

С 44г + С 343е

К-241

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2086



С.А. Карамян, Я. Шукуров

ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
МЕТОДОМ РАССЕЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
НА БОЛЬШИЕ УГЛЫ

АЛГОРИТМЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

1965

2086

С.А. Карамья, Я. Шукуров

ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
МЕТОДОМ РАССЕЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
НА БОЛЬШИЕ УГЛЫ

Направлено в журнал "Атомная энергия"



3230/1, чр.

Взаимодействие ядерных излучений с веществом в настоящее время хорошо изучено. Известно, что свойства излучения, прошедшего через вещество или рассеянного на нем, сильно зависят от заряда (Z) и массового числа (A) этого вещества.

Поэтому можно, исследуя излучение, рассеянное на образце или прошедшее через него, получать сведения о химическом составе образца.

Имеются методы определения процентного содержания того или иного элемента в рудах и в продуктах обогатительных фабрик, в которых используется поглощение или рассеяние γ - или β -излучений радиоактивных изотопов^{/1,2,3/}. Для этой же цели применяются методы активации вещества под действием ионов He^3 , α -частиц и нейтронов^{/4,5,7,8/}.

Основными недостатками этих методов являются применимость каждого из них для анализа элементов в довольно узкой области периодической системы элементов, невозможность полного анализа многокомпонентных систем, необходимость иметь источники радиоактивных излучений, узкая направленность каждого метода на анализ одного или нескольких определенных элементов.

Определенные преимущества в свете этих недостатков дают методы, использующие упругое рассеяние заряженных частиц на большие углы^{/8,9,10/}. В работе^{/8/} анализируемый образец облучался альфа-частицами радиоактивных препаратов Sm^{244} и Pu^{238} , при этом измерялись энергетические спектры альфа-частиц, рассеянных на образце на большие углы. Однако требования, предъявляемые этим методом к интенсивности и монохроматичности источников, очень высоки.

Невозможность иметь источник с очень высокой интенсивностью и одновременно хорошей моноэнергетичностью альфа-частиц приводит к существенному ухудшению точности количественного и качественного анализа образцов. Кроме того, авторами^{/8/} в силу необходимости использованы толстые мишени, что ухудшало точность их метода в определении массы элемента.

Интенсивные пучки заряженных частиц (10–100 мка) с хорошей монохроматичностью можно получать на ускорителях. Изучая рассеяние на большие углы заряженных частиц, ускоряемых на циклотроне, можно добиться существенного улучшения метода, предложенного А. Туркевичем^{/8/}.

В частности, появляется возможность использования тонких мишеней, что значительно улучшает чувствительность метода к обнаружению примесей в образцах и сильно увеличивает разрешение метода по массе.

Характеристики метода анализа по рассеянию заряженных частиц на большие углы (разрешение и чувствительность) зависят от массы ядра рассеивателя и от массы бомбардирующей частицы. Чувствительность метода, кроме того, зависит от энергии бомбардирующей частицы.

На рис. 1 представлена зависимость разрешения $\frac{\Delta E}{E}$ от массы ядра рассеивателя для альфа-частиц и ионов C^{12} и Ar^{40} . Здесь же дана зависимость энергии рассеянной частицы от массы рассеивающего ядра. Приведенные кривые соответствуют случаю рассеяния на 180° и вычислены по формулам:

$$E = E_0 \left(\frac{A - a}{A + a} \right)^2,$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{4a}{A^2 - a^2},$$

где E - энергия рассеянной частицы, E_0 - энергия падающей частицы, A - массовое число ядра-рассеивателя, a - массовое число падающей частицы, ΔE - изменение энергии рассеянной частицы при изменении массы ядра-рассеивателя на одну единицу.

Из кривых видно, что для одной и той же массы рассеивающего ядра разрешение тем больше, чем больше масса бомбардирующей частицы. Поэтому особенно перспективно применение тяжелых ионов в целях химического анализа. Для тяжелых ионов в определенной области масс рассеивающего ядра разрешение метода настолько высоко, что имеется возможность различить массы, отличающиеся на одну единицу, т.е. можно проводить изотопный анализ элементов.

