

ИСКУССТВЕННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Э. В. Шпольский, Москва

§ 1. В заметке на ту же тему, напечатанной в вып. 2-3 этого журнала за текущий год *, уже были сообщены результаты, полученные в Кэвендишевской лаборатории при бомбардировке некоторых легких элементов потоком быстрых протонов. В настоящее время мы имеем возможность ознакомиться с деталями экспериментальной постановки этой замечательной работы и с ее дальнейшими результатами **.

Мы начнем с подробного описания схемы установки высокого напряжения, которая представляет и самостоятельный большой интерес. В статье Л. В. Мысовского *** указаны причины, вследствие которых ударный генератор и трансформатор Тесла, хотя и позволяют получать весьма высокие напряжения, не могут считаться удобными источниками потенциала для данной цели. В этом отношении огромное преимущество на стороне исключительного по остроумию и изяществу метода Лауренса и Лигстона. При помощи этого метода до сих пор удавалось получать токи порядка 10^{-9} А. Хотя уже при этих малых токах количество быстрых частиц значительно превосходит то, что могут дать наиболее сильные радиоактивные препараты, естественно попытаться получить более мощный поток положительных ионов при достаточно постоянном ускоряющем потенциале. С этой целью можно воспользоваться комбинацией из конденсаторов и

* Успехи Физич. наук, 12, 357, 1932.

** J. Cockcroft and E. Walton, Proc. Roy. Soc. A 136, 610, 1932; 137 229, 1932.

*** См. стр. 580 и след. в этом выпуске „Успехов“.

выпрямителей, позволяющей увеличивать в несколько раз основное напряжение. Таким именно путем пошли работники Кэвендишевской лаборатории — Кокрофт и Уолтон. Уже ранее различными авторами (Грейнахер, Шенкель) указывались схемы, при помощи которых можно, имея n конденсаторов и n кенотронов, повысить в n раз основное напряжение. Кокрофт и Уолтон разработали несколько оригинальных схем, обладающих значительным преимуществом перед прежними схемами.

Рассмотрим сначала самую простую схему, иллюстрирующую принцип установки. Пусть имеется источник по-

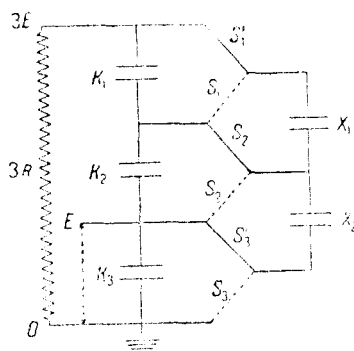


Рис. 1.

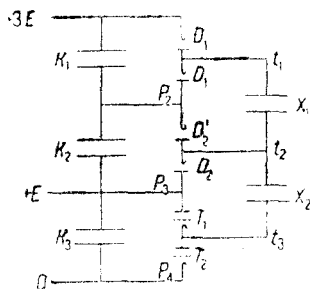


Рис. 2.

стоянного потенциала E и система из трех основных конденсаторов K_1 , K_2 , K_3 , соединенных последовательно, как показано на чертеже. Возьмем еще систему двух вспомогательных конденсаторов X_1 , X_2 , соединяемых с конденсаторами K_1 , K_2 , K_3 при помощи какого-либо непрерывно действующего (например вращающегося) коммутатора. Пусть в первую половину цикла переключатель расположен так, что соединение системы K_1 , K_2 , K_3 с системой X_1 , X_2 осуществляется по пунктирным линиям S_1 , S_2 , S_3 . Это значит, что в первую половину цикла конденсаторы K_2 и K_3 будут соединены с конденсаторами X_2 , X_1 , и конденсатор X_2 будет заряжен при этом до потенциала E . Во вторую половину цикла переключатель займет положение S'_1 , S'_2 , S'_3 , и конденсаторы X_2 , X_1 будут соединены с конденсаторами K_3 , K_1 .

В результате конденсатор X_2 зарядит конденсатор K_2 до потенциала $\frac{E}{2}$, если оба они имеют одинаковую емкость.

