

ЦИКЛОТРОН¹⁾

Е. О. Лоуренс и Д. Куксей, Берклей, США

I. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с первых опытов¹, произведенных 6 лет назад в нашей лаборатории, непрерывно велась работа, посвященная развитию методов получения быстрых заряженных частиц. При этом мы имеем в виду создание методов и приборов, которые были бы полезны в применении к исследованиям из области ядерной физики.

Почти с самого начала наиболее многообещающим мы считали метод многократного ускорения (легких ионов), согласно которому ионы движутся в магнитном поле в резонанс с быстро переменным электрическим полем. В соответствии с этим наибольшее внимание в нашей работе было уделено этому методу многократного ускорения. Четыре года назад был подробно описан прибор², позволивший получать протоны с энергией в 1,2 MeV, а три года назад³ — более мощный прибор этого типа, пригодный для получения дейтронов с энергиями в 5 MeV в количестве долей микроампера. С тех пор были осуществлены значительные усовершенствования не только в отношении повышения отдачи до нескольких микроампер при больших энергиях и в смысле большей надежности и удобства прибора, но также и в отношении способов изъятия ионов с их спиральных траекторий.

Предметом настоящей статьи являются описания этих новейших усовершенствований, а также обсуждение некоторых связанных с этим вопросов, так как некоторые из произведенных нами изменений указывают на возможность дальнейших усовершенствований.

II. ПРИБОР

Общий вид прибора, называемого теперь⁴ магнитным резонансным ускорителем, или чаще „циклотроном“, показан на рис. 1. Электромагнит, описанный в статье, опубликованной в 1934 г., не под-

¹⁾ Phys. Rev., 50, 1134, 1936. Перевод Н. Хлебникова.

вергся никаким изменениям. Мы собирались увеличить диаметр полюсных наконечников (равный сейчас 687,5 мм), однако это изменение до сих пор не осуществлено. Все наше внимание было направлено на усовершенствование циклотрона при его современных размерах. Чертеж рис. 2 дает общий вид камеры со снятой крышкой,

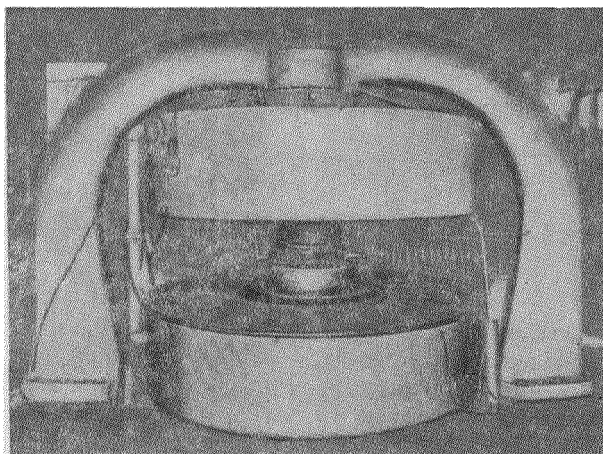


Рис. 1. Общий вид циклотрона.

причем видны: источник ионов, ускоряющие электроды, называемые дуантами, электрод, служащий для отклонения ионов от их спи-

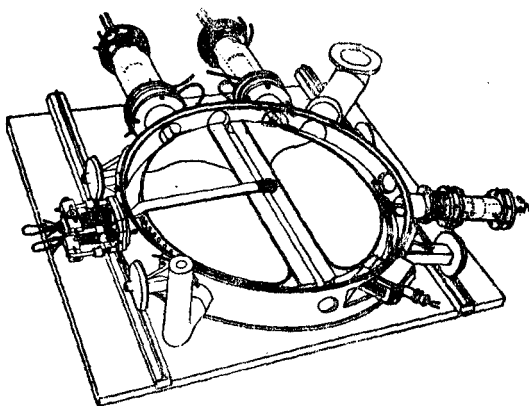


Рис. 2. Перспективный вид камеры циклотрона со снятой крышкой.

ральных путей, могущие вращаться бериллиевый и вольфрамовый электроды и окошко, сквозь которое ионы выпускаются из камеры

наружу. В следующих разделах мы рассмотрим действие всех этих частей прибора.

Источник ионов. Как и в первоначальной конструкции, ионы образуются в центральной части камеры в результате движения пучка электронов, летящих между дуантами по направлению магнитного поля и ионизирующих газ, наполняющий под надлежащим давлением камеру. В первоначальной конструкции спиральные нити, служившие источниками электронов и расположенные в верхней и нижней части центральной области камеры, монтировались на стеклянных трубках, заключенных в медные трубки, укрепленные на стенках камеры и проходившие

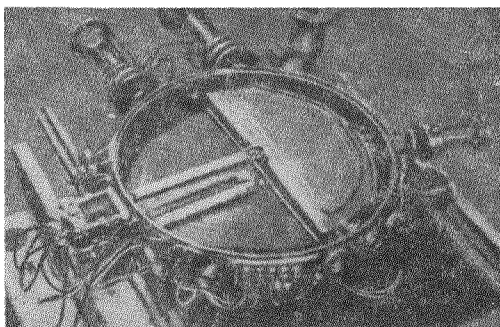


Рис. 3. Вид камеры циклотрона со снятой крышкой и удаленным дуантом (одним). В этом приборе ионы не удаляются полностью, но бомбардируют электроды на стенках камеры.

