

самоуверенно высмеивали эту модель, поскольку она явно противоречила динамическим принципам, однако со временем (о, превратности судьбы!) она отомстила за себя. Дело в том, что планетарный атом является грубым нарушением всех концепций химии и других им подобных, имеющих отношение к характеристикам строения вещества, в первоначальной точке зрения на которые, т. е. на архитектуру, конфигурацию и структуру составляющих вещество молекул, химии утвердились лишь в результате развития этих областей новым рентгеноспектроскопическим методом исследования. Вот именно те качества, которые больше всего интересуют исследователей, изучающих вещество, а вовсе не спектры, которые отражают скорее второстепенные электрические свойства, чем механические.

Периодический закон как следствие атомизации электричества и действия

С точки зрения квантовой теории периодический закон можно рассматривать как простое следствие совместной атомизации электричества и действия, хотя не существует, кажется, двух одинаковых мнений ни относительно того, как это происходит, ни относительно того, какой стоит за этим физический смысл, если есть вообще какой-нибудь смысл. Расчеты и обосновывающие их доводы варьируют от первого незрелого планетарного атома Бора через запутывающую псевдофизическую идентификацию частиц с волнами, или стационарными волновыми пакетами волновой механики, до чисто метафизического выведения всей квантовой теории, включая периодический закон, из принципа неопределенности Гейзенберга, основанного, так сказать, на сомнительном убеждении в том, что невозможность точного физического измерения связана скорее с изъяном природы, чем с неумением человека. Такой взгляд, подобно эйнштейновскому принципу эквивалентности массы и энергии, может быть или не быть правильным, но до тех пор, пока его не докажет эксперимент, он будет скорее опасной ересью, чем движением вперед, поскольку он полностью отрицает привычное соотношение между объективным и субъективным, т. е. между физикой и метафизикой, которое при зарождении науки помогло ускользнуть ей от демагогов.

Факты, которые следует объяснить, достаточно просты, если сжато представить их формулой Ридберга, а именно количество элементов в последовательных периодах равно соответственно 2, 8, 8, 18, 18, 32, что является рядом удвоенных квадратов натуральных чисел, для единицы взятых один раз, а для остальных чисел — дважды. Есть две отправные точки, которые принимаются всеми: это, во-первых, эмпирическое правило исключения, сформулированное в 1925 г. Паули и гласящее, что два электрона в невозбужденном нормальном атоме не могут находиться в одном и

том же квантовом состоянии и, во-вторых, представление о том, что электроны обязаны пребывать в состоянии вращения, делающем их магнитами; при этом электронам, вращающимся в противоположных направлениях, произвольно приписываются разные квантовые состояния. Это-то и удваивает то количество элементов, которым оно должно было быть, если бы не электронный спин. Что касается второго удвоения в формуле Ридберга, то автор объясняет его чисто эмпирическим и уже упоминавшимся принципом симметрии, вынуждающим средние кольца, или оболочки, иметь наибольшее число электронов, а оболочки по обе стороны от последних — равные количества.

В отношении спина электронов экспериментальные результаты подтвердили предположение. Больше того, были открыты две разновидности водорода $H-H$, названные *орто* и *пара*, которые значительно различаются по теплоемкости, но способны к взаимному превращению. У первой разновидности спины двух электронов в молекуле можно представить направленными в одну сторону, а у второй — в противоположные. Другим примером является электронная пара, в которой предполагается, что спины двух электронов противоположно направлены, создавая таким образом магнитное притяжение, превышающее электростатическое отталкивание; в результате образуется пара и одинарная связь неполярных химических соединений. Но это, в свою очередь, явно не согласуется с существованием двух разновидностей водорода, в которых одинарная связь представлена электронами как с одинаково, так и с противоположно направленными спинами. Однако делать выводы на основании водорода, ограничиваясь только этой областью, рискованно, что с очевидностью следует из свойств тяжелого водорода.

Кроме спина, который иногда называют *четвертым квантовым числом*, возможны еще три типа различий, характеризуемых своими квантовыми числами. Согласно теории Бора, главное квантовое число в случае атома водорода имеет тот же смысл, что и количество квантов действия на круговой орбите. Так, для *K*-оболочки оно равно единице, для *L*-оболочки — двум и т. д. Второе квантовое число имеет отношение к эллиптичности возможных орбит, а третье — к трехмерной дифференциации, которая, вероятно, связана с ориентацией плоскости орбиты в пространстве. Вообще говоря, считают, что три квантовых числа связаны с тремя пространственными измерениями, в каждом из которых действие квантуется отдельно. С учетом всех четырех квантовых чисел квантовую теорию оказалось возможным приспособить для объяснения периодической системы, чтобы электроны один за другим входили в атомную структуру при соответствующем увеличении (каждый раз на единицу) центрального ядерного заряда.

Но с развитием современных представлений, приписывающих частицам характер волны и вытекающих непосредственно из того

факта, что свет излучается в виде дискретных фотонов определенной энергии, которые столь неожиданным образом были открыты теорией Бора, электроны рассматриваются теперь волновой механикой не как частицы, вращающиеся по своим орбитам, а как круговые стоячие волновые пакеты, размеры которых определяются интерференцией двух их краев. Таким образом, все промежуточные размеры, отличные от тех, в которых два края волнового пакета усиливают друг друга, а не интерферируют, отвергаются.

Итак, волновая механика сразу зачеркивает возражения против статической модели химиков как якобы динамически невозможной, никоим образом не изменяя полученных вначале линейных соотношений электронных систем.

Принцип неопределенностей

Согласно *принципу неопределенностей Гейзенберга*, квант — это, как всегда, произведение двух факторов, например импульса и длины, или кинетической энергии и времени; но, постулируя, что в математическую формулировку квантовой теории должны входить измеренные или могущие быть непосредственно измеренными величины, Гейзенберг и другие развили мощный практический метод, широко известный как волновая механика, которая позволяет решать многие из проблем, встающих перед теорией. Но здесь нас больше занимает предложенная Гейзенбергом в 1927 г. интерпретация двух факторов, входящих в квант, как сопряженных неопределенностей физического измерения в том смысле, что, чем точнее определяется один из них, тем большая погрешность вносится в другой, так что произведение двух погрешностей или неопределенностей равно планковской константе действия h .

В тех пределах, до которых простираются накопленные знания, это, казалось бы, повсеместно подтверждается в мире атомов и электронов. Наилучшую иллюстрацию к принципу неопределенности дает, вероятно, микроскопия. Всякий микроскопист-практик знает, что единственным способом повысить разрешающую способность объектива микроскопа (т. е. уменьшить расстояние между двумя микроскопическими объектами, при котором еще можно видеть их как два, а не как один объект) является использование для подсветки света с более высокой частотой и меньшей длиной волны. Но в результате отражения света освещаемой частицей последняя испытывает отдачу и меняет свое положение; действительно, свет, как экспериментально установил в начале века П. Н. Лебедев, оказывает давление. Эта отдача тем больше, чем выше частота света, так что попытки улучшить разрешающую способность при помощи более высокочастотной подсветки приводят к большей, чем прежде, неопределенности в положении освещаемой частицы, препятствуя, таким образом, достижению поставленной цели. На этом пути должен существовать, если он уже не дос-

тигнут, некий предел видимости, который дается истинной величиной, т. е. постоянным произведением двух сопряженных погрешностей измерения.

Нулевая энергия

Но Ф. А. Линдеман (лорд Черуэлл), идя еще дальше, попытался показать*, что если с самого начала постулировать: 1) что пространство и время не непрерывны; 2) что неспособность измерить один из сомножителей действия не обусловлена несовершенством современного искусства физического измерения и 3) что концепция непрерывности пространственно-временных явлений, которая навязана нам макроскопическим миром, противопоказана природе и нельзя даже думать о двух самостоятельных точных сомножителях действия (а только об их произведении), то квантовая теория в целом и все ее следствия получаются естественным образом без каких бы то ни было дополнительных допущений. Хотя эти предположения выглядят в согласии с выражением «задним умом крепок», в одном отношении они ведут к некоторому очень важному следствию, которое в конечном счете можно проверить на опыте. Это следствие состоит в том, что при температуре, равной абсолютному нулю, молекулы, даже если это единичные атомы невалентного элемента, не остаются в покое, а обладают некоторой конечной энергией движения. Эта постулируемая энергия, обусловленная относительным движением элементарных частиц материи при абсолютном нуле, называется *нулевой энергией*. Для внутренней колебательной энергии молекул, состоящих более чем из одного атома, существование нулевой энергии можно считать экспериментально доказанным, как это вытекает из объяснения квантовой теорией разделения легких изотопов, о чем уже говорилось в главе седьмой, а также при изложении данных о тяжелом водороде. Но, согласно метафизике лорда Черуэлла, то же самое должно относиться к движению единичных атомов, так что метафизически состояние покоя отныне непредставимо. Математика не может здесь служить аргументацией. Исходя же из физики прийти к окончательному заключению было нельзя, и вставал вопрос, так ли это в действительности или нет.

Невероятен ли покой?

Рассказать о дискуссии, представив ее в намеренно обнаженном и бескомпромиссном виде, не пытаясь несколько ее приукрасить, интересно уже только потому, что она отмечена многими

* The Physical Significance of the Quantum Theory, Oxford University Press, 1932.

важными для нас вехами, не считая чуда, совершенного Эйнштейном, когда он силой своей интуиции извлек из формулы кинетической энергии, преобразованной так, чтобы была инвариантной скорость света, математическую константу, ставшую 30 лет спустя краеугольным камнем энергетике ядерных превращений. Действие — это произведение двух физических величин, которые в целях приведенной аргументации будут импульсом и длиной. Затем Планк постулирует атом действия h , после чего оно может равняться только h , $2h$, $3h$... и т. д. по мере возрастания масштабов, но по самой своей природе не может быть нулем, ибо, как уже было показано, нулевое действие означает бесконечные кинетическую энергию и импульс.

Затем, по Гейзенбергу, h — это постоянное произведение двух неопределенностей, одна из которых — импульс, а другая — длина, т. е. координаты положения движущейся частицы по отношению к некоторой отправной точке. Тогда можно написать

$$\Delta P \times \Delta M = h,$$

где ΔP и ΔM — конечные (в противоположность бесконечно малым) возможные интервалы изменения положения и импульса соответственно. В математике это называется гиперболическим соотношением, так же как и закон Бойля, который гласит, что давление, умноженное на объем газа (при постоянной температуре), есть константа.

Точно так же как должно быть бесконечным давление газа, если приравнять нулю объем, и бесконечным объем, если нулю равно давление, неопределенность импульса должна быть бесконечной, если интервал положения равен нулю, т. е. если положение можно определить точно, и наоборот. Придать ясный смысл отдельно положению или импульсу в той же степени невозможно, как отдельно давлению и объему газа. Какое бы определение вы ни дали одной из величин, оно будет обязательно включать другую. Гейзенберг был озабочен освобождением математических формул от всех недоступных наблюдению величин, что привело к удовлетворительным математическим методам описания квантовых систем, не связанным с физическими понятиями и даже просто невразумительно звучащим на языке физики. Тем не менее мы держимся за математику, так как она дает возможность точно и информативно описать совокупность связанных опытных данных, вывести все известные результаты и предсказать новые.

А теперь начинается метафизика. Сопряженные неопределенности обусловлены не просто несовершенством современных измерительных методов, а ложностью пространственно-временных представлений, возникших у нас на базе макроскопических событий и не применимых к атомам и субмикроскопическому миру природы. Поэтому, чтобы объяснить новые факты, следует отка-

заться от наших естественных представлений о пространстве и времени как о независимых и разных непрерывных переменных и в соответствии с этим принципом неопределенности или индетерминизма рассматривать их как сопряженные. Теперь, если считать, что частица находится в определенном пространственном интервале ΔP , то это утверждение будет иметь смысл только в том случае, если действительно можно измерить положение частицы с такой точностью. Но, если положение ее определено таким образом, ей неминуемо сообщается и некоторая неопределенность импульса ΔM . Акт измерения положения с указанной степенью точности сообщает частице именно такой импульс. Следовательно, утверждение, что частица занимает некоторую определенную область пространства, подразумевает также и определенный интервал скоростей частицы в этой области.

Нам достаточно рассмотреть только единичную молекулу или единичный атом химически инертного элемента. Мы говорим, что она существует, но если мы говорим еще и где она существует, то она должна двигаться тем быстрее, чем локальнее определено ее положение. Если поместить несколько таких атомов в кубический ящик или ячейку со стороной l , причем их количество достаточно мало, чтобы не учитывать их столкновений друг с другом, то в среднем каждой молекуле будет приписан импульс h/l , в том числе и при температуре, равной абсолютному нулю, и, следовательно, они будут обладать соответствующим количеством нулевой энергии. Странно в этом методе то, что размеры куба не влияют на расчет нулевой энергии, которая имеет фиксированное значение.

Настало время показать, насколько далеко мы ушли от первоначального убеждения, что квантовая теория никак неприменима к равномерному поступательному движению, а применима только к движению по замкнутой траектории. В этом смысле так называемая *новая квантовая механика Гейзенберга* совсем не связана больше с действием, так как оно является динамической характеристикой, обязательно подразумевающей движение с определенными ограничениями. До тех пор пока оно используется для описания динамики атомов и тому подобных объектов, движущаяся частица должна периодически возвращаться к своему прежнему состоянию движения как в отношении скорости, так и в отношении направления; техническим средством выражения этого является вектор действия. Квантовая механика в результате своего обобщения включает теперь и свободное поступательное движение, для которого действие, обязательно делаясь бесконечным, совершенно теряет какой-либо практический смысл, а пространство и время должны быть сопряжены таким образом, чтобы состояние покоя стало невыносимым. Является ли это еще одним запутывающим следствием нововведения Эйнштейна, применившего термин, который Планк использовал для действия, к энергии и ввергнувшего таким образом физическую сторону дела в неразбериху (точно так

же как ранее простое математическое понятие ускорения внесло сумятицу в классическую динамику в субмикроскопическом мире), или в конце концов это подтвердится само по себе, подобно эквивалентности массы и энергии, еще одной фундаментальной физической истиной сомнительного логического происхождения, — покажет время. Во всяком случае, это кровно затрагивает самолюбие физической науки, которую пока что можно определить как исключение из выводов, сделанных на основе наблюдения, ошибок наблюдателя.

Глава девятая. НА ПУТИ К ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ПЕРВОГО ИСКУССТВЕННОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Методы регистрации единичного распада

В 30-х годах нашего века были значительно усовершенствованы методы обнаружения и измерения α и β -частиц и других подобных излучаемых частиц, которые, благодаря развитию электротехники высокого напряжения, вскоре стало возможно получать искусственным путем. Таким образом, начиная с этого времени, прогресс в развитии рассматриваемого нами предмета чаще всего достигался не с помощью прежних грубых методов, а путем исследования отдельных атомов и их поведения, поскольку данный метод позволяет получить намного более точные результаты, чем любой из использовавшихся ранее в естественных науках. В первую очередь это стало возможно благодаря тому, что вновь открытые частицы обладали очень большой кинетической энергией. Однако при оценке и сравнении последних и более ранних достижений необходимо также помнить о той огромной разнице, которая существует между самыми точными методами, известными вчера, и теми, что применяются в наше время.

На раннем этапе, основываясь на показаниях простого спинтарископа Вильяма Крукса, ученые считали, что отдельную α -частицу можно увидеть невооруженным глазом. Дело в том, что в этом небольшом приборе (рис. 51 и 52) с помощью простых линз можно наблюдать фосфоресцентное свечение экрана из ZnS (он бомбардируется α -частицами, испускаемыми мельчайшей крупинкой радия) в виде мерцающих звездочек, каждая из которых образуется в результате столкновения с экраном отдельной α -частицы. Смотровая линза C (см. рис. 52) сфокусирована на экран B , который бомбардируется излучением радия, находящегося в ничтожном количестве на острие иглы A ; расстояние между иглой и экраном можно изменять с помощью винта D . В темноте, приник-

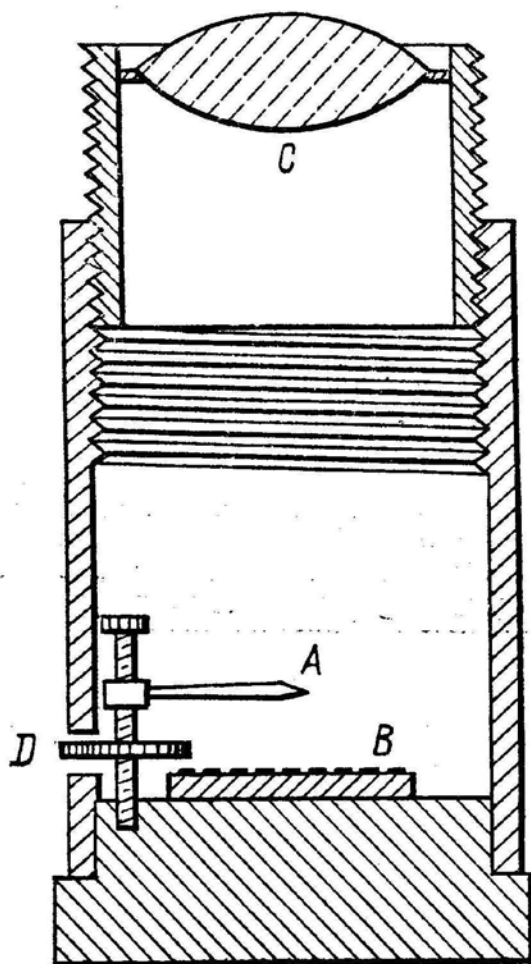


Рис. 51, 52. Спинтарископ Уильяма Крукса

нув глазом к прибору, можно увидеть свечение экрана, преобразованное линзой *C* в скопище мерцающих звездочек.

Таким был впервые использованный Регенером один из ранних методов подсчета α -частиц; этот метод широко применялся в большинстве исследований рассматриваемого нами периода. Однако в наши дни используются менее утомительные и более объективные методы, которые можно разделить на две категории.

В 1899 г., т. е. в самом начале развития теории ионизации газов α -излучением, один из представителей блестящей плеяды исследователей Кавендишской лаборатории в Кембридже Ч. Т. Р. Вильсон занимался изучением того, какую роль играют для метеорологии ионы воздуха, действующие как центры конденсации капель воды в перенасыщенной влагой атмосфере, в результате которой появлялся дождь или туман. В процессе своих исследований он создал замечательный прибор, известный как *камера Вильсона*, позволяющий визуально проследить путь отдельных излучаемых частиц в окружающем их тумане. С течением времени, и особенно после появления стереоскопической фотографии и кино, камера Вильсона превратилась в наиболее ценный инструмент исследования, позволяющий даже проследить динамику столкнове-

ния излучаемых частиц с попадающими на их пути атомными ядрами и в результате вычислить их массу и энергию. Так, в наиболее сложных установках часто наблюдалось явление, когда при прохождении луча сквозь камеру Вильсона фотопленка фиксировала следы излучения, и это в значительной мере способствовало формированию современных представлений о космическом излучении.

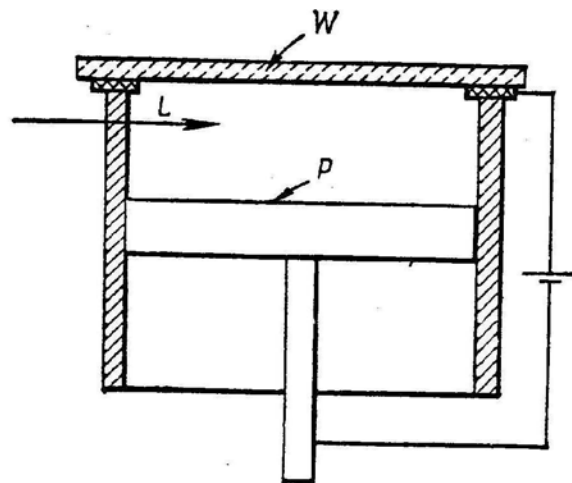


Рис. 53. Принцип действия камеры Вильсона

На рис. 53 схематически изображен принцип действия камеры Вильсона. Цилиндр с подвижным поршнем P закрыт стеклом W . Поверхность цилиндра покрыта промокательной бумагой, смоченной черной тушью; внутренние стенки цилиндра также выкрашены в черный цвет. Лучи, испускаемые радиоактивным препаратом, попадают в цилиндр из трубки в боковой стенке и проходят сквозь воздух в цилиндре в направлении L . С помощью механического приспособления поршень резко опускается, давая возможность влажному воздуху расшириться и вызывая его конденсацию. Если воздух к тому же ионизован, то капли воды конденсируются вокруг ионов, выявляя таким образом следы ионизирующего излучения. Но сначала в процессе нескольких предварительных расширений воздуха удаляются частицы грязи. В момент резкого расширения воздуха батарея высокого напряжения, создающая в цилиндре электрическое поле (см. рис. 53), отключается и включается вновь лишь при подъеме поршня; это делается для того, чтобы очистить камеру от ионов, образовавшихся при предыдущем расширении. На рис. 54 и 55 изображена усовершенствованная модель камеры Вильсона, выполненная Кембриджской приборостроительной компанией, а на рис. 56 и 57 — следы α -частиц, полученные с помощью этого прибора. Следы α -частиц, благодаря производимой ими интенсивной ионизации, представляют собой широкие прямые линии; резкие отклонения в ряде случаев объясняются ядерными столкновениями.