При следующем цикле, когда X_1 будет соединено с K_2 , последний разделит свой заряд с X_1 , а этот в свою очередь при следующей фазе зарядит конденсатор K_1 . Равновесие наступит тогда, когда все конденсаторы будут заряжены до потенциала E , а следовательно, на концах системы K_1 , K_2 , K_3 будет разность потенциалов $3E$. Ясно, что система может быть увеличена прибавлением конденсаторов, а вместе с тем может быть и повышен — теоретически сколько угодно — основной потенциал.

Описанная схема связана с применением механических коммутаторов. Для того чтобы избежать последних, можно указать ряд других схем, сходных с описанной, но оперирующих с катодными лампами — диодами и триодами. В одной из этих схем два переключателя, например S_1 и S_2 , заменяются диодами D_1 , D'_1 и D_2 , D'_2 , а третий — двумя триодами T_1 и T_2 , у которых потенциалы сеток изменяются циклически и противоположно по фазе, так что когда проводит один, другой — заперт. Пусть теперь в первую половину периода проводит триод T_2 . Тогда конденсатор X_2 будет заряжаться через диод D_2 и триод T_2 . В следующую половину цикла, когда проводить будет T_1 , потенциал зажимает, возрастет от нуля до E , а потенциал t_2 — до $2E$. В это время конденсатор X_2 заряжает конденсатор K_2 через диод D'_2 и триод T_1 (так как в p_3 сюда присоединяется потенциал E , то вся цепь $X_2 - K_2$ будет под этим потенциалом). Далее, при последующих циклах, когда проводит триод T_2 , конденсатор K_2 заряжает конденсатор X_1 через диод D_1 и триод T_2 . Наконец, когда проводит триод T_1 , конденсатор X_1 заряжает конденсатор K_1 . Как видим, эта схема совершенно аналогична предыдущей.

Однако осуществление этой схемы встречает известную трудность, состоящую в конструировании триода, выдерживающего напряжение 200—400 kV, что необходимо для получения потенциалов порядка 800 kV. Оказывается, впрочем, что в тех случаях, когда требуется относительно ма-

лая мощность, можно ограничиться более простыми средствами. Действительно, из рассмотрения предшествующей схемы вытекает, что назначение триодов состоит в том, что сообщать зажиму t_3 поочередно потенциалы p_3 и p_1 . Можно совсем избежать применения триодов, заменив их двумя диодами, если взять еще один вспомогательный конденсатор X_3 и соединить его через диод D'_3 последовательно со вторичной обмоткой трансформатора, дающего потенциал $\frac{E}{2}$.

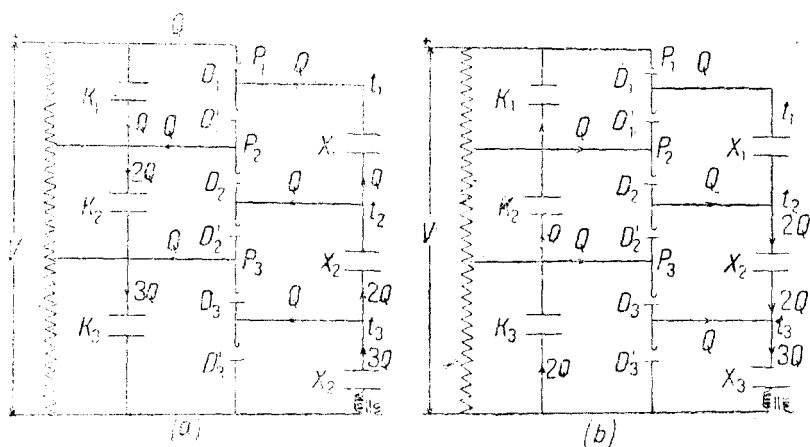


Рис. 3.

Из схемы видно, что когда зажим трансформатора, соединенный с X_3 , становится отрицательным полюсом, конденсатор X_3 заряжается до потенциала $\frac{E}{2}$. Далее, ясно, что так как X_3 и вторичная обмотка трансформатора соединены последовательно, то потенциал t_3 колеблется между нулем и E . Когда потенциал t_3 приближается к E , конденсатор K_3 заряжается через диод D_3 . Когда же потенциал t_3 начинает падать, потенциал t_2 становится меньше потенциала p_3 , и конденсатор K_2 начинает заряжать конденсатор X_2 через диод D'_2 . Словом, все идет так, как в предыдущей схеме и равновесие устанавливается тогда, когда конденсаторы K_1 , K_2 , K_3 , X_1 , X_2 оказываются заряженными приблизительно до потенциала E .

