

Строение атомов и физико-химические свойства элементов¹⁾.

Нильс Бор.

Первый постулат теории атома Бора (Bohr) заключается в предположении наличия „стационарных состояний“ атома, в которых последний не излучает энергии. По второму постулату излучение происходит только при переходах атома от одного стационарного состояния к другому, при чем излучение протекает в виде непрерывного ряда чисто гармонических волн; частота световых колебаний определяется при этом таким условием:

$$h\nu = E' - E'' \quad (1)$$

где ν — частота, h — постоянная Планка (Planck), E' и E'' — энергия исходного и конечного стационарных состояний. Соотношение (1) дает непосредственное истолкование эмпирическому закону Вальмера (Balmer), определяющему частоту колебаний линейного спектра водорода:

$$\nu = K \left(\frac{1}{(n'')^2} - \frac{1}{(n')^2} \right), \quad (2)$$

где K — постоянная, n' и n'' — целые числа. Сравнивая постулат (1) с эмпирическим законом (2), мы видим, что энергия некоторого n -ого стационарного состояния (с точностью до постоянной) определится так:

$$E_n = - \frac{K \cdot h}{n^2} \quad (3)$$

¹⁾ Статья — сокращенный перевод и частью реферат обширного доклада Бора (Bohr), прочитанного 18-го октября 1921 г. в соединенном заседании физического и химического общества в Копенгагене. Доклад с дополнениями напечатан в журнале „Zeitschrift für Physik“ (9, стр. 1—68, 1922) и с формальной стороны является продолжением и развитием статьи Бора (Bohr): „О серийных спектрах элементов“, полный перевод которой дан в „Успехах физических наук“ (т. III, в. I, стр. 28). Воззрения, излагаемые автором в настоящем докладе, опубликовываются впервые и представляют особый интерес не только для широкого круга читателей, но и для специалиста. В нашем переводе опущена главным образом: 1) часть доклада, посвященная теории рентгеновских спектров, 2) экскурсы полемиического характера, 3) вся обширная вводная часть доклада, в которой излагается преимущественно теория линейчатых спектров и принцип соответствия. Читатель найдет их подробное изложение в предыдущей указанной статье Бора. В вводной части, напечатанной мелким шрифтом, напоминаются основные соотношения их теории спектров Бора, на которые ссылается автор в дальнейшем изложении. Новая теория строения элементов Бора получила в последнее время прекрасное подтверждение при изучении рентгеновских спектров (D. Coster, Phil. Mag. 43, p. 1070, 1922).

Перев.

Если пренебречь собственным движением тяжелого ядра атома водорода, то водородный электрон должен двигаться по эллипсу, в фокусе которого расположено ядро. Большая ось $2a$ эллиптической орбиты определяется так:

$$2a_n = \frac{n^2 c^2}{K \cdot h}. \quad (4)$$

Простое периодическое движение, с которым мы имеем дело в атоме водорода, пренебрегая собственным движением ядра, вполне характеризуется одним квантовым числом n . Оно определяет энергию атома и одновременно большую ось эллиптической орбиты, но оставляет неопределенной вторую ось, или эксцентриситет. Энергия n -ого стационарного состояния такова:

$$E_n = - \frac{2\pi^2 N^2 e^4 \cdot m}{n^2 h^2}, \quad (5)$$

где e и m — заряд и масса электрона, N — число зарядов ядра. Для водорода $N=1$. Сравнивая уравнения (3) и (5), имеем:

$$K = \frac{2\pi^2 e^2 m}{h^3}. \quad (6)$$

Для ядра с двумя зарядами, K имеет величину, в четыре раза большую. Это — случай ионизованного атома гелия, испускающего линейный спектр, частоты которого определяются следующим законом:

$$\nu = 4K \left(\frac{1}{(n'')^2} - \frac{1}{(n')^2} \right). \quad (7)$$

Такие же водородоподобные спектры мы встречаем и в рентгеновских спектрах элементов. Мозли (Moseley) показал, что различные химические элементы при излучении наиболее жестких лучей так называемой K -группы дают спектр, частота наиболее яркой линии которого определяется так:

$$\nu = N^2 K \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right), \quad (8)$$

где N — число зарядов ядра, или так называемый атомный номер элемента. Наиболее интенсивная линия более „мягкой“ L -группы определяется для различных элементов соотношением:

$$\nu = N^2 K \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right). \quad (9)$$

Все предыдущие соотношения выведены для того случая, когда пренебрегают собственным движением ядра атома. Если принять во внимание этот фактор, то движение электрона перестает быть чисто периодическим. Электрон совершает сложное центральное движение, при котором орбита, мало отличающаяся от эллипса, обладает равномерным добавочным вращением. В этом случае для определения стационарного состояния уже не достаточно одного главного квантового числа n , характеризующего энергию и величину большой оси эллипса. Требуется второе квантовое число k , определяющее эксцентриситет, или параметр эллипса $2p$ (параметр-хорда, проходящая через фокус эллипса перпендикулярно большой оси $2a$). Для $2a$ и $2p$ получаются следующие выражения:

$$2a = n^2 \frac{h^2}{2\pi^2 N e^2 m}; \quad 2p = k^2 \frac{h^2}{2\pi^2 N e^2 m} \quad (10)$$

Принимая во внимание зависимость массы электрона от скорости движения, Зоммерфельд (Sommerfeld) нашел следующее выражение для энергии стационарного состояния, характеризуемого квантовыми числами n и k :

$$E_{n,k} = - \frac{2\pi^2 N^2 e^4 m}{n^2 h^2} \left[1 + \frac{4\pi^2 N^2 e^4}{h^2 c^2} \left(-\frac{3}{4n^2} + \frac{1}{nk} \right) \right] \quad (11)$$

при чем отброшены члены высших порядков.

