Возрождение гипотезы Prout'a

Э. В. Шпольский.

§ 1. В 1815 году *W. Prout* предложил свою заманчивую гипотезу о том, что все элементы являются полимерами единственного первичного элемента—водорода. Известно, что под давлением весьма убедительных фактов эта гипотеза вскоре была оставлена. Классические работы *J. B. Stas'a* и *Marignac'a* показали, что атомные веса, вообще говоря, не являются целыми числами, как это следует из гипотезы Prout'a. Тем не менее, на протяжении всего XIX века и начала XX, мысль исследователя вновь и вновь обращалась к этой увлекательной гипотезе. Так, уже *Marignac* полагал, что гипотеза Prout'a есть своеобразный предельный закон, вроде законов Бойля-Мариота и Гей-Люссака; он думал, что, быть может, существует главная причина, в силу которой между атомными весами должны наблюдаться простые соотношения и вторичные причины, вносящие небольшие искажения в эти простые соотношения. Ряд других объяснений был предложен *Lothar'ом Meyer'ом, Nägeli, Landol'ом* и др. [1]).

И действительно, если мы рассмотрим периодическую систему элементов, то невольно бросается в глаза, что отступления атомных весов от целых чисел (в особенности в начале таблицы) весьма невелики. *J. R. Rydberg* [2]) и *R. J. Strutt* [3]), показали, что, с точки зрения теории вероятностей, весьма мало шансов за то, что этот факт есть дело простого случая. Именно, *Strutt* подсчитал для 9 элементов (Br, C, Cl, H, N, O, K, Na, S) вероятность того, что малые отступления их атомных весов от целых чисел есть простая случайность. Оказалось, что эта вероятность равна всего 1 : 1000. Аналогичные соображения побудили *Rydberg'a* изображать атомные веса в форме N + D (где N — целое число, D — малая дробь) и искать закономерностей как в N, так и в D.

Работы самых последних лет с новой силой воскрешают идею Prout'a. В самом деле, мы хорошо знаем, что радиоактивные превращения связаны с выделением α — частиц, т.-е. ядер гелия. Значит гелий есть составная часть ядра радиоактивных элементов. Работы

---

[1]) Исторические судьбы гипотезы Prout'a см. у C. Schmidt, Das periodische System der Chemischen Elemente. Leipzig. 1917, p.p 1—5, см. также R. Swinne, Die Naturwissenschaften, **8**, p. 727 (1920).

[2]) J. R. Rydberg. Bihang Sv. Vet-Akad. Handlingar, Stokholm, 11, № 13 (1886), ср. также R. Swinne, l. c.

[3]) См. C. Schmidt, l. c., p. 3.

Rutherford'a [1]) и его учеников показали, наконец, что ту же роль должен играть и водород и при том не только у радиоактивных, но и у легких нерадиоактивных элементов.

§ 2. Уже Rydberg [2]) обратил внимание на то, что целая часть атомного веса чаще всего может быть представлена двумя формулами

$$4n \text{ и } 4n+3 \text{ (или, что то же, } 4n-1),$$

где n — целое число. При этом, как правило, атомным весам первой формулы соответствует четный порядковый номер, атомным весам второй формулы—нечетный.

Можно пойти еще дальше и усмотреть в начале периодической системы нечто совершенно аналогичное правилам сдвига, установленным Fajans'ом и Soddy для радиоактивных элементов [3]). В самом деле, обратимся к таблицам 1 и 2. Просматривая их, нетрудно обнаружить,

Таблица 1.

Элемент	*C*	*O*	*Ne*	*Mg*	*Si*	*S*	*A*	*Ca*
Порядковый номер $Z=2n$	6	8	10	12	14	16	18	20
Атомный вес [4]) $A=4n$	12	16	20	24	28	32	40*	40
Группы периодич. системы	IV	VI	0(VIII)	II	IV	VI	0(VIII)	II

Таблица 2.

Элемент	*F*	*Na*	*Al*	*P*	*Cl*	*K*
Порядковый номер $Z=2n+1$	9	11	13	15	17	19
Атомный вес $A=4n+3$	19	23	27	31	35	39
Группы периодич. системы	VII	I	III	V	VII	I

что изменение порядкового номера на две единицы и связанный с этим переход через одну группу периодической системы, ведет к изменению атомного веса на четыре единицы, т. е. здесь происходит совершенно то же, что и при радиоактивном α-превращении.

---

[1]) См. в особенности Rutherford, Phil. Mag. (6) 37, p, p. 537, 562, 571, 581 (1919). Roy. Soc. Proc. (A) 97 p. 374 (1920). E. Rutherford and J. Chadwick. Nature 107, p. 41 (1921).

[2]) Rydberg, l. c.

[3]) K. Fajans. Phys ZS 14, pp. 131 и 136 (1913). Ibid. 16 p. 456 (1913).

F. Soddy. The Chemistry of the Radio Elements I и II, Lond. 1911; Chem. News 14, p. 422 (1913).

[4]) В этой и след. таблице атомные веса округлены.

когда из ядра радиоактивного элемента выбрасывается α-частица, уменьшая заряд ядра (=порядковому номеру) на 2 единицы и атомный вес на 4 единицы (единственное исключение составляет аргон, отмеченный звездочкой). Отсюда естественно напрашивается гипотеза, что гелий является одним из главных компонентов в структуре всех элементов вообще [1]).

Таким образом целый ряд фактов говорит в пользу возвращения к гипотезе Prout'a, которую, с современной точки зрения, надо было бы формулировать так: атомные ядра всех элементов построены из ядер водорода, гелия и электронов.

Ядро гелия надо считать весьма важной вторичной единицей структуры атомов, но само оно построено сложно и естественнее всего допустить, что оно состоит из четырех ядер водорода и двух электронов [2]).

§ 3. Каковы же, однако, те „вторичные причины", которые обусловливают отступления атомных весов от целых чисел?

