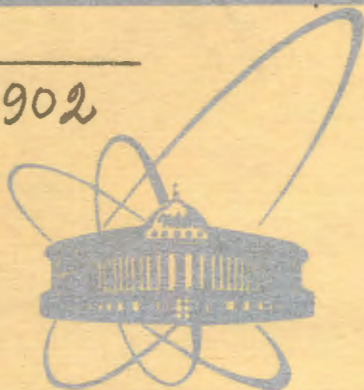


Б-902



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

3888/2-79

1/10-79

P7 - 12402

В.Н.Бугров, В.В.Каманин, С.А.Карамян

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ВЕЩЕСТВА
С ПОМОЩЬЮ
КУЛОНОВСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ЯДЕР

1979

P7 - 12402

В.Н.Бугров, В.В.Каманин, С.А.Карамян

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ВЕЩЕСТВА
С ПОМОЩЬЮ
КУЛОНОВСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ЯДЕР

Направлено в АЭ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Способ определения изотопного состава вещества
с помощью кулоновского возбуждения ядер

Сравнение гамма-спектров кулоновского ядерного возбуждения, полученных на пучке тяжелых ионов от эталонной мишени и исследуемого образца, позволило определить изотопный состав последнего. Метод не требует абсолютных измерений. Приведена формула, связывающая измеряемые величины с содержанием изотопов в исследуемом образце.

Эксперимент, проведенный на циклотроне У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, по определению состава металлического монокристалла из вещества, обогащенного изотопом ^{186}W , позволил определить предельный уровень чувствительности данного способа в конкретных условиях.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

A Method of Determination of Isotopic
Composition of a Sample Using the Coulomb
Excitation of Nuclei

The isotopic composition of a sample has been determined by comparing the Coulomb excitation γ -ray spectra of a standard target and the sample, obtained on a heavy ion beam. This method does not require absolute measurements. The formula relating the quantities measured to the isotopic contents of the sample investigated is given. The limiting sensitivity of this method under specific conditions has been estimated in an experiment to determine the composition of a metallic single crystal from a substance rich in the ^{186}W isotope, carried out at the U-300 cyclotron of the JINR Laboratory of Nuclear Reactions.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

1. ВВЕДЕНИЕ

Известен широкий круг физических методов анализа вещества^{/1-3/}. Среди них немаловажное значение имеют ядерно-физические методы, основанные на знании специфических свойств ядер элементов и изотопов. Разработано множество различных вариантов методов анализа, специально предназначенных для определения того или иного элемента. Избирательность метода, т.е. его пригодность для исследования только одного элемента, является, с одной стороны, преимуществом, так как повышает надежность результата, а с другой - недостатком из-за неуниверсальности. Наибольшее распространение получил нейтронно-активационный анализ, пригодный для определения большого числа элементов при выборе специальных условий. Еще более универсальным является рентгеновский флуоресцентный анализ. Эти методы и большое число других методов элементного анализа неприменимы для анализа изотопного состава вещества. В этом случае может быть применен только метод, базирующийся на физическом процессе, обеспечивающем дифференциацию изотопов одного элемента и выявляющем все стабильные изотопы данного элемента. Эти требования достаточно специальные, в результате чего созданы ядерные методы изотопного анализа только для небольшого числа элементов. Наиболее широко для изотопного анализа применяются масс-спектральные методы. Эти методы не являются инструментальными, они, как правило, требуют отбора пробы, ее химической обработки и полной потери пробы в результате анализа.

В настоящей работе предложен инструментальный относительный способ^{/4/} анализа изотопного состава веществ, который может в некоторых случаях применяться и для определения элементного состава многокомпонентных материалов. Способ основан на применении процесса кулоновского возбуждения

ядер. Описан эксперимент по опробованию способа в частном случае анализа монокристаллической вольфрамовой мишени из вещества, обогащенного изотопом ^{186}W .

II. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Известно ^{5/}, что измерение абсолютной вероятности кулоновского возбуждения под действием тяжелых ионов ядер какого-либо стабильного изотопа, содержащегося в мишени в известном количестве, приводит к определению ядерной характеристики изотопа - приведенной вероятности электромагнитного перехода ядра из основного состояния на возбужденный уровень. В конкретном случае возбуждения первого уровня 2^+ в четно-четном ядре выход γ -квантов в реакции кулоновского возбуждения связан с приведенной вероятностью перехода $B(E2, 0^+ \rightarrow 2^+)$ в первом порядке теории возмущений следующим соотношением:

$$N(2^+ \rightarrow 0^+) = 1,802 \cdot 10^{10} \frac{K\% B(E2, 0^+ \rightarrow 2^+) A_1 Q \int_0^{E_{\max}} (E - \Delta E) \sqrt{E} f(\xi) dE}{A_2 Z_2^2 \left(1 + \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \left(\frac{dE}{d\rho x}\right) \Big|_{E_0} \sqrt{E_0} Z_{\text{иона}}}, \quad /1/$$

где $K\%$ - относительное содержание данного изотопа в мишени, A_2 - атомный вес ядра мишени, Z_2 - порядковый номер ядра мишени, $Z_{\text{иона}}$ - заряд иона, A_1 - атомный вес ядра частицы, Q - интеграл тока ионов в мкК , $(dE/d\rho x) \Big|_{E_0}$ - удельные потери, МэВ/мг/см^2 , частицы в веществе мишени при начальной энергии E_0 , $\Delta E' = (1 + A_1/A_2)\Delta E$, ΔE - энергия наблюдаемого перехода, $f(\xi)$ - функция кулоновского возбуждения ^{5/}.