Следы от β -частиц имеют вид слабых извилистых линий, образованных отдельными каплями воды. Дело в том, что эти частицы вызывают гораздо меньшую ионизацию, а сами они легко отклоняются при столкновении с электронами внешних оболочек атомов. Наблюдая за одним из следов α -частицы в центре рис. 57, можно заметить, что она претерпела одно за другим два ядерных столкновения; на оригинале фотографии видны также слабые извилистые следы, оставленные β -частицами.

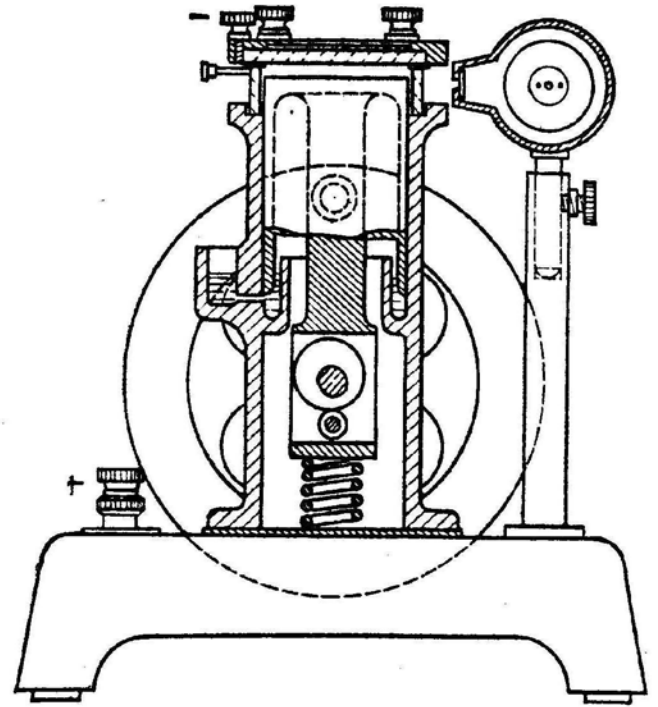
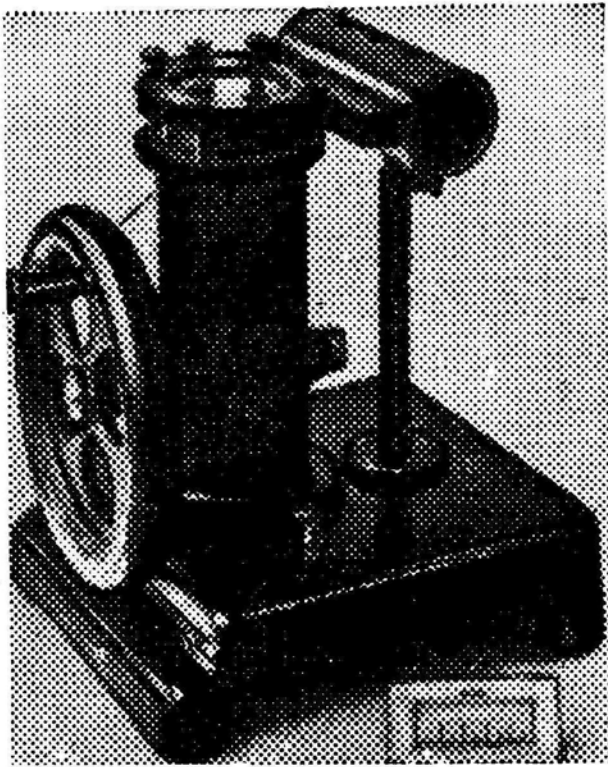


Рис. 54, 55. Камера Вильсона, изготовленная Кембриджской приборостроительной компанией.

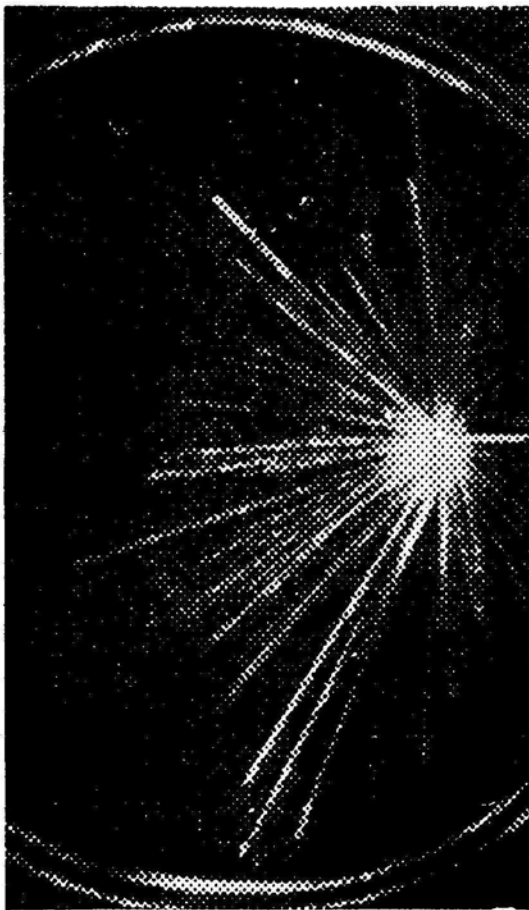


Рис. 56. Следы α -частиц радия в камере Вильсона

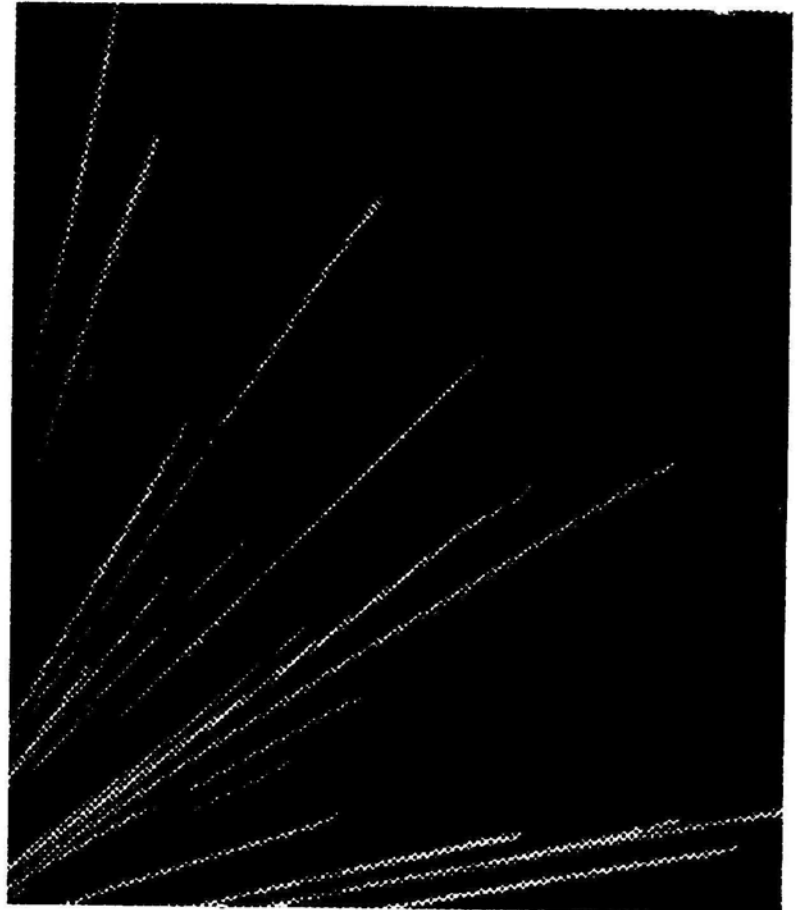


Рис. 57. Увеличенное изображение следов α -частиц

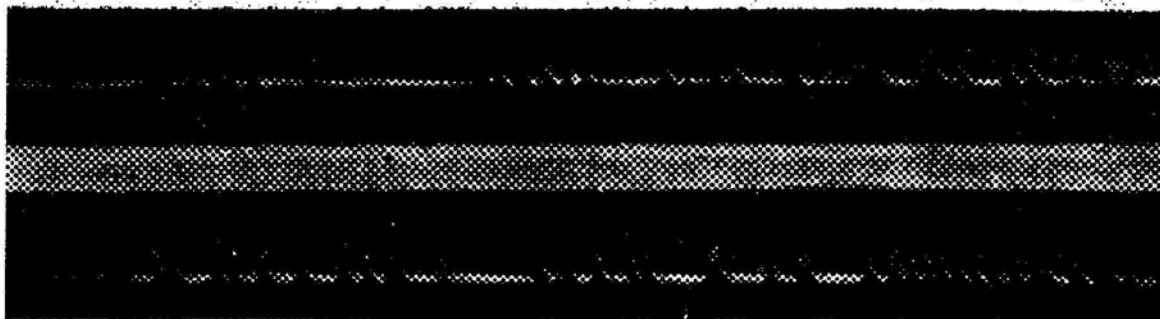


Рис. 58. Фотозапись α -частиц, сделанная с помощью счетчика Резерфорда — Гейгера и проволочного электрометра

Методы усиления

Другой метод основывается на усилении процесса ионизации, в первую очередь путем столкновения ионов с нейтральными молекулами газа в электрическом поле, напряженности которого недостаточно для того, чтобы вызвать искру. К разработке этого метода первым приступил Джон Таунсенд, также один из членов уже упоминавшейся группы по изучению ионизации газов в Кавендишской лаборатории в Кембридже. Находящийся в газовой среде положительно заряженный ион имеет большую массу, чем отрицательно заряженный ион, однако уступает ему в подвижности. Исходя из этого, метод усиления основан на том, что отрицательный ион первым набирает скорость, необходимую для ионизации молекул путем их столкновения. В таких условиях ионизация, хотя и увеличивается в значительной степени, все же имеет предел. Но когда положительные ионы также приобретают скорость, придающую им ионизирующую способность, ионизация становится неограниченной и таким образом создаются условия для электрического разряда в газе. Сперва, с помощью проволочного электрометра и фотографического записывающего устройства, удалось установить скорость ионизации вплоть до 1000 частиц в минуту. На рис. 58 изображена фотозапись α -частиц, сделанная с помощью счетчика Резерфорда — Гейгера и проволочного электрометра; верхняя фотограмма соответствует прохождению через счетчик 600 частиц в минуту. В современном виде этот принцип применяется в так называемых *счетчиках Гейгера*, показания которых зависят от электрического разряда на острие иглы. Счетчик Гейгера является одним из самых простых и в то же время исключительно полезных приборов; он в равной степени реагирует как на α -частицы, так и на β -частицы. На рис. 59 изображена запись этим счетчиком α - и β -частиц (на верхней фотограмме зарегистрированы β -частицы, а на нижней — α -частицы).

Знаменательно, однако, что в наши дни для обнаружения и измерения количества частиц ученые стали использовать термо-

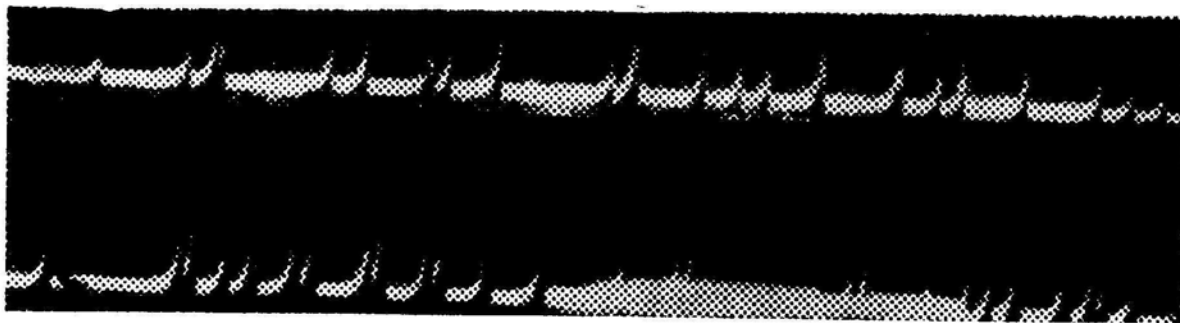


Рис. 59. Запись α - и β -частиц счетчиком Гейгера

электронную лампу, которая еще в 20-х годах сделала возможным появление радиоприемников. При этом получаются такие результаты, которые четверть века назад показались бы невероятными. Оказывается, одна-единственная частица может привести в действие электрический звонок или проявить себя каким-либо иным образом. Скажем, с помощью электронно-счетного прибора (тиратрона) частицы могут управлять механическим счетным устройством; они могут также приводить в действие и другие приборы, если их сигналы достаточно усилить.

Приведем такой пример. Испытуемый, в тело которого введена ничтожная доза радиоактивного вещества, протягивает руку к счетчику Гейгера. По имеющимся данным, в случае если радиоактивность была введена через пищевой тракт, она будет зафиксирована счетчиком через 20 минут, а если путем подкожного впрыскивания — то всего через 20 секунд. Этот пример хорошо показывает, какого высочайшего уровня точности измерения мы сейчас достигли.

В исследованиях радиоактивности, как ни в одной другой области знаний, четко прослеживается огромная важность для науки бесконечно малых величин: раньше история не знала таких случаев, чтобы столь многое зависело от столь малого; применительно к сегодняшнему миру можно сказать что от бесконечно малого зависит даже слишком многое.

Атомное ядро и астрономия

Изучив самым детальным образом способность α -частиц проходить сквозь различные вещества, Резерфорд сделал вывод, что столкновение α -частиц с ядрами элементов, атомная масса которых превышает атомную массу меди (63), носит упругий характер и протекает согласно обычному закону электростатического отталкивания. В результате своих опытов он определил, что диаметр ядра атома порядка 0,0001 диаметра атома водорода. Поскольку практически вся масса атома заключена в его ядре, следователь-

но, плотность ядра примерно в один миллиард раз превышает плотность воды или же в 50 миллионов раз больше плотности самого плотного из всех известных веществ.

В дальнейшем астрономам удалось обнаружить свидетельство того, что плотность некоторых звезд, в частности *белых карликов*, действительно такого порядка. Они даже считают, что периодический коллапс звезд в результате потери энергии на излучение, который сопровождается интенсивным выделением энергии, — это нормальное явление для эволюции звезд. Угасая, звезда превращается в «голые» атомы, внешняя электронная оболочка которых разрушена; вещество приобретает вид сверхплотно сжатого комка, состоящего из ядер этих атомов, который окружен свободными электронами. Ученые теоретически обосновали различные стадии эволюции звезд, каждая из которых соответствует последовательной потере атомами электронных орбит, начиная с внешней и кончая самой близкой к ядру. И тут было высокопарно объявлено, что сами небеса свидетельствуют в пользу атома Резерфорда!

Испускаемые протоны

И все же для нашего рассказа гораздо более «земное» значение имеют результаты изучения более легких элементов. Дело в том, что дезынтегрирующее влияние α -частиц было впервые установлено именно применительно к легким элементам с нечетными атомными номерами. Несколько в стороне от этого общего правила находится водород, динамика столкновений которого уникальна, поскольку это единственный из всех элементов с ядром, уступающим α -частице. Исходя из этого, ученые ожидали, что при лобовом столкновении с α -частицей ядро водорода продвигается вперед со скоростью, значительно превышающей скорость частицы, сообщившей ему движение, а пройденное им расстояние в четыре раза превышает расстояние, проходимое α -частицей. Эти испускаемые H -частицы являются свободными ядрами водорода, или протонами, как ошибочно был назван однозарядный положительно заряженный ион водорода.

Первым свободные ядра водорода наблюдал в 1914 г. Марсден; впоследствии было установлено, что предсказания относительно длины преодолеваемого ими пути соответствовали действительности. Дело в том, что протоны проходят значительное расстояние, что облегчает наблюдение за ними. И хотя в сернистом цинке они вызывают всего лишь слабое мерцание, их можно изучать на расстоянии, значительно превышающем расстояние, на которое может проникать даже самое мощное α -излучение, аналогично тому как для изучения относительно слабых γ -квантов их достаточно пропустить сквозь экран, способный задержать все другие виды

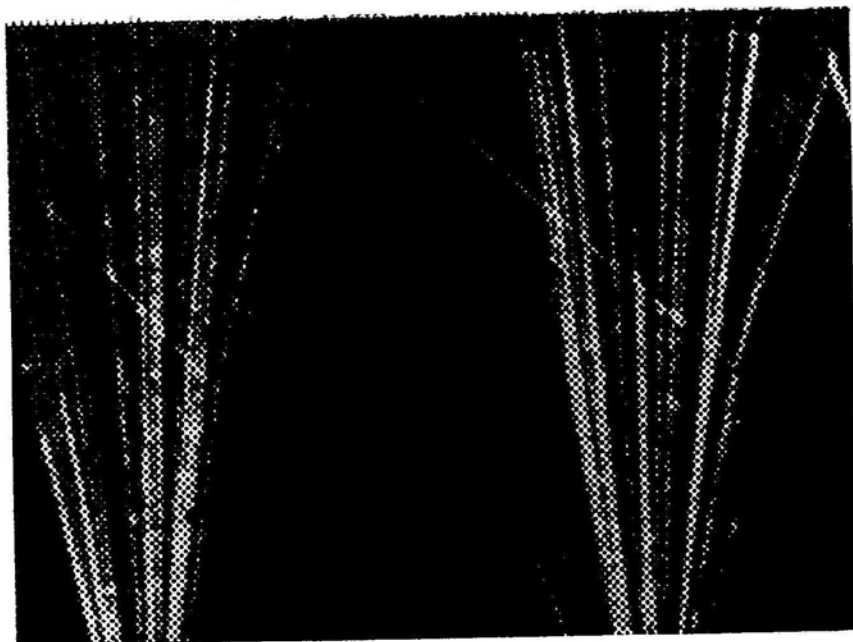


Рис. 60. Упругое столкновение α -частицы с ядром водорода



Рис. 61. Упругое столкновение α -частицы с ядром гелия

излучения. На рис. 60 и 61 приведены сделанные профессором Блэккетом фотографии, изображающие упругое столкновение α -частицы с ядрами водорода и гелия. Первый из снимков является примером более современной «стереографической», двухплоскостной фотографии столкновения, из которой можно вывести его трехмерную диаграмму.

Расщепление ядер легких элементов альфа-частицами

Несколько позднее, а именно в 1919—1922 гг., Резерфорд обнаружил, что при прохождении α -частиц через газообразный азот образуется некоторое количество испускаемых протонов, преодолевающих расстояние на $\frac{1}{3}$ больше, чем путь, проходимый протонами водорода, хотя по всем другим характеристикам протоны водорода и азота совершенно подобны. Другие легкие элементы с нечетными атомными номерами (вплоть до фосфора) также генерируют протоны, хотя и в значительно меньшем количестве. Однако радиус действия протонов алюминия в три раза превышает радиус действия протонов водорода, что соответствует кинетической энергии большей, чем кинетическая энергия генерирующих их α -частиц; помимо этого, значительная часть протонов испускается в противо-

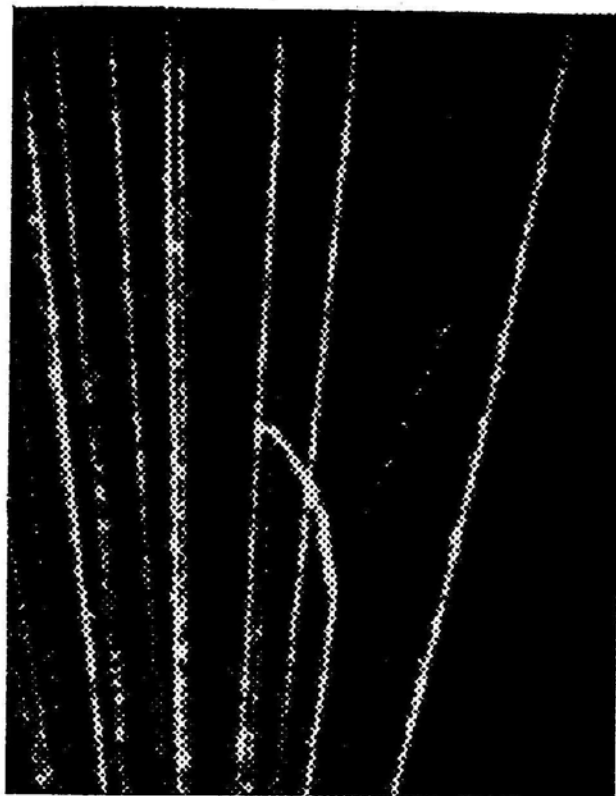
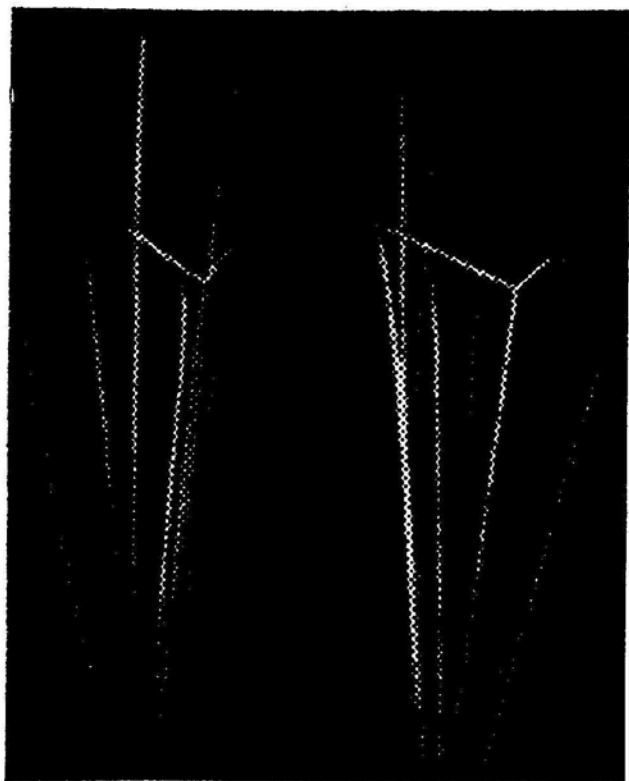


Рис. 62. Упругое столкновение α -частицы с ядром кислорода

Рис. 63. Неупругое столкновение α -частицы с атомом азота, при котором ядро азота расщепляется

положном направлении. Подобные факты со всей очевидностью свидетельствуют о том, что протоны действительно образуются в результате расщепления ядер бомбардируемых элементов.