На одну из таких причин различные исследователи за последнее время указывали весьма часто [3]). Это — релятивистская инерция энергии. Известно, что всякая масса эквивалентна огромному запасу „латентной" энергии и, обратно, энергия обладает инертной массой. Можно подсчитать, например, что уменьшение массы вследствие расхода энергии, развиваемой при радиоактивном распаде, для грамм-атома радия (225 gr.) составляет $1{,}41.10^{-9}$ gr. в час или $1{,}2.10^{-3}$ gr. в год [4]). Если мы представим себе, что образование сложных атомов в виде устойчивых комбинаций первоначальных структурных единиц, сопровождалось колоссальным „термохимическим" эффектом, то a priori надо ожидать, что получающийся атомный вес не будет в точности равен сумме атомных весов его компонентов. Подсчитаем, например, какая масса эквивалентна кинетической энергии α-частицы RaC'. Энергия E, эквивалентная массе m выражается $E=mc^2$, где c — скорость света и

$$m=\frac{E}{c^2}$$

Кинетическая энергия α-частицы

$$E=\frac{1}{2}\, m_{He}\, v^2=2\, m_H\, v^2$$

---

[1]) Ср. W. Kossel. Phys. ZS 20, p. 265 (1919).

[2]) W. Lenz. Müchener Ber. 1918, p. 385. Заряд ядра у гелия равен — $2e$ (e — элементарный электрический заряд — $4.77.10^{-10}$ $CGSE$), нуклеарный заряд водорода — e. Таким образом, если бы в структуру ядра гелия на ряду с четырьмя ядрами водорода не входило бы два электрона, нуклеарный заряд гелия был бы равен 4, вместо 2-х.

[3]) P. Langevin. Journal de Physique (5) 3, p. 386, (1913). W. Lenz Die Naturwissenschaften 8, p. 609 (1920) Harkins und Wilson. Zeitschr. für anorgan. Chemie 95, p. 1 (1916); A. Smekal. Die Naturwissenschaften 8, p. 206 (1920).

[4]) M. v. Laue. Die Relativitätstheorie. B. I p. 209. 3 Aufl. Braunschweig 1919.

Соответствующее ей изменение массы будет

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = 2 m_H \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

или, полагая $m_H = 1$, $v = 2.10^9$, получим

$$\Delta m = 2 \left(\frac{2}{30}\right)^2 = 0{,}01$$ [1].

Таким образом ясно, что эта причина может нам объяснить лишь небольшие отступления атомных весов от целых чисел. Для объяснения же таких значительных отступлений, как у хлора (35,45) или у магния (24,32), приходится искать других причин.

4. Здесь нам существенную помощь оказывает аналогия с явлениями из области радиоактивности. Изучение радиоактивности показало, что все разнообразие элементов далеко не исчерпывается теми 90—100 типами, которые помещаются в обычных таблицах периодической системы. Оказалось, что существует весьма большое количество элементов, которые могут различаться по атомным весам на несколько единиц (вплоть до 8), и которые тем не менее совершенно неразличимы для обычных методов химического анализа. Это элементы изотопные. Не останавливаясь подробно на явлениях изотопии, мы приведем только весьма любопытную таблицу Fajans'a [2]). Беглый взгляд на эту таблицу обнаруживает в отдельных местах ее целые скопления элементов. Это, по терминологии Fajans'a, плеяды изотопных элементов. Химический тип каждой плеяды определяется либо нерадиоактивным, либо наиболее устойчивым радиоактивным элементом, входящим в ее состав.

Изучение конечных продуктов радиоактивных рядов показало, что конечные продукты семейств урана-радия (RaG) и тория (ThD) принадлежат к плеяде свинца. Атомный вес RaG = 206, атомный вес ThD = 208 и, наконец, атомный вес обыкновенного свинца = 207,2. Все эти три элемента по химическим свойствам должны быть неразличимы; всех их, при химическом анализе, мы должны принять за свинец.

Таким образом надо ожидать, что если мы будем определять атомные веса свинца, полученного из чистых урановых руд и из чистых ториевых, то должны получиться числа, различающиеся между собой и от ат. веса обыкновенного свинца, т.-е. числа близкие к 206 и 208. И действительно, оказалось, что для наиболее чистых проб уранового свинца атомный вес равняется в лучшем случае 206,05, в худшем — 206,12; для ториевого свинца (из норвежского торита) —207,90. Между тем атомный вес свинца, изолированного из цейлонского торианита

---

[1]) См. A. Sommerfeld. Atombau und Spektrallinien. 2 Aufl. Braunschw. 1921, p. 96.

[2]) K. Fajans. Radioaktivität und die neueste Entwicklung der Lehre von den Chemischen Elementen. 2 Aufl. Braunschw. 1920, pp. 36 — 37. Таблица приведена с некоторыми изменениями и упрощениями, см. A. Sommerfeld, l. c.

Таблица 3.

Атомные веса.	0 (VIII)	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	Атомные веса.
197	—	Au	—	—	—	—	—	—	197
200	—	—	Hg	—	—	—	—	—	200
204	—	—	—	Tl	—	—	—	—	204
206	—	—	—	β *AcC''*	*RaG, AcD*	—	—	—	206
207	—	—	—	—	Pb	—	—	—	207
208	—	—	—	β *ThC''*	*ThD*	Bi	—	—	208
210	—	—	—	β *RaC''*	β *RaD*, β *AcB*	β *RaE*, αβ*AcC*	α Po, α*AcC'*	—	210
212	—	—	—	—	β *ThB*	αβ *ThC*	α *ThC'*	—	212
214	—	—	—	—	β *RaB*	αβ *RaC*	α *RaC'*, α*AcA*	—	214
216	—	—	—	—	—	—	α *ThA*	—	216
218	α *Ac - Em*	—	—	—	—	—	α *RaA*	—	218
220	α *Th - Em*	—	—	—	—	—	—	—	220
222	α Ra - Em	—	α *AcX*	—	—	—	—	—	222
224	—	—	α *ThX*	—	—	—	—	—	224
226	—	—	α Ra	β Ac	α *RdAc*	—	—	—	226
228	—	—	β *MsTh*$_1$	β *MsTh*$_2$	α *RdTh*	—	—	—	228
230	—	—	—	—	α *Io*, β *UY*	α Pa	—	—	230
232	—	—	—	—	α Th	—	—	—	232
234	—	—	—	—	β *UX*$_1$	β *UX*$_2$ β *Z*	αα *U*$_{II}$	—	234
238	—	—	—	—	—	—	α U$_I$	—	238

