

УДК 539.173.3

О.С. Шевченко<sup>1</sup>, Ю.Н. Ранюк<sup>1</sup>, А.Н. Довбня<sup>1</sup>,  
В.Т. Маслюк<sup>2</sup>, О.А. Парлаг<sup>2</sup>, В.И. Касилов<sup>1</sup>,  
В.А. Кушнир<sup>1</sup>, В.В. Митроченко<sup>1</sup>, С.С. Кандыбей<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"  
61108, Харьков, ул. Академическая, 1

e-mail: oksshevchenko@mail.ru

<sup>2</sup>Институт электронной физики НАН Украины  
88017, Ужгород, ул. Университетская, 21

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОДЕЛЕНИЯ <sup>nat</sup>Pb

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования фотоделения <sup>nat</sup>Pb под действием тормозного излучения энергией 90,8 МэВ.

**Ключевые слова:** фотоделение, продукты деления, тормозное излучение, гамма-спектроскопия, <sup>nat</sup>Pb.

### Введение

В настоящее время внимание мировой научной общественности привлечено к решению проблем ядерной энергетики: трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и созданию безопасных энергетических ядерных установок [1, 2].

В Национальном научном центре "Харьковский физико-технический институт" реализуется программа создания ядерной установки "Источник нейтронов, основанный на подкритической сборке, управляемой ускорителем электронов" [3].

Элементы типа Pb, Ta, Au, Bi, Hg, W, Th и U могут быть использованы в системах, управляемых ускорителем, как материал для мишеней при производстве нейтронов [4].

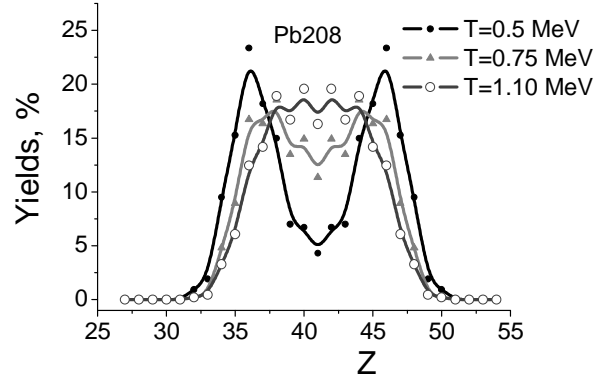
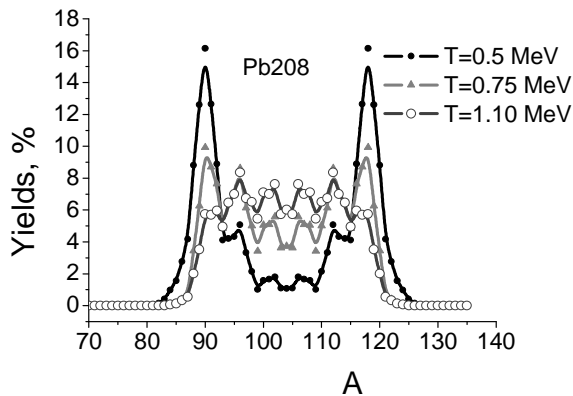
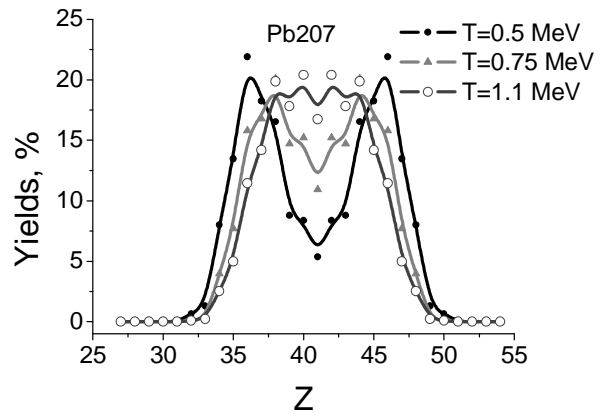
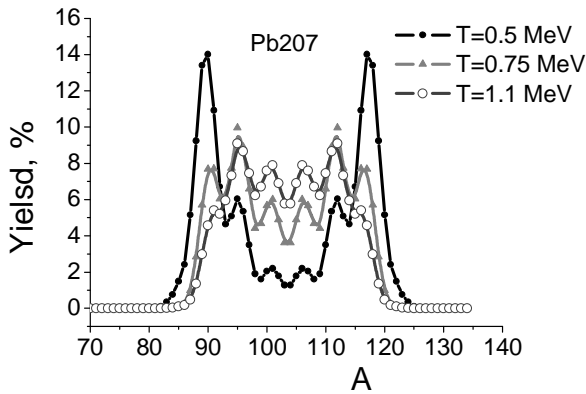
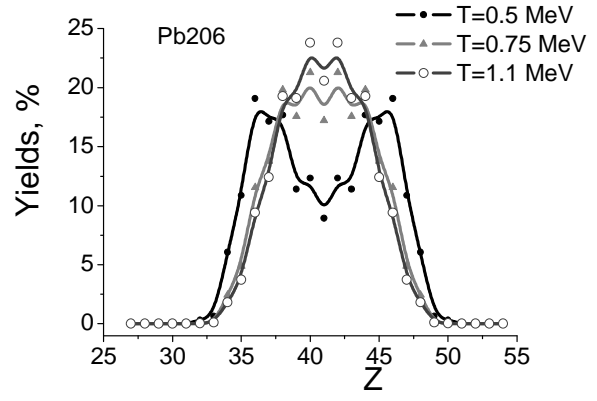
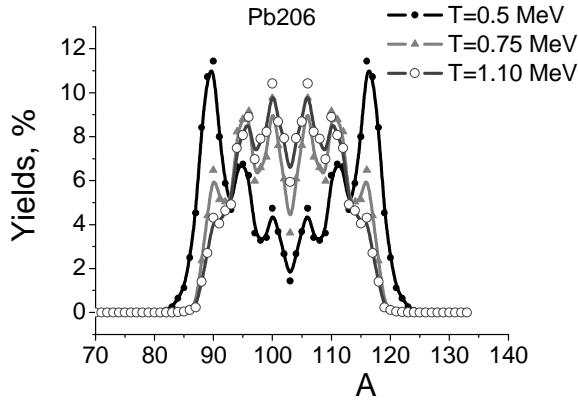
Основным механизмом образования нейтронов электронами в тяжёлых ядрах являются фотоядерные реакции ( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, xn$ ) и реакция фотоделения ( $\gamma, f$ ). Сложность деления атомных ядер, обусловлена кардинальным перераспределением заряда и массы, а также образованием сильнодеформированных и сильновозбужденных осколков, приводящих к тому, что до сих пор не достигнуто детальное описание динамики и механизма этого процесса [5].

