

МАГНИТО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД И ИЗОТОПЫ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В. П. Русаков, Смоленск.

ВВЕДЕНИЕ

Магнито-оптическое явление, открытое Фарадеем, как известно, заключается в том что поляризованный свет, проходя через изотропные тела, испытывает вращение плоскости поляризации, если эти тела помещены в сильное магнитное поле, и если направление света параллельно направлению магнитных силовых линий, причем направление вращения плоскости поляризации света зависит от того, идут ли лучи от северного полюса магнита к южному или обратно.¹ Угол α , на который поворачивается плоскость поляризации, пропорционален напряжению магнитного поля H , длине пути l , проходимого лучом внутри тела, и выражается формулой:

$$\alpha = V H l, \quad (1)$$

где коэффициент пропорциональности V получил название постоянной Верде и означает угол, на который поворачивается плоскость поляризации, когда луч проходит внутри тела расстояние, равное 1 см, и когда напряжение поля H равно 1 гауссу. Порядок величины ее равен нескольким угловым секундам.

Опыты, произведенные Виллари¹, показали, что между моментом возникновения поля и моментом, когда вращение плоскости поляризации достигает наибольшей величины, проходит хотя и небольшое, но вполне определенное время. Опыты заключались в следующем. Кусок тяжелого стекла вращался между полюсами сильного электромагнита, при этом наблюдалось уменьшение вращения плоскости поляризации, когда скорость вращения куска стекла превышала 100 об/сек, и делалось практически равным нулю, когда она достигала 200 оборотов. Время, которое необходимо, чтобы после создания магнитного поля вращение плоскости поляризации достигло своей наибольшей величины, получило название момента отставания или момента запаздывания. Порядок величины момента отставания приблизительно равен 10^{-8} сек. Этим, повидимому, и объясняется, что дальнейшие опыты, поставленные Блондло² и Лоджем³ для установления момента отставания, привели к отрицательным результатам: продолжительность времени слишком коротка, чтобы можно было точно учесть ее при той экспериментальной технике, которая была в их время.

Опыты Блондло заключались в следующем. Лейденская банка разряжалась через спираль изолированной проволоки, окружающей трубку, наполненную сероуглеродом (CS_2). Было найдено, что плоскость поляризации поворачивалась с каждым импульсом колеблющегося разряда, вибрируя взад и вперед со скоростью, приблизительно, 70 000 раз в секунду. Верхняя половина узкой щели освещалась светом разрядной искры, который падал на вращающееся зеркало. Нижняя часть щели освещалась светом, проходящим через трубку с сероуглеродом и падающим на то же зеркало. Освещенная щель была видна в зеркале растянута в виде зазубренной полосы, и никаких разрывов между двумя половинами найдено не было. Отсюда и был сделан вывод, что эффект Фарадея практически является мгновенным.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВОК

В самое последнее время явление Фарадея и основная идея установки Блондло были применены Ф. Эллисоном ⁴ и его сотрудниками ⁵ в качестве очень точного метода химического анализа, пригодного для обнаружения изотопии ⁶ и превосходящего по своим результатам наиболее чувствительный из известных в наше время методов, масс-спектрограф Астона ⁷. Позже некоторые опыты Ф. Эллисона были повторены Ф. Слэком и В. Бризилем ⁸ и привели, в основном, к тем же результатам.

Установка опыта заключалась в следующем (рис. 1). Между скрещенными призмами Николя N_1 и N_2 поляриметра Липпиха помещалась стеклянная трубка A около 11,2 см длиной и 2,5 см в диаметре, к концам которой припаивались прозрачные стеклянные пластинки. Трубка наполнялась испытуемым раствором и вставлялась внутрь катушки L длиной в 12 см и 4,5 см в диаметре, состоящей из 59 оборотов медной изолированной проволоки. Самоиндукция катушки равнялась 0,045 мН. Параллельно катушке L присоединялась совершенно такая же добавочная катушка L' . На схеме T обозначает резонирующий искровой трансформатор, рассчитанный на 1 KVA и дающий максимальное напряжение во вторичной обмотке в 25 000 В при 110 В в первичной обмотке. Ток высокого напряжения вы-

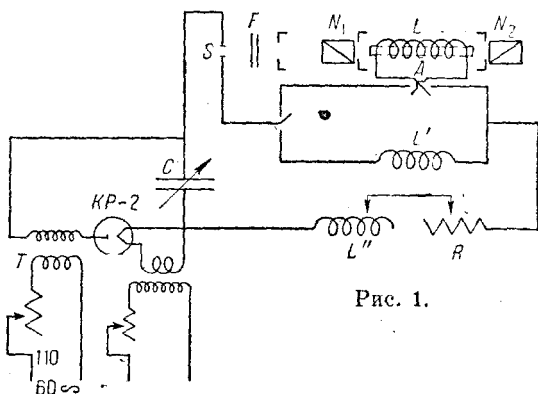


Рис. 1.

