

Академик АН УзССР У. А. АРИФОВ, А. Д. БЕЛЯЕВ,
В. И. КОГАН, В. П. ПИКУЛЬ, А. М. УСМАНДИЯРОВ

СЕПАРАЦИЯ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Поскольку измерения масс методами времени пролета и полупроводниковых детекторов ⁽¹⁾ дают недостаточную точность, а от момента деления ядер до проведения анализа в радиохимических и масс-спектрометрических методах проходит много времени ⁽²⁾, возникла необходимость в создании методики, обеспечивающей точные измерения свойств осколков деления на стадиях, близких к моменту деления. Наилучшим представляется метод пропускания осколков деления непосредственно после деления через электростатическое и магнитное поля. Достоинством этого метода, помимо высокой точности, является пространственное разделение осколков деления, что позволяет изучать их радиоактивные свойства, а также взаимодействие с веществом.

В 1964 г. в ФРГ на реакторе был запущен масс-спектрограф типа Маттауха — Гердого ⁽³⁾. Вследствие некоторых технических особенностей этого прибора была достигнута сравнительно невысокая разрешающая способность — 150 на полувысоте пиков. Но уже и при этом разрешении был проведен ряд оригинальных экспериментов по определению первичных зарядов ядра осколков деления ⁽⁴⁾ и взаимодействию осколков деления с веществом ⁽⁵⁻⁷⁾. В настоящее время в ФРГ ⁽⁸⁾ и Франции ⁽⁹⁾ ведутся работы по изготовлению аналогичного вида установок на реакторах.

За период с 1966 г. по 1970 г. нами был изготовлен и установлен на реакторе масс-спектрометр, обеспечивший сепарацию осколков деления по массам, энергиям и эффективным зарядам за время около 1 мксек. после акта деления. С учетом известных сведений о диапазоне масс, энергий и зарядов осколков деления ^(4, 10), а также условий работы на чучке нейтронов реактора выбрана конструкция масс-спектрометра с последовательно расположенными электростатическим полем цилиндрического конденсатора и секторным однородным магнитным полем с отклонениями ионов в противоположных направлениях и без промежуточного фокуса между полями.

Из условий фокусировки по углам и скоростям ⁽¹¹⁾ и ограничения величин электрического и магнитного полей были определены основные геометрические параметры масс-спектрометра: а) в электростатическом анализаторе, расстояние от объекта до границы поля $l_e' = 380,0$ см, радиус отклонения $r_{e0} = 274,1$ см, угол отклонения $\Phi_e = 19^\circ 7'$, изображение в бесконечности $l_e'' = \infty$, зазор между пластинами $d = 3,000 \pm 0,003$ см, рассеянные поля на краях экранированы заземленными диафрагмами ⁽¹²⁾; б) в магнитном анализаторе: объект — в бесконечности $l_m' = \infty$, расстояние от границы полюсов магнита до изображения $l_m'' = 227,9$ см, радиус отклонения $r_{m0} = 177,5$ см, угол отклонения $\Phi_m = 40^\circ$, угол входа ионов в магнитное поле $\epsilon' = 0$, угол выхода $\epsilon'' = 2^\circ$. Действие рассеянных полей на краях учтено по Ниру ⁽¹³⁾ введением эффективных границ поля, расстояния которых от границ полюсов получены из измеренных значений рассеянных полей методом ⁽¹⁴⁾. Так как $l_e'' = \infty$ и $l_m' = \infty$, расстояние между электрическим и магнитным полями произвольно и выбрано

$\Delta = 318,5$ см. Полная длина пути ионов в масс-спектрометре 11,4 м, время пролета его осколками около 1 мсек.