Примерно только один из миллиарда атомов водорода, в которые вторгаются α -частицы, становится испускаемым протоном, а 100 000 α -частиц могут образовать всего несколько протонов; при воздействии одного миллиона α -частиц азот дает около 20, а алюминий — 8 протонов. Так называемые *вильсоновские следы* в азоте были впервые зафиксированы на киноплёнке американским ученым Харкинсом, а затем — англичанином Блэкеттом. Последний тщательно изучил 23 000 фотографий, на каждой из которых находилось примерно по 20 следов α -частиц, но только в 8 случаях зарегистрировал выталкивание легкого протона. На рис. 62 и 63 можно сравнить упругое столкновение α -частицы с ядром кислорода (где короткая линия, уходящая вправо, показывает путь атома кислорода после столкновения — см. рис. 62) и неупругое столкновение α -частицы с атомом азота (см. рис. 63), которое, как уже говорилось, происходит чрезвычайно редко и в результате которого атом азота распадается. При этом образуется выбитое из атома азота ядро водорода, оставляющее слабый прямой след, а также составное ядро, которое, отлетая в сторону, оставляет за собой

жирный кривой след (движение по кривой линии объясняется последующими ядерными столкновениями).

Этот опыт позволил сделать важное открытие: при всех проводившихся экспериментах после подобного столкновения α -частица не оставляла никакого следа. Уже намного позднее, когда было изучено огромное количество аналогичных случаев и когда было установлено, что этот вид расщепления является одним из самых распространенных, — только тогда ученые смогли с уверенностью сказать, что ядро гелия соединялось с ядром азота, выталкивая при этом протон и образуя ядро изотопа кислорода с массой 17, в то время еще неизвестного и открытого только спустя несколько лет. Что же касается основного вывода из данного опыта, а именно, что при ядерном столкновении выталкивается протон, то в этом практически никогда не сомневались.

Обычно принято связывать результаты приведенных выше опытов, широко известных как *расщепление атома*, с первым осуществлением искусственной трансмутации; однако, если быть точным, их следует рассматривать как первый случай использования естественной трансмутации одних элементов для осуществления трансмутации других. Как бы то ни было, достижение полностью искусственной трансмутации на уровне отдельных атомов теперь было уже не за горами.

Наличие точных сведений о природе α - и β -частиц все больше подводило ученых к признанию того, что это ионы, которые можно ускорить искусственным путем при помощи электрического поля с достаточно высоким, но в то же время легко измеримым потенциалом. Вполне естественно, что признание этого факта в огромной мере стимулировало поиски средств для обеспечения более высокого напряжения, чем было доступно в то время. Большие индукционные катушки, использовавшиеся для генерирования рентгеновского излучения, как правило, не достигали потенциала 100 000 в, в то время как более быстрые α -частицы обладают энергией, которую можно высвободить искусственным путем только при наличии потенциала в 4 млн. в.

Электронвольт

В наши дни большую практическую пользу для измерения энергии отдельных атомов и ионов имеет такая единица, как *электронвольт (эв)*, равная $1,59 \cdot 10^{-12}$ эрг. Тепловая энергия молекулы газа при комнатной температуре составляет около 0,04 эв, а химическая энергия синтеза воды из водорода и кислорода равна примерно 3 эв. При измерении химической энергии в данной системе единиц она почти никогда не превышает 4 эв. Это, в частности, выражается в том, что максимально возможное напряжение первичных и вторичных гальванических элементов может быть чуть

больше 2 в. Однако в рассматриваемой нами области радиоактивных излучений мы имеем дело с такой единицей, как миллион электронвольт — мегаэлектронвольт (*Мэв*). Для электрона и протона, несущих атомные заряды в 1 единицу, кинетическая энергия в 1 *Мэв* численно равна напряжению, необходимому для того, чтобы вызвать скорость, которая соответствовала бы вычисленной в этих единицах кинетической энергии. Для двухзарядных α -частиц необходимое напряжение численно соответствует лишь половине энергии, измеренной в мегаэлектронвольтах. Энергия самых быстрых из основной массы α -частиц радия и тория равна примерно 8 *Мэв*, хотя известно несколько интересных с теоретической точки зрения α -частиц «дальнего действия» (например, в тории одна такая частица попадает на 5000 обычных, причем опять-таки длина ее пробега в половину меньше длины пробега самых быстрых из обычных α -частиц).

Мэв практически соответствует потере атомной массы, равной 0,001 единицы массы, или, если быть до конца точным, 1 единица атомной массы обладает энергией в 931,6 *Мэв*. Таким образом, выталкивание быстрой α -частицы вызывает абсолютную потерю 0,008 атомной массы на энергию выталкивания, если не считать 4 единиц массы, уносимых испускаемой частицей.

Исследования Астона в области изотопов

Вернемся теперь к вопросу об изотопах. Для этого необходимо вспомнить, что в 1913 г. Дж. Дж. Томсон с помощью положительных лучей получил первое, еще недостаточно убедительное свидетельство того, что неон, атомная масса которого равна 20,183, кроме основного изотопа с массовым числом 20 содержит несколько процентов изотопа с массовым числом 22, чем и объясняется тот факт, что общая атомная масса этого элемента не выражается целым числом. Неубедительность свидетельства Томсона заключалась в том, что это массовое число вполне могло объясняться присутствием двухзарядной молекулы двуокиси углерода (CO_2) или каких-либо других примесей, которые, как правило, дают о себе знать в вакуумных трубках. В своих опытах Томсон применял так называемый *метод парабол*, когда отклонение ионов в электрическом и магнитном полях происходит в плоскостях, перпендикулярных друг к другу и направлению движения ионов. При этом ионы с одинаковым отношением m/e оставляют на фотопластинке, благодаря своей большой скорости и кинетической энергии, параболический след.

После первой мировой войны Астон усовершенствовал этот опыт, добившись такого положения, когда оба отклонения происходили в одной и той же плоскости, но в противоположных направлениях (в наши дни этот метод получил повсеместное рас-

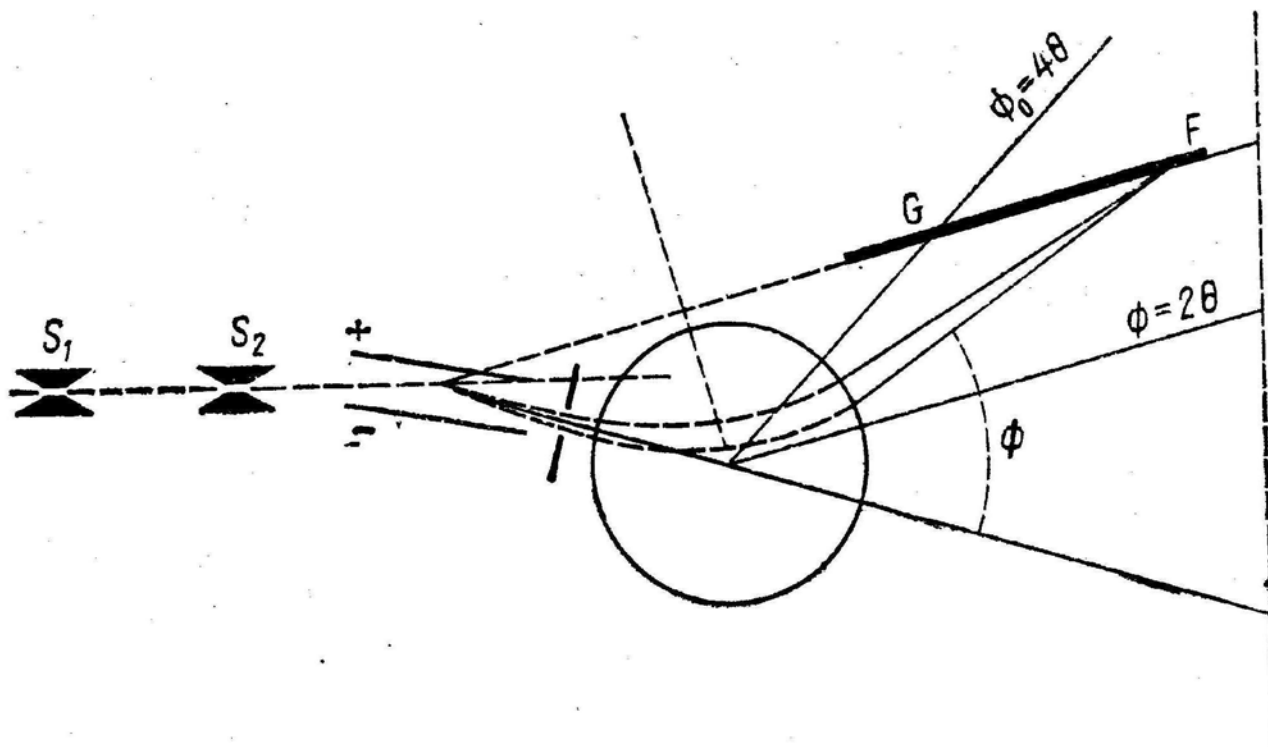


Рис. 64. Принцип действия первого масс-спектрографа Астона

пространение). В результате ему удалось добиться уникального по своему значению фокусирующего эффекта, до предела повысившего чувствительность и точность этого метода. Получив в руки такой замечательный прибор, ученый тут же обнаружил, что многие из наиболее распространенных элементов представляют собой смесь изотопов. В первую очередь это было установлено для хлора (атомная масса 35,457), который, как оказалось, состоит из двух изотопов с массовыми числами 35 и 37, из соотношения которых и складывается общая атомная масса элемента. В конечном итоге были сделаны два широких обобщения, значение которых невозможно переоценить: во-первых, было установлено, что массовые числа всех отдельно взятых изотопов — приблизительно целые числа (по отношению к кислороду, массовое число которого равно 16); во-вторых, наибольшие отклонения точных значений от целых чисел (в порядке их расположения в периодической системе) представляют собой постоянную функцию атомных масс, о чем подробнее будет сказано ниже.

В 1919 г., работая в Кавендишской лаборатории, Астон создал свой первый масс-спектрограф, позволивший воплотить в жизнь усовершенствованный им метод Томсона по определению массы положительно заряженных ионов. Этот первый прибор был способен измерять массу ионов с погрешностью до 0,001. Вскоре появились намного более точные приборы, сконструированные Астоном, а также компанией «Континентал энд Американ уоркерс». Эти приборы, особенно те из них, которые были построены в Америке,

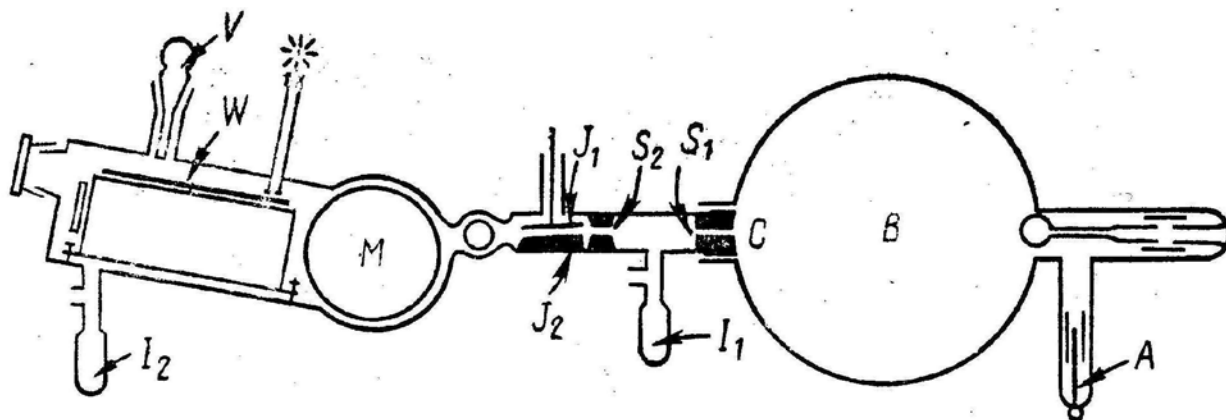


Рис. 65. Схема первого масс-спектрографа Астона

принадлежат к числу наиболее замечательных и точных измерительных приборов, когда-либо созданных человеком.

На рис. 64 показан принцип действия первого масс-спектрографа Астона. Пучок положительно заряженных ионов, направляемый с помощью прорезей S_1 и S_2 , проходит сквозь электростатическое поле, которое образуется между двумя заряженными пластинами и под воздействием которого пучок отклоняется вниз. Затем пучок проходит сквозь магнитное поле, отклоняющее его вверх в той же плоскости, причем весь пучок фокусируется на линии GF , воспроизводя спектр массы (точки G и F соответственно показывают минимальную и максимальную массу). На рис. 65 C — это перфорированный вогнутый катод, а A — анод газоразрядной трубки B . Положительно заряженные лучи, пройдя сквозь прорези S_1 и S_2 , через электрическое поле J_1J_2 и магнитное поле M , доходят до фотопластинки W . Буквами I_1 и I_2 обозначены колбы с древесным углем, охлаждаемые жидким воздухом в целях поддержания вакуума. Приспособление V позволяет изменять положение фотопластинки таким образом, чтобы она подвергалась воздействию вторичного облучения.

На рис. 66 воспроизведена фотография первого масс-спектрографа, установленного Астоном в 1919 г. в Кавендишской лаборатории, а ныне находящегося в Музее истории науки в Саут-Кенсингтоне. В этом приборе индукционная катушка расположена под лабораторным столом; исследуемый газ находится над ртутью в сосуде C , а буквой G обозначен ротационный ртутный насос.

Свой второй масс-спектрограф Астон сконструировал в 1925 г.; погрешность его измерений была 0,0001, что вполне достаточно для того, чтобы различить масс-спектры любого известного элемента. Однако на пути повышения разрешающей способности прибора неожиданно возникли серьезные трудности, которые заключались в отрицательном воздействии эффекта поляризации, существующего в электрическом поле. Астон, а потом и другие ученые стреми-

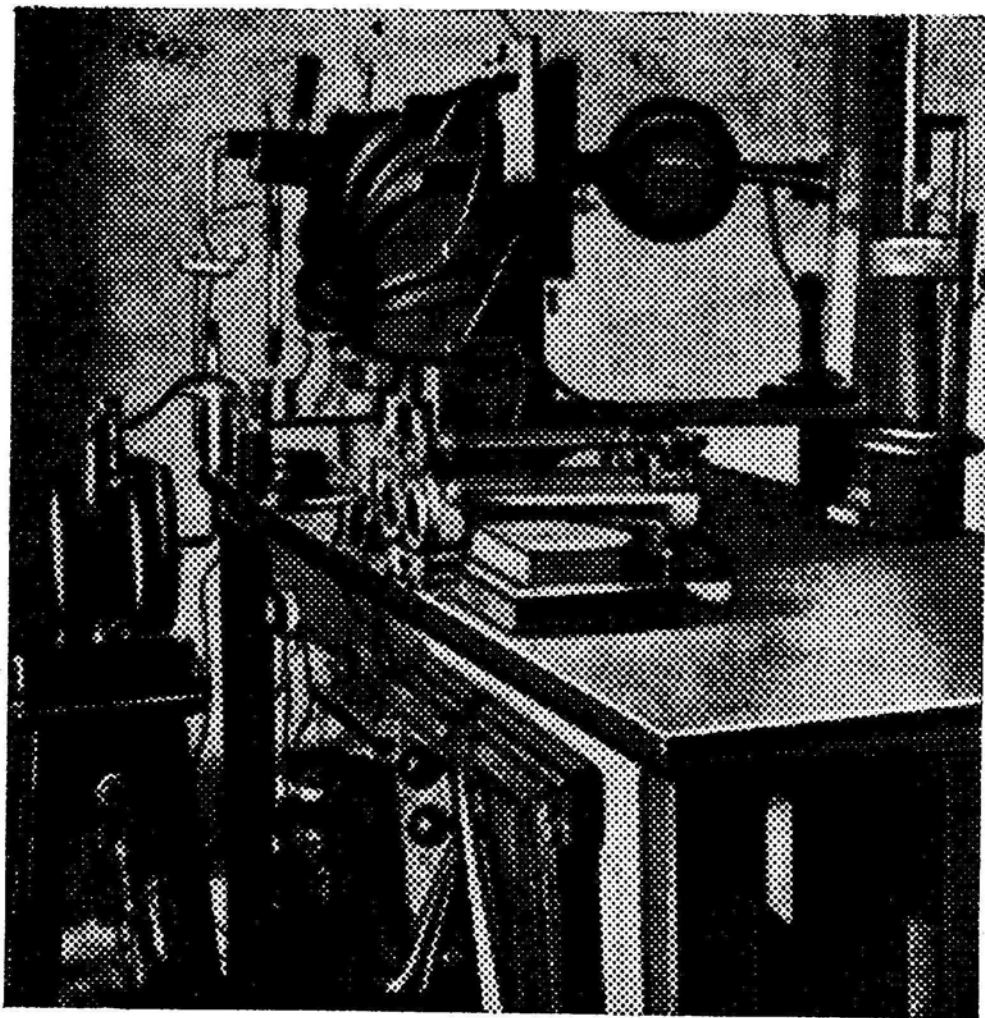


Рис. 66. Первый масс-спектрограф Астона в Кавендишской лаборатории

лись избежать этого эффекта, увеличивая расстояние и напряжение, а также перестраивая всю систему.

В 1937 г. Астон завершил создание своего третьего масс-спектрографа. Вот только несколько примеров, демонстрирующих работу этих приборов. Точность измерения в огромной степени повысилась; в благоприятных случаях погрешность составляла 0,00001, а в среднем она не превышала 0,00003—0,00004.

К этому времени постепенно была усовершенствована практика «естественной группировки», заключающаяся в том, что на одной и той же фотографии фиксировались два различных иона с одинаковым массовым числом, например однозарядный ион кислорода (O^+) и однозарядный ион метана (CH_4^+), имеющие массовое число 16. Таким образом, этот дуплет вскрывал разницу между точными значениями атомной массы водорода и углерода по отношению к эталонной атомной массе кислорода 16. При этом необходимо иметь в виду, что в действительности измеряется не m , а m/e , так что однозарядный ион, обладающий массой m , имеет

такое же массовое число, как и двухзарядный ион с массой $2m$ или трехзарядный ион с массой $3m$. Количество зарядов иона всегда вычисляется, а то и просто угадывается, однако, как думается, это не приводит к серьезным ошибкам. Заслуга Астона состоит в том, что он довольно искусно сумел получить из присутствующих в подобных спектрах ионов углеводорода серию линий, отличающихся друг от друга по степени единства. Так, первая углеродная группа состоит из однозарядных положительных ионов C^+ , CH^+ , CH_2^+ , CH_3^+ , CH_4^+ , имеющих соответственно массовые числа 12, 13, 14, 15 и 16; вторая углеродная группа, в которой на один ион приходится по два атома углерода, имеет массовые числа от 24 до 30, а третья углеродная группа (с тремя атомами углерода на каждый ион — от C_3^+ до $C_3H_8^+$) имеет массовые числа от 36 до 44. Эти линии послужили хорошей основой для сравнения, поскольку по аналогии с ними можно было сгруппировать и любые другие ионы, имеющие такое же массовое число. На рис. 67 приведено несколько примеров масс-спектров Астона, полученных, за исключением самого верхнего спектра *A*, с помощью масс-спектрографа. Спектр *A* был получен на втором масс-спектрографе и показывает первую углеродную группу, причем массовое число 16 соответствует группе кислорода (O^+) и метана (CH_4^+), которые впервые, таким образом, удалось четко разграничить, хотя их массы различаются лишь на 0,036. Спектр *B* показывает третью углеродную группу с массовым числом от 36 до 44, что вызывается ионами от C_3^+ до $(C_3H_8)^+$. На спектре *C* видна граница между этой группой и двухзарядными ионами изотопов криптона с массовым числом 82, 83, 84 и 86, причем раздвоение на уровне 40 и 44 происходит из-за присутствия соответственно примесей аргона и двуокиси углерода. На диаграмме *D* показано разграничение между этой же группой и трехзарядными ионами изотопов ксенона: изотоп с массовым числом 129 дает дуплет на отметке 43, изотоп 131 — на отметке $43\frac{2}{3}$, 134 — на отметке $44\frac{2}{3}$ и 136 — на отметке $45\frac{1}{3}$.