Чувствительность метода к обнаружению малых примесей оценивалась по формуле Резерфорда. Число рассеянных ионов пропорционально толщине мишени и квадрату заряда налетающего ядра и обратно пропорционально квадрату энергии налетающей частицы. Толщина мишени ограничивается требованиями к монохроматичности рассеянных ионов. Удельные потери энергии заряженных частиц в веществе можно считать приблизительно пропорциональными квадрату заряда частицы. Поэтому при одной и той же энергии налетающих частиц чувствительность метода будет слабо зависеть от сорта частицы, т.е. для более тяжелых частиц нужно брать более тонкие мишени (сечение рассеяния $\approx Z^2$, толщина мишени $\approx \frac{1}{Z^2}$). Пробег заряженной частицы в веществе приблизительно пропорционален ее энергии, если эта энергия достаточно велика. Поэтому с уменьшением энергии налетающей частицы чувствительность метода будет улучшаться (сечение рассеяния $\approx \frac{1}{E^2}$, толщина мишени $\approx E$). Существует однако некоторая оптимальная энергия, ниже которой работать невыгодно. Это связано:

- 1) с более быстрым уменьшением пробега при низких энергиях, чем $R = E$;
- 2) с трудностями приготовления очень тонких мишеней ($\approx 5 - 10 \frac{\text{мкг}}{\text{см}^2}$),
- 3) с трудностями очень точного ($\approx 1\%$) измерения энергии малоэнергетичных тяжелых частиц. Для ионов C^{12} эта оптимальная энергия лежит в районе $\approx 10 - 20$ Мэв.

Все высказанные соображения позволяют вычислить, какое минимальное содержание того или иного элемента в образце возможно определить за не слишком большое время экспозиции.

Расчет показывает, что для ионов C^{12} оптимальной энергии имеется возможность обнаружить в образце, состоящем в основном из легких элементов, малые примеси (до $10^{-3} - 10^{-4}$ по весу) тяжелых элементов ($A \approx 200$) за время экспозиции порядка 5 мин при токе ионов $C^{12} = 1$ мка.

При переходе к обнаружению примесей более легких элементов улучшается разрешение метода по массе, но падает чувствительность пропорционально квадрату порядкового номера элемента. Улучшение разрешения метода с уменьшением массы анализируемого элемента позволит несколько увеличивать толщину мишени при переходе к анализу более легких элементов. Это частично скомпенсирует уменьшение сечения кулоновского рассеяния и приведет к не слишком быстрому ухудшению чувствительности метода с уменьшением массы элемента, примеси которого нужно обнаружить.

Методика измерения и результаты

Данная работа была выполнена с целью показать возможность химического анализа образцов-мишеней, снимая энергетический спектр тяжелых ионов, рассеянных на большие углы. Так как опыты носили качественный предварительный характер, применялись искусственно приготовленные мишени заранее известного состава. Тонкие слои веществ, входящих в состав мишеней, наносились на подложки из толстого графита.

Графитовая подложка бралась в связи с тем соображением, что ионы углерода на ядрах углерода не могут рассеиваться назад и поэтому графитовая подложка не будет вносить никакого вклада в спектр рассеянных ионов.

В работе был использован выведенный пучок ионов C_{+4}^{12} , ускоренных до 80 Мэв на циклотроне многозарядных ионов ОИЯИ У-150.

Для того, чтобы рассеяние тяжелых ионов на большие углы происходило с большой вероятностью, необходимо, чтобы энергия падающего иона была ниже кулоновского барьера системы ион+ядро мишени. Поэтому для снижения энергии ионов, выходящих из циклотрона, на их пути ставились тормозящие фольги из алюминия толщиной 60-80 мк,

в результате чего первоначальная энергия уменьшалась до 35 Мэв. Это заметно ухудшило энергетический спектр пучка, ширина которого на половине высоты непосредственно после тормозящих фольг составляла $\approx 2-2,5$ Мэв.

Выведенный пучок циклотрона У-150, прежде чем попасть в экспериментальную камеру, проходит на своем пути две пары фокусирующих магнитных квадрупольных линз и отклоняющий магнит, который направляет пучок в тот или иной экспериментальный канал.

Устанавливая тормозящие фольги в начале тракта транспортировки пучка, можно использовать анализирующие свойства коммутирующего магнита для монохроматизации пучка, попадающего на мишень. Это приведет, конечно, к уменьшению интенсивности пучка.

При использовании этой возможности на мишени был получен пучок с энергией ≈ 35 Мэв, имеющий энергетический спектр шириной ≈ 1 Мэв на половине высоты интенсивностью 0,01 мка.

Ионы C^{12} , рассеянные на мишени, регистрировались кремниевым поверхностно-барьерным счетчиком, имеющим разрешение 1,5% для α -линии A_{241} ($E_{\alpha} = 5,48$ Мэв). Импульсы с полупроводникового счетчика усиливались предусилителем и усилителем типа УИС-1 и затем анализировались 100-канальным амплитудным анализатором АИ-100.

На рисунке 2 приведен энергетический спектр ионов, рассеянных на мишени, содержащей золото (≈ 50 мкг/см²) и соль CsJ (25 мкг/см²).

Положение максимумов спектра и их относительная интенсивность хорошо согласуются с расчетными данными.