Если сечение кулоновского возбуждения велико, то необходимо применять теорию многократного кулоновского возбуждения ^{6/}, в которой сечение возбуждения каждого уровня зависит от набора приведенных вероятностей электромагнитных переходов между различными уровнями ядра.

В обратной постановке задачи измерение сечения кулоновского возбуждения уровней определенного ядра и теоретический анализ результата по формуле /1/ или более сложным формулам позволяют найти абсолютное количество определяемых ядер в мишени. Однако такая постановка задачи предполагает прове-

дение абсолютных измерений эффективности установки, тока пучка ионов, тормозных потерь ионов в веществе в случае толстой мишени и т.д., а также выполнения абсолютных расчетов вероятности реакции кулоновского возбуждения.

В настоящей работе предполагается применить процесс кулоновского возбуждения ядер для определения изотопного состава образца в относительных измерениях путем сравнения γ -спектров кулоновского возбуждения исследуемой мишени и подобной мишени естественного изотопного состава. Обозначим естественное содержание изотопов рядом цифр - P_i при выполнении условия $\sum P_i = 1$, в исследуемом образце соответственно P'_i и $\sum P'_i = 1$, а число зарегистрированных γ -квантов, принадлежащих различным изотопам в γ -спектрах кулоновского возбуждения, - как N_i и N'_i для эталонной и исследуемой мишени соответственно. Нетрудно получить, что искомые значения P'_i выражаются через известные величины P_i и измеренные значения N_i и N'_i следующим образом:

$$P'_i = \frac{N'_i P_i}{N_i \sum_{i=1}^n N'_i P_i / N_i}, \quad /2/$$

где n - число изотопов исследуемого элемента. Точность определения содержания изотопов P'_i будет определяться экспериментальной точностью измерения величин N_i , N'_i и точностью табличных значений естественного содержания изотопов P_i .

Формула /2/ содержит результаты сравнительного измерения для эталонной и исследуемой мишеней. Нетрудно видеть, что формула /2/ не требует абсолютной связи этих двух измерений, поскольку в нее входят отношения N'_i/N_i дважды. В эксперименте необходимо соблюдать только условия, обеспечивающие одинаковое отношение вероятностей кулоновского возбуждения и регистрации γ -излучения для разных изотопов в двух измерениях. К таким требованиям относятся: постоянство энергии пучка ионов, равномерное распределение по толщине мишени исследуемых изотопов, одинаковый ход энергетической зависимости эффективности регистрации γ -лучей для двух измерений. Допустимо различие геометрической эффективности регистрации, не требуется знание отношения интегральных потоков частиц на мишень в двух измерениях.

Еще более существенным является то, что для определения содержания изотопов в данном случае не требуется знание приведенной вероятности электромагнитных переходов в ядрах и не является необходимым расчет сечений кулоновского возбуждения уровней исследуемых ядер. Это дает преимущества в отношении улучшения точности результата и снижения трудоемкости обработки экспериментальных данных.

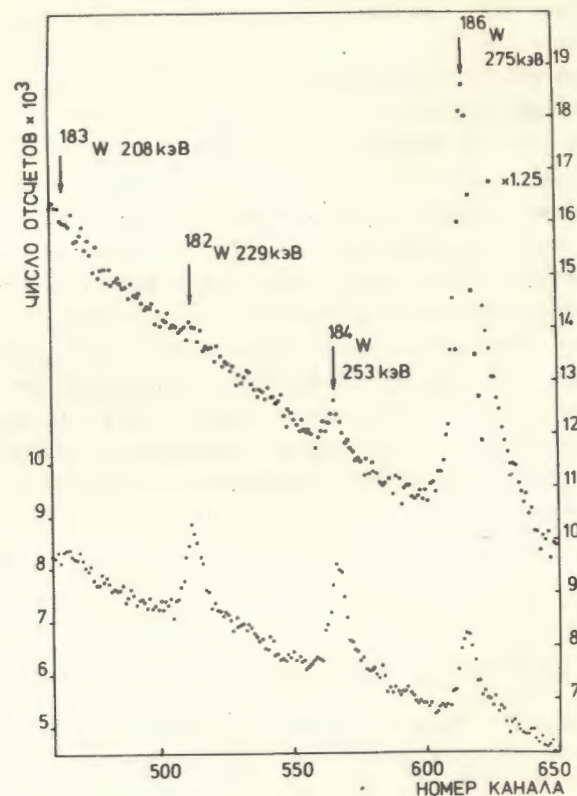
III. ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Способ опробован в эксперименте по определению изотопного состава монокристалла вольфрама, обогащенного изотопом ^{186}W . Монокристалл применялся в экспериментах по измерению времен жизни составных ядер с помощью эффекта теней ⁷¹. Эталонном служил монокристалл из естественной смеси изотопов вольфрама.