Можно подсчитать, какова степень постоянства потенциала в подобной системе. Если конденсаторы $K_1, \dots, K_n$ нагружены сопротивлением $3R$ и если τ продолжительность всего цикла, C — емкость отдельного конденсатора и n — число конденсаторов, то несложное вычисление показывает, что:

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{n+1}{2} \cdot \frac{\tau}{CR}.$$

Если, например, $n = 2$, $C = 0,001 \text{ pF}$, $R = 10^9 \tau = 10^{-2} \text{ сек.}$, то

$$\frac{\delta V}{V} = 1,5\%.$$

Из всех трех описанных схем последняя является наиболее простой. Так как, кроме того, при этой схеме каждый выпрямитель и каждый конденсатор должен выдерживать максимально двойное напряжение трансформатора, то задача построения подходящих конденсаторов и выпрямителей, при любом числе ступеней повышения потенциала, тем самым упрощается. Это выгодно отличает описанную схему от ранее предложенной аналогичной схемы Шенкеля*, при которой некоторые звенья должны выдерживать полное напряжение всей системы. Так как авторам из предшествующего опыта было известно, что можно сконструировать выпрямители, выдерживающие до 400 kV, то они решили воспользоваться схемой, состоящей из двух ступеней, т. е. требующей 4 конденсатора и 4 выпрямителя и дающей четырехкратное повышение потенциала трансформатора.

Конструкция выпрямителей, примененных авторами, очень проста и остроумна. Четыре стеклянных цилиндра диаметром 35 см и высотой около 1 м (3 фута) каждый были поставлены друг на друга в виде башни высотой 4 м. Между отдельными цилиндрами были проложены листы жести A , при помощи которых укреплялись электроды B . Последние представляли собой тонкостенные стальные трубки, заканчивавшиеся толстыми кольцами C для пре-

* Schenkel, E. T. Z., 40, 333, 1919.

дупреждения аутоэлектронного разряда. Верх и низ башни были закрыты телстыми металлическими пластинками и все места соединений сделаны непроницаемыми для воздуха при помощи особой пластической массы „пластицина“ („plasticene“). Качества этой массы, к сожалению, у нас со-

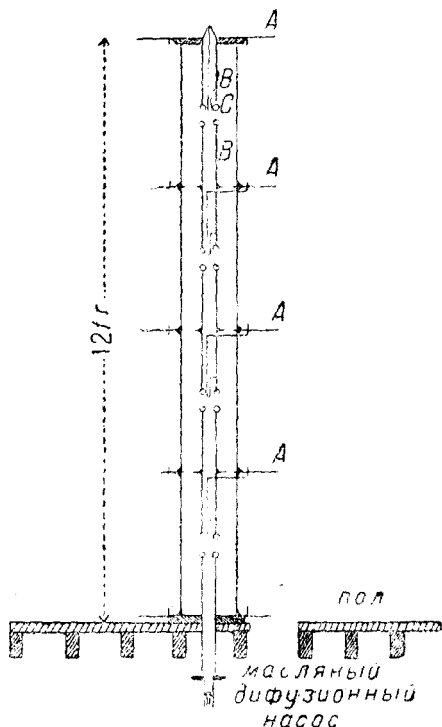


Рис. 4.

вершенно неизвестной *, судя по описанию авторов, поразительны. Достаточно сказать, что столь примитивно построенный выпрямитель, при огромном количестве „ненадежных“ мест (цилиндры просто ставились на железные листы без какой бы то ни было припайки), отлично выдерживал высокий вакуум. Вместе с тем, простота конструкции создавала большие удобства: в любой момент прибор мог быть разобран и собран вновь.

Нить накала имела V-образную форму и слегка выступала за пределы металлической трубки-катода. Для накала один конец нити присоединялся к жестяному листу, а другой — пропущен наружу через отвер-

* Она изготовляется фирмой „Metropolitan Vickers Electrical Co.“

зионным масляным* насосом, помещавшимся для экономии места, под полом (рис. 4).