Греческие буквы перед символом элемента указывают на характер превращения (α-или β-превращение). При α-превращении элемент перемещается через одну группу в соответствующую низшую; при β-превращении — в следующую высшую (правила сдвига Fajans'a и Soddy). Символ αα перед U_{II} указывает на двойной характер превращения этого элемента, который дает, помимо *Io* с большой продолжительностью жизни, еще быстро распадающийся *UY* (оба помещены в одном ряду IV группы). Pa — символ вновь открытого O. Hahn'ом и L. Meitner элемента *протактиния*, по всей вероятности, служащего связующим звеном между семействами урана и актиния. *Z* - новый элемент семейства урана. Атомные веса *UY*, *Pa* и членов рядов актиния — гипотетичны.

(68,9% тория и 11,0% урана), в точности совпадает с атомным весом обыкновенного свинца (207.2) [1]). Отсюда возникает совершенно естественное предположение, что обыкновенный свинец, в сущности, является смесью уранового и ториевого свинца. Но тогда можно сделать дальнейший шаг и задаться вопросом, не являются ли некоторые из элементов нерадиоактивного происхождения также смесями изотопов. Подобная гипотеза разрешила бы противоречие между гипотезой Prout'a и опытом. Ибо, в самом деле, если элемент, который нам представляется совершенно однородным, в действительности есть смесь двух или нескольких изотопов, то атомный вес, определяемый обычными химическими методами, является некоторой средней величиной. И если атомные веса самих этих изотопов в точности выражаются целыми числами или весьма близки к ним, то средний атомный вес может как угодно отличаться от целого числа.

Работы *Aston'a*, которым посвящена вся остальная часть нашей статьи, блестяще подтвердили эту гипотезу и вместе с тем показали, что изотопия не есть особенность, присущая одним только радиоактивным элементам, но что в периодической системе она есть явление повсеместное.

§ 5. Первые результаты, в этом направлении были получены *J. J. Thomson'ом*. Изучая при помощи своего метода электромагнитного анализа каналовых лучей газ, полученный в качестве осадка от испарения жидкого воздуха, *Thomson* нашел на одной из фотографий помимо парабол, соответствующих известным благородным газам — гелию, аргону и неону, еще параболу отвечающую газу с атомным весом 22 [2]). Элемента с таким атомным весом в периодической системе не имеется. Между тем предположение, что эта парабола принадлежит соединению NeH_2 исключается, так как оказалось, что в той же смеси встречаются частицы с массой 22 и с *двумя* зарядами, чего никогда не бывает у *молекул* [3]).

Так как эта парабола, при дальнейших опытах, появлялась только тогда, когда брался неон и не была видна на сотнях пластинок, где неон заведомо отсутствовал, то *Thomson* приписал ее *изотопу неона*, который он назвал *метанеоном*.

Ученик и сотрудник *Thomson'a F. W. Aston* попытался отделить новый газ от неона (атомный вес 20,2). Оказалось, однако, что это задача в высшей степени трудная. *Aston* пользовался, главным образом, двумя методами: фракционировкой над кокосовым углем, охлажденным жидким воздухом и повторной диффузией. В том и другом случае,

---

[1]) K. Fajans, l. c. p.p. 50—58; там же (p. 106) и в обзоре K. Fajans'a (Phys. ZS 16, p. 456) 1915)—дальнейшие литературные указания по этому вопросу.

[2]) J. J. Thomson. Rays of Positive Electricity an their application to chemical Analyses. London, 1913, p. 112 и след.

[3]) *Thomson* выставляет эмпирическое правило, отступлений от которого он не наблюдал ни разу. В силу этого правила, только атомы, но отнюдь не молекулы, в условиях его опытов, могут встречаться с двумя или несколькими зарядами.

в виду разницы масс атомов, надо было ожидать положительных результатов. Между тем оказалось, что первый метод совсем не позволяет осуществить даже частичное разделение [1]). Впрочем, впоследствии *Lindemann* [2]) показал, что эта неудача была и теоретически неизбежна.

Многократная диффузия через мундштук глиняной трубки дала хотя и *слабый*, но все же положительный результат. Именно, после длительных и трудных опытов удалось получить две фракции с разницей в плотности 0,7% [3]). Впрочем, сам *Aston* не считает этот результат окончательным и вполне убедительным.

Предварительное теоретическое исследование [4]) показало, что единственный метод, позволяющий *вполне* разделить изотопы, есть метод каналовых лучей. Этот же метод является наиболее удобным для обнаружения изотопов. И потому *Aston* поставил себе целью настолько утончить электромагнитный анализ каналовых лучей, чтобы приблизить его по точности к оптической спектрометрии. Так как главным преимуществом последней является возможность фокусировки, то все внимание *Aston*'а было направлено именно в эту сторону.

§ 6. Метод *Thomson*'а основан на следующих простых соображениях. Весьма тонкий пучек каналовых лучей пропускается одновременно через электрическое и магнитное поля расположенные так, чтобы отклонения в том и другом были взаимно перпендикулярны. Но отклонение в магнитном поле будет

$$y = A\frac{e}{mv},$$

где константа A не зависит от величин e, m и v; отклонение в электростатическом поле будет

$$z = B\frac{e}{mv^2},$$

где B также не зависит от e, m и v. Из этих двух равенств имеем

$$y^2 = \frac{A^2}{B}\cdot\frac{e}{m}z$$

Следовательно, если перпендикулярно к первоначальному направлению пучка поставить фотографическую пластинку, то все частицы с одинаковым $\frac{e}{m}$ оставят на ней след в виде параболы. Каждая парабола будет характерна для данного сорта частиц, и таким образом можно производить химический анализ газа, заключающегося в разрядной трубке простым сравнением параметров этих парабол [5]).