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию фотоделения <sup>nat</sup>Pb.

### Теоретическое исследование

Теория деления средне-тяжелых ядер, среди которых изотопы Pb, Ta, Au, Bi, Hg, развита значительно меньше, чем, например, для трансурановых элементов. В данной работе для описания массовых (зарядовых) спектров деления изотопов Pb используется метод, предложенный в работах [6-8] и основанный на исследовании устойчивости ансамбля 2-х осколковых кластеров, образованных после деления исходного ядра. Результаты таких расчетов, проведенных при учете эмиссии нейтронов деления, представлены на рис. 1. Особенностью их является различное поведение массовых (а) и зарядовых (б) выходов осколков деления для различных изотопов свинца. Так, для изотопов ряда <sup>206</sup>Pb - <sup>207</sup>Pb - <sup>208</sup>Pb наблюдается увеличение анизотропии массовых выходов, тогда как для зарядовых – имеет место противоположная тенденция. Из рис. 1 также видно, что при увеличении Т имеет место симметризация спектров выхода осколков деления. Расчет показывает, что при делении изотопов <sup>206,207,208</sup>Pb наибольшую вероятность образования имеют осколки: <sup>93-98</sup>Sr - <sup>108-114</sup>Ru, <sup>88-92</sup>Kr - <sup>114-119</sup>Pd, <sup>98-104</sup>Zr - <sup>104-108</sup>Mo.

Причем эта тенденция общая для всех значений энергии возбуждения (температуры) исходного изотопа <sup>nat</sup>Pb.



**а**

**б**

Рис. 1. Массовые (а) и зарядовые (б) спектры осколков деления изотопов-компонент  $^{nat}\text{Pb}$  ( $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ), полученные для различных значений  $T$  - энергии возбуждения (температуры) исходного ядра.

### Эксперимент

Экспериментальное исследование проведено с использованием фотоактивационной методики. Схема эксперимента показана на рис. 2.