Экспериментальная трубка была построена по тому же принципу, что и выпрямитель. Здесь было взято два стеклянных цилиндра указанного ранее размера и проложено стальной пластинкой *A* (рис. 6). Применение жестяных листов в данном случае оказалось нецелесообразным, так

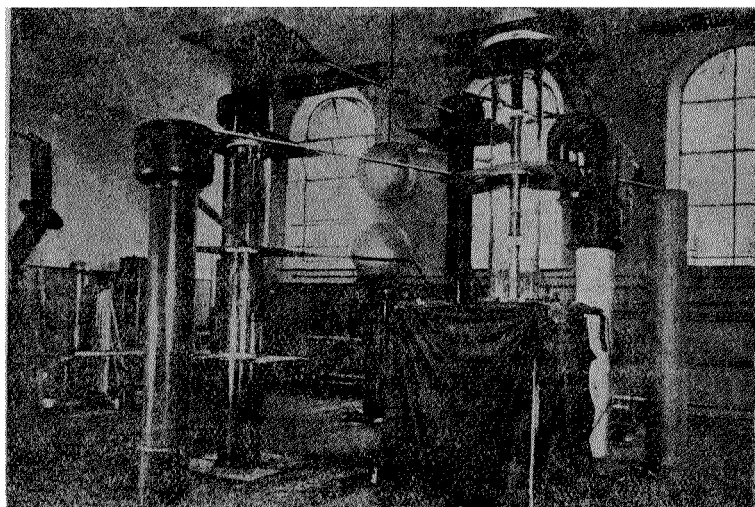


Рис. 5.

как здесь электрод *B*, поддерживаемый пластинкой, должен быть центрирован весьма аккуратно, чего нельзя сделать при помощи тонкой жести.

Назначение электродов *B* — фокусировать пучок протонов, несущихся в трубке. Протоны получались путем разряда в трубке, питавшейся особым трансформатором на 60 kV, и проходили под влиянием электрического поля в экспериментальную трубку через щель, подобно ионам в масс-спектрографе Астона. Агрегат из трансформатора для питания добавочной трубки и альтернатора, посылающего ток в первичную обмотку трансформатора, располагался на изо-

* См. об этом новом типе насосов ст. Дешмана „Успехи физич. наук,“ 11, 669, 1931.

лирующей колонне, видной на фотографии всей установки сзади экспериментальной трубки (рис. 5). Откачка трубки, как и выпрямителя, производилась быстро действующим диффузионным масляным насосом.

С такой трубкой авторы могли достичь приблизительно до потенциалов около 700 кВ при токе порядка 10 микроампер. Авторы имеют в виду увеличить длину цилиндров экспериментальной трубки и пойти в увеличении потенциала до 800 кВ. Можно рассчитывать, что, взяв большее

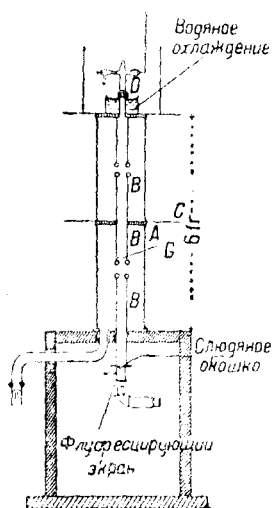


Рис. 6.

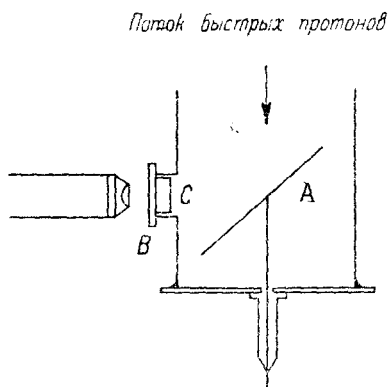


Рис. 7.

число конденсаторов и выпрямителей, можно будет без особого труда достичь до ускоряющих потенциалов в миллион вольт.