Спектр водорода дает определенные данные о процессе присоединения электрона водородным ядром. Изучение спектров других элементов должно служить ключом для понимания процессов присоединения N электронов, определяющих атомный номер данного элемента. Мы должны представлять себе, что образование атома с порядковым числом N протекает в N последовательных стадиях, соответствующих захвату N электронов в поле ядра, при чем можно ожидать особый спектр для каждого процесса связывания электрона. Такие спектры известны только для водорода и гелия. Для остальных элементов ни в одном случае мы не знаем более двух типов спектров, обыкновенно обозначаемых, как „дуговые“ и „искровые“ спектры. Эти спектры значительно сложнее спектров водорода и гелия (2) и (7). Во многих случаях, однако, удается найти простые законы, похожие на (2) и (7), определяющие частоты линий этих спектров. Отвлекаясь от сложной структуры отдельных линий (дублеты, триплеты и т. д.), во многих случаях частоты линий дуговых спектров с значительной точностью можно определить так называемой формулой Ридберга (Rydberg):

$$\nu = \frac{K}{(n'' + a'')^2} - \frac{K}{(n' + a_k')^2}, \quad (12)$$

где K — та же постоянная, что и в формулах (2) и (7), n' и n'' — целые числа, a_k и $a_{k''}$ — члены ряда постоянных, характерных для данного элемента. Теория Бора (Bohr) дает непосредственную интерпретацию формулы (12). Линии серии (12) испускаются при переходах между стационарными состояниями атома, при чем в отличие от водородных спектров мы имеем дело в данном случае с целой группой рядов стационарных состояний. Энергия n -ого стационарного состояния k -ого ряда определится из формулы (12) так:

$$E_k(n) = - \frac{Kh}{(n + a_k)^2}. \quad (13)$$

Структура „искровых“ спектров, как показывают исследования Фоулера (Fowler), определяется приближенно формулой, того же типа, как и формула (12), с той только разницей, что вместо K фигурирует величина $4K$, совершенно аналогично тому, как мы это имеем в спектре (7) ионизованного гелия. С этой точки зрения дуговой спектр соответствует последней стадии образования атома — захвату последнего N -ого электрона. Искровой спектр (спектр ионизованного атома) излучается в предпоследнюю стадию, захвата $(N-1)$ -ого электрона ядром.

При изучении образования атома путем захвата электронов в поле ядра, нам нет надобности долго останавливаться на захвате первого электрона. Конечный результат процесса этого захвата — то состояние атома, энергия которого определяется формулой (5), если мы подставим в ней $n=1$, или точнее формулой (10), где нужно подставить $n=k=1$. Такую орбиту электрона мы назовем одноквантовой; если главное квантовое число имеет значение n , мы будем говорить об n -квантовой орбите. В приложениях, когда окажется существенным различать орбиты, характеризующиеся различными величинами квантового числа k , мы обозначаем орбиту, определяемую квантовыми числами n и k „ n_k -ая орбита“.

Переходя к захвату второго электрона, мы встречаемся сразу с значительно более сложной задачей. Мы можем получить сведения об этом процессе на основании дугового спектра гелия. В отличие от остальных простых спектров данный спектр состоит из двух систем линий, каждая из которых определяется формулами типа (12). На этом основании прежде думали, что гелий—смесь двух газов: „ортогелия“ и „паргелия“. В настоящее время мы знаем однако, что два спектра означают только то, что связывание второго электрона может происходить двумя различными способами. Ланде (Landé) в интересной работе пытался теоретически уяснить основные черты гелиевого спектра. Он представляет себе, что спектр ортогелия излучается при переходах между стационарными состояниями, в которых оба электрона вращаются в той же плоскости и в том же направлении вокруг ядра; электрон, захваченный вторым, движется по орбите, охватывающей орбиту первого электрона. В состояниях, соответствующих спектру паргелия, по представлениям Ланде (Landé), орбиты обоих электронов образуют между собою некоторый угол. Ближайшее исследование взаимодействий двух орбит стационарных состояний атома гелия выполнено докладчиком в совместной работе с др. Крамерсом (Kramers). Результаты нашего исследования, начатого задолго до появления работы Ланде (Landé) еще не опубликованы. Не вдаваясь в подробности, я упомяну, однако, что хотя наши выводы во многих пунктах существенно отличаются от результатов Ланде, тем не менее они согласуются с общими заключениями Ланде о происхождении спектров орто-и паргелия.

В теснейшей связи с соображениями о возникновении спектра гелия стоит вопрос о конечном результате связывания второго электрона в атоме. Этот пункт выясняется важными опытами Франка (Frank) и его сотрудников. Опыты показали, что атомы гелия, подвергнутые бомбардировке электронами, могут переводиться в состояние, которое Франк назвал „метастабильным“ (сверхустойчивым). Атом не может перейти из одного состояния в нормальное простым процессом, сопровождающимся излучением; переход возможен только путем химической реакции, так как для его осуществления требуется наличие атомов других элементов. Этот результат тесно связан с тем обстоятельством, что захват второго электрона в атоме гелия может происходить двумя способами, как мы это знаем на основании спектра. Из опытов Франка следует, что нормальное состояние атома соответствует процессу связывания электрона, сопровождающемуся излучением спектра паргелия. При этом второй электрон так же, как и первый, связывается на 1_1 орбите. Упомянутое выше метастабильное состояние, наоборот, соответствует процессу, сопровождающемуся излучением спектра ортогелия, при этом второй захватываемый электрон в отличие от первого будет двигаться в 2_1 —орбите, в которой прочность связи приблизительно в 7 раз меньше, чем у электрона в нормальном состоянии атома.

Ближайшее рассмотрение этого поразительного на первый взгляд факта показывает, что он находит естественное объяснение и во всяком случае может быть понят, на основании принципа соответствия. Легко видеть, что между обоими процессами захвата электрона существует большое различие, отчетливо проявляющееся при изучении последних стадий процесса. Рассматривая орбиты ортогелия, в котором оба электрона в одной плоскости, мы видим, что орбита внешнего электрона имеет тот же характер, как и орбита электрона, движущегося в простом силовом поле, обладающем центральной симметрией: наличие переходов вышеуказанного типа должно быть непосредственно связано поэтому со свойствами движения внешнего электрона. Но все это так только до тех пор, пока мы ограничиваемся орбитами с главным квантовым числом n , большим 1; ближайшее исследование показывает, что связанный класс движений, к которому принадлежат орбиты ортогелия, не содержит орбиты 1_1 . Если мы тем не менее настаиваем на существовании состояния, в котором оба электрона движутся по 1_1 -орбите в той же плоскости, то нет другой возможности (при условии, что движение сохраняет необходимые для определения стационарного состояния периодические свойства), кроме предположения, что оба электрона движутся в одной и той же круговой орбите вокруг ядра, находясь в каждый данный момент на концах диаметра. Эта простейшая „круговая конфигурация“ должна бы соответствовать, как показывает формальное применение теории квантов, самой сильной связи в атоме и потому она и была предложена мною в первой работе о строении атома, как модель гелия. Если мы зададимся, однако, вопросом о возможности перехода от какого-нибудь из состояний ортогелия к круговой конфигурации, то мы встретимся с соотношениями, совершенно отличными от тех, которые имеются при переходах от одного состояния ортогелия к другому. Мы не можем себе представить такого ряда простых промежуточных форм орбит для обоих электронов, при котором движение последнего захваченного электрона было бы достаточно похоже на центральное движение, чтобы можно было говорить о соответствии искомого типа. Поэтому приходится предполагать, что последний захваченный электрон в том случае, когда оба электрона движутся в одной плоскости, связан не сильнее, чем в 2_1 -орбите. Рассматривая, с другой стороны, процесс связывания, сопровождаемый излучением спектра паргелия, при котором электроны в стационарных состояниях движутся в плоскостях, образующих некоторый угол одна с другою, мы встречаемся с существенно отличными соотношениями. Здесь нет нужды в коренном изменении взаимодействий первого и второго электрона для сохранения равноправности их движений; мы можем поэтому представлять себе, что последняя стадия процесса связывания протекает так же, как и предыдущие стадии, которым соответствуют переходы между орбитами, характеризуемыми большими квантовыми числами n и k . Нужно думать, что в нормальном состоянии атома гелия оба электрона дви-

