

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА

А. Н. Зайдель

За последние 15 лет удалось достичь таких успехов в разделении стабильных изотопов, которые сделали возможным применение материалов определенного изотопного состава не только в лабораторных исследованиях, но и в промышленном производстве. Хорошо известно применение тяжелой воды в атомном реакторостроении, обогащенного урана в тепловыделяющих элементах атомных силовых установок и т. п.

Исследование изотопного состава некоторых элементов, содержащихся в минералах и метеоритах, дает сведения об их возрасте, а также о процессах, приводящих к различиям в изотопном составе элементов, полученных из различных природных источников.

Для контроля процессов разделения изотопов и определения изотопного состава элементов, а также продуктов работы разделительных установок, нужно располагать достаточно надежными и точными методами изотопного анализа, позволяющими производить по возможности быстрые определения. Желательно, чтобы применяемая для этого аппаратура была проста и относительно дешева.

Предложенный Астоном еще в 1919 г. масс-спектрограф, в принципе, наиболее просто позволяет решать все задачи определения изотопного состава. Однако, несмотря на все усовершенствования этого прибора, которые были сделаны за истекшие сорок лет, он не удовлетворяет всем условиям, которые упомянуты выше. Здесь можно отметить только некоторые из трудностей, связанные с применением масс-спектрографов. В основу действия всех приборов этого класса положено различие в характере движения ионов различной массы в электрических и магнитных полях. При этом основная величина, определяющая поведение иона, это отношение его заряда к массе — $\frac{e}{M}$. В зависимости от этого отношения различные ионы фокусируются в различных участках фокальной поверхности прибора, давая масс-спектры, внешний вид которых напоминает обычные атомные спектры; либо, двигаясь с разной скоростью, ионы пролетают между электродами прибора за различные отрезки времени, измеряя которые можно определить величину $\frac{e}{M}$.

В масс-спектрографе источником ионов служит тот или иной тип разряда, причем, наряду с атомными ионами, в нем могут образоваться и молекулярные.

Масс-спектрограф не всегда может различать ионы с одинаковыми массовыми числами и зарядами, как, например, Li^{7+} и Li^6H^+ или O^{18+} , H_2O^{16+} , HO^{17+} , DO^{16+} и т. п.

Массы подобных ионов, обладающих одинаковыми массовыми числами, все же несколько отличаются друг от друга, благодаря различиям

энергий связи ядер, входящих в их состав (дефект массы). Однако для выявления различий, основанных на дефекте массы, требуются масс-спектрографы с высокой разрешающей способностью, применение которых для аналитических целей пока малодоступно и производительность их работы невелика. Применение масс-спектрографа с недостаточным разрешением может приводить к ошибкам анализа, аналогичным тем, которые вызываются в спектральном анализе наложением на аналитическую линию определяемого элемента линии другого элемента, присутствующего в пробе. Другой источник ошибок, связанный с применением масс-спектрографа,— большая «память» прибора, вследствие

чего результаты анализа пробы часто очень сильно зависят от состава тех проб, которые анализировались на этом приборе ранее. Поэтому очистка и тренировка прибора перед проведением каждого анализа иногда превращается в серьезную проблему.

Эти обстоятельства заставили в последние годы искать другие пути решения задачи определения изотопного состава. При этом, естественно, было обращено внимание на различия в атомных и молекулярных спектрах, принадлежащих разным изотопам одного и того же элемента.

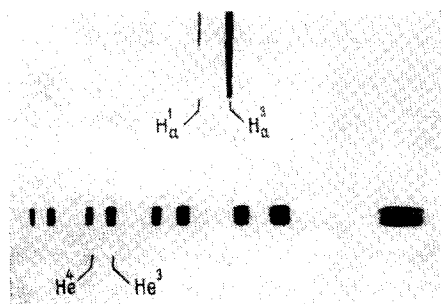


Рис. 1. Изотопическое расщепление линий водорода и гелия (линия гелия регистрировалась с помощью эталона Фабри—Перо)¹³.

Хотя эти различия и невелики, они позволяют пользоваться оптическими спектрами в качестве аналитических признаков данного изотопа.

Энергетические уровни двух изотопических атомов или ионов смещены друг относительно друга. Величина смещений невелика и максимальное определяемое ими смещение спектральных линий наблюдается у изотопов водорода. Изотопическое расщепление α -линий водорода и трития составляет 2,36 Å (рис. 1).

Смещение для линий $\text{He}^3\text{—He}^4$ ($\lambda=6678$ Å) составляет около 0,5 Å: для линий более тяжелых элементов величина смещения обычно меньше 0,1 Å, а для спектров большинства элементов эти смещения так малы, что с трудом могут быть зарегистрированы и совершенно не пригодны для уверенного разрешения аналитических линий.

Наряду со смещением уровней, обусловленным различием масс двух изотопов, наблюдаются также расщепления, связанные с различиями в магнитных и механических моментах изотопических ядер. Такого рода расщепления вызывают появление сверхтонкой структуры спектральных линий, ширина которой часто бывает достаточной для разделения компонентов спектральных линий отдельных изотопов.