§ 2. Для того чтобы иметь возможность экспериментировать с полученными при помощи описанной трубки быстрыми протонами, последние выпускались в особый аппарат, изображенный на рис. 7. Здесь А — пластина исследуемого вещества, расположенная под углом 45° к направлению пучка протонов; отверстие в В могло закрываться или тонкой слюдой или ZnS экраном. В первых опытах с литием в А помещался литиевый кружок, в В располагался экран ZnS, обращенный чувствительной стороной внутрь, а в С приклеивалась слюдяная пластинка с поглощающей способностью в 1,4 см воздуха. Эта толщина слюды с из-

бытком хватала для поглощения всех протонов, отраженных от экрана *A*, так как предварительные опыты показывали, что протоны, получившие ускорения в 600 kV, имели максимальный пробег порядка 10 мм воздуха. Как видно из чертежа, ток к пластинке *A* мог измеряться при помощи электрода, впаянного в трубку; в опытах Кокрофта и Уолтона токи достигали 5 микроампер.

Уже первые опыты с литием показали, что при 125 kV и при токе около 1 μ A на экране начинали появляться яркие сцинтилляции. При указанных условиях их наблюдалось около 5 в минуту, а при 600 kV и токе в 0,3 μ A число частиц, выбрасываемых литием, достигало 700 в минуту (подсчет в последнем случае производился не путем наблюдения сцинтилляций, но по фотографической записи отклонений осциллографа, см. ниже). Никаких сцинтилляций не наблюдалось, когда выключался ток в разрядной трубке с водородом или когда экран защищался от потока протонов латуной пластинкой.

Для того чтобы определить природу получающихся частиц, было произведено несколько серий дополнительных опытов. А именно, так как сцинтилляции по своему характеру и яркости очень напоминали сцинтилляции α -частиц, то прежде всего были поставлены опыты с определением пробега получающихся частиц. Для этого отверстие в *B* закрывалось листочком слюды с поглощающей способностью в 2 см воздуха, экран располагался вне трубки, а между трубкой и экраном можно было помещать любое число слюдяных листочков. Таким путем можно было обнаружить, что сцинтилляции вызываются частицами, имеющими определенно выраженный пробег, равный около 8 см воздуха, причем пробег этот почти не изменялся при увеличении потенциала от 250 до 500 kV.

Для того чтобы получить возможность более определенно решить вопрос о природе частиц, была проделана серия опытов, при которых частицы, выпущенные через слюдяное окошко, попадали в вильсоновскую камеру. Оказалось, что, как только на трубку налагался потенциал, в камере появлялись известные туманные полосы, совер-

шенно того же типа, как при прохождении α -частиц. Определение пробега путем измерения длины этих полосок дадо

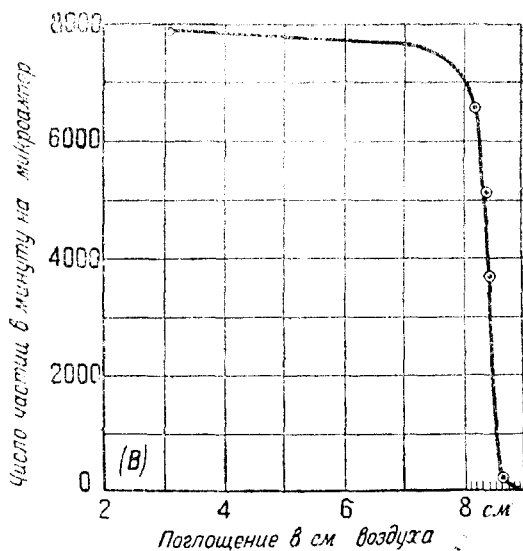


Рис. 8.

те же результаты, что и ранее описанные опыты.

Наконец, точные опыты были произведены при помощи ионизационной камеры, соединенной через усилитель с осциллографом. Таким путем при помещении перед ионизационной камерой слюдяных листочков были получены кривые рис. 8, показывающие также, что частицы имеют резко выраженный пробег.

Точная величина пробега, измеренная таким образом, равна 8,4 см воздуха. Далее можно было очень просто промерить кривую ионизации отдельной частицы. Так как система из камеры, усилителя и осциллографа рассчитана так, что отклонения осциллографа строго пропорциональны ионизационному току, то по величине отклонений, записанных на фотографической ленте, можно было судить об ионизирующей способности частиц после прохождения определенного слоя воздуха. Таким путем была получена ионизационная кривая, изображенная на рис. 9. Эта кривая, как

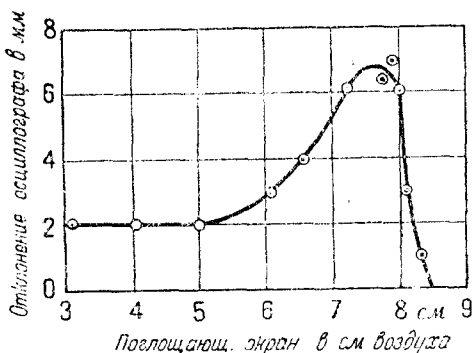


Рис. 9.