жутся в эквивалентных 1_1 -орбитах. В первом приближении эти орбиты могут рассматриваться как круги, плоскости которых образуют угол в 120° , в согласии с условием, которое по теории квантов накладывается на момент импульса атома. Вследствие взаимодействия электронов орбиты медленно вращаются вокруг твердой оси импульса.

В последнее время Кэмбл (Kemble), исходя из оснований, существенно отличных от тех, которые развиты выше, предложил аналогичную модель атома гелия. Одновременно он указал (в отношении тонких взаимодействий электронов) на возможность типа движения с ясно выраженной симметрией такого типа, что электроны во все время их движения занимают симметричные положения относительно твердой оси. Кэмбл не исследовал, однако, это движение ближе математически. Еще до появления этой работы Др. Крамерс начал производить точный расчет именно этого типа движения, предполагая учесть таким образом прочность связи электронов в атоме гелия, которая может быть измерена на основании так называемого ионизационного потенциала. Прежние измерения этого потенциала приводили к величине, которую можно ожидать для описанной выше круговой конфигурации электронов, 28,8 вольт. Новые более точные измерения ионизационного потенциала дали величину значительно меньшую—25 вольт. Уже одно это обстоятельство, независимо от изложенных выше соображений, делает совершенно неприемлемой круговую конфигурацию электронов гелия в нормальном состоянии. Точное исследование пространственной конфигурации электронов в отличие от соотношений при круговой плоской конфигурации требует большой расчетной работы, еще не законченной Крамерсом. С тем приближением, с которым эти расчеты выполнены до настоящего времени, они заставляют надеяться на согласие с опытными результатами.

Водород и гелий образуют первый период системы элементов. Большая разница в химических свойствах водорода и гелия зависит от разницы в прочности и типе электронной связи, о которой мы знаем из исследования спектров и ионизационных потенциалов и которая, повидимому, вполне учитывается теорией квантов. Гелий обладает наивысшим ионизационным потенциалом из всех элементов, в водородном атоме, с другой стороны, электрон связан настолько слабо, что мы в состоянии понять склонность водорода в водных растворах и химических соединениях делаться положительным ионом. Детальное рассмотрение этого вопроса требует, однако, сравнения типа и прочности электронных конфигураций атомов других элементов.

Переходя теперь к рассмотрению строения атомов веществ, содержащих в нейтральном состоянии более двух электронов, мы предположим, во-первых, что все сказанное об образовании атома гелия имеет силу, в основных чертах, для захвата и связывания двух первых электронов всякого атома. Мы предполагаем, следовательно, что в нормаль-

ном состоянии атома эти электроны движутся по эквивалентным орбиталям, обозначаемым 1_1 . Задаваясь вопросом о связи третьего электрона мы получаем непосредственные сведения об этом, исследуя во спектр лития. Этот спектр указывает на существование групп ряд стационарных состояний, в которых прочность связи последнего захваченного электрона почти та же, как и при образовании атома водорода. Кроме этих рядов стационарных состояний, для которых $k \geq 2$ и в которых третий электрон движется совершенно вне той области, в которой движутся первые два электрона, спектр лития указывает еще на ряд состояний, для которых $k=1$ и энергия значительно отличается от энергии соответствующих состояний атома водорода. К числу таких состояний принадлежит и нормальное состояние атома, как это явствует из опытов над поглощением паров лития. В этих состояниях последний захваченный электрон приближается один раз за время своего оборота к ядру на расстояние того же порядка величины, как размеры орбит первых двух электронов хотя быть может в большей части своего пути он и находится на больших расстояниях от ядра. На основании этого электрон в таких состояниях связан значительно сильнее, чем в водороде при стационарных состояниях с тем же значением n . В нормальном состоянии, где, как это явствует из спектра, работа, требующаяся для удаления электрона от атома, составляет всего $0,396 W_*$ (W_* — ионизационный потенциал водорода). электрон движется по 2_1 -орбите; при этом связь приблизительно в полтора раза больше, чем в случае водородного электрона, находящегося на 2_1 -орбите, где работа, требующаяся для излучения электрона $0,25 W_*$. Переход от состояний, указываемых спектром лития, к состоянию, характеризуемому движением третьего электрона на 1_1 -орбите, исключается по основаниям аналогичным тем, с которыми мы встретились при интерпретации метастабильного состояния гелия. Ближайшее исследование возможных движений показывает следующее. Переход, который должен бы привести к стационарному состоянию атома с третьим электроном, как равноправным участником во взаимоотношениях всех трех электронов лития, был бы совершенно иного типа, чем переходы, сопровождающиеся излучением действительного спектра лития; в противоположность этим последним переходам в предполагаемом процессе не было бы соответствия гармоническим компонентам движения атома. Мы получаем таким образом картину образования и строения лития, которая дает естественное объяснение большим отличиям химических свойств лития от гелия и водорода. Мы имеем основание для понимания того факта, что связь последнего захваченного электрона в атоме лития приблизительно в пять раз слабее, чем связь электронов в гелии, и более чем в два раза слабее, чем в атоме водорода.