между дуантами по радиусу к центру. Эти трубчатые экраны имелись только с одной стороны, что приводило к нежелательной асимметрии поля между дуантами. В описываемом приборе этот недостаток был устранен¹⁾ посредством введения нитей в центральную область сквозь один из дуантов, как это видно из рис. 3. На этом рисунке можно видеть два нитедержателя, расположенные один — над и другой — под одним из дуантов (на этом снимке — удаленном). Плоские спиральные нити, состоящие из $5\frac{1}{2}$ витков вольфрамовой проволоки диаметром 0,075 мм, имеющие максимальный диаметр спирали около 12 мм, монтируются путем приваривания к охлаждаемым водой медным блокам. Нитедержатели помещаются внутрь медных защитных чехлов (необходимых вследствие того, что на дуанты подается высокая частота) и всему приспособлению придается по возможности малая толщина, с тем чтобы как можно более увеличить зазоры между частями, связанными с нитями и дуантами. На практике, как показал нам опыт, для того чтобы избежать неприятностей, связан-

¹⁾ В Корнеллевском циклотроне этот дефект был устранен путем симметричного расположения четырех нитей⁵.

ных с пробоем газа, достаточно зазора в 6 мм в вертикальном направлении или 3 мм — в горизонтальном.

Нитедержатели крепятся на специальном сочленении, допускающем перемещение нити в различные точки центральной части камеры. Теоретически, источник ионов должен быть расположен в центре циклотрона, так как ионы начинают свое движение под действием колебательного электрического поля между ускоряющими электродами по траекториям с малыми радиусами кривизны. В действительности, однако, обнаруживается обычно, что наиболее выгодным положением нити является не центральное, но несколько смещенное относительно центра в ту или другую сторону. Это является следствием того, что, вообще говоря, центры последовательных круговых путей ионов перемещаются относительно геометрического центра прибора по причине отсутствия полной центральной симметрии магнитного поля. Это перемещение путей ионов можно более или менее устранить, сделав магнитное поле симметричным, что можно осуществить, например, помещая между полюсными наконечниками магнита и крышками вакуумной камеры куски железа подходящих размеров и формы. Однако обычно много проще оказывается простое перемещение точки, в которой ионы начинают свои спиральные пути.

Вся система нитедержателей при помощи болтов и вакуумной мастики укреплена на пластине, прикрепленной к боковой стенке камеры, и сделана легко разбираемой, что необходимо для замены нитей. Трубки с проточной водой проходят по экрану, защищающему нить, а также охлаждают места, уплотненные мастикой. Электроды, подводющие ток к нити, изолированы от окружающей их электростатической защиты стеклянными трубками и выведены наружу через резиновую пробку, уплотненную также при помощи мастики. Изоляция нити может выдержать напряжение в несколько тысяч вольт; в работе, однако, отрицательный потенциал нити по отношению к экранам и стенкам вакуумной камеры обычно не превышает 1000 V.

Хотя в приборе имеются две нити (одна сверху и одна снизу), одновременно работает только одна. Другая при этом сдвигается в сторону и включается тогда, когда первая перегорает. Электроны из нити, проходя между дуантами, падают на крышку камеры, и, поскольку водяное охлаждение ее не предусмотрено, эта бомбардировка при достаточно большом токе может вызвать накаливание металла и выделение газа. Поэтому в будущем, когда будут пользоваться большими токами, необходимо будет охлаждать водой и эту часть прибора; для токов же, применяемых сейчас (менее 500 μ A при 1000 V), это не являлось необходимым.

Из сравнения величины тока, создаваемого быстрыми ионами в периферической части прибора с количеством ионов, образовавшихся в центре, следует, что фокусирующее действие электрического и магнитного поля таковы, что очень значительная часть возникших ионов достигает улавливающего электрода. Так как влияние пространственного заряда при малых токах и высоких напряжениях, с которыми

мы встречаемся в этом приборе, роли не играют, следует ожидать, что количество быстрых ионов будет пропорционально количеству ионов, образовавшихся в источнике ионов. Поэтому нам представляется важным рассмотреть способы увеличения продуктивности этого источника.

Ионный ток вообще пропорционален электронному, и поэтому для увеличения числа образующихся ионов достаточно увеличить эмиссию нити. К сожалению, большие электронные токи ограничиваются действием пространственного заряда, и для увеличения ионизирующего электронного потока необходимо увеличивать ускоряющее напряжение. В нашем современном приборе увеличение потока электронов за счет повышения ускоряющего напряжения оказывается невыгодным, так как вероятность ионизации (например, образования протонов) падает по мере увеличения энергии электронов, как это было показано Бликнеем⁶. Оптимальное значение энергии для образования протонов или дейтронов лежит вблизи 200 В. Потому желательно создать источник электронов, который давал бы большие токи при низких напряжениях.