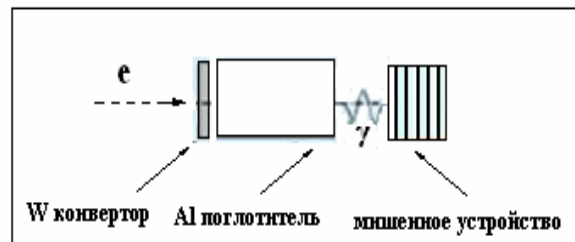


Рис. 2. Схема эксперимента.

Пучок електронів направлявся на вольфрамовий диск товщиною 2 мм (тормозну мішень), за яким розташовувався алюмінієвий поглинач товщиною 13 мм. Облучаемі мішені поміщалися за алюмінієвим поглиначем. В якості мішені використовувався свинець естественного ізотопного складу ( $^{nat}\text{Pb}$ ) діаметром 30 мм і товщиною 20 мкм. Вылетевшие із мішені осколки накопчилися в поліетиленовій плівці товщиною 40 мкм, яка встановлювалася після кожної мішені із  $^{nat}\text{Pb}$ . Активация мішеней вироблялася в теченні 2 годин енергією електронів

90,8 МэВ. Средний ток пучка составлял 3 мкА. Структура и принцип работы ускорителя подробно изложены в работе [9]. Измерения, наведенной в мишенях активности, осуществлялись с использованием коаксиального детектора из сверхчистого германия (HPGe) с энергетическим разрешением 1,8 кэВ для линии 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$  на протяжении 50 часов. Время измерений составляло от 50 мин до 10 часов.

На рис. 3 приведены фрагменты аппаратных спектров остаточной активности полиэтиленовой мишени.

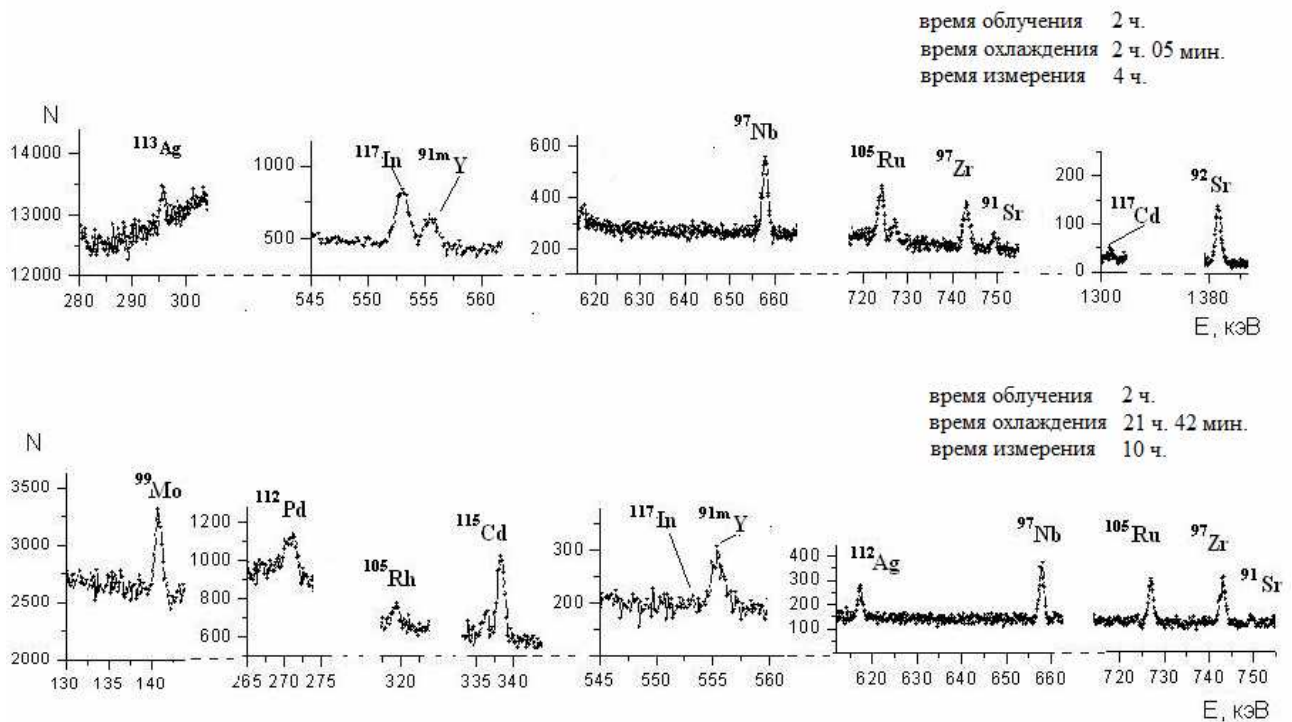


Рис. 3. Фрагменты аппаратных спектров остаточной активности полиэтиленовой мишени.