прямлялся при помощи кенотрона и заряжал конденсатор C каждую шестидесятую долю секунды. Последний состоял из 20 пластинок стекла, 0,3 см толщиной, с покрытой тонкой фольгой площадью в 25 см², и давал полную емкость 0,022 мФ. Емкость могла изменяться путем выключения пластин конденсатора. Конденсатор, достигая определенного потенциала, разряжался при помощи искрового промежутка S , который располагался горизонтально и имел $1/8$ -дюймовые магнетиые электроды, отстоящие друг от друга на расстоянии от 0,25 до 0,30 см. Разрядный ток проходил через катушки L или L' , омическое сопротивление R и индуктивное сопротивление L'' . Сопротивление R состояло из двух параллельно протянутых проволок, которые располагались над аппаратом. Сопротивление изменялось посредством контакта, который скользил вдоль этих проволок. Проволоки были сделаны из хромоникелина, представляющего сопротивление 6,85 ом/м, и имели полную длину около 16 м, хотя иногда применялись и проволоки несколько длиннее. Катушка L'' имела 325 оборотов медной изолированной проволоки и представляла самоиндукцию в 0,66 мН. В ней было несколько неизолированных точек, благодаря которым могла быть изменена ее самоиндукция. Свет от искры проходил сквозь фильтр F , состоящий из двух пластинок иенского стекла ($BG_4 + GG_3$), пропускающих, главным образом, магнетиые искровые линии $\lambda = 4481 \text{ \AA}$ и в небольшом количестве линии $\lambda = 4703$, $\lambda = 4391$ и $\lambda = 3835 \text{ \AA}$, и падал на липпиховский полутеневоый оляриметр. Далее, свет проходил сквозь трубку A и попадал в анализатор N_2 . В течение того времени, когда ток протекал сквозь катушку L , жидкость, аходящаяся в трубке A , под действием магнитного поля, вращала плоскость оляризации светового луча; величина вращения измерялась поворотом анализатора N_2 , причем отсчет поворота мог быть сделан с точностью до 0,01°. запасная катушка L' обычно не действовала и применялась только для того, чтобы отвести ток, когда катушка L выключалась для установления

нулевого положения. Как катушка L' , так и сопротивление R , обычно, включались и применялись только при желании изменить или самоиндукцию, или омическое сопротивление колебательного контура.

Иногда установка видоизменялась. В этом случае действующая катушка L состояла из двух совершенно одинаковых частей L_1 и L_2 , которые включались как каждая отдельно, так или последовательно, или параллельно друг другу, причем в последних двух случаях включение производилось так, чтобы вращающее поле или складывалось или было противоположно. При этой установке применялось два сопротивления R_1 и R_2 , соединенных последовательно с каждой из катушек. На рис. 2 дана схема параллельной связи катушек L_1 и L_2 . Остальная часть установки была одинакова с той, которая указана на рис. 1.

Перед производством отсчетов устанавливалось нулевое положение анализатора, для чего ток пропускаться через запасную катушку L' . Потом тот же пульсирующий ток, происходящий вследствие разряда конденсатора, пропу-

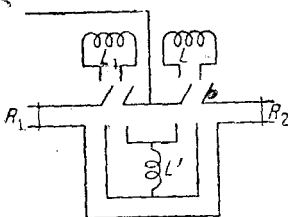


Рис. 2.

скался через катушку L , внутри которой создавалось магнитное поле, действующее на вещество находящееся в трубке A . Плоскость поляризации света вращалась в соответствии с полем, причем наблюдалось просветление обоих полей поляриметра не только яркость одного из них была более резко выраженной. Положение анализатора подбиралось так, чтобы оба поля были одинаково освещены, что и принималось за величину вращения. Такие наблюдения производились при различной силе тока. Длина искрового промежутка и первичное напряжение трансформатора поддерживались, приблизительно, постоянными; последнее было около 60 и регулировалось рядом реостатов.