Расположение *Aston*'а несколько отличается от схемы *Thomson*'а,

---

[1]) F. A. Lindemann и F. W. Aston, Phil. Mag., 37, p. 523 (1919).

[2]) F. A. Lindemann. Phil. Mag., 37 p. (1919).

[3]) F. A. Lindemann и Aston. l. c.

[4]) Lindemann и Aston. l. c.

[5]) Подробности об этом методе см. в цитированной книге Thomson'а. См. также сборник „Новые идеи в физике". Вып. 7-й.

Общая идея этого расположения дана на черт. 1 [1]. S_1 и S_2—две чрезвычайно узкие щели специальной конструкции (подробности см. ниже).

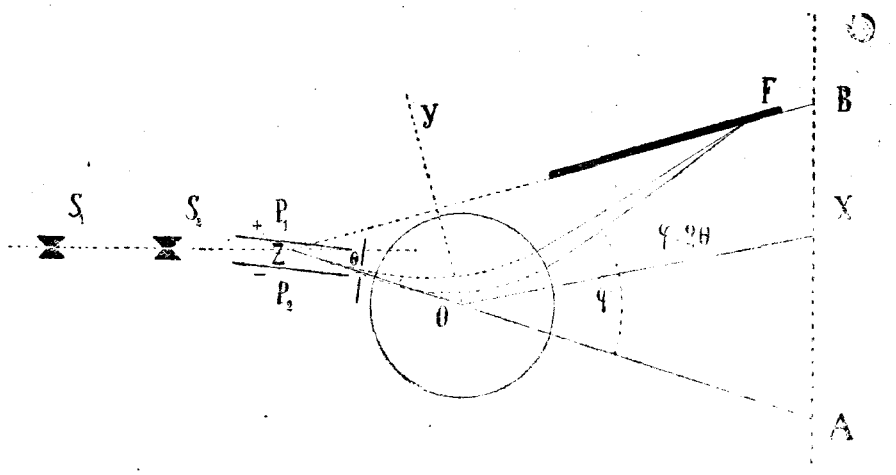

Рис. 1.

Получающийся тонкий пучек каналовых лучей развертывается в электрический спектр, проходя между двумя пластинками конденсатора P_1 и P_2, при чем развернутый пучек можно, в первом приближении, считать исходящим из мнимого источника Z. Часть лучей этого развернутого пучка вновь выделяется диафрагмой D и пропускается между параллельными полюсами большого электромагнита. Полюсы для простоты, имеют круглую форму, поле между ними равномерно *и имеет такой знак, что лучи отклоняются в нем в направлении противоположном электрическому отклонению.* В этом — существенное отличие расположения *Aston*'а от Thomson'овского.

Пусть θ и φ — алгебраические значения углов отклонения выпущенного пучка в электрическом и магнитном поле; пусть $ZO = b$. Положим для простоты расчетов, что магнитное поле сконцентрировано в точке O, и обозначим длину дальнейшего пути пучка от этой точки через r. Так как, далее, отклонения в электрическом и магнитном поле друг другу противоположны, то θ есть некоторый отрицательный угол; пусть $\theta = -\theta'$. Принимая во внимание, что φ и θ' — углы малые (на чертеже они сильно преувеличены), можно показать [2] что при условии

$$r\,(\varphi - 2\,\theta') = b.\,2\,\theta',$$

все частицы обладающие одним и тем же $\frac{e}{m}$, *но разными скоростями, соберутся в некотором фокусе* F. Написанному уравнению практически можно удовлетворить, подобрав соответствующим образом поле и таким образом мы получаем возможность *фокусировать* каналовые лучи.

---

[1]) Чертеж представляет, разумеется, только *закатодную* часть прибора.

[2]) F. W. Aston. Phil. Mag., 38, p. 707 (1919).

Возьмем оси координат так, как показано на чертеже. [redacted] ординаты F будут

$$r \cos (\varphi - 2\theta') \text{ и } r \sin (\varphi - 2\theta')$$

или, вследствие малости углов,

$$r, r(\varphi - 2\theta') = b. \ 2\theta'.$$

Таким образом в первом приближении, для любого поля, все фокусы должны лежать на линии ZF параллельной OX, поскольку положение диафрагмы является неизменным. И если вдоль этой линии расположить фотографическую пластинку (на чертеже показана жирной чертой), то на ней получится ряд „спектральных линий", из которых *каждая будет соответствовать определенному значению* $\frac{e}{m}$.

От общей идеи метода перейдем к экспериментальным деталям, которые настолько интересны, что мы считаем необходимым на них остановиться. Рис. 2-й дает общую схему установки [1]). Разрядная

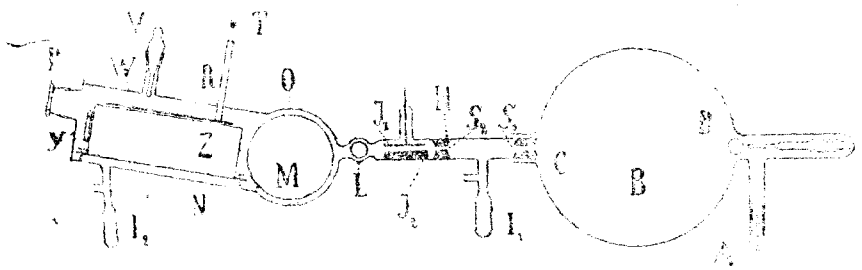

Рис. 2.