видно, совершенно совпадает с известной кривой Брэга для ионизирующей способности α -частиц.

Совокупность всех перечисленных результатов приводит к однозначному выводу: частицы, получающиеся при разрушении ядра лития потоком протонов, суть α -частицы, т. е. ядра гелия. Таким образом получается следующая картина процесса: быстрые протоны захватываются ядром изотопа лития Li^7 (который присутствует в большом избытке над изотопом Li^6), и получающееся ядро с массой 8 разваливается на две α -частицы. Если при этом процессе соблюдается закон сохранения количества движения, то получающиеся α -частицы должны обладать одинаковым запасом энергии, и по наблюдаемым пробегам частиц мы можем заключить, что процесс преобразования совершается с выделением энергии в количестве $17,2 \times 10^6$ V. Что это действительно возможно, показывают прежде всего подсчеты дефекта массы. По точным измерениям Коста масса Li^7 равна $7,0104 \pm 0,003$; уменьшение массы при преобразовании ядра будет $7,0104 + 1,0072 - 8,0022 = 0,0154 \pm 0,003$. Это уменьшение массы эквивалентно выделению энергии в $(14,3 \pm 2,7) \times 10^6$ V, — число близкое к найденному непосредственно из пробега получающихся α -частиц.

Наконец, последнее весьма изящное экспериментальное доказательство правильности сделанной гипотезы основано на одновременном счете сцинтилляций на двух экранах. Если при распаде ядра соблюдается закон сохранения количества движения, то получающиеся частицы должны разлетаться в прямо противоположных направлениях. Таким образом, помещая очень тонкий и малый по размерам листок лития между двумя экранами под углом 45° к пучку протонов, мы можем ожидать, что значительное количество сцинтилляций на том и другом экране будет совпадать во времени. Соответствующие опыты показали, что такие совпадения наблюдаются и на самом деле и притом в количестве, отвечающем геометрии расположения и «функции возбуждения» флуоресцирующего экрана.

Помимо лития опыты были произведены с целым рядом элементов: Be, B, C, O, F, Na, Al, K, Ca, Fe, Co, Ni, Cu, Ag;

Pb, U. Во всех случаях при наблюдении с флуоресцирующим экраном можно было обнаружить некоторое количество ярких сцинтилляций. Относительные порядки величин эффекта при 300 kV для разных элементов графически представлены на рис. 10. С некоторыми из этих элементов были произведены более тщательные опыты. Почти во всех случаях отклонения осциллографа имели такую величину,

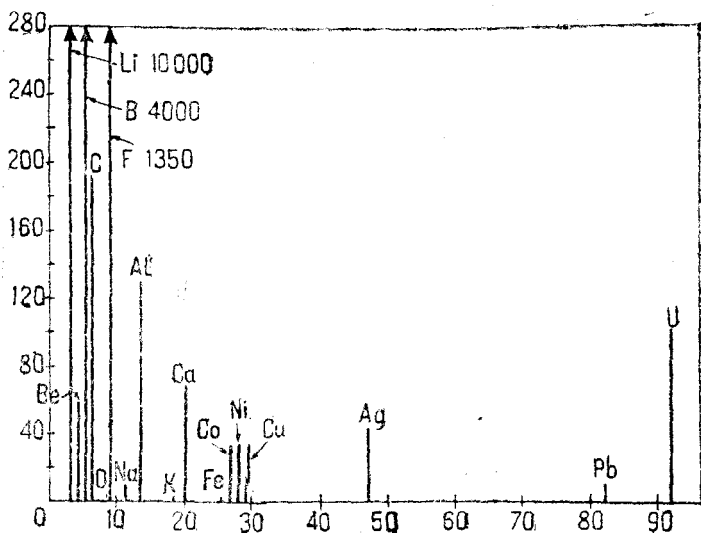


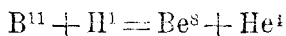
Рис. 10.