Механизм процесса, вызывающего вращение, можно объяснить так. Ток в цепи, вследствие введенных в нее самоиндукции L и омического сопротивления R , является быстро затухающим, что можно видеть из уравнения (для затухающего синусоидального колебания):

$$i = \frac{Ee^{-\frac{Rt}{2L}}}{L \left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} \right)^{1/2}} \sin \left(\left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} \right)^{1/2} t \right), \quad (1)$$

где i — ток в некоторый момент времени, E — начальное напряжение, при котором конденсатор разряжался.

В условиях опыта, колебания затухали после нескольких циклов, при наблюдениях показали, что количество ходов в цикле имело мало влияния и не влияло совсем на наблюдаемое вращение. Последнее было пропорционально разности между первым максимумом кривой тока (положительным) и вторым максимумом (отрицательным). Предположим, что первый цикл волны тока вызывает вращение в направлении часовой стрелки, которое, в свою очередь, вызывает наибольшую яркость правой стороны поля поляриметра, пропорционально первому максимуму тока. Второй максимум вызовет вращение противоположное часовой стрелке, вследствие чего будет просветление левой стороны поля. Но так как вторая вершина меньше, чем первая, то яркость левой стороны поля будет не так велика, как правой. Такие циклы повторяются шестьдесят раз в секунду, глаз не заметит никаких миганий и с каждым полем будет казаться равномерно освещенным. Поворот анализатора до тех пор, пока яркость двух полей не сделается одинаковой, даст величину вращения плоскости поляризации. Положение, что величина вращения пропорциональна разности максимумов, проверялось так. Высчитывались и чертились кривые максимумов положительной и отрицательной части первой волны тока при различных сопротивлениях R , которые на рис. 3 представлены пунктирными кривыми, соответственно. Кривая 3 представляет разность ординат двух первых кривых.

Экспериментальные результаты нанесены в виде точек, которые очень хорошо совпадают с теоретической кривой. Так как наибольшая величина магнитного поля, создаваемого в катушке, может быть выражена уравнением

$$H = 0,4 \pi ni, \quad (3)$$

где n — число оборотов проволоки на один сантиметр катушки, а i — максимум тока в амперах, то угол поворота α , согласно уравнению (1), выразится так:

$$\alpha = 0,4 \pi ni V. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что установка Слэка отличалась от установки Эллисона только тем, что первый вместо полутеневого поляриметра Липшиха применял просто скрещенные николи.

3. Применение метода к изучению изотопов

Изучая явление вращения плоскости поляризации, Эллисон⁴ нашел, что каждое химическое соединение вызывает минимум света в местах, характерных для данного соединения, причем положение минимума представляет некоторую обратную функцию химического эквивалента металлического элемента неорганического соединения. Такой минимум остается все время заметным, пока концентрация растворенного вещества не становится меньше, чем 10^{-10} . Одновременно с этим было обнаружено, что каждое неорганическое соединение характеризуется или одним или двумя и более минимумами, причем число минимумов, за некоторым исключением, являлось тем же самым, что и число известных изотопов металлического элемента соединения. Беря концентрацию раствора настолько слабую, что никакого минимума не было заметно, и постепенно ее увеличивая, можно было наблюдать, что появление первого минимума связано с наиболее обильным изотопом. При дальнейшем увеличении концентрации „выступал“ следующий минимум, связанный с изотопом, занимающим по его обилию в данном элементе второе место. В таком же порядке появлялись и дальнейшие минимумы. Этот вывод оказался верным для всякого металла взятого в форме хлорида, сульфата, нитрата или гидроокиси. В тех случаях, когда это было возможно, результаты сравнивались с астрономическими наблюдениями при помощи масс-спектрографа и во всех случаях оказались совпадающими.

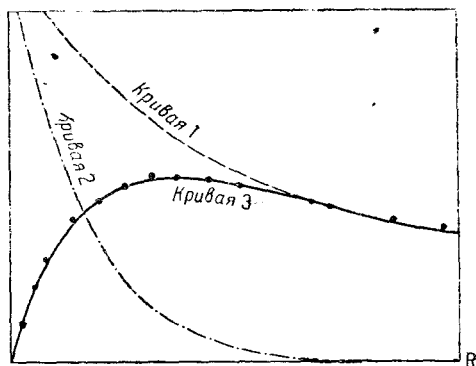


Рис. 3.