трубка B представляет собою обыкновенную рентгеновскую трубку 20 cm. диаметром. Алюминиевый анод A окружен изолированным алюминиевым цилиндром, игравшим роль вентиля. Катод C (алюминиевый) расположен как раз в начале шейки трубки. Чтобы не расплавилась противоположная стенка, прямо против катода расположен кварцевый шарик D (12 m.m. диаметром). Кварц в качестве антикатода особенно удобен потому, что он до минимума сводит, нежелательные в данном случае, рентгеновские лучи.

Детали устройства катода видны на рис. 3. Шейка прикреплялась воском к латунному кольцу E, которым заканчивается латунная же трубка F, коаксиально охватывающая внутреннюю более узкую трубку, несущую катод. Место скрепления, охлаждалось проточной водой, циркулировавшей по трубочке G.

Исследуемый газ подтекал по тонкому капилляру через отверстие Q; через симметрично расположенное отверстие производилась откачка ртутным насосом Геде.

Катод в центре был просверлен, при чем канал имел слегка коническую форму (диаметр 3 mm.). В этот то канал и вставлялась

[1]) Aston. Phil. Mag. 39. p. 611 (1920).

первая главная щель S_1. Катод герметически вгонялся в латунную трубку, в которой, на расстоянии 10 cm., располагался сплошной кусок латуни H, также слегка конически просверленный. Этот последний канал нес вторую щель S_2. Ширина каждой щели составляла 0,05 mm., длина—2 mm.; их необходимо было установить строго параллельно, для чего пришлось воспользоваться уже диффракционными явлениями. Пространство между щелями откачивалось до последней возможности, при помощи кокосового угля и жидкого воздуха. Последнее обстоятельство весьма важно, ибо таким образом до минимума сводилась потери от рассеяния и нейтрализации лучей, вследствие столкновения.

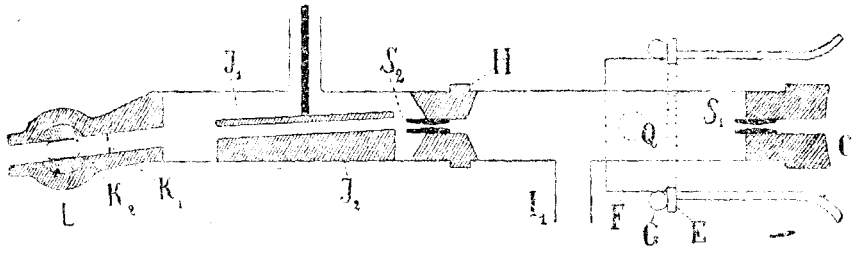

Рис. 3.

По выходе из щели S_2 лучи попадали в электростатическое поле между двумя плоскими латунными поверхностями. Пластинка J_1 могла заряжаться до любого потенциала батареей маленьких аккумуляторов; J_2—соединялась непосредственно с трубкой и вместе с ней отводилась к земле. Чтобы иметь возможность уменьшить расстояние между поверхностями, они располагались несколько под углом к первоначальному направлению пучка.

Непосредственно за этим лучи проходили через две диафрагмы K_1 и K_2. Из них K_1 неподвижна и служит исключительно для того, чтобы не дать возможности лучам попасть на масляную поверхность крана L. Вторая диафрагма K_2 помещена в отверстии тщательно заземленного крана L; она подвижна, при чем ее ширина изменяется при повороте крана.

Далее лучи попадали в магнитное поле. Цилиндрические полюсные наконечники (диам.—8 cm.) большого электромагнита Дюбуа впаивались в латунную трубку O, которая составляет часть камеры N; расстояние между полюсами—3 mm.

Наконец, последний этап пути лучей—камера N. Она сделана из прочной латунной трубы 6,4 cm. в диаметре. С целью полной электростатической защиты, лучи идут в узком пространстве (3 mm.) между двумя параллельными латунными пластинками ZZ (рис. 4), сверху закрытом третьей пластинкой XX. В этой последней имеется прорез (2 mm.), за которым и располагается фотографическая пластинка W. Невычерченное детально приспособление V позволяет перемещать ее параллельно самой себе и нормально к прорезу, так что на одной

пластинке можно было получать несколько снимков. Y—небольшой виллемитовый экран для наблюдений, которые можно было производить через окошко *P*, закрытое красным стеклом. Перед началом и концом каждого снимка на несколько секунд зажигалась лампочка *T*; свет от нее через два весьма тонких отверстия в трубке *R* падал на фотографическую пластинку и оставлял там пятнышко, служившее исходным пунктом при всех измерениях [1]).

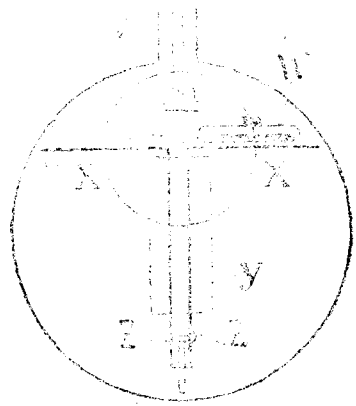

Рис. 4.

На рис. 5 приведено несколько таких снимковк. *Aston* называет их массовыми спектрами элементов (The Mass Spektra of chemical Elements). Как видно, линии этих спектров широки, но по каким-то причинам, геометрического характера, более отклоненный край их всегда резче и ярче; именно по этому краю и производились все отсчеты. Теоретически, достаточно знать массу, соответствующую одной из „спектральных линий", чтобы определить массы, отвечающие всем остальным. Но *Aston* построил целую шкалу известных линий и массу для всякой новой линии определял по сравнению с двумя уже известными и при том расположенными по обе стороны новой. При таких условиях точность опреления масс достигала 1 промилле.