К 1931 г. было уже изучено 64 элемента и оказалось, что только 22 из них однородны. Остальные же представляют собой смесь изотопов, причем самый сложный из них — олово (атомная масса 118,7, атомный номер 50) — имеет 11 изотопов с массой от 112 до 124.

К 1945 г., используя более точные методы, ученые открыли 283 изотопа, присущих 83 элементам, и только 20 элементов оказались однородными (следует, правда, отметить, что во многих элементах сопутствующие им изотопы содержатся в крайне незначительном количестве). В табл. 2 химические элементы расположены в порядке возрастания их атомного номера и атомной массы, а также показаны особенности их изотопного состава.

Изотопический состав устойчивых элементов (1945)

Атомный номер	Элемент	Атомная масса	Диапазон массовых чисел: (S) — единственный; (T) — следы (меньше 0,01%)	Распространенность, % (курсивом) в порядке распространенности
1	H	1,008	1—2	1, <i>99,98</i> ; 2, <i>0,02</i>
2	He	4,003	3—4	4, <i>100</i> ; 3, (T)
3	Li	6,940	6—7	7, <i>92,5</i> ; 6, <i>7,5</i>
4	Be	9,02	9(S)	
5	B	10,82	10—11	11, <i>81,6</i> ; 10, <i>18,4</i> .
6	C	12,010	12—13	12, <i>98,9</i> ; 13, <i>1,1</i>
7	N	14,008	14—15	14, <i>99,62</i> ; 15, <i>0,38</i>
8	O	16,000	16—18	16, <i>99,76</i> ; 18, <i>0,20</i> ; 17, <i>0,04</i>
9	F	19,00	19(S)	
10	Ne	20,183	20—22	20, <i>90,00</i> ; 22, <i>9,73</i> ; 21, <i>0,27</i>
11	Na	22,997	23(S)	
12	Mg	24,32	24—26	24, <i>77,4</i> ; 25, <i>11,5</i> ; 26, <i>11,1</i>
13	Al	26,97	27(S)	
14	Si	28,06	28—30	28, <i>89,6</i> ; 29, <i>6,2</i> ; 30, <i>4,2</i>
15	P	30,98	31(S)	
16	S	32,066	32—36	32, <i>95,1</i> ; 34, <i>4,2</i> ; 33, <i>0,74</i> ; 36, <i>0,016</i>
17	Cl	35,457	35—37	35, <i>75,4</i> ; 37, <i>24,6</i>
18	Ar	39,944	36—40	40, <i>99,63</i> ; 36, <i>0,31</i> 38, <i>0,06</i>
19	K	39,096	39—41	39, <i>93,4</i> ; 41, <i>6,6</i> ; 40, <i>0,01</i>
20	Ca	40,08	40—48	40, <i>96,97</i> ; 44, <i>2,06</i> ; 42, <i>0,64</i> ; 48, <i>0,185</i> ; 43, <i>0,145</i> ; 46 (T)
21	Sc	45,10	45(S)	
22	Ti	47,90	46—50	48, <i>73,45</i> ; 46, <i>7,94</i> ; 47, <i>7,75</i> ; 49, <i>5,52</i> ; 50, <i>5,34</i>
23	V	50,95	51(S)	
24	Cr	52,01	50,54	52, <i>81,6</i> ; 53, <i>10,4</i> ; 50, <i>4,9</i> ; 54, <i>3,1</i>
25	Mn	54,93	55(S)	
26	Fe	55,85	54—58	56, <i>91,6</i> ; 54, <i>6,0</i> ; 57, <i>2,1</i> ; 58, <i>0,28</i>
27	Co	58,94	57—59	59, <i>99,8</i> ; 57, <i>0,2</i>
28	Ni	58,69	58—64	58, <i>67,4</i> ; 60, <i>26,7</i> ; 62, <i>3,8</i> ; 61, <i>1,2</i> ; 64, <i>0,88</i>

Атомный номер	Элемент	Атомная масса	Диапазон массовых чисел; (S) — единственный; (T) — следы (меньше 0,01%)	Распространенность, % (курсивом) в порядке распространенности
29	Cu	63,54	63—65	63, <i>70,13</i> ; 65, <i>29,87</i>
30	Zn	65,38	64—70	64, <i>50,9</i> ; 66, <i>27,3</i> 68, <i>17,4</i> ; 67, <i>3,9</i> ; 70, <i>0,5</i>
31	Ga	69,72	69—71	69, <i>61,2</i> ; 71, <i>38,8</i>
32	Ge	72,60	70—76	74, <i>37,1</i> ; 72, <i>27,3</i> ; 70, <i>21,2</i> ; 73, <i>7,9</i> ; 76, <i>6,5</i>
33	As	74,91	75(S)	
34	Se	78,96	74—82	80, <i>48,0</i> ; 78, <i>24,0</i> ; 76, <i>9,5</i> ; 82, <i>9,3</i> ; 77, <i>8,3</i> ; 74, <i>0,9</i>
35	Br	79,916	79—81	79, <i>50,6</i> ; 81, <i>49,4</i>
36	Kr	83,7	78—86	84, <i>57,11</i> ; 86, <i>17,47</i> ; 82, <i>11,53</i> ; 83, <i>11,53</i> ; 80, <i>2,01</i> ; 78, <i>0,38</i>
37	Rb	85,48	85—87	85, <i>72,8</i> ; 87, <i>27,2</i>
38	Sr	87,63	84—88	88, <i>82,56</i> ; 86, <i>9,86</i> 87, <i>7,02</i> ; 84, <i>0,56</i>
39	Y	88,92	89(S)	
40	Zr	91,22	90—96	90, <i>48,0</i> ; 92, <i>22,0</i> ; 94, <i>17,0</i> ; 91, <i>11,5</i> ; 96, <i>1,5</i>
41	Nb	92,91	93(S)	
42	Mo	95,95	92—100	98, <i>24,1</i> ; 96, <i>16,6</i> ; 95, <i>16,1</i> ; 92, <i>14,9</i> ; 97, <i>9,65</i> ; 94, <i>9,40</i> ; 100, <i>9,25</i>
43	(Ms)			
44	Ru	101,7	96—104	102, <i>31,34</i> ; 104, <i>18,27</i> ; 101, <i>16,98</i> ; 99, <i>12,81</i> ; 100, <i>12,70</i> ; 96, <i>5,68</i> ; 98, <i>2,22</i>
45	Rh	102,91	103(S)	
46	Pd	106,7	102—110	106, <i>27,2</i> ; 108, <i>26,8</i> ; 105, <i>22,6</i> ; 110, <i>13,5</i> ; 104, <i>9,3</i> ; 102, <i>0,8</i>
47	Ag	107,88	107—109	107, <i>51,9</i> ; 109, <i>48,1</i>
48	Cd	112,41	106—116	114, <i>28,0</i> ; 112, <i>24,2</i> ; 111, <i>13,0</i> ; 110, <i>12,8</i> 113, <i>12,3</i> ; 116, <i>7,3</i> ; 106, <i>1,4</i> ; 108, <i>1,0</i>

Атомный номер	Элемент	Атомная масса	Диапазон массовых чисел; (S) — единственные; (T) — следы (меньше 0,01%)	Распространенность, % (курсивом) в порядке распространенности
49	In	114,76	113—115	115, 95,5; 113, 4,5
50	Sn	118,70	112—124	120, 28,5; 118, 22,5 116, 15,5; 119, 9,8 117, 9,1; 124, 6,8 12, 5,5; 112, 1,1; 114, 0,8; 115, 0,4
51	Sb	121,76	121—123	121, 56,0; 123, 44,0
52	Te	127,61	120—130	130, 33,1; 128, 32,8; 126, 19,0; 125, 6,0; 124, 4,5; 122, 2,9; 123, 1,6; 120 (T)
53	I	126,92	127(S)	
54	Xe	131,3	124—136	132, 26,96; 129, 26,23; 131, 21,17; 135, 10,54; 136, 8,95; 130, 4,07; 128, 1,90; 124, 0,094; 126, 0,088
55	Cs	132,91	133(S)	
56	Ba	137,36	130—138	138, 71,7; 137, 11,3; 136, 7,8; 135, 6,6; 134, 2,42; 130, 0,101; 132, 0,097
57	La	138,92	139(S)	
58	Ce	140,13	136—142	140, 89,0; 142, 11,0; 138 (T); 136 (T)
59	Pr	140,92	141(S)	
60	Nd	144,27	142—150	142, 25,95; 144, 22,6 146, 16,5; 143, 13,0; 145, 9,2; 148, 6,8; 150, 5,95
61	—			
62	Sm	150,43	144—154	152, 26,0; 154, 20,0; 147, 17,0; 149, 15,0; 148, 14,0; 150, 5,0; 144, 3,0
63	Eu	152,0	151—153	153, 50,9; 151, 49,1
64	Gd	156,9	152—160	158, 23,45; 160, 20,87; 106, 20,59; 157, 16,42; 155, 15,61; 154, 2,86; 152, 0,20
65	Tb	159,2	159(S)	
66	Dy	162,46	158—164	164, 28,0; 163, 24,0; 162, 24,0; 161, 22,0; 160, 1,5; 158, 0,1

Атомный номер	Элемент	Атомная масса	Диапазон массовых чисел: (S) — единственные; (T) — следы (меньше 0,01%)	Распространенность, % (курсивом) в порядке распространенности
67	Ho	164,94	165(S)	
68	Er	167,2	162—170	166, <i>32,9</i> ; 168, <i>26,9</i> ; 167, <i>24,4</i> ; 170, <i>14,2</i> ; 164, <i>1,5</i> ; 162, <i>0,1</i>
69	Tm	169,4	169(S)	
70	Yb	173,04	168—176	174, <i>29,58</i> ; 172, <i>21,49</i> ; 173, <i>17,02</i> ; 171, <i>14,26</i> ; 176, <i>13,38</i> ; 170, <i>4,21</i> ; 168, <i>0,06</i> .
71	Lu	174,99	175—176	175, <i>97,5</i> ; 176, <i>2,5</i>
72	Hf	178,6	174—180	180, <i>35,14</i> ; 178, <i>27,13</i> ; 177, <i>18,47</i> ; 179, <i>13,85</i> ; 176, <i>5,3</i> ; 174, <i>0,18</i>
73	Ta	180,88	181(S)	
74	W	183,92	180—186	184, <i>30,1</i> ; 186, <i>29,8</i> ; 182, <i>22,6</i> ; 183, <i>17,3</i> ; 180, <i>0,2</i>
75	Re	186,31	185—187	187, <i>61,8</i> ; 185, <i>38,9</i>
76	Os	190,2	184—192	192, <i>41,0</i> ; 190, <i>26,4</i> ; 189, <i>16,1</i> ; 188, <i>13,3</i> ; 187, <i>1,64</i> ; 186, <i>1,58</i> ; 184, <i>0,018</i>
77	Ir	193,1	191—193	193, <i>61,5</i> ; 191, <i>38,5</i>
78	Pt	195,23	192—198	195, <i>35,3</i> ; 194, <i>30,2</i> ; 196, <i>26,6</i> ; 198, <i>7,2</i> ; 192, <i>0,8</i>
79	Au	197,2	197(S)	
80	Hg	200,61	196—204	202, <i>29,56</i> ; 200, <i>23,26</i> ; 199, <i>17,03</i> ; 201, <i>13,17</i> ; 198, <i>10,11</i> ; 204, <i>6,72</i> ; 196, <i>0,15</i> .
81	Tl	204,39	203—205	205, <i>70,9</i> ; 203, <i>29,1</i>
82	Pb	207,21	204—208	208, <i>52,3</i> ; 206, <i>23,6</i> ; 207, <i>22,6</i> ; 204, <i>1,5</i>
83	Bi	209,00	209(S)	
84	Po	210		
85				
86	Rn	222		
87				
88	Ra	226,05		

Атомный номер	Элемент	Атомная масса	Диапазон массовых чисел; (S) — единичный; (T) — следы (меньше 0.01%)	Распространенность, % (курсивом) в порядке распространенности
89	Ac	227		
90	Th	232,12	232(S)	
91	Pa	231		
92	U	238,07	234—238	238, 99,28; 235, 0,71; 234 (T).

Мы несколько не погрешим против истины, если сформулируем уже высказанную нами мысль следующим образом: сложность науки об атомной энергии в наши дни в основном объясняется существованием в природе огромного количества атомов, отличающихся друг от друга. Ведь в табл. 2 показаны только стабильные виды, способные к самостоятельному существованию в качестве обособленных химических элементов. Однако помимо них существует примерно такое же количество нестабильных атомов, выходя-

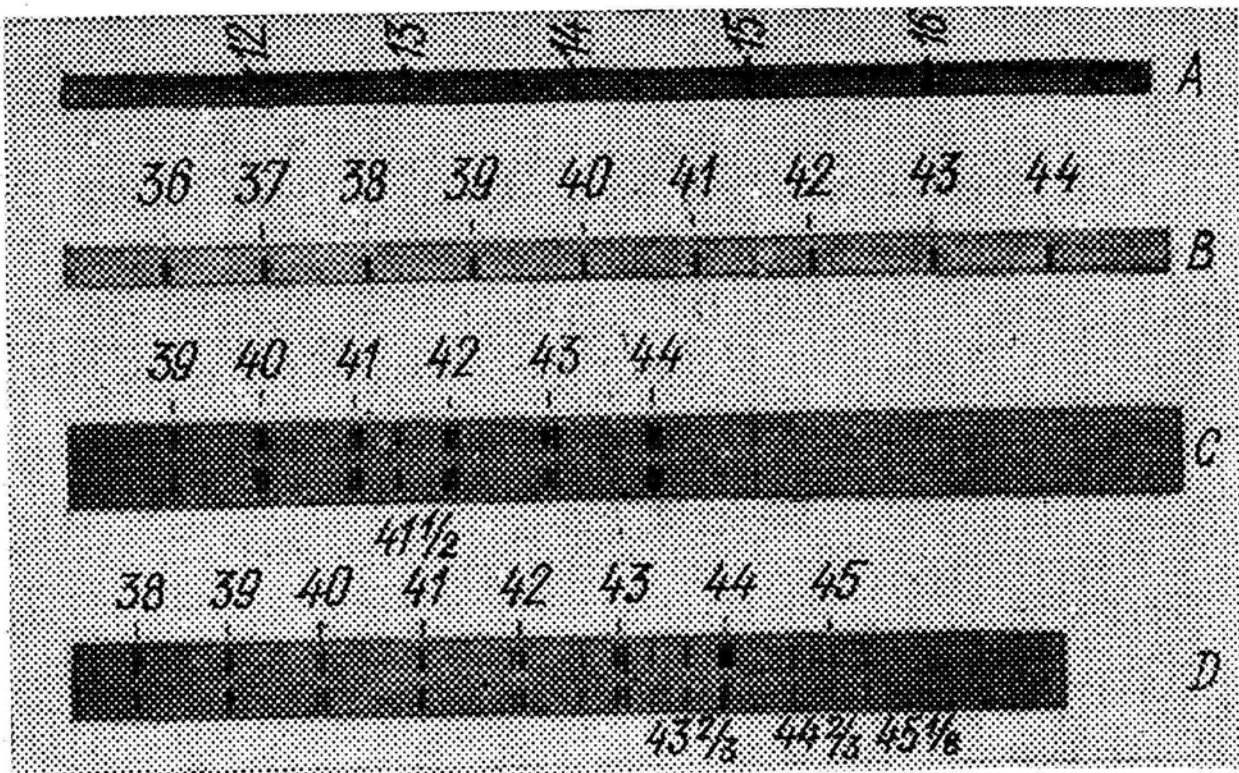


Рис. 67. Образцы масс-спектров, полученных Астоном

щих за пределы массовых чисел, приведенных в табл. 2, причем по мере расширения исследований их число увеличивается.

Четные и нечетные элементы

При определении изотопного состава элементов, приведенных в табл. 2, больше всего поражает огромная разница между элементами с нечетным и четным атомным номером. За исключением одного-единственного спорного случая, каким является торий (атомный номер 90), все 43 четных элемента — сложные, и, взятые вместе, они имеют 223 изотопа (в среднем по 5 изотопов на каждый элемент). В то же время из 40 нечетных элементов 20 однородны, а остальные представляют собой пары, массы которых выражаются следующими друг за другом нечетными числами. Так, нечетный элемент хлор (атомная масса 35,46; атомный номер 17), на котором и было сделано данное наблюдение впервые, имеет два изотопа с массами 35 и 37. В равной степени это относится и ко всем неоднородным элементам, хотя для нескольких легких элементов массы выражаются следующими друг за другом числами.

До сих пор никто из ученых не мог дать убедительного теоретического объяснения данному явлению. А между тем вполне очевидно, что оно имело бы первостепенное значение для решения такой малоизученной проблемы, как определение природы ядра атома. Так или иначе, рассмотренное обобщение было сделано сравнительно недавно, и, может быть, основные выводы еще впереди.

Возрождение гипотезы Праута

Как уже отмечалось, Астону практически с самого начала удалось установить, что массы всех изотопов примерно равны целым числам (по отношению к эталонной массе кислорода 16). Тем самым он возродил в современном виде гипотезу Праута, согласно которой все атомы состоят из одного и того же первичного вещества — протила. Кроме того, после достижения максимальной точности измерения (о чем речь шла выше) было установлено, что отклонения атомных масс от целых чисел носят регулярный характер и наблюдаются от начала и до конца периодической системы как последовательного ряда, в котором каждый элемент сохраняет характерные черты своего предшественника; это также значительно расширило данную концепцию, распространив ее на внутреннее строение ядра атома. Однако уже к описываемому нами периоду, благодаря растущему признанию закона эквивалентности Эйнштейна, эти несоизмеримо малые отклонения приобрели чрезвычайную важность, поскольку они в простейшем виде показывают энергию, которая поглощается или высвобождается при переходе от одного элемента к другим.