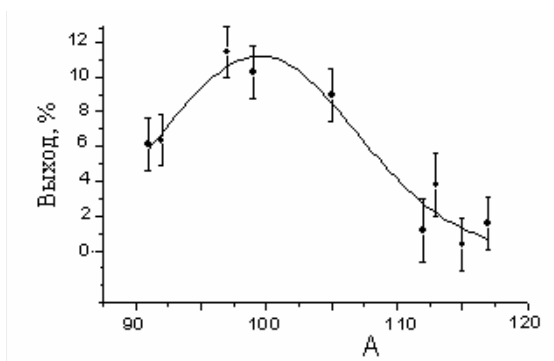


Рис. 4. Выходы продуктов фотоделения  $^{nat}\text{Pb}$ .

Интерпретация спектров осуществлялась с учетом данных теоретического расчета и спектроскопических таблиц [10]. Выявлены следующие продукты фотоделения  $^{nat}\text{Pb}$ :

$^{91}\text{Sr}$  (1024,3),  $^{92}\text{Sr}$  (1383,9),  $^{91m}\text{Y}$  (555,5),  $^{92}\text{Y}$  (934,4),  $^{97}\text{Zr}$  (743,4),  $^{97}\text{Nb}$  (658,1),  $^{99}\text{Mo}$  (140,5),  $^{105}\text{Ru}$  (724,2),  $^{105}\text{Rh}$  (319,1),  $^{112}\text{Ag}$  (617,4),  $^{113}\text{Ag}$  (298,5),  $^{115}\text{Cd}$  (336,24),  $^{117}\text{Cd}$  (1303,2),  $^{117}\text{In}$  (553,0). Здесь в скобках приведены энергии гамма-линий (кэВ).

Статистическая ошибка измерения интенсивности пиков полного поглощения не превышала 5-8%.

Выходы продуктов фотоделения  $^{nat}\text{Pb}$  в зависимости от массового числа осколка представлены на рис. 4.

### Анализ результатов и выводы

Следует отметить, что для данных условий эксперимента осколки деления  $^{nat}\text{Pb}$  определены впервые. Результатом эксперимента является симметричная форма кривой выхода осколков фотоделения  $^{nat}\text{Pb}$ . Согласно расчету (см. рис.1) это свидетельствует об высоких значениях фотовозбуждения  $^{nat}\text{Pb}$  и превалировании симметричных компонент осколков деления. Отметим, что эта же тенденция наблюдалась другими авторами (см., например, [11]).

В результате совместного анализа результатов теоретического и экспериментального исследования нами предложены такие цепочки  $\beta$ -распадов, объясняющие наличие в эксперименте продуктов фотоделения  $^{nat}\text{Pb}$ , которые показаны на рис. 5. Здесь жирным печатным текстом выделены осколки деления,  $^{nat}\text{Pb}$  полученные в результате теоретического расчета.

Жирным прописными литерами обозначены продукты деления, выявленные в эксперименте.

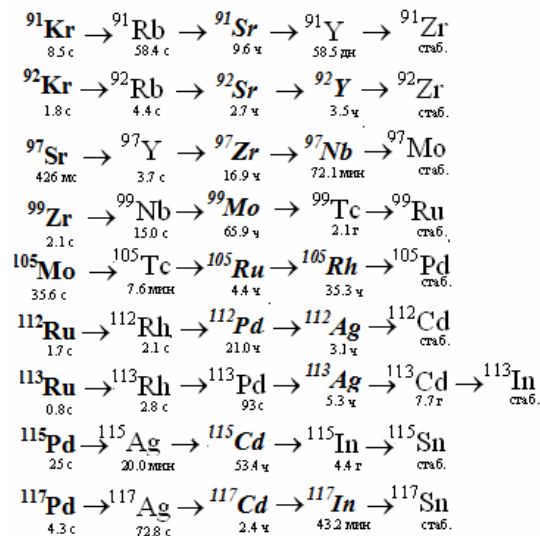


Рис. 5. Цепочки  $\beta$ -распадов фотоделения  $^{nat}\text{Pb}$ .