Как мы уже видели, положение линий в массовых спектрах зависит от $\frac{m}{e}$. Если в пучке каналовых лучей некоторый атом встречается не только с одним, но и с двумя, тремя зарядами, то в спектре будут линии $\frac{m}{e}$, $\frac{m}{2e}$, $\frac{m}{3e}$. Такие линии, соответствующие кратным зарядам, не трудно распознать, ибо очевидно, что по отношению к основной линии им будут соответствовать массы в 2, 3 и т. д. раз меньшие.

$$\left(\frac{\frac{m}{2}}{e}, \frac{\frac{m}{3}}{e}\right) \text{ и т. д.}$$

Aston называет эти линии соответственно линиями 2-го, 3-го и т. д. порядков. На примерах анализа спектрограмм, которые мы дадим ниже, этот прием ориентировки выяснится вполне. Для различения атомов от сложных молекул той же массы *Aston* пользовался цитированным выше правилом *Thomson*'а, в силу которого молекулы дают линии только первого порядка.

[1]) В самое последнее время, для изучения массовых спектров некоторых металлов *Aston* и *G. P. Thomson* предложили несколько видоизмененное расположение. Именно, они пользуются не каналовыми, но *анодными* лучами Gehrke и Reichengeim'a. Применяя анод особого устройства (по Dempster'y Phys. Rev. 11, p. 316, 1918) они могли получать чистые металлические лучи. Таким образом

§ 7. Так как все измерения в массовых спектрах имеют относительный характер, то какой-нибудь элемент необходимо выбрать за основной и к нему относить массы всех остальных элементов. По понятным причинам *Aston* остановился на кислороде. Его молекула и атом с одним и двумя зарядами дают основные линии 32, 16 и 8. Весьма точные интегральные соотношения между атомными весами углерода и кислорода внушают уверенность, что оба они—элементы „чистые" (т.-е. не имеют изотопов), и пока что ни один факт этой уверенности не поколебал. Непосредственное сравнение линий C (12) и CO (28) с упомянутыми основными линиями дало ожидаемые целые отношения, при чем аддитивность масс $(CO = C + O)$ также соблюдается в пределах ошибок наблюдения (1 пром.). Благодаря этому мы получаем еще несколько „штандартных" линий: C^{++}(6), C(12), CO(28) и CO_2(44). Весьма удобны также в качестве основных линии углеводородных радикалов, которые в свободном состоянии существуют в каналовых лучах. Это так называемые группы C_1 и C_2: C_1(12), CH(13), CH_2(14), CH_3(15), CH_4 (или O) (16) и C_2(24); C_2H(25), C_2H_2(26), C_2H_3(27), C_2H_4 (или CO)(28), C_2H_5(29), C_2H_6(30) [1]). Таким образом получается целая шкала масс, охватывающая довольно значительный интервал. По каким-то не вполне понятным причинам, вероятно, зависящим от геометрии аппарата [2]), между массами и смещениями соответствующих линий, с достаточной строгостью выполняется *линейное соотношение*. Это обстоятельство очень облегчает работу и повышает точность измерений.

§ 8. Обратимся к анализу некоторых спектрограмм (рис. 5).

Неон (ат. вес. 20,20).

В массовом спектре неона видны две линии 20 и 22, которые отчетливо повторяются также во втором порядке (спектрограммы не приведены). На некоторых снимках видны слабые следы линии 21. Таким образом подтверждается предположение *Thomson*'а о существовании изотопа неона, с тою только разницей, что *оба* изотопа отвечающие химическому типу „неон", обладают *целыми атомными весами*.

Весьма интересные результаты получены *с хлором* (ат. в. 35,46) (снимки II, III и IV). При изучении этого элемента в аппарат пускался фосген ($CO\ Cl_2$). Рассматривая спектрограмму III, мы видим, что в области, где должна бы быть линия хлора, имеются 4 линии 35, 36, 37 и 38. *Никаких следов линии, отвечающей обычному атомному весу*

было изучено строение щелочных металлов и бериллия, а также магния (Dempster'ом). См. *F. W. Aston* и *G. P. Thomson* Nature 106, p. 827 (1921); *F. W. Aston* Nature 107, p. 72 (1921); *A. J. Dempster*. Phys. Rev. 17, p. 427 (1921); *F. W. Aston*. Nature 107 pp. 520 *G. P. Thomson* Nature 107, p. 395 (1921).

[1]) Эти линии появляются почти всегда благодаря присутствию в аппарате жирных паров.

[2]) Aston. Phil. Mag. 40. p. 628 (1920).

