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, ндут 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:

$$\alpha = V H l, \tag{1}$$

где коэфициент 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 Виллари 1, 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 Блондло ² и Лоджем ³ 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 (CS₂). Выло 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. Инжняя часть щели освещалась светом, проходящим через трубку с сероуглеродом и падающим на то же зеркало. Освещенная щель была видна в зеркале растянутой в виде зазубренной полосы, и никаких разрывов между двумя половинами найдено не было. Остеюда и был сделан вывод, что эффект Фарадея практически является мгновенным. 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 длиною и 2,5 см в диаметре, к концам которой припаивались прозрачные стеклянные пластинки. Трубка наполнялась испытуемым раствором и вставля-

лась внутрь катушки L длиною в 12 см и 4,5 см в диаметре, состоящей из 59 оборотов медной изолированной проволоки. Самоиндукравнялась ция катушки 0,045 mH. Параллельно катушке L присоединялась совершенно такая же добавочная катушка L'. На скеме Тобозначает резонирующий искровой трансформатор, рассчитанный на 1 KVA и дающий максимальное напряжение во вторичной обмотке в 25 000 V при 110 V в первичной обмотке. Ток высокого напряжения вы-



прямлялся при помощи кенотрона и заряжал конденсатор С каждую шестидесятую долю секунды. Последний состоял из 20 пластинок стекла, 0,3 см толщиною, с покрытой тонкой фольгой площадью в 25 см2, и давал полную емкость 0.022 mF. Емкость могла изменяться путем выключения пластин конденсатора. Конденсатор, достигая определенного потенциала, разряжался при по-мощи искрового промежутка S, который располагался горизонтально и имел $\frac{1}{8}$ -дюймовые магниевые 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 цвух параллельно протянутых проволок, которые располагались над аппарагом. 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 прииенялись и проволоки несколько длиннее. Катушка L'' имела 325 оборотов иедной изолированной проволоки и представляла самоиндукцию в 0,66 mH. 3 ней было несколько неизолированных точек, благодаря которым могла быть зменена ее самоиндукция. Свет от искры проходил сквозь фильтр F, состояций из двух пластинок ненского стекла ($BG_4 + GG_5$), пропускающих, главным бразом, магниевые искровые линии $\lambda = 4481 \, {\rm \AA}$ и в небольшом количестве

инни $\lambda = 4703$, $\lambda = 4391$ и $\lambda = 3835$ Å, и падал на липпиховский полутеневой оляриметр. Далее, свет проходил сквозь трубку A и попадал в анализатор I_2 . В течение того времени, когда ток протекал сквозь катушку L, жидкость, аходящаяся в трубке A, под действием магнитного поля, вращала плоскость эляризации светового луча; величина вращения измерялась поворотом анаизатора N_2 , причем отсчет поворота мог быть сделан с точностью до 0,01°. апасная катушка L' обычно не действовала и применялась только для иго, чтобы отвести ток, когда катушка L выключалась для установления нулевого положения. Как катушка L", так и сопротивление R, обычно, выключались 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 вилючались 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 пропускался через запасную катушку L'. Потом тот же пульсирующий ток, происходящий вследствие разряда конденсатора, пропу



Рис. 2.

содящий вследствие разряда конденсатора, пропу скался через катушку L, внутри которой создава лось магнитное поле, действующее на вещество находящееся в трубке A. Плоскость поляризации света вращалась в соответствии с полем, причен наблюдалось просветление обоих полей поляриметря но только яркость одного из них была более резк выраженной. Положение анализатора подбиралос так, чтобы оба поля были одинаково освещевы, чт и принималось за величину вращения. Такие наблк дения производились при различной силе ток: Длина искрового промежутка и первичное напр жение трансформатора поддерживались, приблиза тельно, постоянными; последнее было около 60 и регулировалось рядом реостатов.

Механизм процесса, вызывающего вращение, можно объяснить так. То в цепи, вследствие введенных в нее самоиндукции L и омического сопроти ления R, ягляется быстро затухающим, что можно видеть из уравнения (для затухающего синусондального колебания:

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

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

В условиях опыта, колебания затухали после нескольких циклов, прич наблюдения показали, что количество ходов в цикле имело мало влияния и не влеяло совсем на наблюдаемое вращение. Последнее было пропорциональ разности между первым максимумом кревой тока (положительным) и втор максимумом (отрицательным). Предположим, что первый цикл волны тс вызывает вращение в направлении часовой стрелки, которое, в свою очере вызывает назбольшую яркость правой стороны поля поляриметра, пропционально первому максимуму тока. Второй максимум вызовет вращен противоположное часовой стрелке, вследствие чего будет просветление лег стороны поля. Но так как вторая вершина меньше, чем пергая, то ярко левой стороны поля будет не так велика, как правой. Такие циклы пог ряются шестьдесят раз в секунду глаз не заметит никаких миганий св н каждое поле будет казаться ракномерно освещенным. Поворот анализат до тех пор, пока яркость двух полей не сделается одинаковой, даст велич вращения плоскости поляризации. Положение, что величина вращения г порциональна разности максимумов, проверялось так. Высчитывались и черчивались кривые максимумов положительной и отрицательной части пер волны тока при различных сопротивлениях R, которые на рис. З представл пунктирными кривыми, соответственно. Кривая 3 представляет разность ој нат двух первых кривых.