Одним из путей достижения этой цели является увеличение размера нити. Это возможно, так как на практике мы убедились в том, что в качестве источника ионов может служить значительных размеров центральная область прибора. При перемещении нити на протяжении до 50 мм выход быстрых ионов по отношению к числу образованных в источнике изменяется не более чем на 50%. Ослабление действия пространственного заряда может быть также достигнуто путем расположения ускоряющего электрода по возможности ближе к нити. Подходящей конструкцией было бы поэтому применение сравнительно толстой (порядка 0,1 мм) прямой вольфрамовой нити нескольких дюймов длины, натянутой параллельно краям дуантов посредине между ними. При такой прямой нити, удерживаемой точно в надлежащем положении, можно было бы расположить в непосредственной близости охлаждаемый водой ускоряющий электрод с узкой прямоугольной щелью, который давал бы гораздо более сильное поле у поверхности нити, чем в современном устройстве.

Поэтому нам кажется, что не составит большого труда добиться 5—10-кратного увеличения производящего ионы электронного тока и соответственного увеличения количества быстрых ионов. В настоящее время максимальная отдача быстрых ионов составляет около 25 μA , а обычная устойчивая работа прибора достигается при 20 μA . При увеличении производительности источника ионов отдача быстрых ионов должна оказаться больше 100 μA .

Ускоряющие электроды. Полукруговые полые ускоряющие электроды или дуанты хорошо видны на рис. 2 и более детально показаны на рис. 3 и 4. Эти электроды изготовлены целиком из меди, причем медные листы приварены к более массивной медной раме, несущей трубки с проточной водой для охлаждения, необходимого по причине высокочастотных зарядных токов и бомбардировки движущимися ионами. Наружный диаметр дуантов равен 606,25 мм. Устройство же выходной щели, как можно видеть из рис. 4, таково,

что диаметр последнего кругового пути ионов оказывается равным 575 мм. Дуанты в центре имеют толщину в 43,75 мм, причем толщина их равномерно уменьшается к периферии до 31,25 мм. Большая толщина в центральной части способствует увеличению числа ионов, без ненужного увеличения емкости системы.

Дуанты укреплены на 25-мм медных стержнях длиной 550 мм, которые в свою очередь поддерживаются трубчатыми изоляторами из стекла пайрекс, которые хорошо видны на рис. 2, 3 и 4. Эти изоляторы представляют собой стандартные фланцевые трубки с толщиной стенок в 6 мм и внутренним диаметром 75 мм, средняя часть которых раздута до внутреннего диаметра в 100 мм (изоляторы, показанные на фотографии рис. 3, не раздуты). Стекло присоединено к металлическим частям при помощи вплавленных проволоочных ободков по способу, предложенному Д. Л. Узбестером и П. А. Россом.

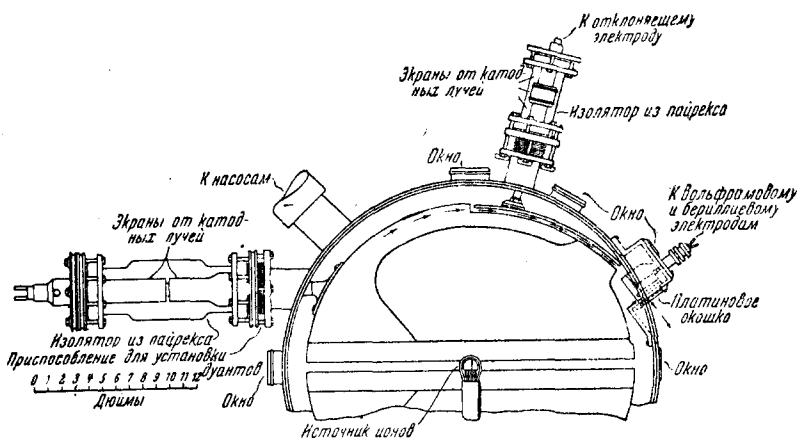


Рис. 4. Детали устройства и монтажа ускоряющих электродов.

С механической точки зрения этот способ крепления дуантов вполне удовлетворителен, однако мы имеем затруднения, связанные с пробоем изолятора под действием катодных лучей и перегревом его в высокочастотном поле. Эти затруднения удалось устранить, предусмотрев защиту от катодных лучей (рис. 4) и применив воздушное охлаждение изолятора. Изображенное на чертеже расположение не только позволяет совершенно устранить опасность со стороны катодных лучей, но и способствует такому распределению высокочастотных полей, при котором нагревание сводится к минимуму. Несмотря на это, нагревание стенок остается все же настолько сильным, что для поддержания допустимой температуры необходимо прибегать к обдуванию изоляторов воздухом. При действии воздушного охлаждения мы не имели случаев пробоя на протяжении нескольких месяцев, и, видимо, изоляторы в этих условиях могут служить неограниченное время.