Смещения и расщепления спектральных линий, вызываемое изотопией, пока не могут быть теоретически рассчитаны сколь-нибудь уверенно*). Иначе обстоит дело со смещениями полос изотопических молекул. Изменение положений колебательных и вращательных уровней такой молекулы однозначно определяется массой ядер атомов, входящих в ее состав, и достаточно точно вычисляется по элементарной теории. Величины изотопических смещений в молекулярных спектрах, как правило, больше, чем в атомных, однако большая протяженность полос и переложение ротационных струк-

*) Исключение составляют простейшие атомы—H и He, для которых теория дает достаточно точные результаты.

энергий связи ядер, входящих в их состав (дефект массы). Однако для выявления различий, основанных на дефекте массы, требуются масс-спектрографы с высокой разрешающей способностью, применение которых для аналитических целей пока малодоступно и экономическая стоимость их работы велика. Применение масс-спектрографа с недостаточным разрешением может приводить к ошибкам анализа, аналогичным тем, которые вызываются в спектральном анализе наложением на аналитическую линию определяемого элемента линии другого элемента, присутствующего в пробе. Другой источник ошибок, связанный с применением масс-спектрографа, — большая «память» прибора, вследствие чего результаты анализа пробы часто очень сильно зависят от состава тех проб, которые анализировались на этом приборе ранее. Поэтому очистка и тренировка прибора перед проведением каждого анализа иногда превращается в серьезную проблему.

Эти обстоятельства заставляют в последние годы искать другие пути решения задачи определения изотопного состава. При этом, естественно, было обращено внимание на различия в атомных и молекулярных спектрах, принадлежащих разным изотопам одного и того же элемента. Хотя эти различия и невелики, они позволяют пользоваться оптическими спектрами в качестве аналитических признаков данного изотопа.

Энергетические уровни двух изотопических атомов или ионов смещены друг относительно друга. Величина смещений линий наблюдается у изотопов одного рода. Изотопическое расщепление α -линии водорода и трития составляет 2,36 Å (рис. 1).

Смещение для линий He^3 — He^4 ($\lambda = 6678$ Å) составляет около 0,5 Å; для линий более тяжелых элементов величина смещения обычно меньше 0,1 Å, а для спектров большинства элементов эти смещения так малы, что с трудом могут быть зарегистрированы и совершенно не пригодны для уверенного разрешения аналитических линий.

Наряду со смещением уровней, обусловленным различием масс двух изотопов, наблюдаются также расщепления, связанные с различием в магнитных и механических моментах изотопических ядер. Такого рода расщепления вызывают появление сверхтонкой структуры спектральных линий, ширина которой часто бывает достаточной для разрешения компонентов спектральных линий отдельных изотопов.

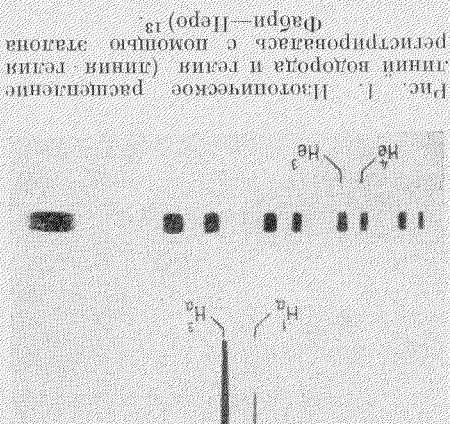


Рис. 1. Изотопическое расщепление линий водорода и трития (линия α) регистрировалась с помощью эталона (Фабри—Перо) 13.

*) Исключение составляют простейшие атомы — H и He, для которых теория дает достаточно точные результаты.

Однако большая протяженность полосы и перекрывание ротационных строк смещений в молекулярных спектрах, как правило, больше, чем в атомных, точно вычисляется по элементарной теории. Величины изотопических изменений определяются массой ядер атомов, входящих в ее состав, и достаточно точно определяют координаты и вращательных уровней такой молекулы одно- и многоатомных молекул. Изменение положения спектров изотопических молекул, вызываемое изотопией, пока не могут быть теоретически рассчитаны сколь-нибудь уверенно*).

Смещения и расщепления спектральных линий, вызываемые изотопией, являются причиной появления сверхтонкой структуры спектральных линий, ширина которой часто бывает достаточной для разрешения компонентов спектральных линий отдельных изотопов.

Наряду со смещением уровней, обусловленным различием масс двух изотопов, наблюдаются также расщепления, связанные с различием в магнитных и механических моментах изотопических ядер. Такого рода расщепления вызывают появление сверхтонкой структуры спектральных линий, ширина которой часто бывает достаточной для разрешения компонентов спектральных линий отдельных изотопов.

тур вызывают иногда специфические трудности в проведении анализа (рис. 2).

Несмотря на то, что обусловленные изотопией различия в атомных и молекулярных спектрах давно применялись для оценок изотопического состава, лишь недавно их стали использовать для создания количественных аналитических методов, способных конкурировать по точности с масс-спектрометрией и превосходящих ее по простоте и удобству работы.

Здесь будут освещены только методы определения изотопного состава, основанные на наблюдении атомных спектров. Эти методы наиболее

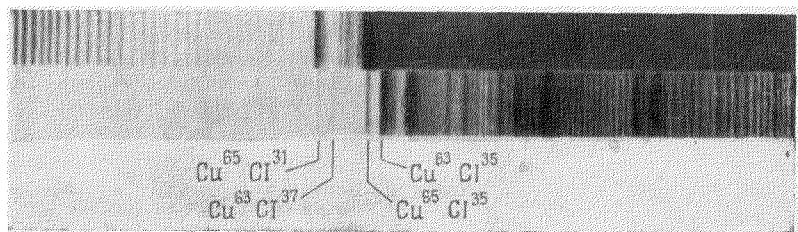


Рис. 2. Изотопические смещения полосы $\lambda=4412 \text{ \AA}$ молекулы CuCl^{13} . Вверху образец, обогащенный Cu^{65} , внизу образец нормального изотопного состава.