Уже при первых работах⁶ были открыты для целого ряда элементов изотопы, о существовании которых до сих пор не было известно. Так, для золота обнаружено 2 изотопа, для палладия—3, для родия—1, для рутения—2, тантала—3, таллия—2, тория—3. Здесь же было подмечено, что момент отставания изменяется в прямой зависимости от атомного веса изотопа, т. е. с увеличением атомного веса увеличивается и момент отставания.

Метод оказался очень удобным и чрезвычайно тонким средством физико-химического анализа и поэтому была организована группа лиц под руководством Эллисона для изучения изотопии радиоактивных элементов, вопроса сложного и достаточно запутанного.

Каждая группа работала над изотопией отдельных веществ. К краткому обзору результатов этих работ мы и перейдем.

4. ИЗОТОПЫ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1. **Изотопы свинца.** Свинцы изучали Э. Бишоп, М. Лауренц и Доллингс⁹. Для определения количества изотопов свинца исследовано четыре различных химических соединения этого элемента: $PbCl_2$, $Pb(NO_3)_2$, $PbSO_4$ и $Pb_3(PO_4)_2$. Растворы каждого соединения приготавливались, по крайней мере, из двух различных, независимых друг от друга источников. Исследование проводилось при различных установках аппаратуры и, по меньшей мере, тремя различными наблюдателями, работавшими в разных лабораториях и даже учреждениях. Если результаты отдельных наблюдателей не совпадали, приготавливался новый раствор путем добавления к прежнему нужного аниона или в виде раствора нитрата, или в виде раствора хлорида, катион которого был изучен. Для каждого из соединений найдено шестнадцать изотопов, атомные веса которых изменялись от 201 до 216 включительно.

В 1927 г. Астоном были определены главные изотопы свинца, а в 1929 г. изотопы свинца радиоактивного происхождения, которыми его снабжал Пиггот¹⁰. Его работы показали, что принимаемый атомный вес свинца 207,2 является статистическим средним, по крайней мере, трех изотопов, и что один из этих основных изотопов имеет массу 207 и является, по всей вероятности, конечным продуктом активного ряда. Кроме того, они доказали, что свинец радиоактивного происхождения имеет состав изотопов, отличный от обыкновенного свинца. В то время как последний состоит, в порядке их обилия, из изотопов 208, 206, 207, в свинце радиоактивного происхождения порядок 206, 207, 208. Это заставило признать необходимым изучить свинец, образцы которого были бы различного геологического и географического происхождения и совершенно свободны от возможного их загрязнения обыкновенным свинцом.

Уран и связанные с ним свинцы выделялись: 1) из урановой руды Верхней Катанги в Бельгийском Конго, 2) из канадской смоляной руды, взятой вблизи озера Большого Медведя, 3) из шведских углей (кольм). Вероятный порядок обилия изотопов свинца, на основании полученных результатов, следующий:

Обыкновенный свинец 208, 206, 207, 205, 212, 210, 204, 202, 203, 211, 201, 209, 216, 215, 214, 213.

Урановая соль 206, 210, 202, 214, 207, 208, 215, 203, 205, 204, 209, 211, 212, 213, 216, 201.

Ториевая соль 208, 216, 204, 212, 206, 207, 202, 205, 214, 211, 209, 210, 203, 213, 215, 201.

В начале опыта ожидалось, что в урановых солях будет обнаружен только изотоп свинца Pb^{206} , а в ториевых Pb^{208} . Как видно из приведенных результатов, во всех случаях найдены все шестнадцать изотопов. Эти опыты частью подтверждаются недавними работами Астона¹¹, который открыл следующие изотопы свинца — 208, 206, 207, 204, 209, 210, 203, 205, и работами Шюлера и Ионеса¹², которые спектроскопически подтвердили существование Pb^{204} , Pb^{203} и Pb^{208} . Необходимо отметить, что свинцы различного происхождения имеют и относительно разное обилие своих изотопов, но ради экономии места останавливаться на этом вопросе более подробно не представляется возможным.