Была сделана попытка произвести анализ мишени, содержащей золото и висмут в равных количествах (по 50 мкг/см²). Однако недостаточная моноэнергетичность пучка не позволила разрешить по энергии пики, принадлежащие золоту и висмуту. Правда, как и следовало ожидать, энергетический спектр ионов, рассеянных на мишени, содержащей золото и висмут, несколько шире, чем спектр, полученный при облучении мишени, содержащей только золото. Эти данные приведены на рис. 3.

Из полученных данных следует, что предлагаемый метод химического анализа мишеней требует хорошей монохроматичности падающего пучка ($\approx 0,5-1\%$). Полупроводниковый детектор тоже должен обладать хорошим разрешением ($\approx 0,5\%$).

При такой монохроматичности пучка имеется возможность в области масс ≈ 200 надежно разделить компоненты, отличающиеся на 5 или более массовых единиц.

В заключение авторы выражают благодарность проф. Г.Н.Флерову за руководство работой, Ю.Ц.Оганесяну за ценные советы и обсуждение результатов, а также группе эксплуатации циклотрона У-150 за обеспечение хорошей работы ускорителя, Ю.Э.Пенин-онжгевичу и К.Н.Шарифову за помощь в измерениях.

Л и т е р а т у р а

1. П.Д.Корж, Л.М.Велюс. Изв. вузов, серия "Цветная металлургия", № 6, 1962.
2. А.А.Абдулаев и др. Труды Ташкентской конференции по мирному использованию атомной энергии. Том II, стр. 282. Изд. АН Узб.ССР, Ташкент, 1961.
3. Д. Абдулаев. Доклады АН Тадж. ССР, т. VI, 3, Душанбе, 1963.
4. И.Н.Плаксин и др. Радиоактивные изотопы и ядерные излучения в народном хозяйстве СССР, т.4. Изд. АН СССР, стр. 270, 1961.
5. А.А.Смейле. Применение радиоактивных изотопов в промышленности, медицине и в сельском хозяйстве. Изд. АН СССР, стр. 153, М, 1958.
6. A.Turkevich. Science, 134, 3480, p. 672-673, 1961.
7. S.S.Markowitz, J.D.Mahony. Analytical Chemistry, v. 34, 3, p.329. March 1962.
8. D.Taylor. Neutron Irradiation and Activation Analysis. London, 1964.
9. S.Rubin. Nucl. Instrum and Methods, 5, 177 (1959).
10. N.A.Eskind, H.Mark. Journal of Geoph Research, USA, 67, 4867 (1962).

Рукопись поступила в издательский отдел
6 апреля 1965 г.