Так как в дальнейшем тенденция в развитии этих приборов будет, несомненно, заключаться в стремлении к увеличению числа быстрых ионов с все большими и большими энергиями, это будет вести к непрерывному повышению высокочастотного напряжения на дуантах. Вследствие этого неизбежно будет достигнуто такое положение, когда избежать пробоя изоляторов окажется весьма трудным и возникнет необходимость в полном их устранении. Это может быть осуществлено путем крепления дуантов на массивных и жестких катушках, находящихся в вакууме. Подведение высокой частоты к такому контуру может быть осуществлено при сравнительно низком напряжении, и поэтому колебательную мощность можно будет увеличить во много раз без того, чтобы возникли неприятности с изоляторами. Такое устройство, использующее изоляционные свойства вакуума наподобие Слоановского⁷ высоковольтного радиочастотного генератора, будет, несомненно, использовано в нашей лаборатории в будущем.

Вопрос о влиянии толщины дуанта (т. е. о величине просвета между крышками) на отдачу быстрых ионов имеет большой интерес и практическое значение. Тот факт, что быстрые ионы могут получаться в количестве многих микроампер, указывает, что фокусирующее действие искривленного электрического поля между дуантами весьма эффективно. Вместе с тем не представляется возможным точно предсказать влияние геометрии ускоряющих электродов на фокусировку. Без сомнения, можно с уверенностью утверждать, что количество ионов, образованных в центре, будет, по меньшей мере линейной функцией толщины дуантов, но, насколько сильно влияет на выход ионов толщина дуантов на периферии, можно определить лишь путем эксперимента.

Для выяснения этого вопроса мы недавно испробовали дуанты с всюду одинаковой толщиной в 50 мм и установили, что в тех же условиях, в которых с узкими дуантами выход ионов составлял 20 μ A, широкие дуанты дали устойчивую отдачу в 50 μ A. Таким образом выход ионов возрастает с толщиной дуантов несколько быстрее, чем по линейному закону. Поэтому циклотрон, предназначенный для весьма больших выходных токов, должен обладать не только мощным источником ионов, но и очень толстыми дуантами.

Выведение ионов наружу. Приспособление, служащее для выведения ионов наружу, показано на рис. 2 и 4. Ионы, покидающие один из дуантов, отклоняются поперечным электрическим полем и движутся между отклоняющей пластиной и дуантом по приблизительно круговому пути, радиус которого на 30% больше радиуса последней траектории внутри дуанта (радиус которого равен 287,5 мм). Сила, которую испытывает движущийся по окружности ион со стороны магнитного поля, равна центробежной силе, которая в свою очередь равна удвоенной энергии иона, деленной на радиус кривизны. Поэтому сила, с которой магнитное поле действует на ион с энергией в 5 MeV, движущийся по окружности с радиусом в 30 см, соответствует электрическому полю в 330 000 V/cm. Ввиду этого, примененные в современном циклотроне электрические поля имеют

градиенты порядка $100\,000\text{ V/cm}$. Так как диаметр полюсного наконечника равен $687,5\text{ мм}$, ионы, покидающие полость дуанта, оказываются на расстоянии 56 мм от боковой стенки вакуумной камеры. При посредстве отклоняющих электростатических полей указанной величины они подводятся к стенке на протяжении, меньшем четверти окружности от точки выхода из дуанта. Как видно из рис. 2 и 4, охлаждаемый водой электрод, укрепленный на притертой пробке, может быть поставлен на пути пучка ионов. Обычно эта система состоит из двух электродов — вольфрамового и бериллиевого. Первый служит, главным образом, для целей регулировки прибора (измерение интенсивности пучка, при минимальном количестве нейтронов), второй — как источник нейтронов. Наличие вдавненной части стенки камеры вблизи электродов позволяет помещать объекты вблизи и непосредственно перед источником нейтронов. Так как нейтроны приобретают количество движения от бомбардирующих дейтронов, то обычно интенсивность потока нейтронов в прямом направлении больше, так что возможность помещать объекты вблизи или в непосредственной близости к бериллиевому электроду является действительным преимуществом.

Часто бывает желательно подвергать объекты непосредственному действию потока дейтронов, для чего необходимо выпустить поток ионов наружу. Это осуществляется посредством тонкого платинового окошка, состоящего из платиновой фольги толщиной в $0,0025\text{ мм}$, приваренного к латунной решетке, охлаждаемой водой и способной рассеять тепло, выделяемое бомбардирующими и проходящими сквозь окошко потоком дейтронов. Примененная платиновая фольга по своему поглощению эквивалентна слою воздуха в $1,5\text{ см}$ толщины. Отверстия решетки таковы, что позволяют пройти потоку, несколько большему половине падающего. Проникающий в воздух поток дейтронов интенсивностью в несколько микроампер вызывает интенсивное свечение лавандового цвета. На рис. 5 приведена фотография этого свечения, образованного в воздухе пучком дейтронов с энергиями в $5,8\text{ MeV}$, интенсивностью в $5\text{ }\mu\text{A}$; длина свечения равна 25 см . Несмотря на то, что описанное здесь устройство вполне применимо и удобно для целого ряда исследований, в некоторых случаях было бы желательно вывести поток ионов через вакуум на значительное расстояние от ускоряющих электродов, с тем чтобы устранить фон — излучение вызываемое ионами, движущимися между дуантами и бомбардирующими различные части прибора помимо специальных электродов. Это усовершенствование легко осуществить, установив на место платинового окна один (открытый) конец трубки нужной длины, другой конец которой снабжен платиновым окошком. Если не принять меры для фокусировки пучка внутри трубы, он будет расходящимся, частично вследствие неоднородности магнитного поля за пределами вакуумной камеры циклотрона. Эту неоднородность, однако, легко устранить, поместив вокруг трубы надлежащих размеров и формы куски железа. Этим может быть достигнута фокусировка пучка ионов на новом выходном окне. Эти мероприятия еще не были