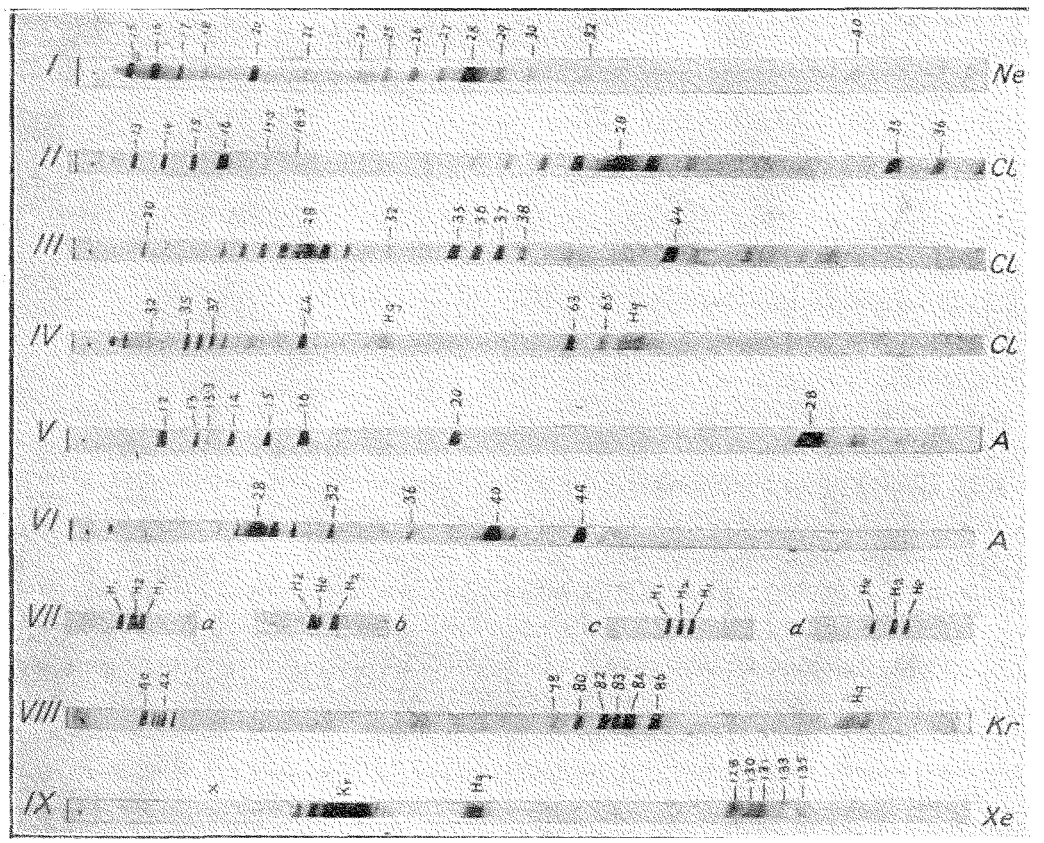

Рис 5.

хлора 35,46, не имеется. На спектрограмме II видны слабые линии 17,5 и 18,5; они появляются только тогда, когда в аппарате имеются следы хлора, и, несомненно, являются линиями второго порядка для 35 и 37. Линии 36 и 38, очевидно, относятся к HCl^{35} и HCl^{37}. На спектрограмме IV имеются еще линии 63 и 65; их *Aston* приписывает $COCl^{35}$ и $COCl^{37}$.

Из всего этого следует, что обычный хлор с атомным весом 35,46 есть элемент „смешанный“: он состоит на самом деле из смеси двух изотопов с атомными весами ровно 35 и 37. Следовательно, наблюденный атомный вес есть статистическое среднее. Но если это так, то a priori надо ожидать, что компонент 35 в смеси должен преобладать. И действительно, сравнение яркостей линий 35 и 37 вполне подтверждает это, хотя пока еще трудно определить пропорцию смешения.

Криптон (ат. в. 89,92) и *ксенон* (ат. в. 130,2) оказались также элементами весьма сложными (спектры VIII и IX). Первый состоит по крайней мере из *шести* изотопов: в его массовом спектре имеется пять ярких линий 80, 82, 83, 84, 86 и одной слабой 78. Все эти линии превосходно повторяются во втором и третьем порядке, что дает возможность с большой точностью определить атомные веса изотопов. Ксенон имелся в весьма незначительном количестве (несколько кубических миллиметров), и потому его исследование носит предварительный характер. Однако, сложная природа этого элемента не подлежит сомнению. В качестве предварительных значений для атомных весов его изотопов *Aston* дает следующие цифры: 128, 130, 131, 133 и 135 [1]).

Весьма сложной оказалась также и *ртуть* (ат. в. 200,6). У нее *Aston* насчитывает до шести изотопов. На спектрограммах видна, во-первых, размытая полоса 197—200 и, во-вторых, две линии 202 и 204. В полосе 197—200 *Aston* находит возможным считать три или четыре изотопа. Результаты эти, разумеется, имеют пока предварительный характер.

Мы остановимся еще только на *гелии* и *водороде*, а все остальные результаты дадим просто в виде таблицы. Точное определение атомных весов у гелия и водорода представляет трудности в том отношении, что линии их значительно удалены от штандартных. В виду этого пришлось разработать особый прием определения масс специально для данного случая. Мы не будем останавливаться на этом приеме, но сразу дадим результаты.

а) *Гелий.*

Из сравнения с O^{++} = 8,00 ат. в. = 3,994 — 3,996
„ „ „ O^{+} = 6,00 ат. в. = 4,005 — 4,010.

Таким образом гелий есть элемент „чистый“.

---

[1]) Впоследствии *Aston* получил в свое распоряжение большее количество ксенона и вновь исследовал его. Результаты этого исследования даны в таблице 4.

Таблица 4[1]).

Элемент.	Атомный номер.	Атомный вес.	Минимальное число изотопов.	Массы изотопов в порядке интенсивности линий.
H	1	1,008	1	1,008
He	2	3,99	1	4
Li	3	6,94	2	6,7
Be	4	9,1	1	9
B	5	10,9	2	11,10
C	6	12,00	1	12
N	7	14,01	1	14
O	8	16,00	1	16
F	9	19,00	1	19
Ne	10	20,20	2 (3)	20,22 (21)
Na	11	23,00	1	23
Mg	12	24,32	3	24, 25, 26
Si	14	28,3	2 (3)	28,29 (30)
P	15	31,04	1	31
S	16	32,06	1	32
Cl	17	35,46	2 (3)	35, 37 (39)
A	18	39,88	2	40,36
K	19	39,10	2	39,41
As	33	74,96	1	75
Br	35	79,92	2	79, 81
Rb	37	85,45	2	85,87
Kr	36	82,92	6	84, 86, 82, 83, 80, 78,
J	53	126,92	1	127
Xe	54	130,2	5 (7)	129, 132, 131, 134, 136 (128, 130?)
Cs	55	132,81	1 [2])	133
Hg	80	200,6	(6)	(197 — 200), 202, 204.

[1]) Цифры в скобках имеют предварительный характер.
[2]) У *Cs* обнаружен пока один изотоп.

b) *Водород.*

Для изучения водорода брались молекулы H_3 (Томсоновская молекула X_3) и H_2. Результаты получились следующие:

H_3[1]	из C^{++}	$=6{,}00$	$3{,}025-3{,}027$
	„ He	$=4{,}00$	$3{,}021-3{,}030$
H_2	„ He	$=4{,}00$	$2{,}012-2{,}018$

Таким образом из всех исследованных элементов водород представляет единственное исключение. *Будучи элементом „чистым" он обладает атомным весом (O = 16,00) отличающимся от целой единицы, а именно, атомным весом, совпадающим с общепринятым 1,008.* На возможных причинах этой аномалии мы остановимся несколько ниже.