подробно разработаны и обладают некоторыми специфическими особенностями по сравнению с обычными спектрально-аналитическими приемами работы.

Количественные методы изотопного спектрального анализа по атомным спектрам разрабатываются главным образом в четырех лабораториях. В СССР работа ведется в двух лабораториях. В одной из них разрабатывались методы изотопного анализа водорода¹, ртути² и урана³; в другой — водорода^{4, 5, 6, 7} лития и свинца^{8, 9, 10}; во Франции исследовались гелий¹¹, литий^{11, 12}, свинец¹¹ и уран¹¹; в США — водород^{13, 14}, гелий¹³, литий¹⁵, ртуть¹³, свинец¹⁶ и уран^{13, 16}. Приведенные здесь работы выполнены в 1950—1958 гг. Из этого перечисления видно, что все четыре лаборатории независимо выбирали в качестве объектов исследования одни и те же элементы. Это частично объясняется удобством приложения именно к этим элементам оптических методов анализа и главным образом, вероятно, потребностью в создании для этих элементов удобных аналитических методов.

1. СПЕКТРАЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Малость изотопических смещений в атомных спектрах заставляет, как правило, пользоваться приборами с высокой разрешающей способностью. Лишь в отдельных случаях достаточна разрешающая способность приборов, широко вошедших в обычную спектрально-аналитическую практику.

Для анализа изотопного состава водорода и урана достаточна разрешающая сила спектрографа ИСП 51-А или небольшого дифракционного прибора, например, ДС-1. Во всех других случаях изотопного анализа по атомным спектрам необходима реальная разрешающая способность в несколько сотен тысяч, так что применение больших дифракционных решеток или интерферометров Фабри и Перо обязательно.

Наиболее эффективно применение установок с фотоэлектрической регистрацией. Сканирование спектра с помощью изменения давления в баро-

камере эталона Фабри и Перо, по-видимому, является сейчас лучшим методом измерения интенсивностей компонентов изотопической структуры^{17, 18}.

Оптическая схема установки такого типа дана на рис. 3. Применение зеркал эталона с диэлектрическими покрытиями позволяет довести

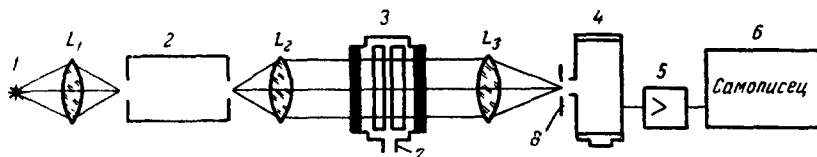


Рис. 3. Оптическая схема установки для фотоэлектрической записи сверхтонкой структуры спектральных линий: 1—источник света, L_1 , L_2 , L_3 —проектирующие объективы, 2—монокроматор, 3—эталон Фабри—Перо, 4—фотоумножитель, 5—усилитель, 7—барокамера, 8—диафрагма.

реальную разрешающую способность установки до 10^6 , а ее светосила достаточна для регистрации линий изотопов, содержание которых измеряется десятками долями процента.

2. ИСТОЧНИКИ СВЕТА

К источникам света, применяемым в изотопном спектральном анализе, помимо обычных требований достаточной стабильности и яркости еще предъявляется требование давать спектральные линии с узким контуром. Искры и дуги, горящие при атмосферном давлении, как правило, дают

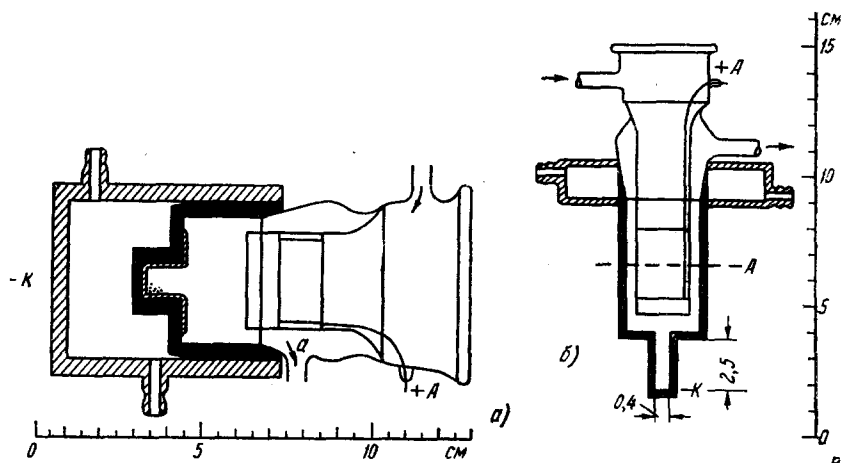


Рис. 4. Трубки с полым катодом: а—водяное охлаждение, б—охлаждение жидким азотом, А— — линия погружения в жидкий азот, —рубашки водяного охлаждения, → —направление циркуляции газа.