Нужно предполагать, что все сказанное имеет силу не только для образования атома лития, но вообще для связывания третьего

электрона всякого атома; третий электрон будет двигаться, следовательно, в 2_1 -орбите в противоположность первым двум электронам, движущимся в 1_1 -орбите. Аналогичное можно предполагать для связи четвертого, пятого и шестого электрона. Я не буду здесь ближе останавливаться на тех представлениях, которые можно составить о последовательном захвате и связывании этих электронов. Укажу только, что причина того, что захват первого из названных электронов не препятствует включению следующих электронов в двухквантные орбиты, лежит в том, что эти орбиты не круговые, а сильно эксцентричные. Поэтому третий электрон, например, не может удерживать дальнейшие электроны в удалении от внутренней системы в отличие от действия двух первых захваченных электронов лития, препятствующих включению третьего электрона в одноквантную орбиту. Мы должны на основании этого ожидать, что 4-й, 5-й и 6-й электрон, так же как и 3-й, в некоторых точках своего пути будут проникать в области, где движутся первые два электрона. Нельзя, однако, думать, что эти посещения внутренней системы четырьмя электронами происходят одновременно; весьма вероятно, что четыре электрона проходят около ядра по очереди через одинаковые промежутки. В более ранних работах о строении атома обыкновенно полагали, что электроны в различных группах атома движутся в отдаленных одна от другой областях, причем внутри каждой группы, в каждый данный момент, электроны находятся в конфигурации, обладающей симметрией такого же рода, как правильные многоугольники или многогранники; одним из следствий этого было предположение что электроны одновременно находятся в таких точках их орбит, в которых они ближе всего расположены к ядру. Можно сказать, что такое строение атома характеризуется тем, что движения электронов в отдаленных группах связаны независимо от взаимодействия различных групп. Характерной чертой излагаемого здесь строения атомов является, наоборот предположение о тесной связи электронных орбит различных групп, определяемых различными квантными числами и большая независимость типа связи электронов одной и той же группы, определяемых одними и теми же квантными числами. Подчеркивая последнее обстоятельство, я подразумеваю не только относительно малое влияние, оказываемое на прочность связи позднейшего электрона ранее захваченными электронами той же группы. Существенно также, что движения электронов внутри каждой группы отражают независимость тех процессов захвата отдельных электронов, в результате которых образовалась группа.

Изложенные соображения дают возможность понять тот факт, что элементы, следующие за литием бериллий и бор действуют в соединениях с другими веществами электроположительно с двумя или тремя валентностями. Последние захваченные электроны в этих элементах, так же как третий электрон лития, связаны значительно слабее, чем два

первые электрона. Одновременно нам становится понятным, почему электроположительный характер этих элементов менее выражен, чем у лития. Электроны двухквантовых орбит этих элементов движутся в более сильных полях и потому они сильнее связаны у бериллия и бора, чем в атоме лития. В следующем элементе—углероде—мы встречаемся с новыми отношениями; это вещество в своих типичных химических соединениях выступает как нейтральный атом, а не как ион. Это обстоятельство связано не только с большей прочностью электронных связей но существенно зависит и от симметричных свойств электронной конфигурации.

Нужно думать, что при захвате четвертого, пятого и шестого электрона на 2₁-орбиты относительная конфигурация орбит сопровождается возрастающей пространственной симметрией. При захвате шестого электрона орбиты четырех последних электронов должны образовать чрезвычайно симметричную конфигурацию. Нормали плоскостей орбит принимают при этом относительно одна другой почти то же положение, как линии, соединяющие углы правильного тетраэдра с центром. Подобная конфигурация группы двухквантовых орбит в атоме углерода, повидимому, действительно пригодна для понимания строения органических соединений. Я не буду, однако, здесь ближе останавливаться на этом вопросе, его разрешение требует основательного изучения взаимодействий электронных движений в атомах, присутствующих в молекуле. В связи с этим следует только указать, что типы молекулярных моделей, к которым приводят изложенные соображения, существенно отличны от тех моделей, которые докладчик предлагал в первых своих работах. В этих работах „валентные связи“ предполагались соответствующими „электронным кольцам“ того же типа, как электронные группы в отдельных атомах. Если, не вдаваясь в такие вопросы, тем не менее возможно дать представление о химических свойствах элементов на основании изучения их атомов, то причина этого в следующем. Рассмотрение молекулярных образований такого типа, как соединение нескольких атомов того же элемента, или многие органические соединения, не играют для нас такой роли, как анализ соединений, в которых отдельные атомы проявляются как электрически заряженные ионы. Соединения последнего типа, часто называемые „гетерополярными“ (к их числу принадлежит большинство простых неорганических соединений) значительно типичнее, чем „гомэополярные“ соединения, и в значительно большей мере обладают индивидуальными свойствами. Поэтому в дальнейшем главная задача будет заключаться в рассмотрении пригодности электронных конфигураций к образованию ионов.

Прежде чем окончить с вопросом о строении углеродного атома, я должен указать, что модель атома углерода, в которой конфигурация орбит четырех слабо связанных электронов обладает ясно выраженной „тетраэдрической симметрией“, была уже предложена Ланде. Учитывая

экспериментальные данные о величине атома, он также предположил, что соответствующие электроны движутся по 2_1 -орбитам. Между вышеприведенными основаниями и соображениями Ланде есть, однако, существенное различие. У Ланде обоснование характерных свойств углеродного атома построено на исследовании простейших пространственно-симметричных форм движения, которые могут совершать четыре электрона. Наши рассуждения сводятся к устойчивым свойствам всего атома, предположения об орбитах электронов основаны на исследовании взаимодействий вновь захватываемых электронов с уже захваченными.

Переходя к свойствам следующих элементов, мы встречаемся прежде всего с особой устойчивостью конфигурации 10 электронов в нейтральном атоме неона. Обыкновенно в основу решения этой задачи кладется предположение о том, что свойства такой конфигурации обусловлены взаимодействием 8 электронов, движущихся по эквивалентным орбитам вокруг ядра и внутренней группы из двух электронов, аналогичной соответствующей группе нейтрального атома гелия. Мы увидим, однако, что, решение нужно искать, повидимому в другом направлении. Задаваясь вопросом о захвате седьмого электрона, мы не можем ожидать что этот электрон будет связан также во 2_1 -орбите, эквивалентной орбитам предыдущих четырех электронов. Появление пяти подобных орбит безусловно нарушило бы симметрию взаимодействия электронов. Нельзя себе представить, чтобы такой процесс присоединения пятого электрона был аналогичен, согласно принципу соответствия, с процессом, сопровождающимся излучением спектра. Приходится предположить, что четыре электрона с их необычайно симметричной конфигурацией орбит удерживают новые электроны вдали, так что они связываются в орбитах другого типа.