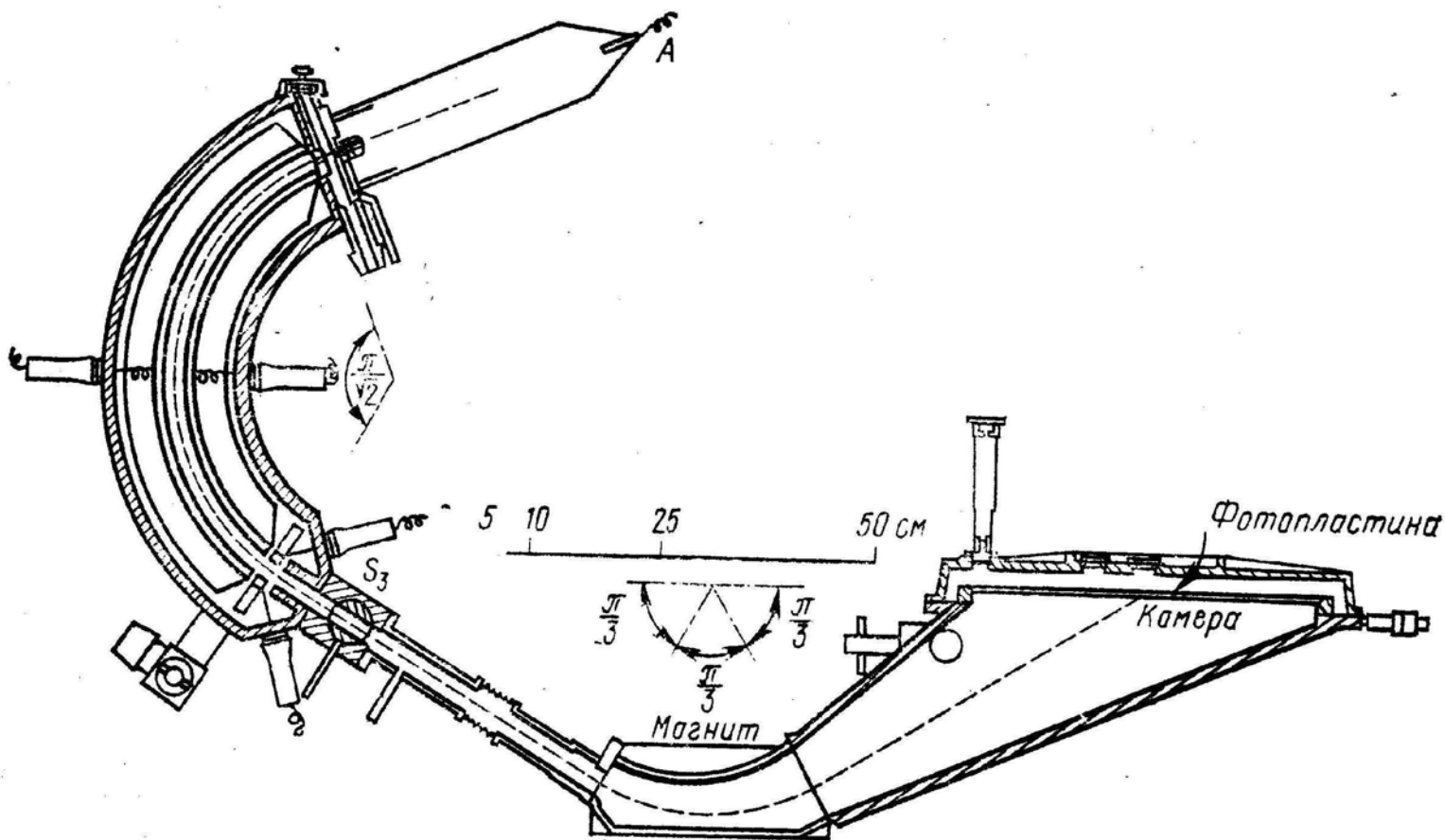


Рис. 68. Двухфокусный масс-спектрограф Бейнбриджа и Йордана

На рис. 68 схематично изображен двухфокусный масс-спектрограф, сконструированный учеными Гарвардского университета Бейнбриджем и Йорданом и являющийся, вероятно, наиболее совершенным из всех подобных приборов, которые были когда-либо созданы. Эта иллюстрация расположена в вертикальной плоскости, и, таким образом, массивный электромагнит, изображенный внизу рисунка, служит опорой всего прибора. Положительно заряженные ионы, необходимые для проведения опыта, генерируются в стеклянной газоразрядной трубке (верхний левый угол рисунка), а справа изображена фотографическая пластинка, обращенная светочувствительным слоем вниз. Вся система находится в высоком вакууме. Сначала электростатическое отклонение ионов достигается пропусканием их через изогнутый конденсатор, пластины которого представляют собой концентрические цилиндры, изогнутые под углом в $\pi/\sqrt{2}$ (127°) по отношению к первоначальному направлению движения ионов. Таким образом, конденсатор рассеивает поток ионов, незначительно отклоняя их от первоначальной траектории соответственно их энергии в энергетическом спектре. Далее они проходят сквозь широкое отверстие S_3 , преодолевают по прямой расстояние 44 см и, попадая в электромагнит, принимают форму конического луча и отклоняются на 60° (аналогично предыду-

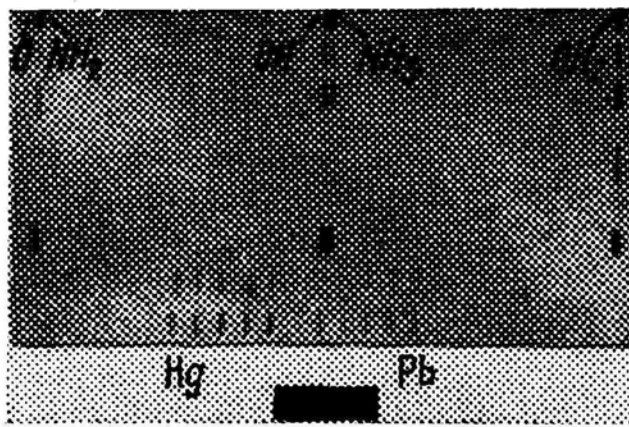


Рис. 69. Масс-спектр, полученный с помощью прибора Бейнбриджа и Йордана

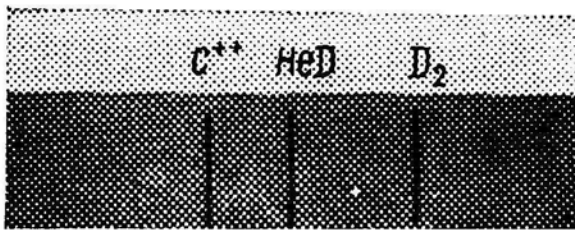


Рис. 70. «Согласованный триплет» с массовым числом 6 (X5)

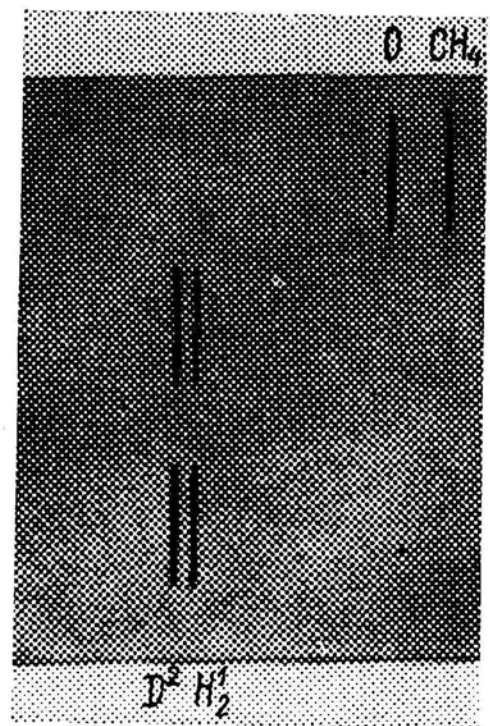


Рис. 71. «Согласованные дуплеты» с массовым числом 16 (сверху) и с массовым числом 2 (внизу) (X5)

щему отклонению на 127°). В результате этого опыта пучок ионов фокусируется на расположенной в масс-спектрографе фотопластинке прямо пропорционально (слева направо) отношению массы к заряду ионов. Разрешающая способность прибора оказалась настолько высока, что получившиеся фотографии можно было увеличить в пять раз без какой-либо потери резкости снимков. Для этого необходимо, чтобы путь, проходимый ионами, был равен 1,5 м и, кроме того, вакуум должен быть порядка $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.

На рис. 69 приведена фотография, полученная с помощью масс-спектрографа Бейнбриджа и Йордана. Центральный дуплет соответствует массовому числу 17, складывающемуся из OH^+ и NH_3^+ ; слева от него — массовое число 16 (O^+ и NH_2^+), а справа — массовое число 18 (OH_2^+). Расстояние между частями дуплета позволяет вычислить коэффициент Астона для азота и водорода. На нижней части рисунка показаны следы изотопов ртути (слева) и свинца (справа), полученные под воздействием двух полей — электрического и магнитного. Черный прямоугольник, расположенный под основным снимком, соответствует по ширине отдельной линии в ее первоначальном виде, т. е. без повторного фокусирования полученного спектра энергии с помощью магнита.

На рис. 70 воспроизведен пятикратно увеличенный снимок «согласованного триплета» с массовым числом 6, куда входят двухзарядный ион углерод а (слева), однозарядные трехатомные молекулы дейтерия — D_2 (справа) и атом дейтерия, примыкающий к атому гелия (в центре). На рис. 71 приведена подобная фотография для массового числа 16 (вверху). Этот снимок демонстрирует разницу в массе между атомом кислорода и молекулой метана (CH_4); что же касается нижнего дуплета, то он показывает разницу в массе между атомом дейтерия и молекулой водорода (H_2), имеющими массовое число 2.

Уже первый прибор, сконструированный Астоном, не уступал по точности самым совершенным методам определения химической атомной массы; все последующие приборы позволили произвести еще более точные измерения. И каждый, у кого хватит воображения постичь степень точности измерений, отображенных, например, на рис. 70 и 71, охотно согласится с тем, что масс-спектрограф, по всей видимости, является самым замечательным измерительным прибором, когда-либо созданным человеком.

Коэффициент Астона

Отклонение от целых чисел Астон назвал упаковочным коэффициентом. В наши дни, после того как был открыт нейтрон, этот термин вводит в заблуждение и нуждается в замене, поскольку масса нейтрона (1,009) превышает общую массу протона (1,008) и электрона (0,0005), а не уступает ей, тогда как в период введения данного термина считалось, что уменьшение массы объясняется уплотнением (например, гелия по сравнению с четырьмя атомами водорода). Астон умер в ноябре 1945 г., однако еще задолго до этого автор книги предпочитал применять термин *коэффициент Астона*, и нет сомнения в том, что в наши дни именно он и должен применяться. Под этим термином следует понимать малое отклонение от целых чисел — порядка 0,0001 массы изотопа. Их абсолютное значение до некоторой степени зависит от выбранного эталона, однако это не играет большой роли. На практике для этих целей за физический эталон берется кислород с массовым числом 16, соответствующим массе чистого изотопа, который преимущественно содержится в элементе. Отсюда из природной смеси трех изотопов (16, 17 и 18) и выводится химическая атомная масса, равная 16, 0043.

Общий порядок отклонения можно представить следующим образом. Для водорода коэффициент Астона относительно велик, затем он быстро уменьшается и, естественно, при массовом числе 16 равен 0. В дальнейшем он приобретает небольшое отрицательное значение, достигающее минимума при массе 55—60, вновь увеличивается до нуля при массе 207 (свинец), а для всех последую-

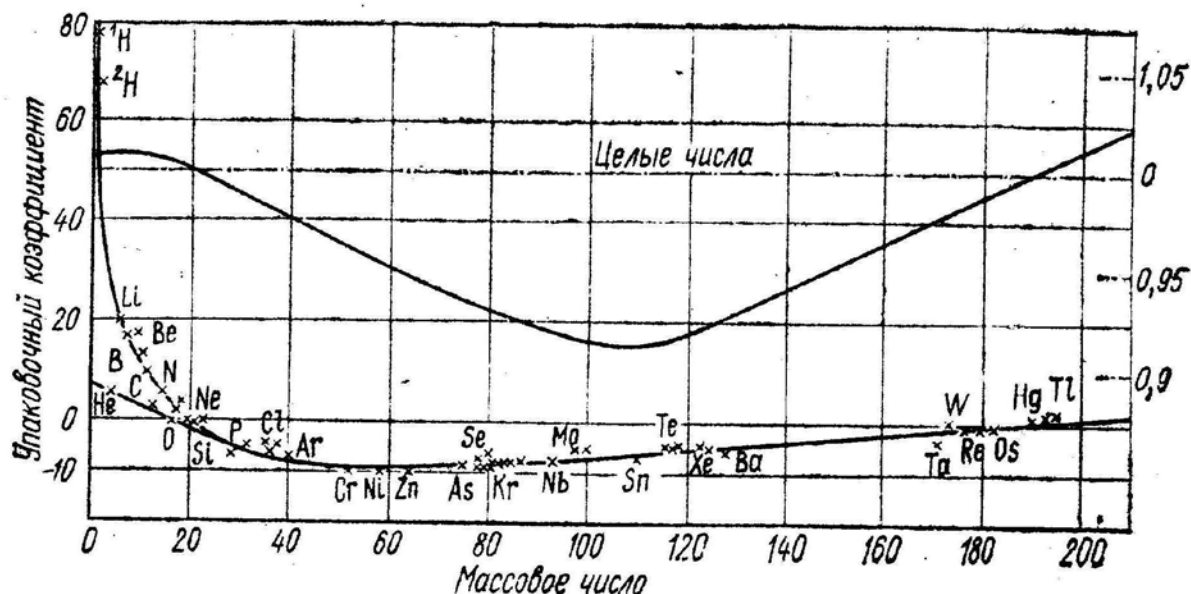


Рис. 72. Взаимосвязь между массовым числом и коэффициентом Астона

ших радиоактивных элементов опять имеет ярко выраженное положительное значение. Так, для урана множитель Астона равен $+3,7$, а для тория $+3,0$. Это означает, что при полном распаде этих элементов на свинец и гелий общий выход энергии равен соответственно 54 и $43,6$ Мэв, что вполне согласуется с результатами экспериментов.

На рис. 72 приведена диаграмма, отражающая взаимосвязь между массовыми числами и коэффициентом Астона. Нижняя кривая, относящаяся к левой вертикальной шкале, показывает выраженный в десятитысячных долях коэффициент Астона, показывающий отклонения массовых чисел, обозначенных делениями на горизонтальной шкале, от целочисленных значений. Для всех элементов, за исключением He, C и O (числа, кратные 4), кривая имеет почти гиперболическую форму. Пересекая нулевую отметку на уровне фтора (массовое число 19), она примерно с этой точки круто уходит влево вверх в направлении водорода, а в направлении направо достигает своей самой низкой точки на уровне элементов группы железа. Далее кривая медленно поднимается вправо, достигая нуля на уровне ртути и переходя в область положительных значений для радиоэлементов (они в диаграмму не включены). Верхняя кривая относится к правой шкале, являющейся для нее вертикальной осью, и показывает фактические отклонения точных масс изотопов от целочисленных значений, причем правая часть кривой имеет весьма приблизительный характер.

Внимание Астона привлек тот факт, что самая низкая точка первой кривой приходится на район железа (его некоторые ученые считают наиболее распространенным элементом на Земле), а вторая кривая ниже всего опускается на уровне олова, которое име-

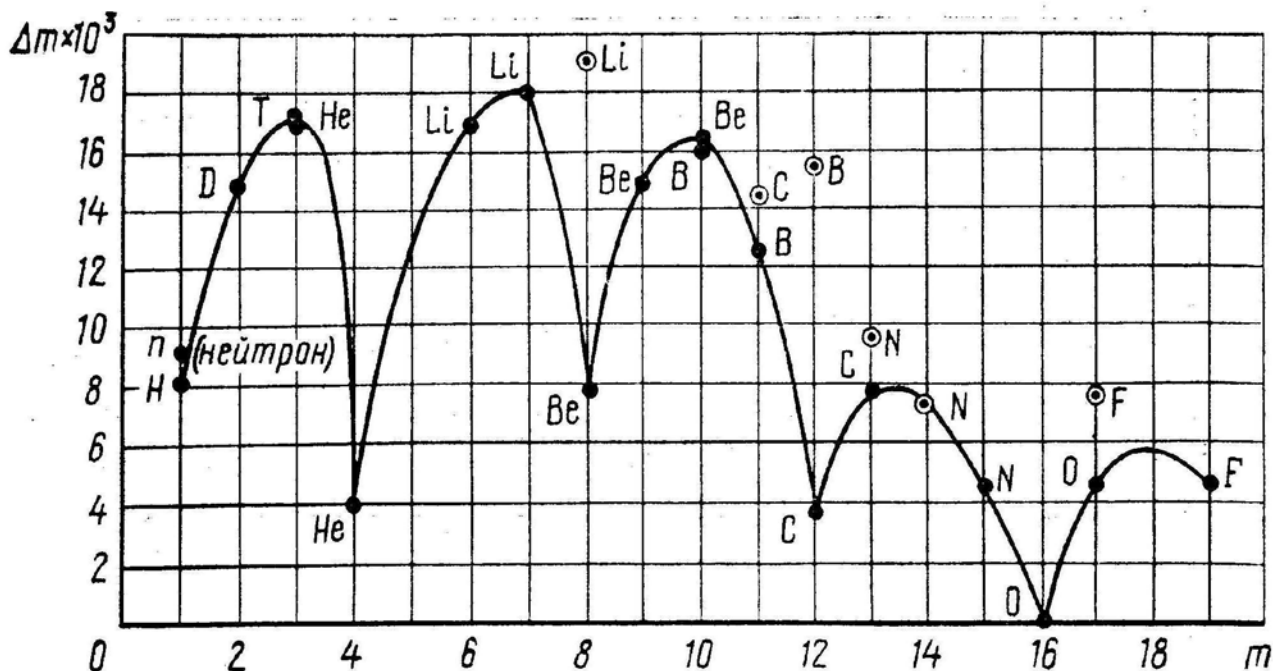


Рис. 73. Выведенная Олифантом кривая различий между массами изотопов и минимальными значениями коэффициента Астона

ет максимальное (по сравнению с другими элементами) число изотопов.

Если рассматривать график в обратном направлении, т. е. начиная со свинца, то мы увидим, что коэффициент Астона постепенно принимает отрицательные значения, достигая минимума (—10) где-то на уровне между хромом и никелем, а затем вновь доходит до нуля на уровне эталонного числа 16 (кислород). Начиная с этой точки бросается в глаза огромная разница в значениях коэффициентов Астона для нечетных и четных элементов. Значения его для нечетных азота +5,4; бора +11,7; лития +26; водорода +81,2; для четных элементов, за исключением бериллия, значение коэффициента Астона возрастает гораздо медленнее (углерод +3,2; бериллий +16,6; гелий +10,2). И вот эти-то малые значения и являются истинными путеводителями по лабиринтам современной алхимии.

Олифант доказал, что если обрисованную нами вкратце взаимосвязь между массовыми числами и коэффициентом Астона с большой точностью изобразить в виде кривой, то ее минимумы совпадут с массовыми числами, кратными 4. В этом заключается одно из многочисленных свидетельств того, что гелий, по крайней мере, потенциально или в «зачаточной» форме является составной частью ядра атома. На рис. 73 изображена выведенная Олифантом кривая различий между массами изотопов и минимальными значениями коэффициента Астона для элементов с массовыми числами, большими 20 и кратными 4. Большие кружки на этом рисунке соответствуют нестабильным атомам. Особое внимание следует

обратить на положение нестабильного изотопа лития с массовым числом 8, характерное для элементов с наибольшим запасом энергии.

Необходимо также отметить, что коэффициент Астона для водорода является наивысшим. В частности, он более чем в три раза превышает следующий за ним коэффициент для лития, который, в свою очередь (за исключением бериллия), в два раза больше третьего по значению коэффициента для бора. А коэффициент Астона самого бора в два раза больше, чем любого другого элемента. Этого оказалось вполне достаточно для того, чтобы в качестве наиболее доступных объектов осуществления искусственной трансмутации выделить легкие элементы с нечетным атомным числом, а также бериллий. И вскоре правильность этого вывода была подтверждена на практике.

Первая искусственная трансмутация

28 апреля 1932 г. на заседании Королевского общества Резерфорд объявил о том, что сотрудники Кавендишской лаборатории Дж. Д. Кокрофт и Е. Т. С. Уолтон успешно осуществили расщепление ядер атомов лития и других легких элементов с помощью протонов, искусственно полученных в условиях высокого электрического напряжения.

Тогда наиболее удивительным казалось, что для этого потребовалось сравнительно невысокое напряжение. Установленный для проведения опыта генератор мог обеспечить напряжение порядка 750 кВ, однако процесс расщепления начался уже при напряжении, в шесть раз меньшем. Правда, позднее, заменив протоны дейтонами (атомами изотопа водорода с массой 2), Резерфорд отодвинул точку начала реакции на уровень 20 — 40 кВ — напряжение, которое вполне может быть обеспечено небольшим индуктором для генерирования рентгеновского излучения.

Для генерирования протонов использовалась изготовленная с расчетом на высокое напряжение заполненная водородом электронная лампа продолговатой формы. На выходе лампы находилось окошко из тончайшего слоя слюды, проникая сквозь которое протоны сталкивались с атомом бомбардируемого элемента. Было подсчитано, что скорость протонов достигала $\frac{1}{30}$ скорости света, а длина их пробега в воздухе равна всего 1 см. За бомбардируемым веществом следили по мерцанию сернистого цинка сквозь экран, поглощавший протоны. При напряжении 125 кВ начали появляться яркие мерцания, абсолютно схожие с теми, которые вызывались самыми быстрыми из обычных α -частиц тория. По мере увеличения напряжения увеличивалось и количество мерцаний, однако при этом длина пробега протонов и яркость оставались без из-

менений. При напряжении 400 кВ было насчитано несколько сот мерцаний в минуту. При напряжении 250 кВ одно мерцание приходилось примерно на 1 млрд. протонов.

Расщепление ядра лития

Следует, однако, отметить, что кинетическая энергия протона в шесть раз уступает энергии образующихся α -частиц. Именно это обстоятельство и позволило сделать вывод, что протоны только способствовали началу реакции и высвободили энергию из ядра атома лития. Было также доказано, что мерцания вызываются различными α -частицами с энергией 8,76 Мэв, которые практически аналогичны α -частицам, испускаемым торием и проходящим в воздухе расстояние 8,6 см; они несколько быстрее α -частиц радия с пробегом 7 см. Несмотря на то, что в наши дни термин *расщепление* приобрел специфическое значение и применяется для обозначения нового вида распада, претерпеваемого при определенных обстоятельствах атомами урана и тория, описанный нами процесс искусственного распада лития все же представлял собой ярко выраженное расщепление.