чересчур расширенные линии и применение их возможно только при изотопном анализе урана и, вероятно, некоторых других тяжелых элементов.

Применение дуги во всех случаях снижает область доступных для анализа концентраций.

Наиболее широко применяемые источники: трубки с охлаждаемым полым катодом (рис. 4) и высокочастотный безэлектродный разряд. Применение последнего особенно удобно при анализе изотопного состава газов.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ И КОНЦЕНТРАЦИЙ

В первом приближении можно положить, что отношение интенсивностей компонент изотопической структуры равно отношению концентраций соответствующих изотопов. Если линия имеет сверхтонкую структуру, то расчет следует делать с учетом соотношения интенсивностей компонент этой структуры. Однако непосредственно пользоваться для точных определений такой связью между интенсивностью и концентрацией можно лишь в исключительных случаях. Как правило, отношение интенсивностей искажается рядом вторичных явлений в источнике света и регистрирующем приборе. В ряде работ рассмотрены причины таких искажений. Здесь упомянем главные из них.

а) Источник света: разделение изотопов, различное доплеровское уширение, переложение контуров компонент изотопической и сверхтонкой структуры, самопоглощение, наложения сплошного и молекулярного спектров.

б) Спектральный прибор: конечная ширина инструментального контура, рассеянный свет.

Искажения, вызываемые совокупностью всех этих причин, могут вносить значительные систематические ошибки в результаты анализа. Роль этих ошибок, как правило, возрастает с уменьшением концентрации определяемого изотопа.

Поэтому есть две возможности определения изотопного состава по измеренному отношению интенсивностей. Наиболее надежно строить градуировочный график, пользуясь эталонами известного изотопного состава, подобно тому, как это делается в обычном спектральном анализе.

Более привлекательно — выяснить величину всех искажений, вносимых в отношение интенсивностей, а при проведении анализа вносить необходимые поправки в измеренные отношения. Это избавляет от необходимости пользоваться эталонными образцами и особенно важно в тех случаях, когда получение их невозможно. К сожалению, безэталонный метод анализа почти всегда не свободен от возражений. Дело в том, что определение всех поправок обычно не может быть проделано с должной степенью точности, и, когда эти поправки сравнимы по величине с измеренным отношением интенсивностей, вносимая вместе с ними ошибка может оказаться недопустимо большой.

Поэтому основная задача экспериментатора при разработке метода безэталонного анализа — выбрать такие условия возбуждения и регистрации спектра, при которых величина необходимых поправок будет настолько мала, что ею можно пренебречь, либо по крайней мере можно пренебречь ошибками, которые вносятся в результаты анализа недостаточно точным определением поправок. Иначе говоря, систематическая ошибка, вносимая вместе с поправкой, должна быть существенно меньше случайной ошибки измерения отношения интенсивностей.

В качестве примеров приложения описанных выше принципов рассмотрим работы по определению изотопного состава различных элементов. Выбраны те работы, в которых достигнуты лучшие, на наш взгляд, результаты.

В о д о р о д: Наибольшее число опубликованных работ посвящено водороду, об изотопном анализе которого был сделан доклад на X Всесоюзном совещании по спектроскопии. Эта задача наиболее проста, и в области средних концентраций может применяться безэталонный метод, подробно описанный ранее⁴. Сейчас удалось довести⁷ чувствительность этого метода до того, что он позволяет определять содержание дейтерия в природном водороде, где дейтерий содержится в концентрации 0,014%.

Аналогичный метод может быть применен для анализа тройных смесей Н—D—Т^{1, 5} и анализа чистого трития⁵.

Гелий: Изотопный анализ гелия рассматривается в работах^{11, 14}. В работе¹¹ применяется для регистрации спектра интерферометр Фабри и Перо с плоской дифракционной решеткой в качестве монохроматора предварительной дисперсии. Источник света—полый катод, охлаждаемый жидким азотом. Сканирование проводится изменением давления воздуха в эталоне. Аналитическая линия He : $\lambda = 6678 \text{ \AA}$. Образец регистрограммы приведен на рис. 5. Соотношение ширин линий (He^3 —83,4 mK и He^4 —72,7 mK) близко к отношению $\sqrt{\frac{4}{3}}$, что указывает на основную роль доплеровского уширения и относительно узкий инструментальный контур. Это