2. **Изотопы висмута.** Изотопы висмута были изучены Ф. Эллисоном и Э. Бишоп¹³ тем же самым методом, который был описан в начале и который применялся при изучении изотопов свинца. Исследовано три различных соединения висмута — хлорид, сульфат и фосфат. Обнаружено четырнадцать изотопов для каждого соединения, вероятная атомная масса которых, в порядке обилия, следующая: 211, 210, 209, 212, 215, 214, 213, 216, 207, 205, 206, 208, 219, 217.

Раствор висмута, который применялся в каждом отдельном случае, был исследован на уран; присутствие последнего найдено, приблизительно, равным 10^{-8} части, чем объясняется наличие тяжелых короткоживущих изотопов.

3. **Изотопы радия.** Изотопы радия изучали Э. Бишоп и С. Доллингс¹⁴. Этот вопрос удалось благополучно разрешить благодаря Ч. Пигготу, который для поставленных опытов выделил из стандартного раствора радия необхо-

димое количество этого элемента и предоставил его в распоряжение работающих. Раствор разбавлялся до концентрации 10^{-11} г радия на 1 г воды, а желаемое соединение получалось путем добавления следов соляной кислоты, сульфата натрия и фосфата натро-аммония. В поляриметре наблюдалось четыре минимума для каждого соединения радия, что привело к заключению о наличии четырех изотопов этого элемента, с атомными весами, в порядке их обилия, 226, 228, 230, 232. Так как химически найденный атомный вес радия равен 225,97, то указанное противоречие, повидимому, объясняется тем, что изотопы с более тяжелым атомным весом, чем 226, имеют, вероятно, короткий период жизни и распадаются в течение времени, необходимого для определения их атомного веса химическим путем.

4. Изотопы урана, тория и таллия. Этот вопрос изучали Р. Гослин и Ф. Эллисон¹⁵. Уран выделялся из тех же образцов, что и свинцы, и каждый из элементов был исследован по крайней мере в трех различных соединениях. Приблизительный порядок обилия изотопов был определен из концентрации, при которой появлялись соответствующие минимумы, количество изотопов по числу минимумов, а относительные атомные веса по моменту запаздывания. Для всех трех элементов найдено по восьми изотопов. Так, уран определялся в четырех различных соединениях — UCl_4 , UCl_6 , $\text{U}(\text{SO}_4)_2$, $\text{U}_3(\text{PO}_4)_4$, торий в трех — ThCl_4 , $\text{Th}(\text{CO}_3)_2$, $\text{Th}_3(\text{PO}_4)_4$ и таллий также в трех — TlCl , Ti_2SO_4 , Ti_3PO_4 . Атомные веса изотопов этих элементов, в порядке их обилия, следующие:

Уран 238, 239, 240, 234, 237, 235, 233, 236.

Торий 232, 230, 234, 235, 236, 229, 233, 231.

Таллий 207, 205, 211, 203, 201, 209, 215, 213.

Открытие новых изотопов, которые не были замечены в предыдущих исследованиях, объясняется исключительно некоторыми усовершенствованиями в технике эксперимента и практике наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. W. Wood, *Physic. Optics*, 496, 1924.
2. Blondlot, *Comp. Rend.*, 1882.
3. Lodge, *Phil. Mag.*, 1889.
4. F. Allison, „*Phys. Rev.*“, **30**, 66, 1927; **31**, 313, 1928.
5. F. Allison and E. Murphy, *J. Am. Chem. Soc.*, **52**, 3796, 1930.
6. F. Allison and E. Murphy, *Phys. Rev.*, **36**, 1097, 1930; F. Allison, *Ind. Eng. Chem. (Anal. Ed.)* **4**, 9, 1932.
7. Ф. Астон, *Изотопы*, 45, 1923.
8. F. Slack a. W. Breazeale, *Phys. Rev.*, **40**, 1052, 1932; **42**, 305, 1932.
9. E. Bishop, M. Lawrenz and C. Dollins, *Phys. Rev.*, **43**, 43, 1933.
10. F. Aston, *Nature*, **120**, 224, 1927; **123**, 313, 1929.
11. F. Aston, *Nature*, **129**, 649, 1932.
12. Scüler u. Jones, *Naturwiss.*, **20**, 171, 1932.
13. F. Allison a. E. Bishop, *Phys. Rev.*, **43**, 47, 1933.
14. E. Bishop a. C. Dollins, *Phys. Rev.*, **43**, 48, 1933.
15. R. Goslin a. F. Allison, *Phys. Rev.*, **43**, 49, 1933.