Ядро лития с массовым числом 7 соединяется с протоном, массовое число которого равно 1. При этом сразу же образуется неустойчивый изотоп бериллия с массовым числом 8, который мгновенно распадается на равные части и испускает две α -частицы, или ядра гелия. В ходе этого процесса, т. е. при получении 8 г гелия из 7 г лития и 1 г водорода, происходит потеря примерно 0,00181 г, эквивалентная 17,1 Мэв; это объясняется тем, что значение коэффициента Астона для водорода и лития намного больше, чем для гелия. Такой результат вполне соответствует выводу, что каждая частица получает энергию 8,76 Мэв, особенно если прибавить кинетическую энергию бомбардирующего ее протона.

Кроме того, некоторые из неустойчивых ядер бериллия, полученных из лития, испускают перед расщеплением γ -фотон с энергией не меньше 17 Мэв (что в то время считалось беспрецедентной энергией для этого вида излучения); при самом же расщеплении, в результате которого образуются два атома гелия, выделяется относительно небольшое количество энергии. При бомбардировке дейтонами изотоп лития с массой 6 ведет себя примерно так же, как и изотоп этого элемента с массой 7 при нейтронной бомбардировке, но при этом высвобождается даже большее количество энергии, а именно 22 Мэв.

Выделение энергии из лития

Интересно отметить, что при одинаковых массах энергия, равная 17 Мэв, в десять раз превышает энергию полного распада урана и тория в свинец и гелий, если этот распад происходит естест-

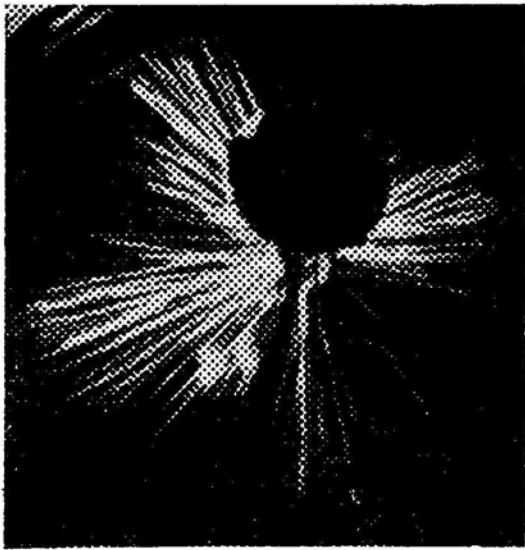


Рис. 74. Бомбардировка лития протонами

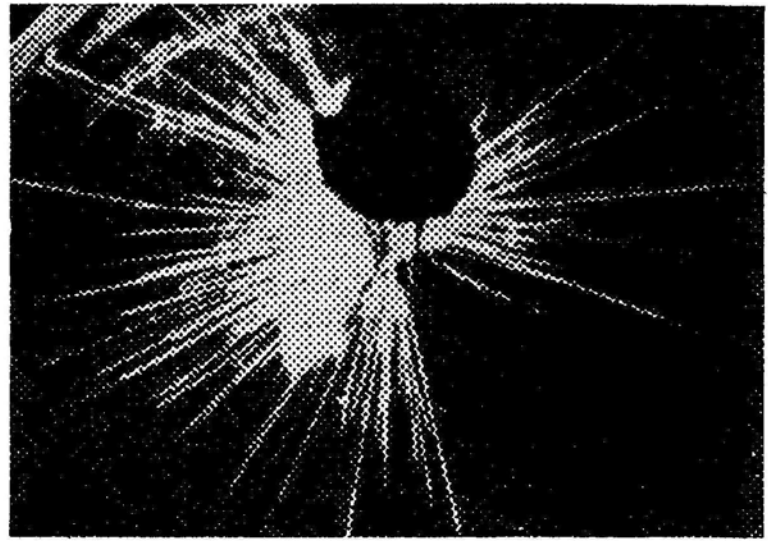


Рис. 75. Бомбардировка лития дейтонами

венным путем, и в два раза превышает энергию, выделяющуюся при их искусственном делении (следует, однако, сделать оговорку, что в последнем случае делению подвергается менее 1% всей массы вещества). В процессе синтеза гелия из водорода, рассмотренном выше, выделяется в четыре раза больше энергии, чем при расщеплении лития. Однако, если оставить в стороне эти случаи, можно с уверенностью сказать, что, расщепляя литий протонами или дейтонами, можно получить при прочих равных условиях больше энергии, чем при каком-либо другом доступном трансмутационном изменении (речь, естественно, не идет о полной аннигиляции вещества и превращении его в энергию). По мнению автора, если когда-либо атомная энергия и войдет в нашу повседневную экономическую жизнь, то произойдет это за счет крупномасштабной искусственной трансмутации легких, а не тяжелых элементов, которая уже осуществлена на практике. (Следует, однако, признать, что сегодня мы, насколько известно, так же далеки от этой цели, как и в 1932 г.) Такой вывод основан на том, что в ходе рассмотренных нами первоначальных исследований похожие результаты были получены по бериллию, бору, углероду, фтору и алюминию, хотя, как и следовало ожидать, длина пробега частиц, выбитых из этих элементов, гораздо меньше, чем у лития, и для осуществления их трансмутации требуется намного большее напряжение.

На рис. 74 и 75 воспроизведены фотографии, полученные с помощью камеры Вильсона Ди и Уолтоном и иллюстрирующие процесс искусственной трансмутации лития. На рис. 74 изображена бомбардировка литиевой мишени протонами. В данном случае изотоп лития с массой 7 соединяется с протоном и образует неустойчивый изотоп бериллия с массой 8, который, в свою очередь, рас-

падает на две α -частицы с одинаковой длиной пробега. На рис. 75 показана бомбардировка лития дейтонами. Здесь изотоп лития с массой 6 соединяется с дейтонами, образуя, как и при бомбардировке протонами, неустойчивый изотоп бериллия, который распадается на две α -частицы, проходящие в воздухе расстояние 13 см; при этом выделяется гораздо больше энергии, чем в первом случае. Как видно из фотографии, иногда бывает и так, что один из нейтронов, входящих в дейтон, соединяется с ядром лития, при этом образуется изотоп с массовым числом 7 и испускается протон, который, пересекая камеру, оставляет более слабый след. Что же касается изотопа с массовым числом 7, то он образует нейтроны и α -частицы с различной длиной пробега (вплоть до 8 см), которые также хорошо видны на фотографии.

Таким образом, расщепление лития можно осуществить самыми различными способами, о которых мы, к сожалению, не имеем возможности рассказать здесь более подробно.

Глава десятая. НОВЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОТКРЫТИЯ И МЕТОДЫ

Чудесный год радиоактивности

Осуществление полностью искусственной трансмутации на уровне отдельного атома, только что рассмотренное нами на примере лития и других легких элементов, было тем рубиконом, который человечество, начиная с древнейших времен, безуспешно пыталось перейти. Однако оно явилось лишь одним из четырех великих открытий, сделанных в 1932 г., благодаря которым этот год был назван чудесным годом радиоактивности. Во-первых, помимо осуществления искусственной трансмутации был наконец-то обнаружен положительно заряженный электрон, или *позитрон*; в противоположность ему отрицательный электрон с тех пор получил название *негатрон**. Во-вторых, был открыт *нейтрон* — незаряженная элементарная частица с массой 1 (единица), которую можно рассматривать как нейтральное ядро, только без внешнего электрона. И наконец, был открыт изотоп водорода с массой 2, названный *тяжелым водородом*, или *дейтерием*, ядро которого, как считается, состоит из протона p и нейтрона n ; подобно обычному водороду, его атом имеет один внешний электрон. В следующем, 1933, году произошло еще одно открытие, которое в некотором роде (во всяком случае, по мнению первых исследователей атомной энергии)

* Ниже в книге всюду будет использован традиционный термин *электрон*. Термин «негатрон» не прижился в науке. — Прим. ред.

представляло наибольший интерес. Речь идет об открытии явления искусственной радиоактивности.

Большинство из этих открытий были сделаны с помощью описанных выше методов исследования отдельных атомов, хотя они для этого и не предназначались.

Электронная пара

Первым позитрон обнаружил сотрудник Калифорнийского технологического института Карл Андерсон. Позитрон предстал перед ученым в камере Вильсона в виде электронной пары в следах космического излучения, подвергнутого воздействию магнитного поля с целью вызвать отклонение заряженных частиц. Электронная пара оставляла за собой два совершенно аналогичных следа, отклонившиеся от своего общего первоначального пути в противоположных друг к другу направлениях, что было вызвано наличием у двух похожих как две капли воды электронов противоположных зарядов. После того как аналогичные результаты были получены англичанами Блэкеттом и Оккиалини, Андерсон продемонстрировал «земной» характер этого явления и доказал, что появление электронных пар является нормальным следствием взаимодействия достаточно мощного γ -излучения с атомами тяжелых элементов. Для любого γ -кванта с энергией, намного превышающей 1 Мэв (рассматриваемой как критическая энергия), количество появляющихся электронных пар возрастало пропорционально квадрату атомного номера, или ядерного заряда облучаемого элемента. Как и нейтрон, позитрон оказался трудноуловимой частицей, поскольку он легко соединяется с электронами или с ядрами. Поэтому в свободном состоянии он менее долговечен, чем даже электрон.

Расщепление фотона

Считается, что соединение позитрона с электроном является результатом процесса, обратного тому, при котором позитрон был обнаружен, так как в зависимости от энергетических условий соотношение

$$\gamma\text{-квант} = e^+ + e^-$$

имеет обратимый характер. Энергетический эквивалент массы электрона равен 0,5 Мэв, поэтому для сохранения импульса необходимо, чтобы электроны генерировались парами, чем и объясняется тот факт, что критическая энергия производящего электронные пары γ -излучения равна 1 Мэв. Этот процесс нередко называют материализацией фотона, хотя его скорее следовало бы называть «электризацией» фотона. Если все это соответствует дейст-

вительности, то мы имеем дело с подлинной аннигиляцией массы, и наоборот, с ее появлением из энергии. По мнению автора, применительно к рассмотренным явлениям данное предположение звучит весьма обоснованно.

Создается впечатление, что современная физика с некоторым запозданием дает должную оценку тем фундаментальным и революционизирующим выводам, которые можно сделать из этой двусторонней связи, существующей между фотоном большой энергии и электронной парой. Вероятно, виной тому — внесенная в науку путаница по вопросу о различии между квантом действия и квантом энергии (или импульсом). Однако посторонний наблюдатель, которому, как известно, видна практически полная картина, рассматривает это открытие как одно из наиболее убедительных достижений в области изучения природы света и установления взаимоотношения между электричеством, материей и энергией. Дело в том, что, исходя из приведенного выше утверждения о природе кванта действия, согласно которому соединение (или слияние) положительного и отрицательного электрических зарядов осуществить на практике невозможно, вполне естественно было бы считать (как и делают в наши дни), что фотон похож на двойную звезду, состоящую из двух равных противоположных электрических зарядов, которые вращаются вокруг своего общего центра притяжения. И опять-таки, как говорилось выше, это объясняется волнообразной природой частицы, поскольку построенная таким образом система окружена электромагнитной волной, которая неотступно следует за ней. Видимо, этим обстоятельством объясняется и то, что волна состоит из частиц, а не из распространяющихся сферически импульсов.

Наблюдение за процессом расщепления вещества фотонами, обладающими высокой энергией, позволяет сделать важный вывод, заключающийся в том, что проникающая способность γ -излучения тяжелых элементов, которая вначале увеличивается пропорционально росту энергии этого излучения и достигает максимума при энергии 3 Мэв (это является практически наивысшим значением для γ -излучения природных радиоэлементов) и затем идет на убыль. Так, поглощение свинцом γ -излучения энергией 10 Мэв объясняется в основном данным процессом. Открытие этого эффекта сделало со временем недействительными многие предыдущие выводы о природе космического излучения.

Нейтрон

Нейтрон впервые наблюдали Боте и Беккер в 1930 г., причем произошло это при очень любопытных обстоятельствах. Ученые нашли, что при столкновении α -частиц полония с атомами лития, бора, и в особенности бериллия, возникает эффект, принятый ими

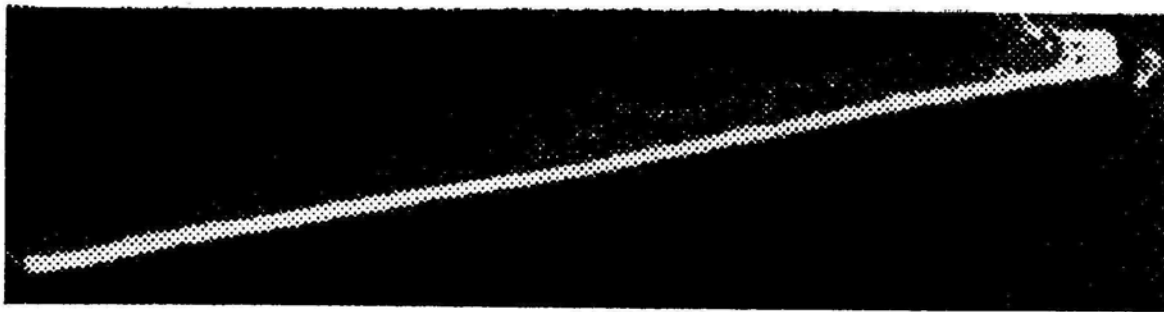


Рис. 76. Расщепление атома азота нейтронами

вначале за γ -излучение с беспрецедентной для того времени проникающей способностью: для уменьшения интенсивности излучения в два раза требовался слой свинца толщиной 2,5 см. Однако, повторив этот опыт, супруги Жолио (дочь и зять супругов Кюри) установили, что это излучение легко поглощается такими содержащими водород веществами, как парафин и вода, и выбивает из них быстрые протоны с длиной пробега в воздухе 26 см и энергией 4,3 Мэв. Затем, в 1932 г., Джеймс Чедвик обнаружил, что при столкновении с этими протонами ядра легких элементов резко отскакивают назад, и, благодаря интенсивному выделению энергии, за ними можно наблюдать по оставляемым ими следам в камере Вильсона. Именно Чедвик первый пришел к правильному выводу, согласно которому описанные выше эффекты вызываются не фотонами, а происходят благодаря выделению быстрых нейтронов.

Открытию нейтрона благоприятствовало то, что полоний испускает только α -частицы с довольно невысокой скоростью и небольшой длиной пробега, и если бы в качестве источника излучения использовался какой-либо другой элемент, то наблюдаемый крайне незначительный эффект, вероятно, был бы перечеркнут вторичными эффектами, производимыми более мощными излучениями, и, таким образом, остался бы неоткрытым.

На рис. 76 воспроизведен полученный профессором П. И. Динским с помощью камеры Вильсона. Оставленные нейтронами следы начинаются «ниоткуда», поскольку сам нейтрон дает след только в том случае, если на своем пути он сталкивается с атомом, который, отлетая после столкновения, ионизует окружающий газ. На снимке видна картина столкновения ядра атома азота с невидимым нейтроном, в результате чего ядро азота распадается на атом бора (оставляющий короткий след) и атом гелия, или α -частицу, оставляющую длинный след. Этот процесс можно условно записать в виде: ${}^{14}_7\text{N}(n, \alpha){}^{11}_5\text{B}$ (подробное объяснение дано ниже в данной главе).

Следует, однако, отметить, что еще за 12 лет до этого, в 1920 г., Резерфорд указал на возможность существования как

нейтрона, так и дейтона и с замечательной точностью предсказал их вероятные свойства. Он предвидел, что нейтрон — это лишенное электронов ядро массой 1 и нулевым зарядом, способное, благодаря своей незаряженности, проникать сквозь вещество и внешнее электронное окружение атомов, а следовательно, и сквозь стенки закупоренных сосудов; по мнению Резерфорда, нейтрон либо легко соединяется с ядрами других элементов, либо разрушает их, либо сам расщепляется в их интенсивном поле, испуская протон или электрон, а то и оба сразу. Как показала жизнь, все эти предсказания соответствовали действительности и, более того, они явились ключом к осуществлению трансмутации в широких масштабах.

И все же наряду с этим имеется одно немаловажное различие. Резерфорд считал, что по своему происхождению нейтрон представляет собой соединение протона с отрицательно заряженным электроном. В наши дни нейтрон считается элементарным протилом — мельчайшей составной частью всей материи, а под протоном принято понимать соединение нейтрона с позитроном. Такая точка зрения основывается на том, что масса нейтрона (1,009) больше массы протона и электрона, вместе взятых (соответственно 1,008 и 0,0005). В то же время, если придерживаться взглядов Резерфорда, то масса нейтрона должна уступать сумме масс протона и электрона, поскольку в таком случае происходило бы высвобождение энергии и потеря массы.

Новое ядро

Итак, только с открытием нейтрона и позитрона стало возможным правильно объяснить структуру ядра атома. Раньше, для того чтобы объяснить явление испускания радиоэлементами β -частиц, ученым приходилось исходить из предположения, что электрон, как и протон, является частью ядра. Вполне очевидно, что в таком случае масса M должна складываться из некоего количества протонов M , равного атомной массе, и — поскольку величина положительного заряда равна атомному номеру Z — из количества электронов, равного массовому числу минус атомный номер, т. е. $M - Z$. Получается, что у более тяжелых элементов количество электронов значительно превышает чистый положительный заряд, выраженный атомным номером. Но поскольку ядро ничтожно мало и устойчиво, эта точка зрения никогда не внушала особого доверия.

В наши дни не требуется предполагать, что в ядре вообще содержатся электроны. Ядро атома можно считать — и именно так оно и рассматривается — соединением протонов, равных по коли-

честву атомному номеру* Z , с таким количеством нейтронов, которое вместе с протонами составит атомную массу или массовое число M ; число нейтронов равно разнице между двумя числами ($M - Z$). Для более тяжелых элементов, по мере возрастания их массы, количество нейтронов все больше превышает количество протонов. Отсюда можно сделать вывод, что (по арифметическим причинам) именно поэтому ядерное деление, при котором высвобождаются свободные нейтроны, сделало искусственную трансмутацию вещества практически используемой, в то время как обычное искусственное расщепление до сих пор удавалось осуществить лишь для отдельных атомов.

Вместе с тем до сих пор подвергается сомнению правильность объяснения с этой точки зрения происхождения уже упоминавшихся выше β -частиц. Такое объяснение возможно, если предположить, что γ -квант, перед тем как покинуть ядро, претерпевает внезапное превращение, распадаясь на электрон (искускаемый как β -частица) и позитрон, который, соединяясь в ядре с нейтроном, образует протон. Однако существует и альтернативная точка зрения (выдвинутая теоретиком Г. Гамовым), согласно которой в ядре может существовать отрицательно заряженный протон — двойник известного ныне протона, находящийся к нему в таком же отношении, в каком позитрон находится к открытому ранее электрону. Данная гипотеза имеет некоторые преимущества, однако отрицательный протон пока еще никому не удалось открыть.

Может показаться, что автор слишком подробно остановился на чрезвычайно простых идеях, и все же читателю следует набраться терпения, поскольку их правильное восприятие значительно облегчит последующее рассмотрение современных взглядов на природу ядра.

Тяжелый водород

Переходя к вопросу об открытии тяжелого водорода, мы вновь возвращаемся к первоисточнику информации о массе ядра — изотопам. Однако в данном случае нам придется иметь дело с изотопом, никак непохожим по своим физико-химическим и физическим характеристикам на любой другой изотоп. Это отличие проявляется, в частности, в том, что по своим свойствам тяжелый водород настолько сильно отличается от простого водорода, что его можно сравнительно легко выделить в чистом виде. Как и предсказывал Резерфорд, тяжелый водород представляет собой атом, ядро которого состоит из протона и нейтрона (pn) и который, как и обычный атом водорода, имеет снаружи только один электрон.

* Здесь и ниже для обозначения порядкового номера элемента использован традиционный символ Z (Содди использовал N , ныне обозначающий число нейтронов в атоме). — Прим. ред.

Открытие тяжелого водорода произошло довольно любопытно и несколько напоминает историю открытия аргона. Первоначально соотношения атомных масс водорода и кислорода, полученных химическим и масс-спектрографическим анализом, практически полностью совпадали, однако это совпадение было обманчивым. Как известно, аргон обнаружили благодаря отклонениям от точного значения атомной массы азота (путем измерения его плотности: плотность азота, содержащегося в атмосфере, превышает плотность этого элемента в азотных соединениях). Что же касается тяжелого водорода, то своим открытием он обязан случайному соответствию результатов химического и физического методов определения атомной массы водорода по отношению к атомной массе кислорода.