проведены в нашей лаборатории, но мы намереваемся осуществить их в ближайшем будущем в связи с некоторыми ведущимися у нас исследованиями.

Генераторы. Источником высокой частоты служит самовозбуждающийся генератор (с настройными контурами сетки и анода), имеющий преимущество простоты и минимального количества вспомогательных устройств. Генератор работает на двух лампах нашей конструкции, недавно описанных⁸, включенных по пушпульной схеме. Лампы рассчитаны на 30 kW, но на практике требуется много меньшая мощность. Анодные цепи ламп питаются от трехфазного двуполупериодного выпрямителя, дающего выпрямленный ток напряжением примерно до 10 000 V. Выпрямитель состоит из трех трансформаторов 220/6600 V, соединенных для трехфазного двуполупе-

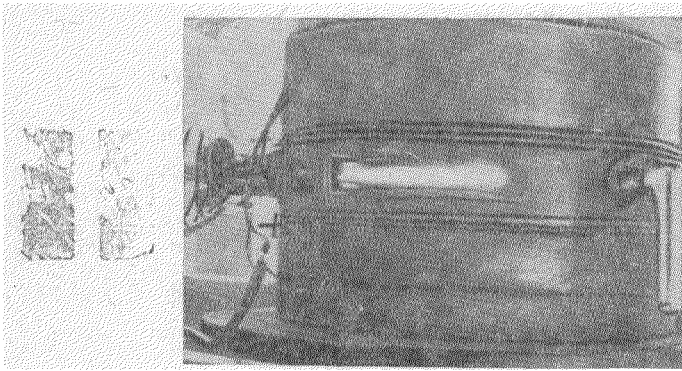


Рис. 5. Фотография 5 μ A-потока дейтронов с энергиями в 5,8 MeV (длина пробега в воздухе равна 25 см), выходящего из платинового окошка циклотрона.

риодного выпрямления и кенотронов марки 872 А. Для того чтобы брать от выпрямителя токи любой необходимой силы, одновременно работают 12 таких кенотронов, соединенных в группы по два с стабилизирующими сопротивлениями на каждую группу. Во время работы циклотрона с отдачей в 20 μ A дейтронов с энергиями в 5,5 MeV, анодное напряжение генератора составляет 8000 V и анодный ток — около 3 А. Из подводимой мощности в 25 kW около 12 kW колебательной мощности сообщаются контуру, ускоряющему ионы.

Несмотря на то, что простота генератора с самовозбуждением рекомендует его для многих практических цепей, такой генератор имеет недостатки в отношении непостоянства частоты и известной нестабильности в работе. Дело в том, что изменение частоты генератора означает изменение выхода быстрых ионов, во многих же случаях желательно поддержание возможно большего постоянства энергии ионов и интенсивности пучка. Мы в настоящее время заняты постройкой нового генератора, состоящего из стабилизиро-

ванного задающего генератора и нескольких ступеней усиления мощности. Это устройство должно подавать на ускоряющие электроды высокочастотное напряжение неизменной частоты и весьма постоянное. При существующем генераторе постоянство интенсивности пучка можно поддерживать с точностью до 10% путем регулировки время от времени магнитного поля. Новый генератор даст возможность получить от циклотрона постоянный и однородный пучок быстрых ионов в течение значительных промежутков времени без наблюдения.

III. РЕГУЛИРОВКА ЦИКЛОТРОНА

Дуанты. Специальное сочленение в системе крепления дуантов делает возможным изменение их положения во время работы прибора. Как и можно было ожидать, наиболее выгодным положением дуантов является такое, при котором они в точности параллельны друг другу и симметричны относительно магнитного поля. Отклонения от этого симметричного расположения, например, в 1 мм обнаруживаются иногда как десятипроцентное понижение отдачи ионов. Это обстоятельство подчеркивает, с одной стороны, важность такой конструкции крепления дуантов, которая не допускала бы смещения их из надлежащего положения, а с другой — желательность приспособления, допускающего настройку прибора. В отношении установки дуантов было обнаружено, что небольшие нарушения параллельности могут быть до известной степени компенсированы изменением их относительного расположения. Система крепления дуантов допускает изменение расстояния между ними, которое при параллельном расположении равно около 18 мм. Изменение расстояния между дуантами не приводит к значительным изменениям отдачи, но в общем с увеличением расстояния выход быстрых ионов уменьшается. Нам неизвестно, происходит ли это уменьшение вследствие изменения числа ионов, образующихся в центре прибора, или же в результате изменения фокусирующего действия полей.