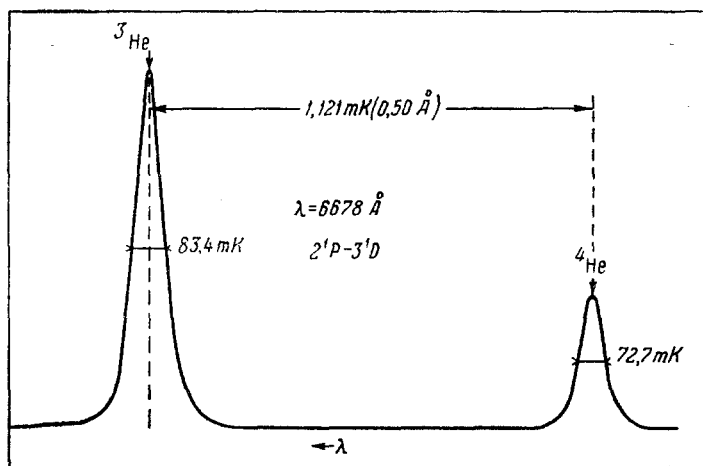


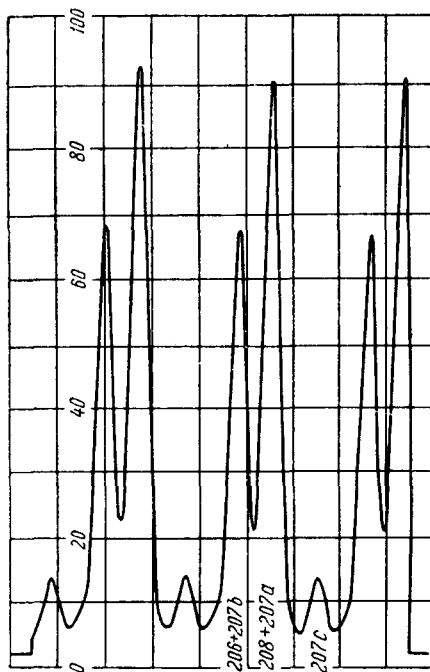
Рис. 5. Регистрограмма линий гелия.

позволяет проводить измерения концентраций по отношению высоты максимумов кривых с учетом доплеровского уширения, либо непосредственно по отношению площадей. Данных о чувствительности и точности метода авторы не приводят.

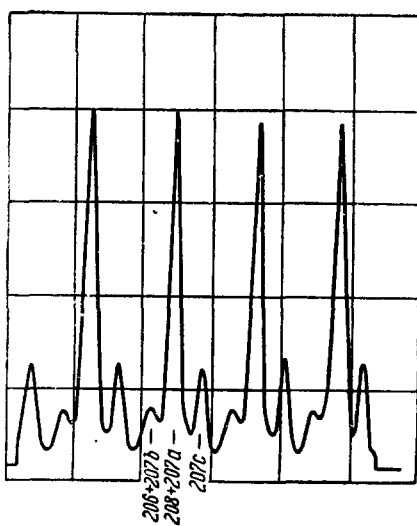
Л и т и й: Эти же авторы¹² описали применение аналогичного метода к анализу смеси Li^6 — Li^7 в качестве аналитической была выбрана линия $\text{Li} \lambda = 4603 \text{ \AA}$. Отношение ширин линий Li^6 и Li^7 оказалось 1,082, что в пределах ошибок измерений совпадает с $\sqrt{\frac{7}{6}} = 1,081$. Это позволяет проводить

измерения без применения эталонов, как и в случае гелия. Небольшая интенсивность используемой линии дает возможность вести анализ только в области содержаний Li^6 7 ± 97%. Расширение этой области может быть достигнуто применением более интенсивной линии $\text{Li} \lambda = 6707 \text{ \AA}$ и эталонирования. Точность метода (в области содержания $\text{Li}^6 = 12\%$) составляет 0,5% (средняя арифметическая ошибка), т. е. около 5% от содержания Li^6 .

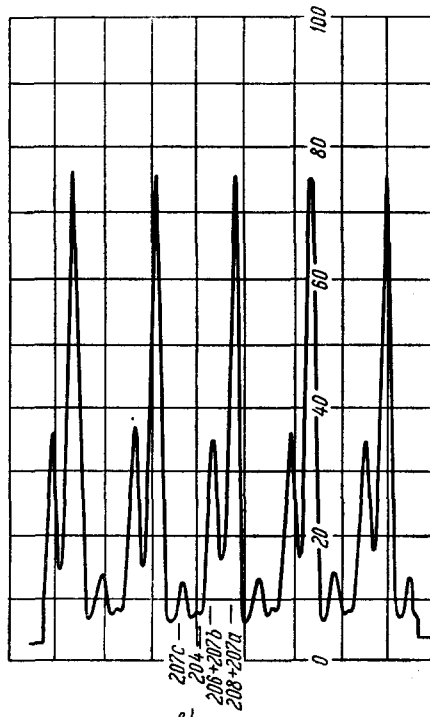
С в и н ц: В состав естественного свинца входят четыре изотопа: Pb^{204} , Pb^{206} , Pb^{207} и Pb^{208} . Линии нечетного изотопа Pb^{207} имеют сверхтонкую структуру. Поэтому задача изотопного анализа этого элемента довольно сложна. Наиболее подробное исследование было выполнено в нашей лаборатории^{8, 9, 10}. Применялась установка и разрядная трубка с полым катодом, показанные ранее (рис. 3 и 4). Образцы регистрограмм при разных соотношениях изотопов приведены на рис. 6 (линия $\text{PbI} \lambda = 4058 \text{ \AA}$). Были исследованы различные приемы обработки результатов измерений



a)



б)



в)

Рис. 6. Регистрограммы линий свинца $\lambda=4058 \text{ \AA}$ при разном изотопном составе образцов.