Полосатые спектры изотопов

Нельзя не отметить, что, за исключением тяжелого водорода, идентичность свойств изотопов распространяется и на их линейчатые спектры (атомные спектры), которые настолько схожи, что с помощью обычных методов их невозможно отличить друг от друга. Однако совсем иначе обстоит дело с полосатыми—молекулярными—спектрами, так как в них массы составляющих молекулу атомов входят в величину, определяющую длину волны. В то время, когда масс-спектрограф еще не достиг своего нынешнего совершенства, полосатые спектры использовались для обнаружения ничтожно малого количества более тяжелых изотопов таких простых элементов, как углерод, азот и кислород, что невозможно было сделать с помощью существовавших тогда масс-спектрографов. Было установлено, что помимо основного изотопа с массовым числом 16 кислород содержит $1/500$ изотопа с массовым числом 18 и $1/2500$ изотопа с массовым числом 17. По аналогии с кислородом ученые пришли к выводу, что водород должен также содержать около $1/45000$ изотопа с массой 2, который способствовал бы достижению уже упомянутого близкого соответствия между химическим и физическим соотношением масс. Такое предсказание было сделано Бирге и Мензелем и почти сразу же, в 1932 г., было проверено на практике американским ученым Г. Юри, который обнаружил, что при электролизе воды тяжелый изотоп концентрируется в той ее части, которая не подвергается электролизу. Вплоть до начала второй мировой войны именно этим методом производилась на норвежских гидроэлектростанциях чистая тяжелая вода (D_2O), поступавшая в большом количестве в продажу для научных исследований.

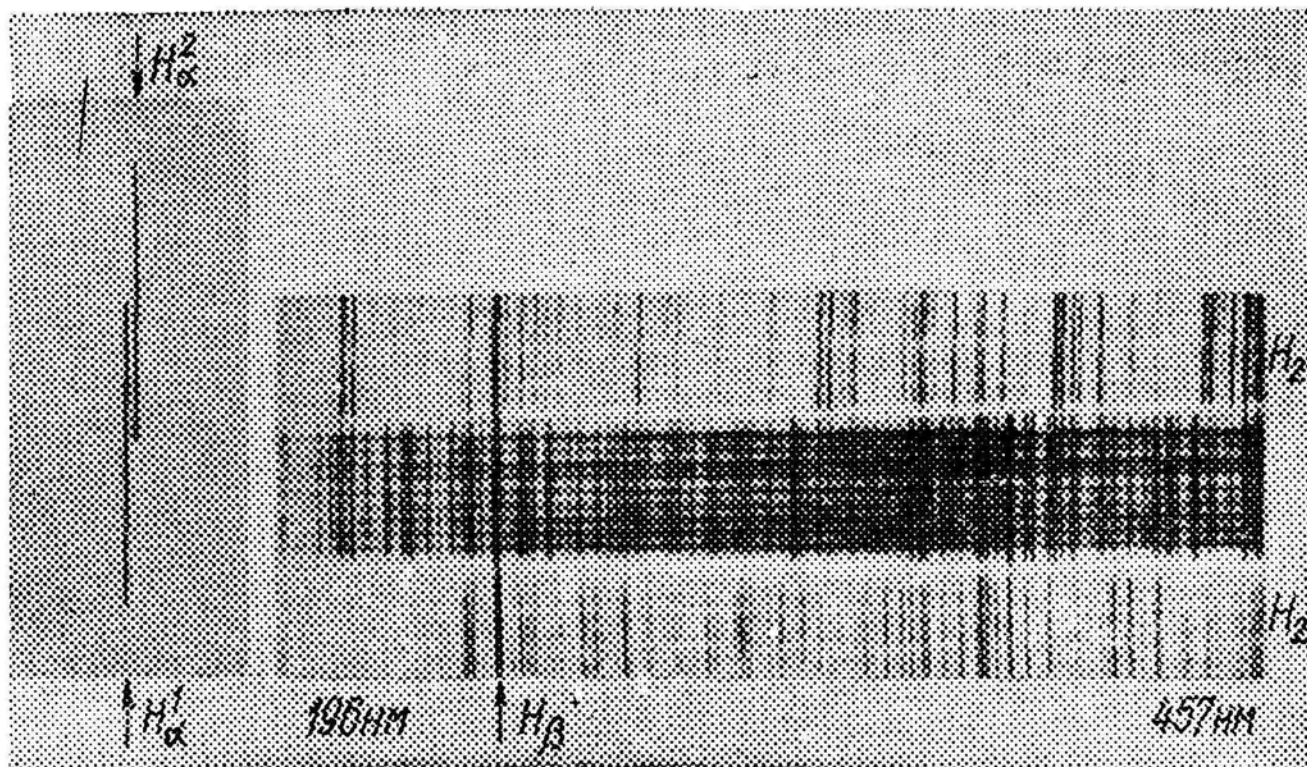


Рис. 77. Линейчатый спектр водорода (внизу) и дейтерия (вверху)

Свойства тяжелой воды

Тяжелая вода имеет температуру замерзания на $3,8^{\circ}\text{C}$ и температуру кипения на $1,2^{\circ}\text{C}$ более высокую, чем обычная вода; ее максимальная плотность выше на 10% , причем достигается такая плотность при температуре $11,5^{\circ}\text{C}$, а не 4°C , как у обыкновенной воды. Но особый интерес представляет небольшое, но хорошо заметное смещение полосатого спектра D к фиолетовой области спектра обычного водорода. Более того, это смещение находится в полном соответствии с очень простым расчетом из теории водородного спектра Бора, принимающей во внимание смещение центра тяжести атома, вокруг которого вращается электрон. Полосатый спектр дейтерия полностью отличен от спектра обычного водорода, а 50% -ная смесь этих двух элементов демонстрирует не только спектры двух чистых веществ D—D и H—H, но и третий, такой же сильный, спектр, соответствующий молекуле D—H. На полосатые спектры, как на способ изучения изотопов, впервые обратили внимание именно после того, как эта бросающаяся в глаза разница спектров была замечена у хлора — первого из обычных элементов, подвергнувшегося разложению на масс-спектрографе.

Наиболее ценным свойством дейтона является его способность выступать в роли бомбардирующего агента, вызывающего трансмутацию. Выступая в этой роли при искусственном расщеплении, он действует как разорвавшийся снаряд, а не как дробь, зачастую распадаясь на составляющие его компоненты; причем один из

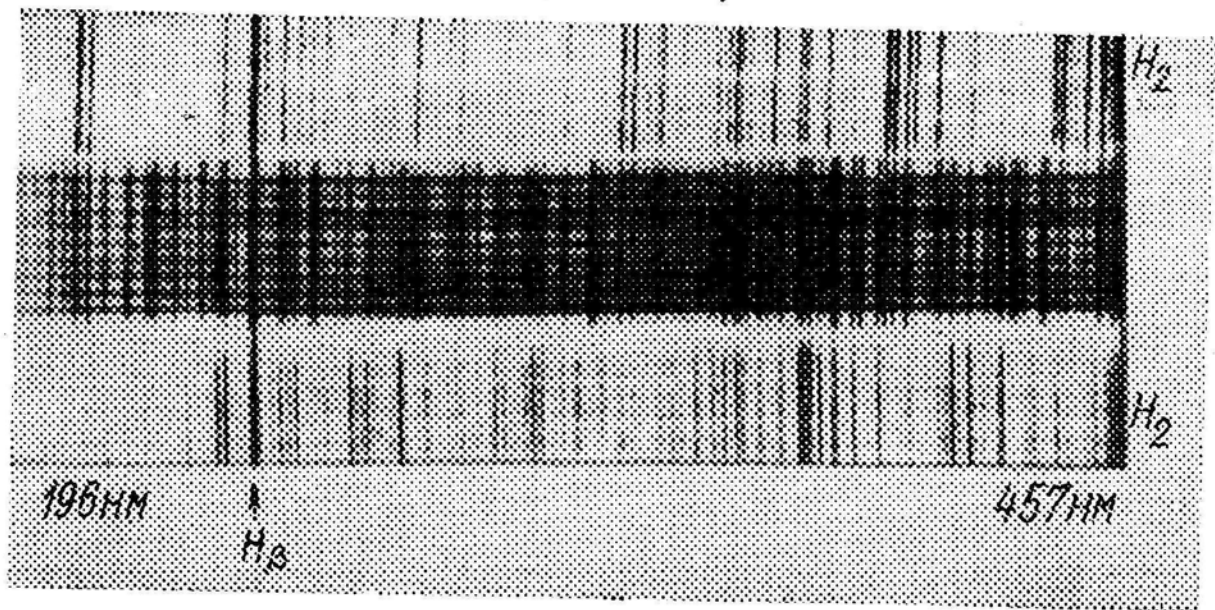


Рис. 78. Полосатые спектры водорода (вверху), дейтерия (внизу) и 50%-ной смеси этих элементов (в центре)

них — либо протон, либо нейтрон — может соединиться с бомбардируемым ядром, а другой выталкивается.

На рис. 77 красная линия, или α -линия, спектра водорода сопоставляется с аналогичной линией для дейтерия. Вторая из них смещена в направлении фиолетовой области на $1,78 \text{ \AA}$ (это значение точно вычислено по теории Бора как результат смещения общего центра тяжести ядра и электрона). Обе линии легко поддаются разрешению обычным спектроскопом. На рис. 78 изображены полосатые спектры двухатомной молекулы H_2 . Верхний спектр соответствует обычному водороду, нижний — чистому дейтерию; средний спектр — 50%-ной смеси этих двух элементов — помимо уже упомянутых двух спектров имеет еще и третий, соответствующий H-D , в молекулу которого входит по одному атому каждого элемента. Оригиналы снимков, воспроизведенных на рис. 77 и 78, были сделаны немецким исследователем Г. Герцем, который впервые применил диффузию для выделения газообразных изотопов и значительно усовершенствовал уже известные методы решения данной задачи.

Водород и энергия при абсолютном нуле

Следует, однако, отметить, что различия, существующие между химическими и физическими свойствами изотопов водорода, нельзя объяснить только относительной разницей их масс (от 2 до 1), поскольку эта разница намного больше, чем в любом другом случае. Как отметил Поляньи, они скорее принадлежат к области квантовой механики, которая исходит из идентичности хи-

мических свойств двух атомов. Причиной этого является так называемая энергия абсолютного нуля (в данном случае имеется в виду энергия соединения, а не свободного атома), т. е. энергия колебаний при температуре, равной абсолютному нулю. Энергия возрастает по мере увеличения в молекуле сил притяжения, объединяющих атомы в молекулу, а также по мере уменьшения масс атомов. Оба эти фактора увеличивают частоту данных колебаний и, следовательно, квант энергии $h\nu$, соответствующий кванту действия. Из этого вытекает, во-первых, что разница в количестве энергии (при абсолютном нуле) возрастает не как относительное соотношение масс двух изотопов, а примерно как их квадрат, благодаря чему для изотопов водорода — в отличие от всех других изотопов — этот эффект имеет столь большое численное выражение; во-вторых, при выделении в чистом виде изотопов по последовательно проявляющимся мельчайшим различиям в их физико-химическом поведении легче всего отделить соединения, на образование которых из элементов уходит наибольшее количество тепла. Так, для водорода это фторид или хлорид, а не иодид. В наши дни используются гораздо более совершенные методы выделения изотопов водорода, чем те, что практиковались в период, когда производство изотопов в коммерческих целях еще только начиналось.

Система записи ядерных реакций

Необходимо пояснить простую стенографическую символику, с помощью которой современные ученые описывают изменения, происходящие в ядре. Вплоть до того момента, как получило признание деление ядра (а это произошло всего за один-два года до начала второй мировой войны), был известен лишь один вид ядерных изменений, а именно превращение (под воздействием налетающей заряженной частицы или нейтрона) одного ядра в другое с испусканием или без испускания при этом излучения или частицы. Этот процесс описывается четырехзначной символикой, в которой букв p , n , d , ν , β , γ , e^+ , e^- вполне достаточно для обозначения всех происходящих изменений. Ядра обозначают химическими символами элементов; слева от символа записывают два числа: верхнее соответствует массовому числу (M), нижнее — атомному номеру, или положительному ядерному заряду (Z).

Таким образом, произведенное впервые Резерфордом расщепление ядра азота α -частицами с испусканием протона и образованием ядра кислорода с массовым числом 17 можно записать в этих символах так: ${}^1_7\text{N} (\alpha, p) {}^{17}_8\text{O}$. В скобках, находящихся между символами двух ядер, заключены расщепляющая частица и испускаемая частица, если таковая имеется.

Суть заключается в том, что реагирующие частицы в левой части и две получаемые частицы в правой части должны быть в сумме равны как по заряду, так и по массе. В данном случае отношение масс будет: $14+4=17+1$, а отношение положительных зарядов: $7+2=8+1$. По этой символике электрон, естественно, рассматривается как частица, обладающая зарядом -1 , а заряд нейтрона равен 0.

К 1945 г. ученым уже было известно свыше 400 первичных и 200 вторичных превращений, что и привело к созданию такой стенографической символики. Уже рассмотренное нами превращение бериллия, при котором впервые был открыт нейтрон, можно представить как ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n) {}^{12}_6\text{C}$, т. е., если следовать закону сохранения массы и заряда, мы должны будем признать, что в результате этого превращения получается углерод, поскольку соотношение масс и зарядов соответственно удовлетворяет равенствам: $9+4=12+1$ и $4+2=6+0$. Эти законы сохранения массы и заряда позволяют чрезвычайно просто описать превращение элементов. Вот чего вскоре после 1932 г. достигла наука, которую современные физики называют ядерной физикой!

Однако законы сохранения массы и заряда не имеют ничего общего с какой-либо специальной теорией атома, ядра и т. д. Сохранение электрического заряда, равно как и массы, при атомном превращении впервые показал именно закон радиоактивного смещения; объединение Эйнштейном законов сохранения массы и энергии также не вытекает из теории вещества. При наличии точных сведений об изотопической массе этот последний закон позволяет сразу же определить энергию, которая поглощается или высвобождается при любом превращении.

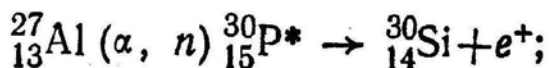
Таким образом, рассмотренный нами четырехзначный символизм является, вероятно, более концентрированным и информативным, чем любой другой.

Искусственная радиоактивность

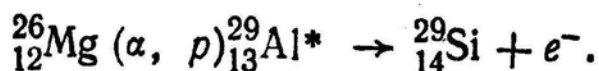
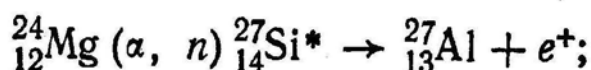
Возвратимся теперь к открытию в 1933—1934 гг. искусственной радиоактивности. Для одного из первых исследователей этой проблемы — М. Кюри — данное открытие представляло еще особый интерес: оно было сделано ее дочерью и зятем. М. Кюри имела счастье за несколько месяцев до своей смерти передать зажженный ею факел членам своей семьи. Предмет, который она превратила из диковины в колосс, через четверть века находился на пороге того, чтобы обрести новую, плодотворную жизнь.

Изучая упомянутый эффект Боте и Беккера, супруги Жолио обнаружили, что счетчик продолжал регистрировать импульсы даже после того, как был удален полоний, первоначально возбуж-

давший их. Эти импульсы прекращались точно таким же образом, как импульсы неустойчивого радиоэлемента с периодом полураспада 3 мин. Ученые установили, что алюминиевое окошко, через которое проходило α -излучение полония, само становилось радиоактивным благодаря генерируемым нейтронам; аналогичный эффект имел место для бора и магния, только наблюдались другие периоды полураспада (соответственно 11 и 2,5 мин). Реакции для алюминия и бора выглядели следующим образом:



где звездочки обозначают, что ядра, полученные сначала, радиоактивны и претерпевают указанные стрелками вторичные превращения, в результате которых образуются хорошо известные устойчивые изотопы кремния и углерода. Что же касается магния, то все три его изотопа (с массовыми числами 24, 25 и 26) участвуют в этой реакции, генерируя нейтроны, протоны, позитроны и электроны; в результате образуются хорошо известные устойчивые изотопы алюминия и кремния (превращения носят комбинированный характер):



Более того, с помощью обычных химических методов, используемых в радиохимии, удалось достаточно легко идентифицировать неустойчивые радиоактивные фосфор и азот.

Эти первые результаты демонстрировали богатство возможностей, открываемых вновь полученными данными. В дальнейшем мы будем использовать их в качестве иллюстрации тех несложных общих принципов, на которых, как теперь известно, основаны ядерные реакции.

Электротехника высокого напряжения

Однако прежде нам необходимо остановиться на освещении тех огромных достижений в области техники высокого напряжения, которые позволили быстро оставить далеко позади казавшиеся до тех пор недостижимыми уровни энергии, присущие природным радиоактивным элементам (мы уже видели, максимальная их

энергия обычно не превышает 4 Мэв для однозарядных частиц и 8 Мэв — для двухзарядных). Были значительно улучшены старые электростатические методы генерирования тока высокого напряжения с помощью так называемых фрикционных и индукционных машин; были усовершенствованы используемые в промышленных целях трансформаторы переменного тока высокого напряжения. Следует, однако, отметить, что, хотя, работая с этими приборами, ученые и не ставят перед собой цели получить искусственную молнию, иногда она вспыхивает и этого трудно избежать. Чтобы исключить попадание электрического разряда в стены, крышу или землю, необходимо для такого генератора просторное здание. На практике это резко ограничивает использование таких аппаратов, позволяя получать на них напряжение не более 1—2 млн. в. Они по-прежнему используются для проведения некоторых исследований, однако, если необходимо получить только напряжение, вместо них сейчас намного чаще применяют циклотрон.

Циклотрон

Это в высшей степени оригинальная машина, усовершенствованная Е. О. Лоуренсом из университета Беркли в Калифорнии. Если оставить в стороне вопрос о стоимости циклотрона, единственным недостатком его можно считать то, что по мере роста скорости положительных ионов увеличивается их относительная масса. Думается, однако, что этот недостаток вполне преодолим. Циклотрон генерирует эти, обладающие высокой скоростью, положительные ионы сначала непосредственно внутри разреженной камеры, которая имеет форму плоской цилиндрической коробки, находящейся между двумя полюсами огромного электромагнита. Аппарат начинает работать, используя высокочастотный переменный ток такого напряжения, при котором другие приборы выходят из строя. Затем этот потенциал может быть многократно увеличен (надо отметить, что такие результаты удалось достичь только на последней модели этого аппарата). Десять лет назад с помощью циклотрона можно было получить протоны и дейтоны энергией 6 Мэв. Следующий, более мощный циклотрон позволил довести энергию протонов и дейтонов до 17 Мэв. Смело можно сказать, что эта энергия достигла бы 100, если бы удалось завершить до начала войны строительство циклотрона, на которое Институт Рокфеллера отпустил 1 млн. долларов (один только электромагнит ускорителя весит 5000 т). Однако эти средства пошли на создание атомной бомбы, а циклотрон, насколько известно автору, до сих пор так и не закончен. На рис. 79 изображена плоская круглая коробка, рассеченная на две половины (называемые дуантами), внутри которых генерируемые положительные ионы движутся по спирали от центра к краю. Каждый раз, пересекая пространство

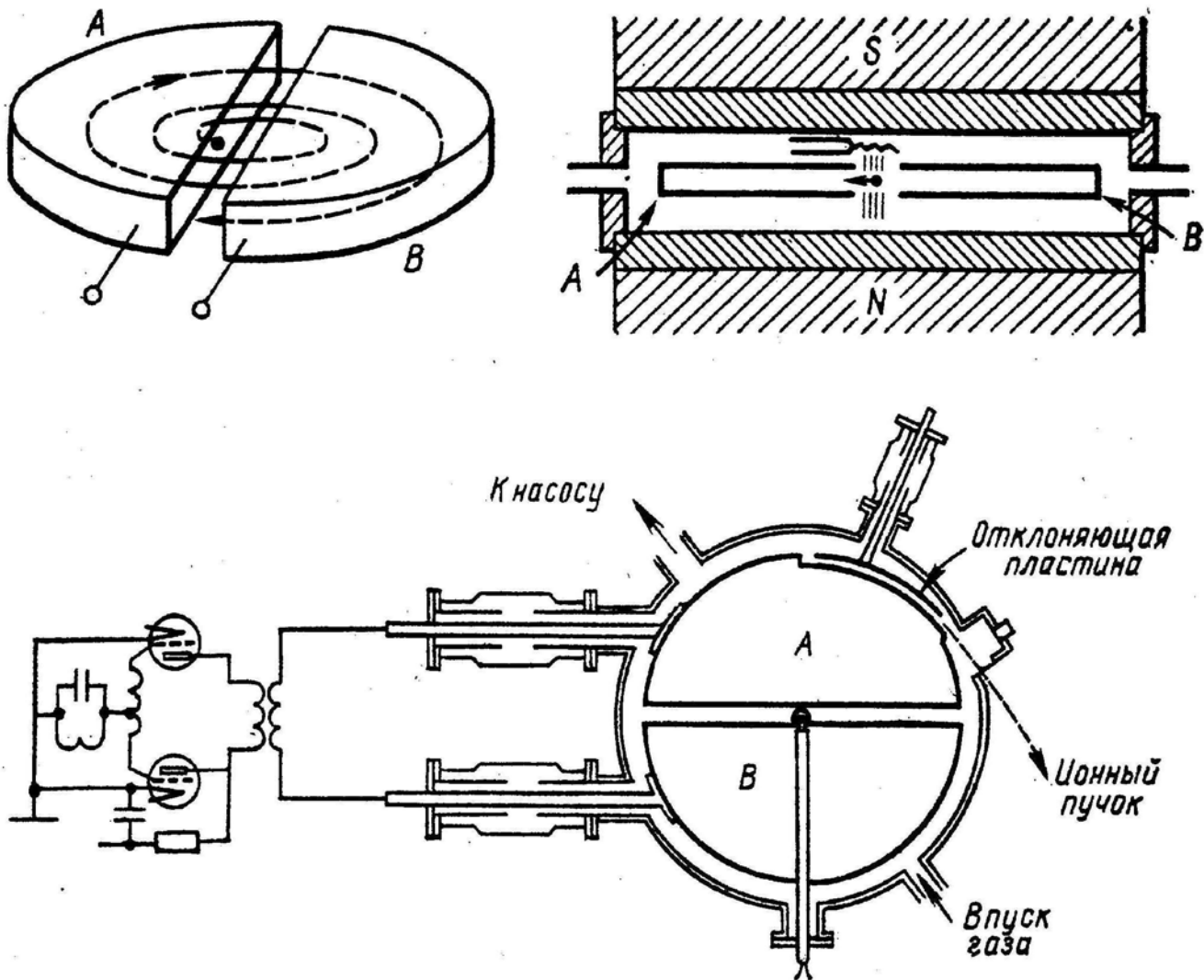


Рис. 79, 80, 81. Схемы, иллюстрирующие принцип действия циклотрона

между дуантами, ионы ускоряются. На рис. 80 показаны дуанты *A* и *B*, расположенные между полюсами электромагнита. На рис. 81 изображена схема (вертикальная проекция) подвода тока высокого напряжения к дуантам *A* и *B*; мы видим также имеющую сильный отрицательный заряд отклоняющую пластину, с помощью которой пучок ионов выводится из аппарата сквозь тонкое слюдяное окошко. Рис. 79, 80 и 81 взяты из книги Дж. Бартона Хоуга «Электрон и ядерная физика»*.