Орбиты, появляющиеся при связывании седьмого электрона в атоме азота и 7-го, 8-го, 9-го и 10-го электронов в следующих элементах—круговые орбиты типа 2_2 . Диаметр этих орбит значительно больше диаметра орбит двух внутренних электронов, но тем не менее они лежат внутри области, в которой движутся четыре следующие электрона. Вытянутые участки эксцентричных 2_1 -орбит должны поэтому несколько выступать за круговые 2_2 -орбиты. Я не предполагаю останавливаться ближе на вопросе о последовательном захвате и связывании новых электронов, для этого требуется точное исследование взаимодействий в движении электронов по двум типам двухквантовых орбит. Укажу только, что в атоме неона, где необходимо предположить существование четырех 2_2 -орбит, плоскости этих орбит обладают не только высокой степенью пространственной симметрии одна в отношении к другой, но образуют гармоническую конфигурацию и в отношении к четырем эллиптическим 2_1 -орбитам. Взаимодействие такого рода без совпадения плоскостей орбит осуществимо только при конфигурации орбит в обеих подгруппах с систематическим отклонением

от тетраэдрической симметрии. Электронная группа с двухквантными (2_1 и 2_2) орбитами в атоме неона будет поэтому обладать только одной простой осью симметрии, совпадающей, как это необходимо предположить, с осью симметрии конфигурации внутренней группы двух электронов на одноквантных орбитах.

В отношении объяснения ясно выраженного электроотрицательного характера кислорода и фтора, элементов, предшествующих неону и имеющих атомные номера 8 и 9, нужно подчеркнуть следующее. Стремление нейтральных атомов этих элементов, образовать путем захвата новых электронов отрицательные ионы, строения подобного нейтральному атому неона, нужно приписать не только большей симметрией и увеличивающейся поэтому прочности электронной конфигурации. Существенно также то, что новые, захваченные электроны расположатся внутри области 2_1 -орбит. Это обстоятельство обуславливает разницу элементов второй и первой половины второй группы периодической системы; в первой половине названных элементов существует только один тип двухквантных орбит.

Мы переходим к вопросу о строении атомов элементов третьего периода системы элементов и сталкиваемся прежде всего с задачей о способе связывания одиннадцатого электрона в атоме. Отношения здесь подобны тем, с которыми мы встретились при исследовании захвата седьмого электрона. Так же как и в атоме углерода, конфигурация атома неона была бы существенно или совершенно искажена захватом нового электрона на орбиту 2_2 . Как и в случае 3-го и 7-го электрона можно ожидать, что 11-й электрон расположится на орбите нового типа 3_1 . Электрон, движущийся по такой орбите, будет находиться большей частью вне конфигурации десяти первых электронов; в некоторые моменты пути он, однако, проникает не только в области 2_1 и 2_2 -орбит, но даже и в области, где его расстояние от ядра будет меньше радиуса одноквантных орбит двух первых захваченных электронов. Это обстоятельство, чрезвычайно важное для понимания устойчивости атома, приводит к такому интересному результату. В атоме натрия электрон во внешних частях орбиты будет двигаться в поле, мало отличающемся от поля вокруг ядра атома водорода; тем не менее размеры соответствующих частей орбиты 11-го электрона натрия существенно отличаются от размеров 3_1 -орбиты атома водорода. Причина этого в том, что хотя 11-й электрон находится в области орбит десяти первых электронов в течение очень короткого времени, тем не менее данная часть пути существенна для определения главного квантового числа; движение электрона для внутренней части пути очень мало отличается от движений ранее связанных электронов на 2_1 -орбитах.

11-й электрон атома натрия связан еще слабее, чем третий электрон атома лития, что объясняет электроположительные свойства натрия.

Переходя от натрия к другим веществам третьего периода системы элементов, мы имеем при захвате 12-го, 13-го и 14-го электрона отношения, совершенно аналогичные тем, с которыми мы встретились при рассмотрении захвата 4-го, 5-го и 6-го электрона. Можно предполагать, что в нейтральном атоме кремния имеется конфигурация электронов, в которой 4 последних захваченных электрона движутся по 3_1 -орбитам; эти орбиты, подобно 2_1 -орбитам углерода, образуют столь симметричную конфигурацию, что захват нового электрона (в других атомах) на 3_1 -орбиту невозможен. 15-й электрон у элементов с более высоким атомным номером будет захватываться поэтому на орбиту нового типа. В отличие от 7-го электрона эта орбита не будет, однако круговой, но эксцентричной, вращающейся орбитой типа 3_2 . Это тесно связано с тем обстоятельством, что эксцентрическая орбита соответствует большей прочности связи электрона, чем круговая с тем же главным квантовым числом, в первом случае электрон в некоторые промежутки времени будет проникать глубоко внутрь атома. 3_2 -орбита не будет, правда, достигать областей 1_1 -орбит, однако она может приближаться к ядру на расстояния значительно меньшие, чем радиусы 2_2 -круговых орбит. Отношения для 16-го, 17-го и 18-го электрона таковы же, как и для 15-го. Мы можем ожидать поэтому для атома аргона конфигурацию, в которой 10 внутренних электронов движутся по орбитам того же типа, как и в атоме неона, восемь последних электронов движутся по четырем 3_1 и четырем 3_2 -орбитам, при чем можно предполагать, что отношения симметрии соответствуют конфигурации двухквантовых орбит атома неона. Такое представление делает понятным качественное сходство в свойствах неона и аргона, а также элементов во втором и третьем периоде; одновременно оно открывает возможность естественного объяснения важных количественных различий в свойствах этих гомологичных элементов.

Переходя к четвертому периоду системы элементов, мы встречаем сначала вещества аналогичные в химическом отношении с элементами начала двух предыдущих периодов. Это находится в согласии с тем, что можно было ожидать заранее. Мы представляем себе, что 19-й электрон связывается в орбите нового типа, 4_1 . Отношения, на которые мы указывали при рассмотрении захвата 11-го электрона в атоме натрия, выступают здесь еще резче, вследствие больших значений квантовых чисел, определяющих орбиты внутренних электронов. Внутренняя петля 4_1 -орбиты почти совпадает с 3_1 -орбитой, поэтому размеры внешних частей орбиты 19-го электрона атома калия не только сильно отличаются от размеров 4_1 -орбиты водородного атома, но, как этого следует ожидать, почти совпадают с размерами водородной орбиты типа 2_1 , приблизительно вчетверо меньшей, чем размеры орбиты 4_1 . Этот результат дает сразу возможность учесть основные черты спектральных и химических свойств калия. Подобные же результаты

получаются для кальция, нейтральный атом которого содержит два валентных электрона на 4_1 -орбитах. Элементы высших атомных номеров четвертого периода, однако, как известно, все более и более отличаются от соответствующих элементов в третьем периоде. Семейство железных металлов уже существенно отлично по свойствам от элементов предыдущего периода. Переходя еще к более высоким атомным номерам, мы встречаемся с рядом веществ, снова приближающихся в химическом отношении к элементам последней части предыдущего периода; атомному номеру 36 соответствует снова благородный газ криптом.