Блок-схема масс-спектрометра представлена на рис. 1. Часть осколков деления, возникших в слое U^{235} , находящемся во входном плече 2 масс-спектрометра, в потоке нейтронов $1,5 \cdot 10^{12} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$, выходит через щель 1 шириной 1 мм и высотой 38 мм и слаборасходящимся пучком с апертурой, ограниченной диафрагмой 4 со щелью переменной ширины (высота всех последующих щелей 40 мм), и проходит в электростатический

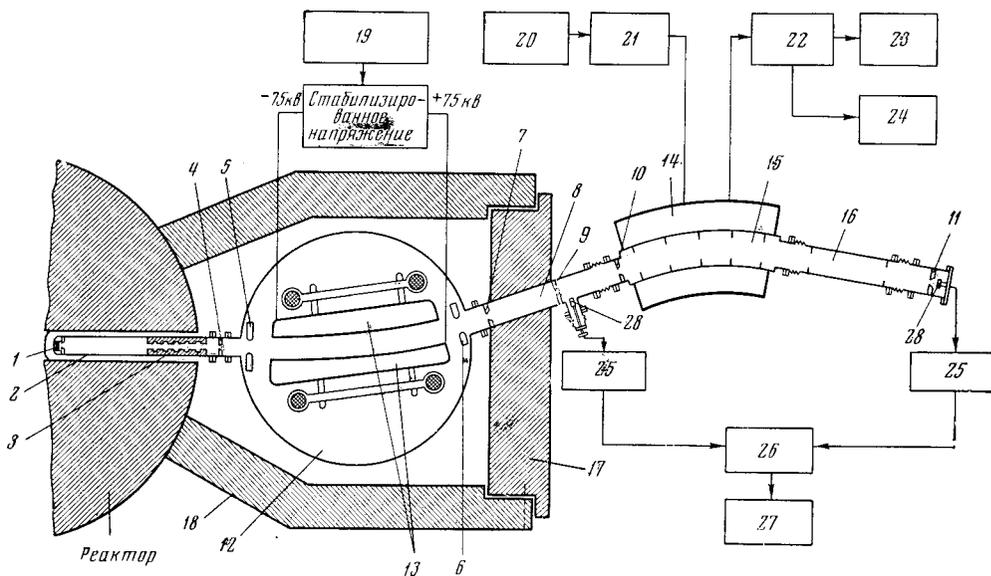


Рис. 1. Блок-схема масс-спектрометра с двойной фокусировкой для сепарации осколков деления. 1 — источник ионов (слой U^{235} толщиной 260 мкг/см^2) и входная щель, 2 — входное плечо, 3 — коллиматоры нейтронного пучка, 4 — диафрагма, коллимирующая осколки деления, 5, 6 — диафрагмы, экранирующие рассеянное электростатическое поле, 7 — диафрагма для предотвращения рассеяния ионов, 8 — ионопровод между полями, 9 — диафрагма, регулирующая величину $\Delta(E/Z^*)$, 10 — диафрагма, определяющая максимальную величину $\Delta(E/Z^*)_{\text{max}}$, 11 — выходная щель, 12 — камера электростатического анализатора, 13 — пластины цилиндрического конденсатора, 14 — камера магнитного анализатора, 15, 16 — выходное плечо, 17 — подвижная часть защиты, 18 — неподвижная часть защиты 19 — высоковольтный источник питания, 20 — источник питания электромагнита, 21 — стабилизатор тока, 22 — измеритель магнитного поля ИМИ-2, 23 — осциллограф ЭО-7, 24 — частотомер ЧЗ-30, 25 — предусилитель, 26 — усилитель, 27 — амплитудный анализатор, 28 — полупроводниковые детекторы

анализатор. Последний представляет цилиндрический конденсатор, пластины 13 которого изготовлены с высокой точностью из цельных кусков алюминиевого сплава и укреплены с помощью юстировочных приспособлений на полистироловых стойках, стянутых в жесткий каркас, который опирается на поворотный стол и заключен вместе с ним в цилиндрической камере 12.

Через электростатический анализатор проходят ионы с отношением кинетической энергии E к эффективному заряду Z^*

$$\frac{E}{Z^*} = \frac{1}{2 \ln(r_2/r_1)} V = aV, \quad (1)$$

где V — напряжение между пластинами цилиндрического конденсатора, r_2 и r_1 — радиусы кривизны рабочей поверхности внешней и внутренней пластин соответственно.