Эксперементальные 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

$$H=0,4\pi ni,\tag{3}$$

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

$$\alpha = 0,4 \pi n i V. \tag{4}$$

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

3. Применение метода к изучению изотопов

Изучая явление вращения плоскости поляризации, Эллисон ⁴ нашел, что каждое химическое соединение вызывает минимум света в местах, характерных для данного соединения, при-

чем положение минимума предста- а вляет некоторую обратную функцию химического эквивалента металлического элемента неорганического соединения. Такой минимум остается нее время заметным, пока концентрация растворенного вещества не стансвится 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

HpuBan 3

Рис. 3.

первого минимума связано с наиболее обильным изотопом. При дальнейшем увеличении концентрации "выступал" следующий минимум, связанный с изотопом, заничающим по его обилию в данном элементе второе место. В таком же порядке появлялись и дальнейшие минимумы. Этот вывод оказался верным для всякого метазла взятого в форме хлорида, сульфата, нитрата или гидроокиси. В тех случаях, когда это было возможно, результаты сравнивались с астоновскими наблюдениями при помощи масс-спектрографа и во всех случаях

Уже при первых работах ⁶ были открыты для целого ряда элементов изотопы, о существовании которых до сих пор не было известно. Так, для золота обноружено 2 изотопа, для палладвя—3, для родия—1, для рутения—2, тантала — 3, таллия — 2, тория — 3. Здесь же было подмечено, что момент отставания изченяется 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 физикохимического анализа и поэтому была организована группа лиц под руководством Эллисона для изучении 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 Доллинс⁹. Для определения количества изотопов свинпа исследовано четыре различных химических соединения этого элемента: PbCl₂, Pb(NO₃)₂, PbSO₄ и Pb₃(PO₄)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, приготавливались новый раствор путем добавления к прежнему нужного аниона или в виде раствора нитрата, или в виде раствора 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 Пиггот ¹⁰. 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 вероятвости, конечным продуктом актиниевого ряда. Кроме того, они доказали, что сыинец радиоактивного происхождения имеет состяв 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 сов-ршенно свободны от возможного их загрявнения 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 изотонов 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 Pb²⁰⁶, а в ториевых Pb²⁰⁸. 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 работыми Шюлера и Ионеса¹², которые спектроскопически подтвердиль существование Pb²⁰⁴, Pb²⁰⁸ и Pb²⁰⁵. Необходимо отметить, что свинцы различного происхождения имеют и относительно разное обилие своих изотопов, но ради экономии места останаяливаться на этом вопросе более подробно не представляется возможным.

2. Изотопы висмута. Изотопы висмута были изуч-ны Ф. Эллисоном и Э. Бишоп¹³ тем же самым методом, который был описан в начале и который применялся при изучение изотопов свинца. Исстедовано три различных соединения висмута — хлорил, сульфат н фосфат. Обнаружено четырнадцать изотопов для каждого соединения, вероятная атомчая масса которых, в порядке обылия, следующая: 211, 210, 209, 212, 215, 214, 213, 216, 207, 205, 2⁶6, 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. И во топы радия. Изотопы радия изучали Э. Бишоп и С. Долленс ¹⁴. Этот вопрос удалось благополу но разрешить благодаря Ч. Пигготу, который для поставленных опытов выделия из стандартного раствора радия необходимое количество этого элемента и предоставил его в распоряжение работаю щих. Раствор разбавлялся до концентрации 10-11 г радия на 1 г воды, а жела-мое 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 налични четырех изотопов этого элемента, с атомными весами, в порядке их обилия, 226, 228, 230, 232. Так как химически найденный атомный вес редия 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. Гос-лин и Ф. Эллисон ¹⁵. 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, урэн определялся в четырех различных соединениях — UCl₄, UCl₆, U(SO₄)₂, U₃(PO₄)₄, торий в трех — ThCl₄, Th(CO₄)₂, Th₃(PO₄)₄ и таллий также в трех — TlCl, Tl₂SO₄, Tl₃PO₄. Атомные веса изотопов этах элементов, в порядке их обилия, следующие:

Ўран 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.
- 8. Lodge, Phil. Mag., 1889.

- F. Allison, "Phys. Rev.", 30, 66, 1927; 31, 313, 1928.
 F. Allison and E. Murphy, J. Am. Chem. Soc., 52, 3796, 1930.
 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.