Эти соотношения соответствуют нашим ожиданиям. При рассмотрении образования и устойчивости электронных конфигураций атомов трех первых периодов мы основывались на том, что каждый из 18 первых электронов в следующем элементе связан в орбите с тем же главным квантным числом. Это неверно, как легко видеть, в отношении 19-го электрона. С возрастанием заряда ядра и связанным с этим уменьшением разницы силовых полей внутри и вне области орбит 18 первых захваченных электронов, размеры той части 4_1 -орбиты, которая расположена вне области внутренней конфигурации, все больше приближаются к размерам четырехквантовой орбиты, рассчитанной без учета взаимодействий электронов атома. При возрастающем атомном номере настает наконец момент, когда 3_3 -орбита соответствует более сильной связи 19-го электрона, чем 4_1 -орбита. Это происходит в самом начале четвертого периода. Изучение спектра калия показывает, что 4_1 -орбита соответствует вдвое более прочной связи, чем 3_3 -орбита. (В искровом спектре кальция связь электрона в 4_1 -орбите слабеет.) Для скандия можно уже ожидать, что 3_3 -орбита будет прочней, чем 4_1 -орбита, хотя связь 19-го электрона в атоме на 3_3 -орбите слабее, чем связь первых 18 электронов, что согласуется с электроположительностью скандия в химических соединениях (где он является трехвалентным).

В следующих элементах в нормальном состоянии атома появится большее число электронов на 3_3 -орбите; число таких орбит будет зависеть от прочности связи электрона в сравнении с прочностью на 4_1 -орбите. В отношении образования и прочности атомов мы встречаемся здесь с отношениями существенно отличными от тех, которые мы рассматривали в предыдущих периодах периодической системы. В отличие от прежнего мы имеем дело при возрастающем атомном номере с образованием одной из внутренних электронных групп атома, в нашем случае — с группой электронов на трехквантовых орбитах. Только в том случае, когда образование такой группы завершается, мы можем ожидать изменения в свойствах элементов с возрастающим атомным номером, подобного тому, с которым мы имели дело в предыдущих периодах системы. Анализ свойств элементов последней части четвертого периода показывает непосредственно, что соответствующая группа

в ее завершенной форме должна содержать 18 электронов; мы должны думать, например, что криптон, кроме групп одно-двух-и трехквантных орбит, имеет симметричную конфигурацию 8 электронов в четырехквантных орбитах (четыре 4_1 -орбиты и четыре 4_2 -орбиты).

Спрашивается: как представлять себе образование группы электронов на трехквантных орбитах? По аналогии со строением электронной группы на двухквантных орбитах можно было бы на первый взгляд ожидать, что законченная группа трехквантных орбит состоит из трех подгрупп по 4 электрона, расположенных на орбитах типов 3_1 , 3_2 и 3_3 ; общее число электронов 12 вместо 18, как это необходимо предположить для понимания свойств элементов. Ближайшее рассмотрение показывает ошибочность такого предположения. Устойчивость конфигурации 8 электронов на двухквантных орбитах в неоне объясняется не только симметрией электронных подгрупп, состоящих из электронов на 2_1 и 2_2 -орбитах, но также возможностью привести орбиты этих подгрупп в гармонические отношения одну относительно другой. В электронных группах с трехквантными орбитами дело обстоит иначе; три подгруппы по четыре орбиты не могут быть столь же просто приведены во взаимодействие. Наоборот, захват электронов на 3_3 -орбиты нарушает гармонию конфигурации орбит двух первых подгрупп и их взаимодействия; это произойдет во всяком случае, когда с повышением атомного номера мы дойдем до того пункта, где 19-й электрон связан уже не столь слабо в сравнении с ранее захваченными электронами в трехквантных орбитах, как в атоме скандия, но втягивается в глубь атома, двигаясь, главным образом, в области внутренних электронов. Нужно думать, что это уменьшение гармонии „открывает“, так сказать, ранее „замкнутую“ конфигурацию электронов на 3_1 и 3_2 -орбитах, вследствие чего становится возможным захват дальнейших электронов такого типа. Что касается конечного результата, то число 18 указывает на образование групп из трех подгрупп по 6 электронов. Хотя до сих пор невозможно проследить шаг за шагом образование этих групп, тем не менее наше заключение довольно интересно подтверждается тем, что три конфигурации по 6 электронных орбит могут быть чрезвычайно просто ориентированы одна относительно другой. Эта конфигурация подгрупп не обладает, однако, тетраэдрической симметрией, как группы двухквантных орбит углерода; здесь симметрия может быть названа тригональной. Несмотря на большое различие в свойствах рассматриваемых элементов, можно сказать при ближайшем изучении, что завершение группы в 18 электронов в трехквантных орбитах обнаруживается подобно завершению группы двухквантных орбит. Мы видим, что эта завершенность определяет не только неактивность неона, но также электроотрицательные свойства предыдущих и электроположительные свойства последующих элементов. Отсутствие благородного газа с внешней группой в 18 элект-

ронов на трехквантных орбитах объясняется просто тем, что размеры 3_z -орбиты значительно больше размеров 2_z -орбиты, устанавливающейся под влиянием того же силового поля. Следствием этого является то, что трехквантная группа не может служить внешней группой нейтрального атома, но появится только в положительно заряженном ионе. В характерном уменьшении валентности меди, сказывающемся в появлении медных ионов, мы усматриваем стремление к завершению симметричной электронной конфигурации, что подтверждается спектром меди. В отличие от сложности спектров предыдущих элементов, являющейся результатом асимметрии внутренней системы, дуговой спектр меди по своему типу близок к спектру натрия. Несомненно это сходство нужно приписать тому обстоятельству, что ион меди, подобно иону натрия, обладает простой симметричной структурой. С другой стороны, соединения меди показывают, что группа трехквантных орбит меди не обладает прочностью связи двухквантной группы натрия. Только в следующем элементе — цинке, являющемся двухвалентным, электроны трехквантной группы настолько сильно связаны, что они не отщепляются при обыкновенных химических процессах.