Анализируя рис. 5, можно заключить о хорошем согласии между расчетными и экспериментальными данными. Отметим также необходимость постановки новых экспериментов, особенно, при низких энергиях деления  $^{nat}\text{Pb}$  с целью обнаружения анизотропии выхода его осколков деления.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rubbia C., Rubio J.A., Buono S. et. al. Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier. CERN/AT/95-44 T.
2. Proc. of the Internat. Workshop – Nuclear Methods for Transmutations of Nuclear Waste. Problems, Perspectives, Cooperative Research. Dubna, Russia, 29-31 May, 1996. Eds. M. Kh. Khankhasayev, H.S. Plendl, Z.B. Kurmanov. World Scientific. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong.
3. Айзацкий Н.И., Борц Б.В., Водин А.Н. и др. Источник нейтронов НИЦ ХФТИ // ВАНТ. – 2012. – № 3. – С. 3-9.
4. Обухов И.А. Деление ядер при взаимодействии с протонами и нейтронами промежуточных энергий // ЭЧАЯ. – 2001. – Т. 32, вып. 2. – С. 318–367.
5. Грузевич О.Т. Эмиссия нейтронов и  $\gamma$ -квантов из осколков деления // <http://www.ippe.ru/podr/cjd/vant/00-1/1-05.pdf>
6. Маслюк В.Т. Статистична модель двофрагментарного поділу // УФЖ. – 1996. – Т.41, № 11-12. – С. 1029-1031.
7. Maslyuk V.T. New statistical approach to the systematization of heavy nuclei fission fragment // Intern. J.Phys. – 2000. – V.6, N. 1-2. – P.1-8.
8. Маслюк В.Т., Парлаг О.А., Маринец Т.И. Исследование массовых спектров изотопов Kr и Xe при делении легких актинидов в рамках нового статистического подхода // ЭЧАЯ. 2007. - Т.4, №1(137). - С. 78-84.
9. Айзацкий Н.И., Белоглазов В.И.,

Божко В.П. и др. Ядерно-физический комплекс на основе линейного ускорителя электронов с энергией до 100 МэВ // VANT. Nuclear Physics Investigations. – 2010. – № 2. – P. 18-22.

10. Firestone R.B. WWW Table of

Radioactive Isotopes. Version 2.1, January 2004. <http://ie.lbl.gov/toi/>.

11. Naik H., Kim G., Goswami A. et. al. Mass-yield distribution of fission products from photofission of  $^{nat}\text{Pb}$  induced by 50-70 MeV bremsstrahlung // J. Radional. Nucl. Chem. – 2010. – 283. – P. 439-445.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2012

O.S. Shevchenko<sup>1</sup>, Yu. M. Ranyuk<sup>1</sup>, A.M. Dovbnya<sup>1</sup>,  
V.T. Maslyuk<sup>2</sup>, O.O. Parlag<sup>2</sup>, V.I. Kasilov<sup>1</sup>,  
W.A. Kushnir<sup>1</sup>, V.V. Mitrochenko<sup>1</sup>, S.S. Kandybey  
<sup>1</sup>National Science Center “Kharkov Institute of Physics and Technology”  
61108, Kharkiv, Akademichna Str., 1  
e-mail: oksshevchenko@mail.ru  
<sup>2</sup>Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine  
88017, Uzhhorod, Universitetskay Str., 21

## INVESTIGATION OF $^{nat}\text{Pb}$ PHOTOFISSION

The results of theoretical and experimental research photofission  $^{nat}\text{Pb}$  under the bremsstrahlung energy 90.8 MeV are present.

**Keywords:** photofission, products of fission, bremsstrahlung, gamma-spectroscopy,  $^{nat}\text{Pb}$ .

О.С. Шевченко<sup>1</sup>, Ю.М. Ранюк<sup>1</sup>, А.М. Довбня<sup>1</sup>,  
В.Т. Маслюк<sup>2</sup>, О.О. Парлаг<sup>2</sup>, В.І. Касилов<sup>1</sup>,  
В.О. Кушнір<sup>1</sup>, В.В. Митроченко<sup>1</sup>, С.С. Кандибей<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Національний науковий центр "Харківській фізико-технічний інститут"  
61108, Харків, вул. Академічна, 1  
e-mail: oksshevchenko@mail.ru  
<sup>2</sup>Інститут електронної фізики НАНУ, 88017, Ужгород, вул. Університетська, 21

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОПОДІЛУ $^{nat}\text{Pb}$

Представлено результати теоретичного та експериментального дослідження фотоподілу  $^{nat}\text{Pb}$  під дією гальмівного випромінювання з максимальною енергією 90,8 МеВ.

**Ключові слова:** фотоподіл, продукти поділу, гальмівне випромінювання, гамма-спектроскопія,  $^{nat}\text{Pb}$ .