как с применением эталонных образцов, так и без них. Лучшие результаты получаются при охлаждении полого катода жидким азотом. В этих условиях масс-спектрометрические измерения достаточно хорошо совпадают со спектральными данными, полученными путем непосредственных измерений максимумов на регистраграммах с учетом переложения контуров. Таким образом, применение безэталонного метода здесь также возможно. Однако точность результатов повышается, если пользоваться хотя бы одним эталоном в качестве опорного. Сопоставление результатов спектральных и масс-спектроскопических измерений приведено в табл. 1. Относительная

Таблица I

Результаты анализов образцов Рb

 C_I — концентрация, определенная спектральным методом. C_{II} — концентрация, определенная на масс-спектрографе.

$$R = \left| \frac{C_I - C_{II}}{C_{II}} \right| \cdot 100$$

Образец	Метод	C_{208} (в %)	R (в %)	C_{207} (в %)	R (в %)	C_{206} (в %)	R (в %)
11	C_I	32,0	3,9	17,6	2,9	49,5	3,5
	C_{II}	30,8		17,1		51,3	
147	C_I	35,2	0,3	56,8	1,2	8,0	11
	C_{II}	35,3		57,5		7,2	
7	C_I	52,0	0,6	21,1	3,6	25,4	1,6
	C_{II}	51,7		21,9		25,0	
68	C_I	2,2	—	10,3	0,0	87,5	1,5
	C_{II}	0,93		10,3		88,8	

чувствительность метода — несколько ниже 1%, так что изотоп Pb^{204} , содержание которого лежит в природных свинцах всегда вблизи этой величины, еще может определяться, но с небольшой точностью (табл. II). Для анализа применяется металлический либо иодистый свинец,

Таблица II

Результаты анализа образцов Рb на содержание Pb^{204}

Образец	Метод	C_{204} (в %)	R (в %)
7	C_I	1,4	2
	C_{II}	1,37	
40	C_I	1,0	9
	C_{II}	1,10	
11	C_I	0,9	23
	C_{II}	0,73	

выделенный из горных пород. Трудности химического выделения заставляют стремиться к возможному сокращению необходимого для анализа количества материала. Оно составляет около 1 мг. В последнее время Г. Г. Кунд удалось, применяя электролитическое осаждение свинца на поверхность катода, снизить эту величину до 0,01 мг.

У р а н: Область относительно больших содержаний U^{235} ($>1\%$) может анализироваться с применением дуги постоянного тока и приборов небольшой разрешающей способности³ (рис. 7). При переходе к низким концентрациям прекрасные результаты получены в работе¹¹. Аналитической линией была выбрана линия $U \lambda = 5027,39 \text{ \AA}$. Линией

сравнения служила линия U^{238} , расположенная на расстоянии $0,5 \text{ см}^{-1}$, от линии $5027,39 \text{ \AA}$ со стороны длинных волн. Эта линия в 70 раз слабее

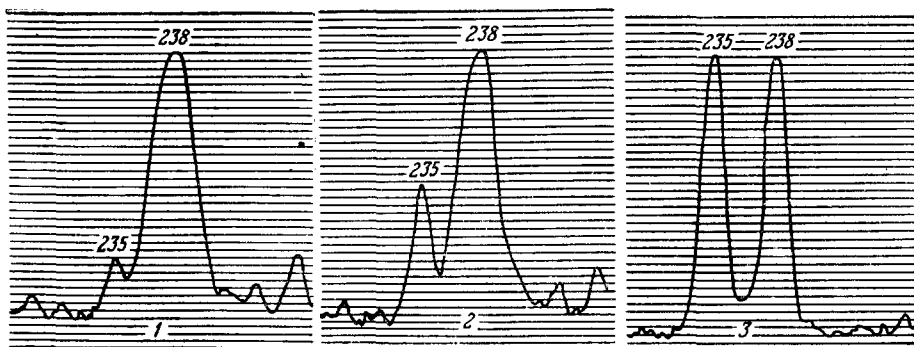


Рис. 7. Микрофотограмма линии 4424,37 Å обогащенных образцов урана. Спектрограф ИСП-51-А³: 1—2,82% U^{235} , 2—9,52% U^{235} , 3—50% U^{235} .