Развитые выше представления об образовании и строении элементов четвертого периода позволяют не только понять в общих чертах химические и спектральные свойства этих веществ, но подтверждаются рассмотрением характерных особенностей другого типа. Как известно, элементы четвертого периода отличаются в различных отношениях от веществ предыдущих периодов, именно частью магнитными свойствами, частью своеобразной окраской соединений. Конечно, парамагнетизм и окраска существуют и у веществ предыдущих периодов, но, однако, не в соединениях, где атомы являются ионами. Многие элементы четвертого периода обладают даже в диссоциированных водных растворах ясно выраженными парамагнитными свойствами и характерной окраской.

Обычные электродинамические представления не дают нам основания для объяснения атомного магнетизма. Это не должно нас удивлять, если вспомнить, что те же представления не в состоянии объяснить и явлений излучения, обусловленных тесным взаимодействием электрических и магнитных сил, возникающих от движения электронов. Независимо от того, как разрешится это затруднение, можно сделать вероятное предположение о том, что появление магнетизма связано с отсутствием симметрии во внутреннем строении атома. Благодаря этому магнитные силы, появляющиеся от движения электронов, не могут образовать системы силовых замкнутых в самом атоме линий. В отличие от элементов предыдущих периодов, положительные или отрицательные ионы которых обладают ясно выраженной симметрией, в веществах четвертого периода, атомы содержат электроны на трехквантных орбитах в переходной стадии между симметричной кон-

фигураций 8 и 18 электронов и потому ионы обладают несимметричной электронной конфигурацией. Коссель (Kossel) указал, что экспериментальные данные чрезвычайно просты, ионы соответствующих элементов с равным числом электронов имеют один и тот же магнитный момент. В прекрасном согласии с предположениями о строении меди и цинка опыт показывает, что магнетизм исчезает как раз для ионов с 28 электронами, где, как мы уже указывали, существует законченная группа трехквантных орбит. В целом, анализ магнитных свойств элементов четвертого периода оставляет живое впечатление о существовании здесь некоторой „раны“ в симметричном в остальных случаях строении атома; при постепенном переходе от одного элемента к другому мы становимся свидетелями возникновения и излечения этой раны. Можно надеяться, что ближайшее исследование магнетизма дает в руки путеводную нить для детального понимания процесса постепенного развития электронной группы трехквантных орбит.

Окраска ионов также подтверждает развитое выше воззрение о строении атомов четвертого периода. Согласно постулатам теории квантов мы должны представлять себе, что как поглощение, так и излучение света происходит при переходах между стационарными состояниями. Наличие окраски, т.-е. поглощения света в видимой части спектра показывает возможность переходов в атоме, сопровождающихся изменением энергии порядка величин, наблюдающихся в оптическом спектре. В противоположность ионам предыдущих периодов с сильно связанными электронами, мы можем заранее ожидать возможность переходов указанного типа у элементов четвертой группы; образование и завершение группы трехквантных орбит протекает все время, так сказать, в борьбе с возможностью связывания электронов в орбитах с более высоким квантным числом. Надо думать поэтому, что число появляющихся трехквантных орбит определяется тем, что электроны в этих орбитах сильнее связаны, чем в орбитах 4_1 ; связывание электронов в трехквантных орбитах должно продолжаться до тех пор, пока, так сказать, установится равновесие захвата электронов в орбиты обоих типов. Это обстоятельство тесно связано не только с окраскою ионов, но и со склонностью элементов четвертого периода образовывать ионы различных валентностей в противоположность элементам первых периодов, где заряд ионов в водных растворах всегда постоянен для данного элемента.

По отношению к следующим элементам периодической системы наш анализ может развиваться по естественной аналогии с вышесказанным. Рассматривая первые элементы пятого периода, мы должны предполагать, как это явствует из дугового спектра рубидия, и искрового спектра стронция, что 37-й и 38-й электроны связаны в 5_1 -орбите. Искровой спектр стронция указывает, однако, на существование 4_3 -орбит; нужно думать поэтому, что в пятом периоде,

содержащем, как и четвертый, 18 элементов, мы имеем дело с дальнейшей стадией образования электронной группы четырех-квантных орбит. Первой стадией этой группы можно считать криптон с симметричной конфигурацией из двух подгрупп по 4 электрона на 4_1 и 4_2 -орбитах. Дальнейшее предварительное завершение этой группы имеется в серебре в симметричной конфигурации трех подгрупп по 6 электронов на орбитах типа 4_1 , 4_2 и 4_3 . Все сказанное об образовании электронной группы трехквантных орбит сохраняет силу и для рассматриваемой стадии развития группы четырехквантных орбит, так как мы не делали предположений об абсолютных значениях квантных чисел и о форме орбит, определяя только число рассматриваемых типов орбит. Интересно, однако, в тоже время отметить, что элементы пятого периода несколько разнятся от элементов предыдущих периодов, что соответствует разнице типов орбит. Отклонения от характерных для второго и третьего периодов отношений валентностей наблюдается в пятом периоде позднее, чем в четвертом; в четвертом периоде титан имеет уже определенное стремление к переменной валентности, соответствующий элемент пятого периода циркон постоянно четырехвалентен, так же как углерод во втором и кремний в третьем периоде. Простое исследование кинематических свойств электронных орбит показывает, что электрон в эксцентричной 4_3 -орбите элемента пятого периода слабее связан, чем электрон в круговой 3_3 -орбите соответствующего элемента четвертого периода; электроны же, связанные в эксцентрических орбитах типов 5_1 и 4_1 , обладают почти одинаковой прочностью связи.

В конце периода, в ксеноне с атомным номером 54 мы можем ожидать, кроме уже указанных конфигураций 2 одноквантных, 8 двухквантных, 18 трехквантных и 18 четырехквантных орбит, еще симметричную конфигурацию из двух подгрупп по 4 электрона на 5_1 и 5_2 -орбитах.