Атомный номер

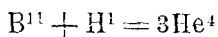
что с большой степенью вероятности можно было заключить, что продуктами преобразования являются α -частицы.

У бериллия наблюдалось два типа сцинтилляций: небольшое количество ярких сцинтилляций, очень похожих на сцинтилляции α -частиц, и, кроме того, при 500 kV появляется значительно большее количество слабых сцинтилляций, число которых быстро возрастает с увеличением потенциала. Природа частиц, вызывающих эти сцинтилляции, еще не ясна, несомненно только, что они обладают очень малым пробегом. Элемент бор дает наибольшее после бериллия количество сцинтилляций. Уже при 115 kV наблюдаются первые немногочисленные вспышки экрана; число их достигает 100 в минуту при 375 kV. Сейчас еще

нет достаточных данных для того, чтобы решить, по какому из двух возможных путей:



или



идет на самом деле превращение. Интересно отметить, что из четырех элементов, расположенных по соседству в периодической системе — Fe, Ni, Co, Cu — железо почти не дает никакого эффекта, тогда как остальные элементы дают довольно значительный эффект.

Наконец, быть может, наиболее поразительные результаты были получены с ураном. В этом случае оказалось, что при бомбардировке сильными токами протонов при потенциале в 600 kV число сцинтилляций урана возрастает вчетверо по сравнению с числом естественных сцинтилляций, причем искусственно вызванные частицы обладают большим пробегом, нежели естественные. Еще нет полной уверенности в том, что эти добавочные сцинтилляции принадлежат самому урану, а не каким-либо загрязнениям. Если, однако, факт столь значительного усиления радиоактивности подтвердится, то это будет замечательным открытием. Нельзя не указать здесь на то, что понимание механизма искусственного преобразования в случае урана очень затруднительно. Несомненно, что при 600 kV протон не может достаточно близко подойти к ядру урана, чтобы быть им захваченным. Единственный путь для объяснения подобного захвата состоит в допущении резонансного процесса. Существование резонансного расщепления атомного ядра при бомбардировке его α -частицами определенно доказано опытами Позе и Чадвика с сотрудниками. Не исключена возможность, что и здесь мы имеем дело с подобного рода резонансным эффектом.

В качестве общего вывода из полученных до сих пор результатов можно отметить, что наиболее значительный эффект дают элементы литий, бор и фтор, т. е. элементы, имеющие атомные веса типа $4n + 3$. Естественно предположить, что захватываемый протон вместе с тремя имею-

щимися в ядре образует новую α -частицу и вся система оказывается неустойчивой.

Несомненно, что результаты, полученные Коккрофтом и Уолтоном вместе с рядом других замечательных открытий, сделанных в текущем году в физике атомного ядра (см. предшествующие статьи этого выпуска „Успехов“), дадут мощный толчок развитию теории атомного ядра. Первые интересные попытки в этом направлении уже сделаны *, и мы имеем основания ожидать, что именно в этой области в ближайшее время будут получены результаты, весьма существенные не только для теории атомного ядра, но и для всей квантовой физики вообще **.

* W. Heisenberg, Z. Physik, **77**, 1 (1932).

** За время, протекшее после написания этой статьи, опыты с искусственным разложением лития были повторены в двух местах: у нас, в СССР, Синельниковым, Вальтером и Латышевым в Украинском физико-техническом институте (Харьков) и в Америке в Калифорнийском университете Лауренсом, Ливингстоном и Уайтом (Phys. Rev., October. 1, 42, 150, 1932). В том и другом случае были получены положительные результаты, подтверждающие опыты Коккрофта и Уолтона. При этом в Харькове экспериментальная установка повидимому была аналогична установке Коккрофта и Уолтона и наблюдения производились путем счета сцинтилляций, тогда как американские исследователи, воспользовавшись методом получения быстрых протонов, разработанным Лауренсом и Ливингстоном (см. статью Мысовского стр. 601, а для счета получающихся частиц применяли счетчик Гейгера (с острием). Интересно отметить, что численные значения вероятности освобождения α -частицы из ядра лития при ударе быстрых протонов, найденные из опытных данных Лауренса, совпадают с теоретически предсказанными на основании теории Гамова.