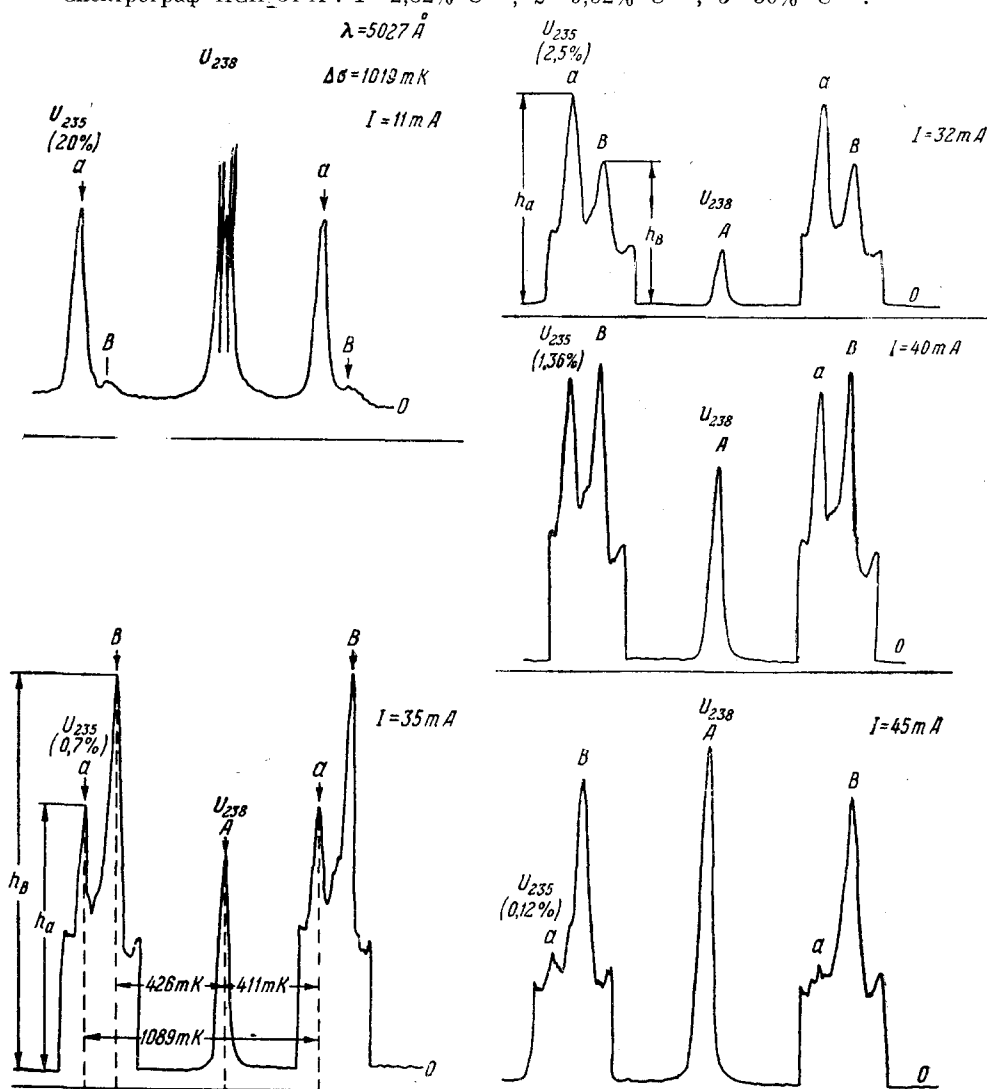


Рис. 8. Регистраграммы линии $\lambda = 5027 \text{ Å}$ при разных содержаниях U^{235} . B—линия сравнения ¹¹.

линии 5027,39 Å и достаточно гомологична с ней. Регистрограммы при разных концентрациях U^{235} даны на рис. 8, а градуировочный график, построенный по эталонам, содержащим U^{235} в концентрациях 0,7% (α), 1,35% (β) и 2,5% (γ), — на рис. 9. Как видно из рисунка, образец, содержащий U^{235} в концентрации 0,12%, удовлетворительно ложится на эту прямую. Ошибка метода в области содержаний $U^{235} \sim 1\%$ составляет 2% (относительная ошибка). При меньших содержаниях U^{235} она несколько больше.

Все описанные методы ничем по существу не отличаются от классических методов спектрального анализа.

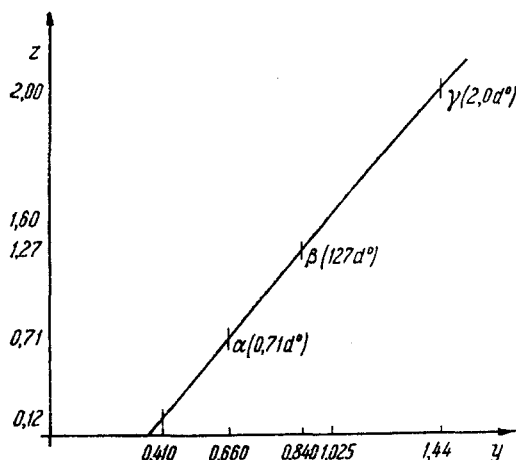


Рис. 9. Градуированный график для определения малых концентраций U^{235} 11. $y = \frac{h_A}{h_B}$;

по оси ординат отложено: $z = \frac{x}{100-x}$, где x — содержание U^{235} в пробе (в %).

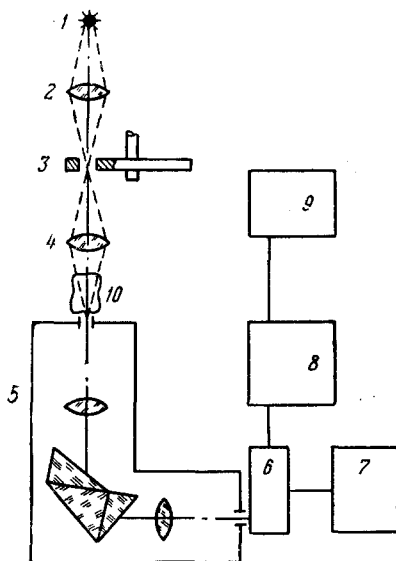


Рис. 10. Схема установки для абсорбционного определения изотопного состава лития: 1 — полный катод, 2, 4 — проектирующая оптика, 3 — модулятор, 5 — монохроматор, 6 — 9 — блоки фотоэлектрической регистрации, 10 — пламя.

Однако здесь возможны и другие приемы, применение которых представляет несомненный интерес. На одну из таких возможностей указал Л. А. Тумерман на нашем предыдущем совещании¹⁹. Им предложено усилить эффект изотопического расщепления линий, наблюдая излучение ионов, ускоренных электрическим полем. При наблюдении вдоль направления движения ионов появятся дополнительные смещения линий, причем величина этих смещений зависит от массы изотопа. Этот эффект может вызвать расщепления, во много раз превосходящие ширину обычной изотопной структуры. К сожалению, пока не сделано экспериментальной проверки возможностей этого метода.