Приведем теперь таблицу окончательных результатов (табл. 4 стр. 254).

§ 8. На основании этой таблицы можно сделать обобщение, которое *Aston* называет правилом целого числа (The Whole — number Rule): для исследованных элементов, за исключением водорода, все массы атомные или молекулярные суть, в пределах точности наблюдений, *целые числа.* Довольно значительное количество и разнообразие уже изученных элементов внушает уверенность, что это правило является справедливым вообще.

Исключительное положение водорода, разумеется, нуждается в объяснении. Здесь необходимо напомнить прежде всего, что не только водород, как таковой, но и, быть может, главным образом, также и вторичные единицы вроде гелия принимают участие в структуре элементов. Однако, если это так, всетаки еще остается объяснить, почему у гелия, ядро которого само построено из четырех водородных ядер и двух электронов, атомный вес равен в точности четырем. Мы уже указывали, что для обяснения малых отступлений от целых чисел обычно привлекают релятивистскую инерцию энергии. В частности, для случая гелия *Lenz*[2]) именно с этой точки зрения объясняет ту необычайную устойчивость ядра гелия которая поразила Rutherford'a[3]). Необходимо еще указать, что такие малые отступления

---

[1]) Таким образом, из этих измерений с совершенной определенностью выяснилась и природа загадочного газа X_3.

[2]) W. Lenz l. c. См. также A. Sommerfeld Atombau, p. 586 и след.

[3]) Rutherford в заключении своей исторической работы (Collision of α-Particles with Light Atoms. IV. An anomalous effekt in nitrogen. Phil. Mag. 37, p. 581 1919) пишет, что его не столько удивляет, что при столкновении α-частицей разрушается азот, сколько то, что сама α-частица выдерживает те огромные силы, которые при этом развиваются. Пользуясь приведенной на стр. 244 формулой Lenz подсчитал, что „теплота образования" ядра гелия должна составлять для грамм-атома в больших калориях $6{,}25 \cdot 10^9$ Cal. Для сравнения стоит напомнить, что теплоты образования при обычных химических процессах имеют порядок 100 Cal. Таким образом с этой точки зрения необычайная устойчивость ядра гелия является вполне понятной.

с чисто электромагнитной точки зрения вполне понятны. Ведь электромагнитную массу сложного образования можно рассчитывать аддитивно до тех пор, пока компоненты достаточно удалены друг от друга. Если речь, напр., идет о молекуле водорода H_2, то можно считать, что ее масса равна удвоенной массе атома водорода. Но когда компоненты расположены чрезвычайно тесно, как это и бывает в ядре, то поля их налагаются друг на друга, и à priori надо ожидать, что результирующая масса не будет в точности равна сумме масс исходных (*Harkins* и *Wilson* остроумно называют это явление — „Packeffekt").

Есть еще один вопрос, на котором необходимо остановиться. В течение нескольких лет *F. W. Richards* в лаборатории Гарвардского университета ведет замечательные определения атомных весов с целью установить, нет ли разницы в атомных весах у элементов, взятых из различных мест земной поверхности. Результаты до сих пор получались всегда отрицательные. Так, у меди немецкого и американского происхождения атомные веса оказались совершенно одинаковыми. То же было обнаружено у обыкновенного свинца самого разнообразного географического и минералогического происхождения, у хлора, натрия, серебра и т. д. Еще любопытнее, что атомный вес *метеорного железа* оказался совпадающим, в пределах погрешностей наблюдений, с атомным весом железа земного. Но если многие элементы на самом деле представляют собой смесь изотопов, то такое постоянство атомных весов свидетельствует о том, что эти изотопы повсюду смешаны в одинаковом отношении. Причина этого постоянства еще не вполне ясна. Возможно, что наши элементы сформировались уже тогда, когда земля была еще в жидком или даже газообразном состоянии и смогли в то время равномерно перемешаться [1]). Впрочем, экспериментальных фактов для разрешения этого вопроса у нас пока что нет совсем; здесь еще — обширное поле для разнообразных гипотез [2]).

---

[1]) См. напр. K. Fajans. Radioactivität etc.

[2]) Мы лишь вскользь коснулись (по поводу метанеона) других методов разделения изотопов кроме метода каналовых лучей. Добавим к этому, что Harkiny's Nature, 105 p, 230, (1920) удалось осуществить частичное разделение изотопов хлора путем повторной диффузии; Brönsted и Hevesy (Nature 106, p. 144, 1920) добились тоже частичного разделения изотопов ртути, испаряя ее под малым давлением и конденсируя, испарившуюся ртуть на охлажденной поверхности; наконец Hevesy (Nature 108, p. 000 1921) тем же методом разделил изотопы хлора. F. W. Loomis (Phys Rev 17, 436, 1921) указал на то, что наличность изотопов должна отражаться на инфракрасном спектре поглощения газа. Именно, отдельные линии ротационных полос поглощения в ближней инфракрасной части спектра должны представляться дублетами. И действительно, на кривых поглощения HCl, данных Imes'ом (Astrophys. Journal 50, p. 251, 1919) видно, что каждая линия в полосе 1,76 и сопровождается на расстоянии 14 Å (в сторону длинных волн) более слабым спутником; расстояние же вычисленное на основании атомных весов изотопов составляет 13,5 Å. Эти-то слабые спутники и приписываются Cl^{37} (См. также работу A. Kratzer'a. ZS. für Physik 3, p. 460, 1920).

Работы *Rutherford*'а и *Aston*'а служат новым могущественным стимулом к возрождению гипотезы *Prout*'а. Водород снова получает роль первичного элемента, и *Rutherford* предложил даже для него и новое название, *протон*, соответствующее этой роли. Но мы остановились так подробно на работах *Aston*'а еще и потому, что среди блестящих успехов физики за последние годы открытие изотопии у обыкновенных элементов занимает одно из наиболее заметных мест. И независимо от каких бы то ни было гипотез, „правило целого числа" есть факт, с которым всякому исследователю в этой области придется считаться.