Для элементов с более высоким атомным номером мы должны прежде всего предположить, как показывает спектр цезия и бария, что 55-ый и 56-й электроны связываются в 6_1 -орбитах; мы должны быть, однако, готовы натолкнуться на совершенно новые соотношения. Можно предполагать, что при возрастании заряда ядра настанет не только момент, когда электрон в 5_3 -орбите будет связываться прочнее, чем в 6_1 -орбите, но и 47-й электрон не будет захватываться в 5_1 -орбиту, а в орбиту 4_1 , где связь электрона будет прочнее; это соответствует тому моменту в элементах третьего периода, когда 19-й электрон впервые вместо 4_1 -орбиты связывается в 3_3 -орбите. Дойдя до этого места, можно ожидать, что с возрастанием атомного номера мы натолкнемся на группу элементов, следующих один за другим, обладающих, подобно семейству железных металлов, почти одинаковыми свойствами. В данном случае это выступает еще сильнее, так как мы имеем дело с последовательным образованием электронных конфигураций, находящихся в глубине атома. Вы, конечно, поняли, что я имею в виду

простое объяснение наличия семейства редких земель в начале шестого периода системы элементов. Из длины шестого периода мы можем непосредственно определить число электронов (именно 32), присутствующих после окончательного развития в группе электронов на четырехквантовых орбитах. По аналогии с соотношениями в группе с трехквантовыми орбитами можно заключить, что завершенная группа содержит по восьми электронов в каждой из четырех подгрупп. Хотя нет еще возможности проследить развитие группы шаг за шагом, мы можем все же и в данном случае получить из простых соображений основания для теоретического понимания появления симметричной конфигурации именно 32 электронов. Я укажу в связи с этим, что симметричное расположение у четырех подгрупп по шести электронов недостижимо без совпадения плоскостей орбит; такое соотношение возможно, однако, между тремя подгруппами с конфигурацией, обладающей простой тригональной симметрией. Затруднения, с которыми мы встречаемся в этом случае, делают вероятным предположение, что симметричная конфигурация осуществима при четырех подгруппах по 8 электронов; конфигурация орбит при этом должна обладать осевой симметрией.

Так же как и в семействе железных металлов четвертого периода наше объяснение наличия семейства редких земель в шестом периоде подтверждается исследованием магнитных свойств этих элементов. Несмотря на большое сходство в химическом отношении, члены семейства редких земель обладают весьма различными магнитными свойствами: некоторые показывают ничтожный магнетизм, другие же обладают атомным магнитным моментом, превышающим момент всех других исследованных веществ. Точно так же окраска соединений редких земель получает простое объяснение по аналогии с элементами четвертого периода. Кроме завершения образования группы четырехквантовых орбит мы наблюдаем у веществ шестого периода вторую стадию образования группы пятиквантовых орбит, проявляющуюся в семействе платиновых металлов, а также первую предварительную ступень образования шестиквантовой электронной группы в радиоактивном, химически недейтельном газе нитоне, замыкающем период. В атоме этого элемента мы должны предполагать существование 2 одноквантовых, 8 двухквантовых, 18 трехквантовых, 32 четырехквантовых, 18 пятиквантовых орбит и, кроме того, внешнюю симметричную конфигурацию 8 электронов в шестиквантовых орбитах, состоящую из двух подгрупп по четыре электрона на 6_1 и 6_2 -орбитах.

Переходя наконец к седьмому и последнему периоду системы элементов, мы в праве ожидать появления семиквантовых орбит в нормальном состоянии атома. В нейтральном атоме радия кроме конфигурации электронов, соответствующей нитону, появятся два электрона на 7_1 -орбитах. Эти электроны во время своего обращения будут проникать не только в области орбит с меньшим главным квантовым числом, но и на такие расстояния от ядра, которые меньше ради-

усов внутренних одноквантовых орбит. Свойства элементов седьмого периода очень напоминают свойства веществ пятого периода. В противоположность шестому периоду, в начале седьмого нет элементов аналогичных редким землям. В полном соответствии с тем, что мы говорили об отношении свойств элементов четвертого к элементам пятого периода, вышеприведенное обстоятельство объясняется тем, что эксцентрическая 5_4 -орбита соответствует более слабой связи 79-го электрона в атоме седьмого периода, чем связь 47-го электрона в круговой орбите элемента шестого периода; разница в прочности связи этих электронов на 7_1 -орбите и на 6_1 -остаётся незначительной.

Как известно, седьмой период до сих пор остаётся незамкнутым, так как мы не знаем элемента с атомным номером более 92; по всей вероятности это связано с радиоактивностью последних элементов системы; повидимому, атомные ядра с зарядом большим 92 с недостаточной устойчивы и не могут наблюдаться в тех условиях, в которых мы изучаем свойства элементов. Довольно заманчивая задача — набросать картину строения атомов с порядковым номером больше 92, образующихся захватом и связыванием электронов в поле ядра и отсюда определить химические свойства этих гипотетических элементов. Я не предполагаю, однако, останавливаться на этом вопросе, так как развитая мною интерпретация свойств фактически наблюдаемых веществ делает для вас и без того ясным способ подхода к решению такой задачи. Лучшей сводкой результатов наших соображений может быть послужит следующая таблица, содержащая символическое изображение строения атомов благородных газов, замыкающих шесть первых периодов системы элементов. Для большего подчеркивания общей тенденции в таблице приведена также предполагаемая конфигурация электронов следующего атома, с теми же свойствами, как и остальные благородные газы.

Элемент.	Атомный номер.	ЧИСЛО ЭЛЕКТРОНОВ НА n_k -ОРБИТЕ.																							
		1 ₁	2 ₁	2 ₂	3 ₁	3 ₂	3 ₃	4 ₁	4 ₂	4 ₃	4 ₄	5 ₁	5 ₂	5 ₃	5 ₄	5 ₅	6 ₁	6 ₂	6 ₃	6 ₄	6 ₅	6 ₆	7 ₁	7 ₂	7 ₃
Гелий	2	2																							
Неон	10	2	4	4																					
Аргон	18	2	4	4	4	4	—																		
Криптон	36	2	4	4	6	6	6	4	4	—	—														
Ксенон	54	2	4	4	6	6	6	6	6	6	—	4	4	—	—	—									
Иттон	86	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	6	6	6	—	—	4	4	—	—	—	—			
?	118	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	8	8	8	8	—	6	6	6	—	—	—	4	4	—

Возможно, конечно, углубить изложенные мною соображения во многих пунктах дальше, тем не менее я должен указать, что наша исходная точка зрения, покоящаяся на теории квантов и принципе соответствия, не позволяет еще проследить все стадии образования атома в деталях. Мы не можем еще сказать, что результаты вышеприведенной таблицы должны рассматриваться во всех деталях, как единственный возможный результат применения принципа соответствия. С другой стороны, изложенные соображения настолько объясняют эмпирические данные, что едва ли возможна существенно отличная интерпретация свойств элементов на основании постулатов теории квантов.

Перевел С. Вавилов.