Другая возможность указана в работе²⁰. Она основана на том, что коэффициент поглощения паров элемента, измеренный для некоторой линии этого же элемента, будет меняться при изменении изотопического состава поглощающего пара (или при изменении изотопического состава элемента в источнике света). Возможность применения этого явления для анализа экспериментально проверена Е. Н. Коренным, Ю. И. Туркиным и автором в случае лития, а Г. В. Островской в случае водорода.

Установка для анализа лития (рис. 10) состоит из газовой горелки 10, в пламя которой вводится раствор исследуемого образца, полого катода 1, содержащего литий определенного изотопического состава, и модулятора 3.

Свет проходит через небольшой монохроматор 5, выделяющий из спектра резонансную линию лития, и падает на фотоумножитель 6. Резонансный усилитель 8 отсекает постоянную составляющую фототока, вызванную излучением самой горелки. Усиленный сигнал после выпрямления подается на стрелочный гальванометр 9. Градуировочный график строится по эталонам. Образец графика показан на рис. 11. Основное, что определяет точность метода,—постоянство режима работы горелки. Для проверки

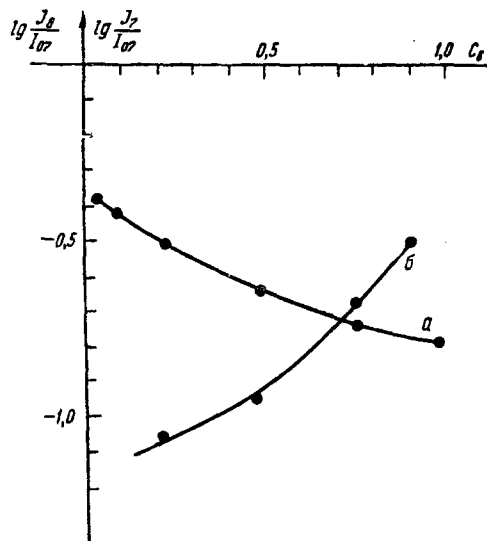


Рис. 11. Градуировочные графики для абсорбционного определения изотопного состава лития: а — в источнике Li^6 , б — в источнике Li^7 .

воспроизводимости метода проведено многократное определение концентрации в образце с содержанием Li^6 в $(30 \pm 0,6 \%)$. Результаты измерений дали для этого образца значение $C_6 = (32 \pm 2 \%)$. Аналогичное устройство было применено для анализа изотопного состава водорода. Так как в невозбужденном водороде поглощение отсутствует, то свет от разрядной трубки, содержащей анализируемую смесь, пропускается через положительный столб тлеющего разряда в водороде.

Результаты измерений показали отчетливую зависимость коэффициента поглощения линий балмеровской серии от изотопного состава водорода. Однако количественные результаты исследования пока не могут быть приведены.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. Н. Оганов и А. Р. Стриганов, Атомная энергия 3, 8 (1957).
2. Ю. П. Донцов и А. Р. Стриганов, Оптика и спектроскопия 2, 21 (1957).
3. А. Р. Стриганов, Ф. Ф. Гаврилов, С. П. Ефремов, Атомная энергия 2, 337 (1957).
4. Г. В. Вейнберг, А. Н. Зайдель, А. А. Петров, Оптика и спектроскопия 1, 973 (1956).
5. А. Н. Зайдель, Н. А. Тетерина, Т. Г. Федоров, К. Д. Фомина, Атомная энергия (в печати).
6. В. А. Боргест, Г. В. Вейнберг, А. Н. Зайдель, А. П. Петров, Материалы X Всесоюзного совещания по спектроскопии, т. II, ст. 158, Львов, 1958.
7. А. Н. Зайдель Г. В. Островская, Вестник ЛГУ (в печати).
8. А. Г. Жиглинский, Оптика и спектроскопия 3, 9 (1957).

9. А. Г. Жиглинский, А. Н. Зайдель, Ю. Чайко, Оптика и спектроскопия 4, 2 (1958).
 10. А. Н. Зайдель, А. Г. Жиглинский, Ю. Чайко, Чехословацкий физический журнал 8, 530 (1958); 8, 665 (1958).
 11. J. Artaud, J. Blaise, S. Gerstenkorn, Доклад на 2-й Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии, № 15 (p), 328, 1958.
 12. J. Artaud, J. Blaise, S. Gerstenkorn, Spectrochim. Acta 10, 110 (1957).
 13. J. K. Brody, F. S. Tomkins, Доклад на 2-й Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии № 15(p), 945, 1958.
 14. H. P. Broida, G. H. Morgan, Analyt. Chem. 24, 799 (1952).
 15. J. K. Brody, M. Fred, F. S. Tomkins, Spectrochim. Acta 6, 383 (1954).
 16. J. K. Brody, M. Fred, F. S. Tomkins, Spectrochim. Acta 8, 329 (1957).
 17. P. Jacquinet, JOSA 44, 10 (1954).
 18. Н. И. Калитеевский, М. П. Чайка, Вестник ЛГУ, № 4, 9 (1956).
 19. Л. А. Тумерман, Материалы X Всесоюзного совещания по спектроскопии, т. 1, стр. 81, Львов, 1957.
 20. А. Н. Зайдель, Оптика и спектроскопия 4, 701 (1958).
-