В свете предыдущих замечаний может казаться, что при достаточной жесткости дуантов и поддерживающих их стержней можно обойтись и без подвижных соединений, так как дуанты можно поставить в оптимальное симметричное положение при сборке прибора, и это положение не нарушится во время работы. Трудно, однако, решить, будет ли на практике это упрощение конструкции держателей дуантов более чем компенсировать отсутствие возможности регулировки положения дуантов во время работы.

Магнитное поле. Пренебрегая, ввиду их незначительности, релятивистскими поправками, в простой теории действия циклотрона предполагается, что магнитное поле однородно на протяжении всей ускоряющей ионы системы. В действительности эти идеальные условия не соблюдаются. Причиной этого является, с одной стороны, несовершенство геометрии магнитной цепи и неоднородность образующего ее железа, с другой же то, что насыщение

железных полюсных наконечников приводит к ослаблению поля в направлении от центра к периферии дуантов. Эта последняя неоднородность, как это ни кажется странным, является желательной. Существующее в действительности распределение напряженности магнитного поля от центра к периферии (для существующего в настоящее время циклотрона) показано на рис. 6, из которого видно, что на расстоянии от центра полюсного башмака до его окружности напряженность поля падает на 25%, и что даже на расстоянии от центра до места выхода ионов из ускоряющих электродов (радиус 387,5 мм) поле уменьшается на 7%. На первый взгляд столь значительная радиальная неоднородность магнитного поля сделает невозможным ускорение ионов на периферии. Однако при ближайшем рассмотрении оказывается, что если ускоряющее высокочастотное напряжение при получении ионов с энергией в 5 MeV составляет 100 000 V, то ионы совершают лишь около 25 полных оборотов, и при этих условиях неоднородность поля, составляющая при перемещении к периферии всего 7%, не может существенным образом влиять на синхронизацию между высокочастотным полем и обращающимися по окружности ионами. Применяемое в современном циклотроне высокочастотное напряжение не подвергалось надежному измерению, но по приблизительной оценке лежит между 50 000 и 100 000 V.

Этот радиальный градиент магнитного поля, становящийся весьма значительным вблизи периферии, производит „открытие“ спиральных траекторий ионов. Вместо того чтобы двигаться по окружностям между дуантами, ослабление поля по направлению к краю заставляет те из ионов, центры траекторий которых не в точности совпадают с центрами магнитного поля, описывать спирали с постепенно возрастающими радиусами кривизны. Степень влияния этого фактора на работу существующего в настоящее время циклотрона иллюстрируется простым приближенным вычислением траектории иона, в предположении, что центр спирали, описываемой ионом, в последний момент перед вылетом смещен на 3 мм относительно центра поля и что ускоряющее высокочастотное напряжение равно 50 000 V. Траектория иона, рассчитанная этим упрощенным способом, оказывается выходящей за пределы дуанта на расстоя-

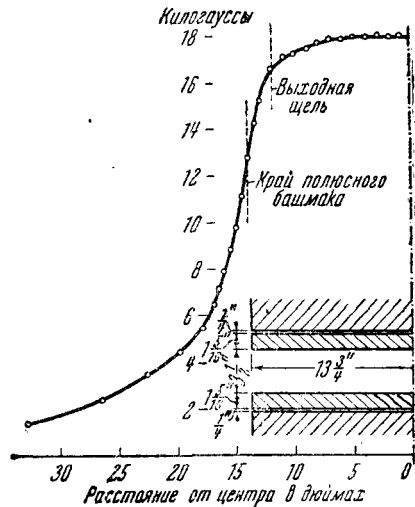


Рис. 6. Радиальное распределение магнитного поля в циклотроне; заштрихованные участки изображают полюсные наконечники электромагнита и железные крышки камеры циклотрона.

ний, большем 12 мм от того места, где выходит предыдущая. Таким образом мы видим, что этот радиальный градиент магнитного поля оказывает очень заметное действие. Это, очевидно, является весьма ценным его свойством, так как облегчает удаление ионов из ускоряющей системы.