Основной частью циклотрона является огромный электромагнит, в узком пространстве между расположенными горизонтально один над другим дискообразными полюсами которого находится вакуумная камера. Почти в самом центре этой камеры генерируются требуемые положительно заряженные ионы. Если бы на ионы воздействовал только электромагнит, то они просто вращались

* Barton Hoag J. Electron and Nuclear Physics. Chapman and Hall, Limited, 1938.

бы по малой орбите в горизонтальной плоскости. Однако, сделав пол-оборота, они проходят между проводниками, обладающими большим зарядом и соединенными с противоположными полюсами генератора переменного высокочастотного тока, которые ускоряют ионы (причем всегда в одном и том же направлении), заставляя их двигаться по расширяющейся спирали от центра к периферии со всевозрастающей скоростью. Это достигается синхронизацией частоты переменного тока таким образом, чтобы при каждом прохождении ионами половины пути полярность в пространстве между дуантами изменялась, что вполне осуществимо на практике благодаря постоянному времени вращения ионов (если не брать в расчет относительности этого процесса). При движении ионов по расширяющейся спирали увеличение их скорости полностью компенсируется с увеличением проходимого ими пути. Достигая периферии, ионы электростатически отклоняются и сквозь тончайшее окошко вылетают из аппарата. Дейтоны энергией 16 Мэв достигают скорости 25 000 миль в секунду (примерно 1/7 скорости света) и в виде светящегося луча проходят в воздухе расстояние 1,5 м. Как уже говорилось, для ионов гелия, или α -частиц, эта энергия вдвое больше.

Таким образом удалось искусственно достичь новых уровней энергии, которые настолько превосходят возможности природных радиоэлементов, что последние теперь кажутся относительно слабыми. Как следствие этого, протоны, нейтроны, дейтоны и α -частицы значительно более высоких энергий стали в последнее время доступными для научных исследований в гораздо больших количествах, чем ранее.

На рис. 82 и 83 изображен 220-т циклотрон университета Беркли в Калифорнии с полюсами диаметром 1,5 м (на рис. 82 — та сторона аппарата, откуда выходит пучок). Физик, регулирующий на рис. 82 приборы управления, — д-р Н. Джон Уолк из Ливерпульского университета. Он был убит электрическим разрядом во время работы с аппаратом 21 декабря 1939 г. в возрасте 28 лет. С левой стороны на платформе — алюминиевый приемник пучка. На рис. 83 изображена сторона аппарата, куда пучок поступает по двум сходящимся трубам. Выступающая часть в левой стороне снимка — щит, предохраняющий исследователей от поступающего на отклоняющую пластину тока высокого напряжения. В углу, расположенном по диагонали к тому месту, где стоял д-р Уолк (см. рис. 82), мы видим профессора Принстонского университета Мильтона Уайта. На рис. 84 показан пучок дейтонов энергией 16 Мэв и скоростью 25 000 миль в секунду, который после выхода из аппарата преодолевает в воздухе расстояние около 1,5 м. Фотографии, с которых воспроизведены рис. 82—84, были сделаны и предоставлены в распоряжение автора д-ром Дональдом Кукси, заместителем директора Радиационной лаборатории им. Вильяма Г. Крокера.

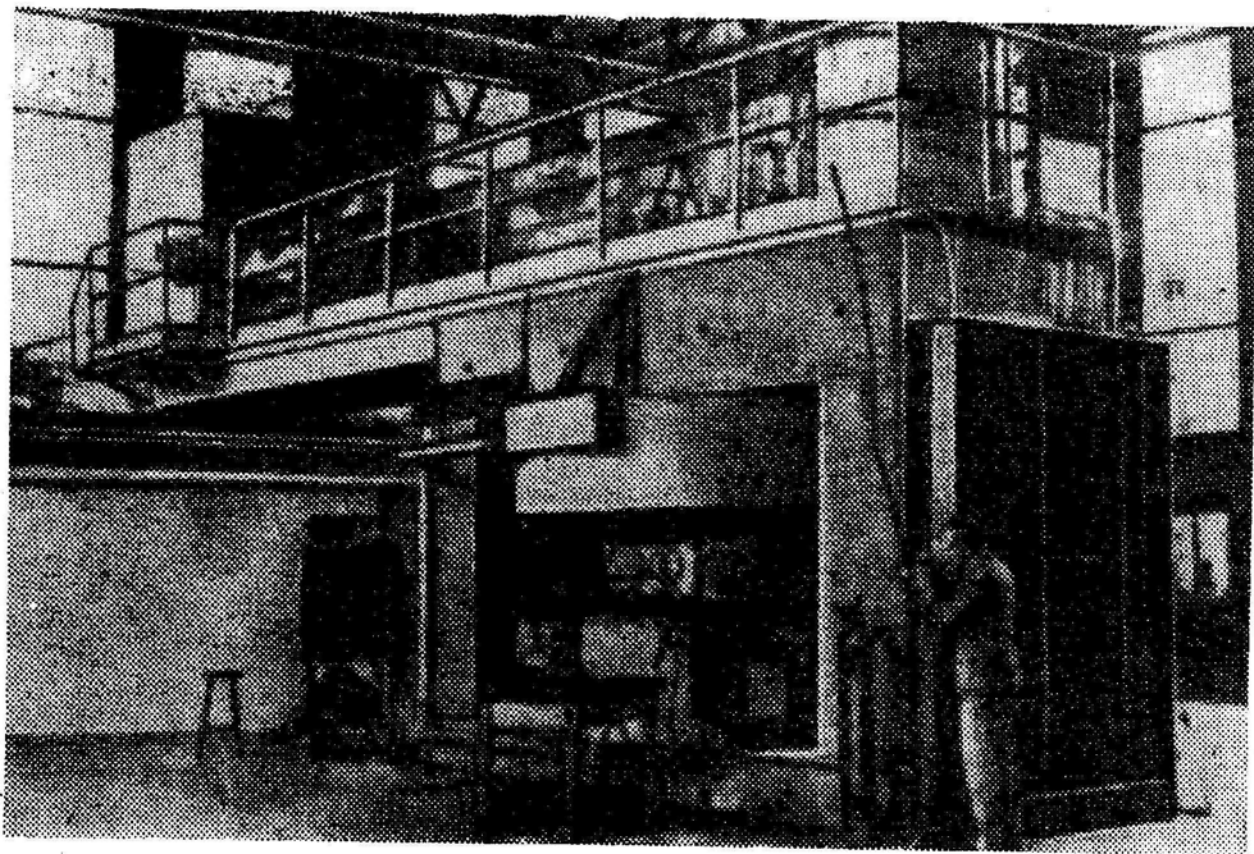


Рис. 82. 220-т циклотрон университета Беркли в Калифорнии, сфотографированный со стороны выхода пучка

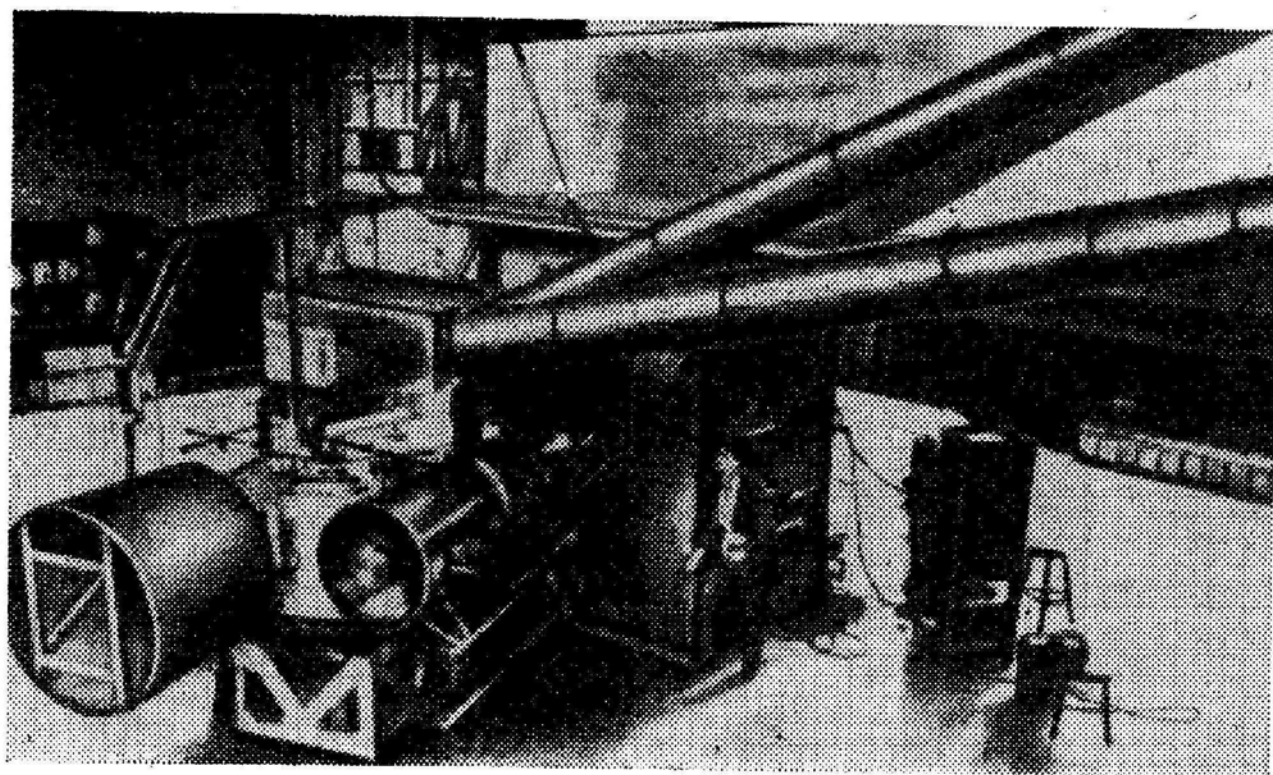


Рис. 83. 220-т циклотрон университета Беркли, сфотографированный со стороны входа пучка

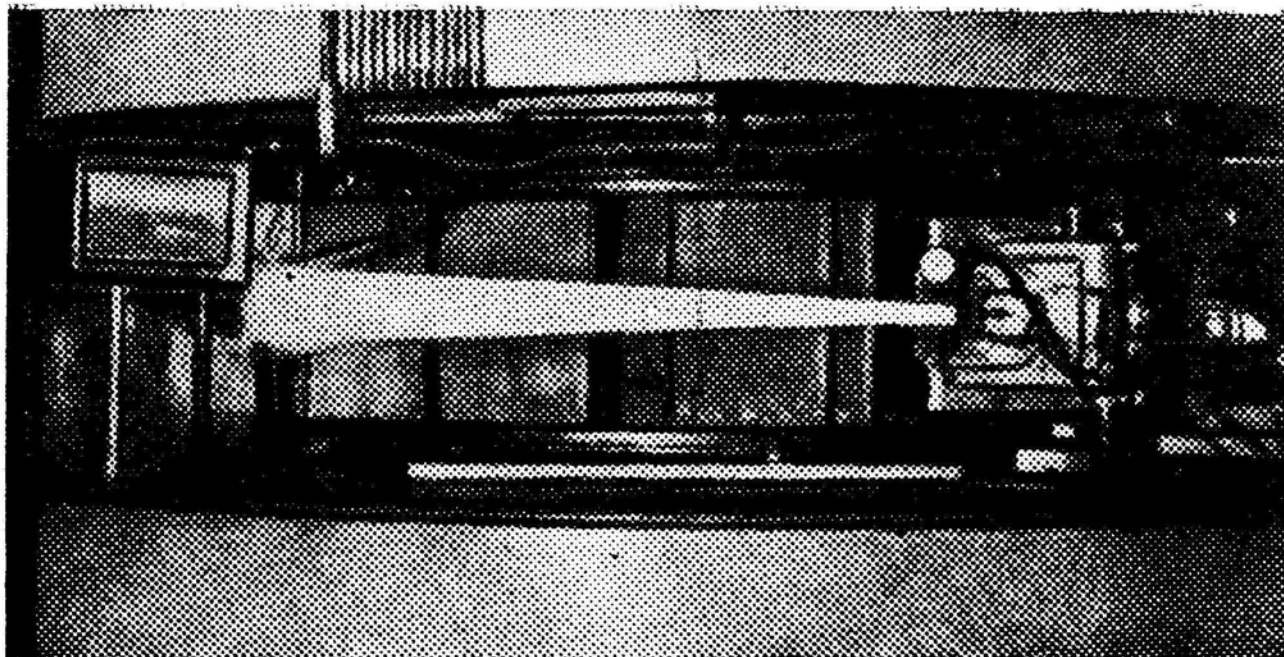


Рис. 84. Пучок энергией 16 Мэв, преодолевающий после выхода из циклотрона расстояние $\sim 1,5$ м

Для тех, кто был свидетелем развития данного предмета, рис. 84 является живым олицетворением прогресса XX в., достигнутого в познании излучений, и его можно сравнить с рис. 41 и 42, иллюстрирующими проникающую способность естественных α -частиц. Тогда, в начале века, казалось поразительным, что атомы гелия могут, практически не отклоняясь, преодолеть в воздухе расстояние в несколько сантиметров при атмосферном давлении или пройти сквозь стекло толщиной в десятитысячные доли сантиметра. А на рис. 84 мы видим пучок атомов вещества, искусственно ускоренных при помощи напряжения в несколько миллионов вольт. Они пробегают в воздухе уже более метра. За ними можно наблюдать благодаря испускаемому ими характерному свечению, присущему, как считалось ранее, только разряду в трубке Гейслера в сильно разреженной газовой среде. Несколько позднее с помощью аппарата, похожего на циклотрон, аналогичное изменение масштаба исследований произошло и в отношении проникающей способности β -частиц (или испускаемых электронов). Этот аппарат известен как *бетатрон*. Однако о нем мы не имеем возможности рассказать более подробно.

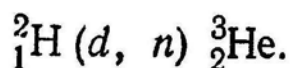
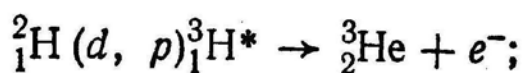
Превращения, осуществленные на циклотроне

При столкновении двух дейтонов (как, например, при бомбардировке дейтонами мишени из тяжелого водорода) даже напряжения 20 кВ достаточно для того, чтобы высвободилось огромное

количество протонов с длиной пробега 14 см; при этом образуется новое ядро — тритий, являющийся изотопом водорода с массой 3. В свое время этот изотоп пытались найти в тяжелой воде, но, несмотря на большие затраты, поиск тогда закончился безрезультатно. Электролизу было подвергнуто 13 т воды; было получено 43,3 кг тяжелой воды 99%-ной чистоты, однако трития в ней не оказалось. В наши дни известно, что тритий (${}^3_1\text{H}$) радиоактивен. Период его полураспада равен 30 годам; он испускает β -частицы слабой проникающей способности и переходит в изотоп гелия ${}^3_2\text{He}$.

Если процесс столкновения дейтонов происходит при напряжении 100 кВ, параллельно с уже описанной идет еще одна реакция: вместе с изотопами гелия с массой 3 появляется большое количество нейтронов. При энергии дейтонов 1 МэВ на каждые несколько тысяч дейтонов появляется один нейтрон. Это обстоятельство, а также отсутствие γ -излучения делает дейтоны более предпочтительным и гораздо более эффективным источником получения нейтронов, чем радий. Существование изотопа гелия с массой 3 в бесконечно малых количествах (0,0000001 в обычном атмосферном гелии и в 12 раз меньше — в гелии, содержащемся в природном газе) было недавно установлено с помощью циклотрона; это содержание настолько мало, что недостаточно для чувствительности даже наиболее совершенного масс-спектрографа.

Рассмотренные ядерные реакции можно записать в следующем виде:



Наиболее удобным лабораторным источником получения нейтронов является закупоренная трубка, содержащая смесь 100 мг чистого сульфата радия с порошком бериллия; колбу можно также заполнить эквивалентным количеством радона. Это позволяет на 1 г радия получать в секунду 20 млн. нейтронов энергией 10 МэВ, и, таким образом, на генерирование одного нейтрона уходит 8000 α -частиц, что является относительно большой мощностью. Более эффективным методом получения нейтронов является бомбардировка бериллия дейтонами энергией 0,9 МэВ, которые превращают его в стабильный изотоп бора с массовым числом, равным 10; в ходе реакции вылетают нейтроны с энергией 9 МэВ: ${}^9_4\text{Be} (d, n) {}^{10}_5\text{B}$.

Одним из достижений в применении циклотрона является то, что с его помощью путем бомбардировки обычной поваренной соли NaCl дейтонами большой энергии был получен соперник радия — радиоактивный натрий с периодом полураспада 15,5 ч.

Он испускает относительно слабые β -частицы, которые тем не менее сопровождаются очень мощным γ -излучением (5,5 Мэв), что значительно превышает энергию γ -излучения радия. Однако радиоактивный натрий легче получить, если использовать циклотрон для производства нейтронов, которые, соединяясь с обычным натрием (${}_{11}^{23}\text{Na}$), и образуют этот изотоп, на одну единицу массы более тяжелый (${}_{11}^{24}\text{Na}$). Так были изготовлены препараты с активностью, эквивалентной 30 г радия.

Искусственное получение радиоэлементов

Величайшим триумфом циклотрона является, по-видимому, получение с его помощью радиоактивных изотопов RaE и RaF, причем второй из них аналогичен открытому М. Кюри полонию, а первый является его непосредственным предшественником в радиоактивном ряду. Закон радиоактивных смещений показал, что RaE представляет собой изотоп висмута с массовым числом 210 (вместо 209 у обычного, неактивного висмута), из которого при испускании β -частицы с периодом полураспада 5 дней получается полоний, занимающий ранее пустовавшее место в подгруппе серы (сразу вслед за висмутом). Затем, по прошествии 140 дней, полоний, испуская α -частицы, превращается в конечный стабильный изотоп свинца с массовым числом 206. Все эти существующие в природе радиоэлементы были воссозданы искусственно, бомбардировкой висмута дейтонами с энергией 5 Мэв; в этом процессе нейтрон из дейтона соединяется с висмутом, образуя RaE, а протон выталкивается. В случае дейтонов большей энергии кроме этой реакции протон соединяется с висмутом, непосредственно образуя полоний, а испускается уже нейтрон. Все эти искусственные радиоактивные изотопы проявляют свойства, идентичные давно известным свойствам природных изотопов, и они свидетельствуют о том, что загадка радиоактивности была разгадана правильно и точно.

Нейтрон в роли агента превращений

В заключение всего сказанного выше о нейтронах необходимо отметить их наиболее важное свойство, впервые замеченное Ферми, а именно их способность играть двойную роль. При генерировании нейтроны обычно имеют такую же кинетическую энергию, как и другие бомбардирующие частицы, и при столкновении с ядрами вещества они расщепляют последние примерно таким же образом. Однако нейтроны, выражаясь современным языком, чувствительны к водороду (что было установлено супругами Жолио