Эксперимент проводился на циклотроне У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Исследуемая и эталонная мишени облучались пучком ионов ^{40}Ar , имеющих энергию 135 МэВ, после прохождения тормозящих фольг при токе -1 нА в течение нескольких часов. Спектр гамма-лучей кулоновского возбуждения регистрировался полупроводниковым Ge(Li) -детектором объемом 37 см^3 с энергетическим разрешением $2,0 \text{ кэВ}$ /по линиям ^{57}Co /. Детектор располагался на расстоянии 3 см от мишени. На рисунке показаны гамма-спектры для исследуемой и эталонной мишеней. Идентификация γ -линий в спектре осуществлялась с использованием ядерно-спектроскопических данных из таблицы изотопов ⁷⁸. В спектрах отсутствуют гамма-пики изотопа ^{180}W поскольку его содержание даже в естественной смеси составляет только 0,135%, это выходит за предел чувствительности измерения, определяемый статистической погрешностью.

Значения процентного содержания изотопов в исследуемом монокристалле, полученные путем обработки экспериментальных результатов и вычисления по формуле /2/, составляют:

$$\begin{aligned} ^{182}\text{W} &- (0,73 \pm 0,40)\%, & ^{183}\text{W} &- (1,3 \pm 1,0)\%, \\ ^{184}\text{W} &- (3,75 \pm 0,75)\%, & ^{186}\text{W} &- (94,2 \pm 2,5)\%. \end{aligned}$$



Из приведенных результатов видно, что предельный уровень содержания изотопа, поддающийся определению, в конкретных условиях эксперимента равен около 0,5%. К уже упоминавшимся преимуществам описываемого инструментального относительно-го способа анализа следует добавить также отсутствие активации образца /т.к. энергия ионов ниже кулоновского барьера ядерного взаимодействия/, а также возможность анализа веществ в различной химической форме и механическом состоянии.

К числу ограничений применимости способа следует отнести тот факт, что его предельная чувствительность становится недостаточной для элементов, ядра которых характеризуются малой приведенной вероятностью электромагнитных переходов. К таким ядрам относятся, например, сферические, близкие к дважды магическим. Способ не эффективен и для анализа

легких элементов, т.к. сечение кулоновского возбуждения пропорционально $(Z_1 Z_2)^2$, где Z_1 и Z_2 - атомные номера ядер мишени и бомбардирующей частицы. Однако если в качестве бомбардирующей частицы применить такие ионы, как ^{40}Ar или более тяжелые, то сечение реакции кулоновского возбуждения становится достаточно большим практически для всех элементов за исключением самых легких и элементов с магическим Z , таких, как олово, свинец. Кроме изотопного содержания, данным способом можно определить также элементный состав смесей, сплавов или химических соединений при условии, что все компоненты смеси не очень сильно отличаются по Z /для правильного выбора энергии частиц по отношению ко всем компонентам/ и что каждая компонента имеет хотя бы один изотоп, сечение кулоновского возбуждения которого достаточно велико.

Авторы благодарны Ю.А.Александрову за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боуэн Г., Гиббонс А. Радиоактивационный анализ. Атомиздат, 1968.
2. Егизаров Б.Г., Кoryшко Л.А., Сельдяков Ю.П. Измерительная техника в инструментальном нейтронно-активационном анализе. Атомиздат, М., 1972.
3. Пустановский В.П. Оценка точности и чувствительности активационного анализа, Атомиздат, М., 1976.
4. Бугров В.Н., Каманин В.В., Карамян С.А. Авторское свидетельство № 602835, кл. G01N 23/00 с приоритетом от 3 января 1977 г. Бюллетень ОИПОТЗ, 1978, № 14, с. 157.
5. Альдер К. и др. В сборнике "Деформация атомных ядер", перевод под редакцией Л.А.Слива, ИЛ, М., 1958.
6. Берсон И.Я. ИАН Латв. ССР, сер. физ. и техн. наук, 1964, т. 6, с. 3; 1965, т. 1, с. 3. Berson I.Y. Nucl. Phys., 1965, 67, 296.
7. Каманин В.В. и др. ЯФ, 1972, 16, с. 447.
8. Lederer C.M., Hollander J.M., Perkman I. Table of Isotopes, Willey, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 апреля 1979 года.