Двуполярный высоковольтный источник питания 19 обеспечивает подачу плавно регулируемого напряжения величиной до ± 70 кВ, стабили-

зированного до 0,01%, на каждую из пластин, что позволяет пропускать через анализатор осколки деления с любым значением E/Z^* при $r_1 = 272,6$ см и $r_2 = 275,6$ см.

Затем осколки деления через ионопровод 8 проходят к магнитному анализатору — секторному однородному магнитному полю, создаваемому электромагнитом 14. Интервал значений E/Z^* задается диафрагмами 9 и 10, $\Delta(E/Z^*)_{\max} \approx 1\%$. В магнитном поле осуществляется сепарация прошедших электростатический анализатор ионов по отношению массы M к заряду Z^* :

$$\frac{M}{Z^*} = r_{m0}^2 \ln \frac{r_2}{r_1} \frac{H^2}{V} = b \frac{H^2}{V}, \quad (2)$$

H — напряженность магнитного поля в зазоре магнита.

Таким образом, через выходную щель масс-спектрометра проходят осколки деления со значениями E/Z^* и M/Z^* , определяемыми при данных геометрических параметрах установленными величинами V и H .

Модернизированный источник питания 20 электромагнита СП-25^б обеспечивает величину поля в зазоре электромагнита, равном 72 мм, от 1000 до 10 600 э со стабильностью $\Delta H/H \leq 0,01\%$, что позволяет проводить анализ осколков деления всех возможных значений M/Z^* .

Детектирование осколков деления осуществляется полупроводниковыми детекторами 28, один из которых расположен за электростатическим анализатором и может с помощью сильфонного перехода убираться с пути пучка осколков, второй — в фокусе, за выходной щелью 11. Амплитудный анализ импульсов от детекторов производится анализатором АИ-128(27).

Камера электростатического анализатора с подвижным блоком защиты и электромагнит установлены на двух тележках, снабженных механизмами выставки и жестко соединенных регулирующим стержнем. Тележки с помощью электропривода могут перемещаться по колее с рельсами параллельно оси канала реактора, обеспечивая введение входного плеча в канал реактора. В рабочем положении камера электростатического анализатора окружена защитой от излучений реактора. В процессе измерений давление в масс-спектрометре — $(1-2) \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Откачка производится тремя паромаслянными насосами с азотными ловушками.

Юстировка прибора выполнена с помощью плоскопараллельной (до 18") стеклянной пластины и портативной лазерной установки, выставка по горизонту — с помощью нивелира.

Градуировка проведена по α -частицам Pu^{238} , имеющим две интенсивные линии с энергиями $E_1 = 5,4557$ Мэв и $E_2 = 5,4988$ Мэв (¹⁵). На рис. 2 представлены градуировочные кривые: a — спектр значений E/Z^* α -частиц, b — пик M/Z^* . Из рис. 2б видно, что имеет место фокусировка α -частиц с двумя значениями энергии ($\Delta E = 43$ кэв) в одном фокусе.

Рис. 2. Спектры α -частиц, снятые на масс-спектрометре: a — после прохождения электростатического поля, b — после прохождения магнитного поля

Разрешающая способность масс-спектрометра, согласно рис. 2б, $M^*/\Delta M^* = 300$ на 0,1 высоты пика (или около 600 на 0,5 высоты), $M^* = M/Z^*$. По рис. 2 определены также постоянные a и b в (1), (2).

На рис. 3 показан амплитудный спектр осколков деления, прошедших электростатический анализатор. Всем линиям этого спектра ($V = 71,1$ кв)

соответствует одно значение $E/Z^* = 3,235$ Мэв/ e_0 . Линейчатый характер спектра обусловлен дискретностью зарядов осколков деления. Определение значений Z^* производилось сравнением спектров, снятых при ряде соседних значений отклоняющего напряжения методом, предложенным в (5). Полученные величины можно проверить по формулам поправок на амплитудный дефект (16). На рис. 4 приведен спектр значений M/Z^* осколков деления, снятый при выбранном значении V и изменении величины H . Разрешающая способность та же, что и для α -частиц: $M^*/\Delta M^* = 300$ на 0,1 высоты пиков. Пики хорошо разделены.