То обстоятельство, что небольшое смещение центра спиральной траектории (3 мм) приводит к столь значительным изменениям самой траектории, налагает на магнитное поле весьма жесткие условия в отношении постоянства в азимутальном направлении. Если бы среднее значение напряженности магнитного поля в одном квадранте заметно отличалось от значений в других квадрантах, результатом было бы перемещение центров спиральных траекторий, и, как следствие этого, значительные их искажения, сильно увеличенные действием радиального градиента поля. Поэтому при регулировке магнитного поля циклотрона оказывается необходимым помещать между полюсными наконечниками и крышками камеры куски железа. Для этой цели, как можно видеть из рис. 6, между камерой и полюсными наконечниками предусмотрены 6-мм зазоры. Введение железа осуществляется совершенно наощупь — критерием является устранение азимутальной неоднородности. Вообще можно указать, что увеличение магнитного поля, скажем, в южной части междуполюсного пространства, имеет следствием перемещение центров спиральных траекторий к востоку. Поэтому, если оказывается, что поток ионов, покидающий выходную щель дуанта, имеет энергию, меньшую, чем это должно быть, — это означает, что центры спиральных траекторий переместились в направлении к выходной щели, так что радиусы кривизны последних траекторий оказываются меньше расстояния между центром и выходной щелью. При этом энергия частиц может быть увеличена помещением кусков железа таким образом, чтобы вызвать увеличение поля в определенной области, с тем чтобы центры спиральных путей переместились обратно к центру прибора и радиусы последних путей возросли. Следует еще раз подчеркнуть, что на практике регулировка магнитного поля посредством введения железа является в значительной мере эмпирической операцией. Хотя действие железа и не всегда может быть точно объяснено, этот способ регулировки, по счастью, не является трудно осуществимым, так как поток ионов может быть получен и без введения дополнительного железа. Таким образом однородность, интенсивность и энергия ионного пучка могут быть непрерывно наблюдаемы во все время регулировки магнитного поля.

IV. РАБОТА ЦИКЛОТРОНА

Водородные ионы. Существующий в настоящее время циклотрон дает поток дейтронов в несколько микроампер с энергиями от 5 до 6 MeV без всякой регулировки, непосредственно после того как вакуумная камера помещается между полюсами электромагнита. В начале работы бомбардировка различных частей при-

бора движущимися ионами приводит к выделению газа, так что в течение нескольких первых часов работы выход ионов непрерывно увеличивается по мере того как уменьшается выделение газа. Было установлено, что для удовлетворительной работы прибора необходимо, чтобы давление посторонних газов было ниже 10^{-6} мм Hg. Наивыгоднейшим давлением водорода, при котором получают наибольшие токи, является давление порядка 10^{-4} мм Hg. Путем регулировки прибора (т. е. подбором отклоняющего напряжения, распределения магнитного поля, положения дуантов, отклоняющего электрода и нити, находящейся обычно в центре) ионные токи обычно могут быть доведены до оптимального значения в 20—25 μ A дейтронов с энергией в 5,8 MeV (при применении дуантов с внутренней периферической толщиной в 31,25 мм) и в 50 μ A ионов с энергией в 4,3 MeV (при дуантах толщиной в 50 мм и меньшего диаметра). Мы нашли, что интенсивность получаемого ионного потока не зависит заметным образом от энергии ионов. Так например, с узкими дуантами мы получали одинаковые токи как для энергий, больших 5 MeV, так и меньших этой величины. Наибольшая энергия дейтронов, которую мы получали с современным циклотроном, составляла 6,3 MeV.

Потоки быстрых протонов обычно одинаковы в отношении силы тока с потоками дейтронов, но эти частицы имеют меньшую энергию, так как для сообщения им той же энергии необходима большая частота переменного потенциала.

Гелиевые ионы. Циклотрон, отрегулированный для получения дейтронов, отрегулирован также и для получения двухзарядных ионов гелия. Так как ионы гелия имеют удвоенные заряд и массу по сравнению с дейтронами, они приобретают при каждом прохождении между дуантами двойной запас энергии и попадают на периферию дуанта с энергией, вдвое большей энергии дейтрона в тех же условиях. Поэтому — отвлекаясь от трудностей, связанных с получением двухзарядных ионов гелия в центре прибора — циклотрон столь же пригоден для генерации α -частиц с энергиями в 10 MeV, как и дейтронов в 5 MeV.

В одном случае мы заменили дейтерий в камере циклотрона гелием и получили 0,1 μ A α -частиц с энергиями в 11 MeV (причем при условии улучшения регулировки, несомненно, существовала возможность получить токи, в несколько раз большие). То что полученный поток ионов состоял, действительно, из ионов гелия со столь большой энергией, а не из более медленных дейтронов, было с определенностью установлено несколькими путями. Так например, было найдено, что поток α -частиц имел наибольшую интенсивность при магнитном поле, несколько меньшем необходимого для потока дейтронов, длина пробега его составляла половину длины для потока дейтронов при тех же условиях, а вызываемое им в воздухе свечение было эквивалентно свечению, вызываемому в четыре раза более интенсивным пучком дейтронов. До настоящего момента мы еще не произвели опытов с этими α -лучами, за исклю-

чением наблюдения, что бомбардировка ими бериллия не дает столь большой нейтронной эмиссии, как бомбардировка дейтронами с половинной энергией.