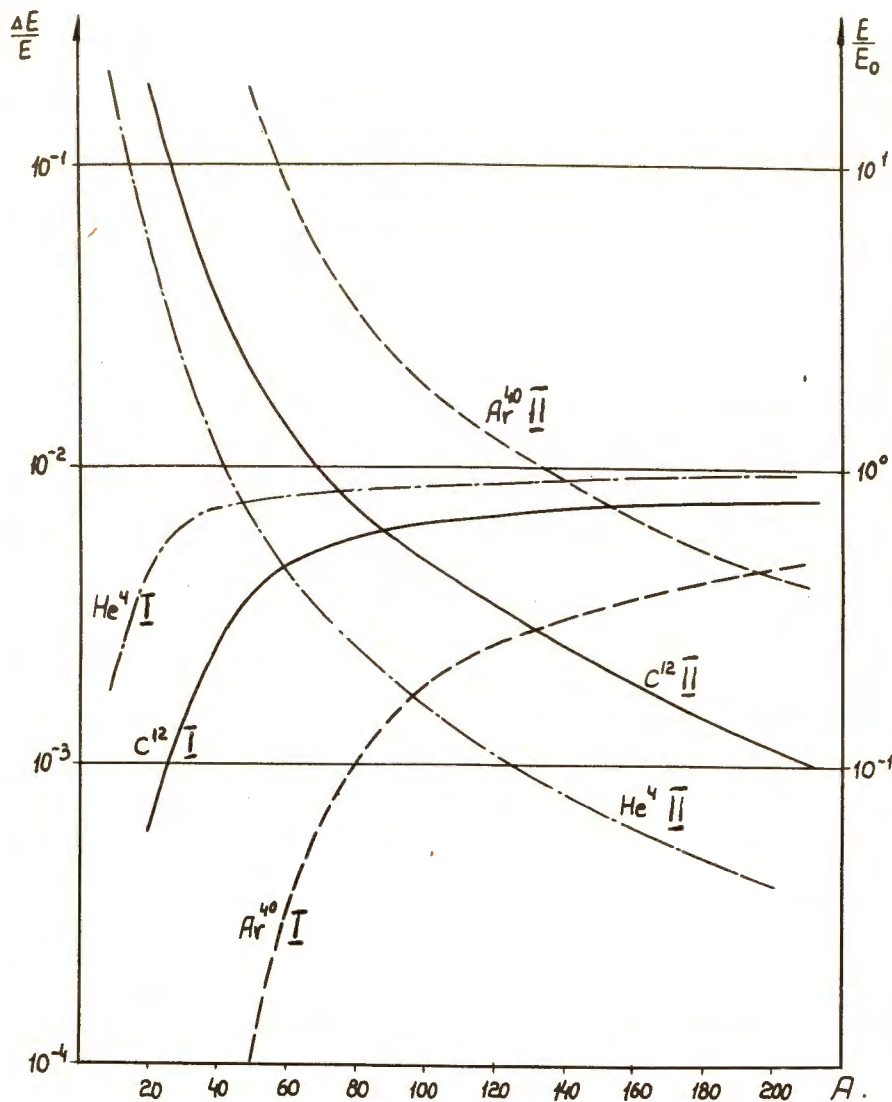


Рис. 1. Зависимость энергии ионов, рассеянных назад, $\frac{E}{E_0}$ (кривые с индексом I) и зависимости разрешения $\frac{\Delta E}{E}$ (кривые с индексом II) от массы рассеивающего ядра.

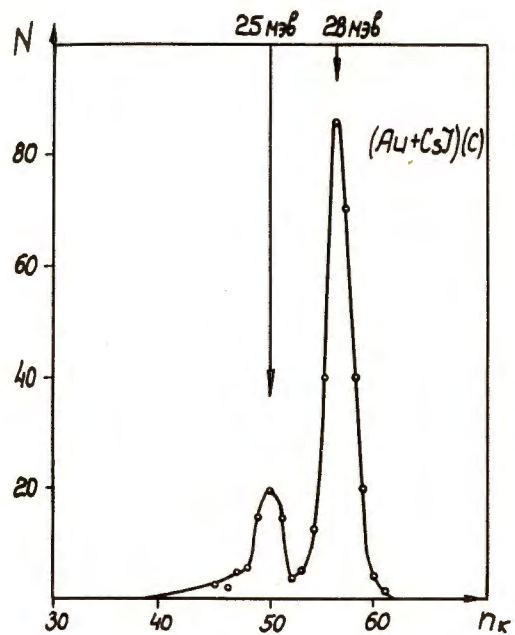


Рис. 2. Спектр ионов, рассеянных на 180° , от мишени, содержащей 50 мкг/см^2 золота и 25 мкг/см^2 соли CsJ. Мишень облучалась током $0,01 \text{ мкА}$ в течение 4 мин.

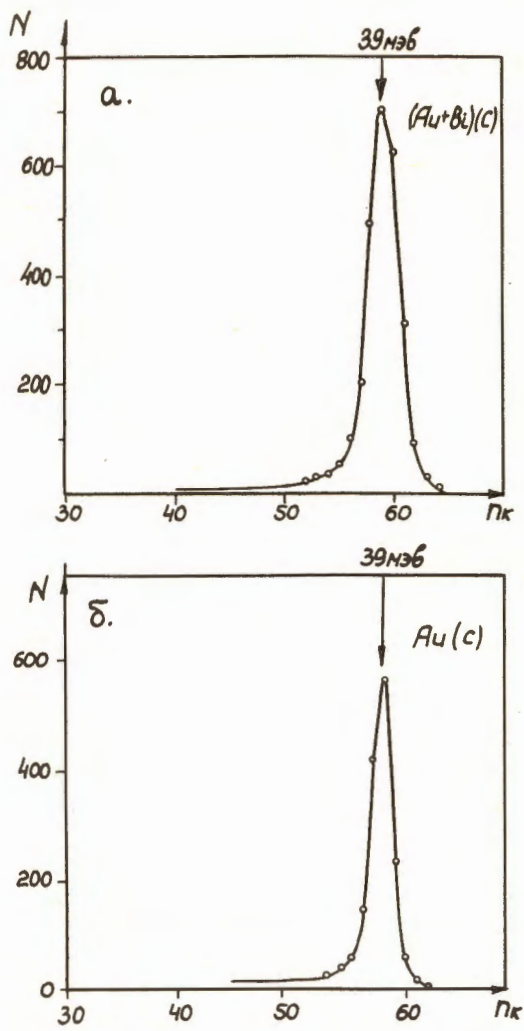


Рис. 3. Сравнение спектров рассеянных ионов от мишеней, содержащих золото и висмут (в равных количествах по 50 мкг/см^2) в одном случае (рис. 3а) и только золото - в другом (рис. 3б).