Было установлено соответствие между амплитудами импульсов обоих детекторов 28 (рис. 1) по всей области энергий осколков, что позволило определить Z^* для осколков, прошедших оба анализатора, и таким образом определить их массу, эффективный заряд и кинетическую энергию одновременно.

На выходе из канала реактора, вплотную к входному плечу, расположен полупроводниковый детектор с прилегающим слоем U^{235} , который служит монитором нейтронного пучка.

Таким образом, описанный масс-спектрометр позволяет сепарировать в пространстве с хорошим разрешением примерно через 1 мсек. после акта деления осколки деления, характеризующиеся определенными значениями массы, эффективного заряда и энергии, с высокой точностью идентифицировать эти значения и определять выходы

таких осколков. Вынос фокальной плоскости изображения далеко от границ магнитного поля расширяет круг исследований на этой установке.

Институт электроники
Академии наук УзССР
Ташкент

Поступило
26 X 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. С. Pappas, J. Alstad, Phys. and Chem. of Fission, Vienna, 1969. ² Э. Хайд, И. Перлман, Г. Сиборг, Деления ядер, М., 1969. ³ Н. Ewald, E. Konecny et al., Zs. Naturforsch., 19a, 2, 194 (1964). ⁴ E. Konecny, H. Ewald et al., Zs. Phys., 231, № 1, 59 (1970). ⁵ Н. Оровер, E. Konecny, G. Siegert, Zs. Naturforsch., 20a, 1, 131 (1965). ⁶ E. Konecny, K. Hetwer, Nucl. Instr. and Meth., 36, № 1, 61 (1965). ⁷ U. Höpner, E. Konecny, G. Fiedler, Nucl. Instr. and Meth., 74, № 2, 285 (1969). ⁸ P. Armbruster, H. Ewald et al., Arkiv fys., 36, № 1—6, 305 (1967). ⁹ Атомная энергия, 30, в. 3, 326 (1971). ¹⁰ А. А. Грешников и др., Продукты мгновенного деления U^{235} , U^{238} , в интервале 0—1 ч, Справочник, М., 1969. ¹¹ J. Mattauch, R. Herzog, Zs. Phys., 89, № 11/12, 786 (1934). ¹² R. Herzog, Zs. Naturforsch., 10a, № 6, 887 (1955). ¹³ Дж. Барнард, Современная масс-спектрометрия, М., 1958. ¹⁴ К. Бейнбридж, Экспериментальная ядерная физика, М., 1957, стр. 513. ¹⁵ В. М. Горбачев и др., Основные характеристики изотопов тяжелых элементов, Справочник, М., 1970. ¹⁶ H. W. Schmitt, J. H. Neller, F. J. Walter, Phys. Rev., 141, № 3, 1146 (1966).

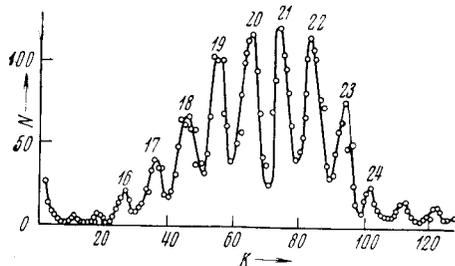


Рис. 3. Амплитудный спектр осколков деления за электростатическим анализатором. Числа при пиках — значения эффективных зарядов, выраженные через заряд электрона e_0

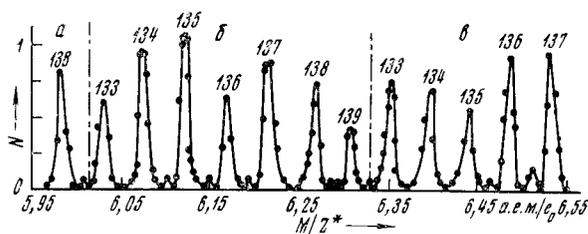


Рис. 4. Спектр M/Z^* осколков деления, снятый на масс-спектрометре ($E/Z^* = 3,291$ Мэв/ e_0): а — $Z^* = 23$; б — $Z^* = 22$, $E = 72,4$ Мэв; в — $Z^* = 21$, $E = 69,1$ Мэв. Числа при пиках — значения масс в а.е.м.