Нейтроны. Среди многих элементов, испускающих нейтроны под действием дейтронной бомбардировки, особенно замечательным является бериллий. Эмиссия нейтронов из бериллиевого электрода, бомбардируемого $7 \mu\text{A}$ 5 MeV дейтронов, иллюстрируется вильсоновскими фотографиями рис. 7. При камере, наполненной водородом, и расстоянии в $1,8 \text{ м}$ от бериллиевого электрода, число протонов оказывается слишком большим для того, чтобы можно

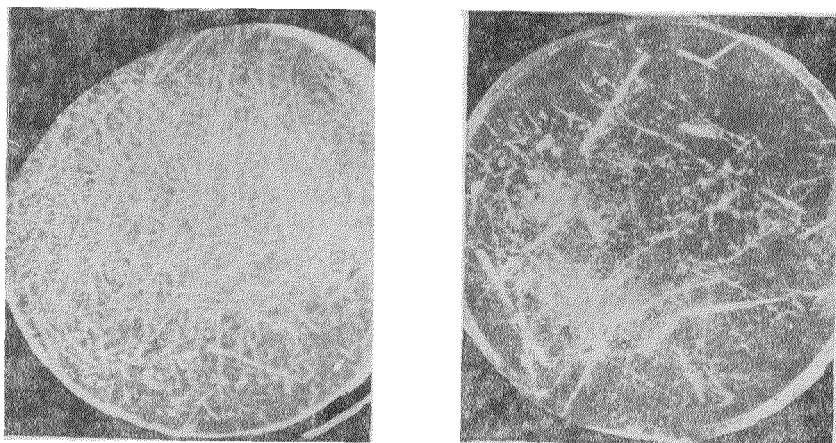


Рис. 7. Фотография протонов отдачи (в камере Вильсона, наполненной водородом при $p = 100 \text{ мм Hg}$), производимых нейтронами из бериллиевого электрода, бомбардируемого $7 \mu\text{A}$ -потоком дейтронов с энергией в $5,5 \text{ MeV}$, *a* — расстояние от камеры до электрода $1,8 \text{ м}$, *b* — расстояние 12 м .

было произвести подсчет. Более подходящими условиями является помещение вильсоновской камеры на расстояние 12 м . Хотя сравнения сильно различающихся количеств нейтронов представляется затруднительным, приближенные определения показывают, что эмиссия нейтронов из бериллиевого электрода циклотрона в 10^5 раз больше, чем даваемая смесью одного кюри радона и бериллия.

Эта высокая интенсивность потока нейтронов облегчает изучение многих проблем ядерной физики, но, с другой стороны, и затрудняет некоторые исследования. Среди практических трудностей, связанных с работой с нейтронами, является биологическое действие нейтронных лучей, которое делает необходимым защиту работающих лиц. Некоторые уже проведенные биологические исследования⁹⁻¹¹ показали, что в отношении биологического действия обычная нейтронная эмиссия бериллиевого электрода современного циклотрона эквивалентна γ -излучению 100 г радия. Соответственно с этим, в настоящее время для предохранения работающего управление

циклотроном ведется с расстояния в 12 м от бериллиевого электрода, и на пути нейтронов помещаются соответствующие поглощающие экраны.

Искусственные радиоактивные элементы. При помощи 5 MeV дейтронов оказалось возможным¹² получить радиоактивные изотопы многих элементов из всех групп периодической системы. Во многих случаях выход радиоактивных элементов оказался весьма значительным. Так например, в результате бомбардировки в течение дня металлического натрия 5 MeV-дейтронами, было получено более 200 мг экв радионатрия¹³, т. е. количество радионатрия, γ -активность которого равна γ -активности 200 мг радия. Получение таких больших количеств радиоактивных изотопов в лабораторных условиях имеет большее значение, так как открывает новые возможности для физических и биологических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. O. Lawrence a. N. E. Edlerson, Science, **72**, 376, 1930.
 2. E. O. Lawrence a. M. L. Livingston, Phys. Rev., **40**, 19, 1932.
 3. E. O. Lawrence a. M. S. Livingston, Phys. Rev., **45**, 608, 1934.
 4. E. O. Lawrence, E. McMillan a. R. L. Thornton, Phys. Rev., **48**, 495, 1935.
 5. M. S. Livingston, Rev. Sci. Inst., **7**, 55, 1936.
 6. W. Bleakney, Phys. Rev., **35**, 1180, 1930.
 7. D. H. Sloan, Phys. Rev., **47**, 62, 1934.
 8. D. H. Sloan, R. L. Thornton a. F. A. Jenkins, Rev. Sci. Inst., **3**, 675, 1935.
 9. J. H. Lawrence a. E. O. Lawrence, Proc. Nat. Acad., **22**, (2), 124, 1936.
 10. R. E. Zirkle a. P. A. Aebersold, Nat. Acad. Sci., **22** (2), 1934, 1936.
 11. J. H. Lawrence, P. A. Aebersold a. E. O. Lawrence, Proc. Nat. Acad., **22**, 543, 1936.
 12. J. M. Cork a. E. O. Lawrence, Phys. Rev., **49**, 788, 1936; J. J. Livingston, Phys. Rev., **50**, 425, 1936.
 13. E. O. Lawrence, Phys. Rev., **47**, 17, 1935.
-