

УДК 593.17, 593.173

## ДЕЛЕНИЕ $^{232}\text{Th}$ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОТОНОВ НИЗКИХ И СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

© 2018 г. А. Н. Пан<sup>1,2,\*</sup>, Э. М. Козулин<sup>1</sup>, Ю. М. Иткис<sup>1</sup>, М. Г. Иткис<sup>1</sup>, Г. Н. Княжева<sup>1</sup>, К. Б. Гикал<sup>1</sup>, К. В. Новиков<sup>1</sup>, Т. Н. Квочкина<sup>2</sup>, Н. Т. Буртебаев<sup>2</sup>, К. В. Ковальчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup>Лаборатория физики деления, Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

\*E-mail: sofvillain1993@gmail.com

С целью исследования проявления оболочечных эффектов в делении ядра  $^{232}\text{Th}$  под действием протонов низких и средних энергий были измерены массово-энергетические распределения осколков в диапазоне энергий протонов от 7 до 55 МэВ. При энергиях протонов от 13 до 55 МэВ эксперименты были выполнены на протонных пучках циклотрона К-130 Университета г. Ювяскюля (Финляндия) при помощи двухплечевого времяпролетного спектрометра CORSET. Эксперимент с энергией протонов 7, 10 и 13 МэВ проводился на пучке циклотрона У-150М в Институте ядерной физики (Алматы, Казахстан), осколки регистрировались 2E-спектрометром. Обнаружено, что выход симметричных осколков уменьшается с уменьшением энергии протонов, а выход асимметричных увеличивается. Глубоко ниже кулоновского барьера, при самой низкой энергии протонов – 7 МэВ наблюдается повышенный выход осколков в районе 60–70 а.е.м., что соответствует суперасимметричной моде деления.

DOI: 10.7868/S0367676518060236

### ВВЕДЕНИЕ

Свойства массово-энергетических распределений (МЭР) осколков деления в зависимости от энергии возбуждения и ядерной структуры составного ядра часто рассматривается с точки зрения наличия нескольких независимых мод деления. Согласно этому подходу на массовые и энергетические распределения осколков деления оказывают влияние несколько независимых мод деления, каждая из которых обладает собственным воздействием на них. Впервые гипотеза о независимых модах деления была предложена Туркевичем и Нидэем [1] при исследованиях осколков деления  $^{232}\text{Th}$  под действием быстрых нейтронов. В дальнейшем эта гипотеза получила теоретическое обоснование в работе Брозы [2].

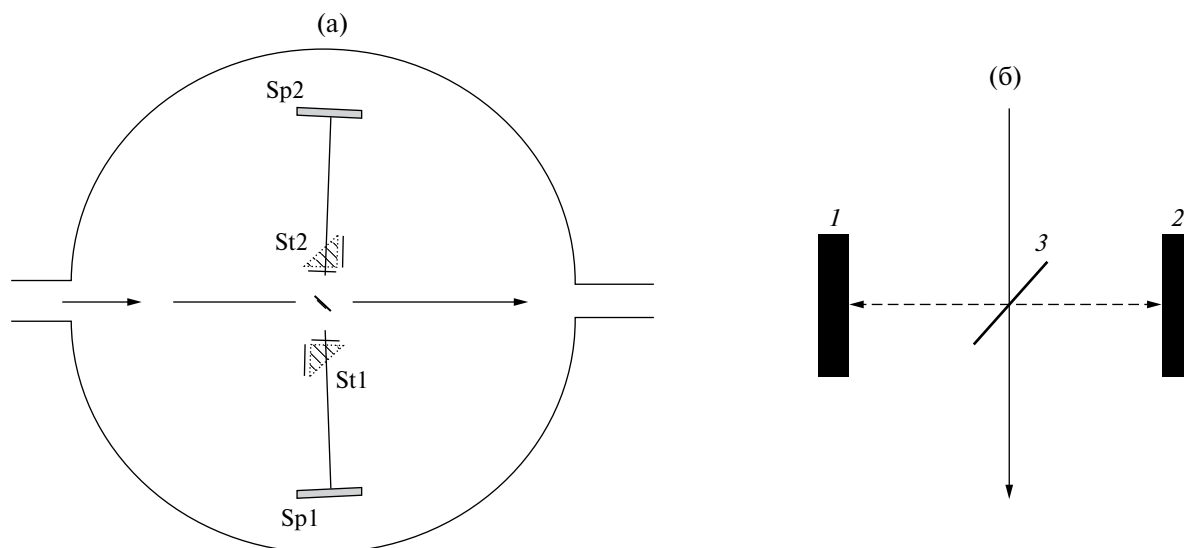
Выделяют 4 независимые моды: симметричную ( $S$ ) и три асимметричных ( $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ). Эта классификация основана на работах [2, 3]. Симметричная мода формируется за счет жидко-капельных эффектов при высокой энергии возбуждения. Асимметричная мода  $S1$  формируется в области массы тяжелого осколка приблизительно 134 а.е.м., что соответствует количеству протонов и нейтронов, близкому к магическим числам  $Z = 50$  и  $N = 82$ . Мода  $S2$  является преобладающей асимметричной модой деления, ей соответствует средняя масса тяжелого осколка 140 а.е.м., что связывают

с формированием в тяжелом осколке деформированной нейтронной оболочки  $N = 88$ , что приводит к тому, что осколки, образовавшиеся под воздействием этой моды, обладают меньшей средней кинетической энергией и большим разбросом кинетической энергии. Третьей асимметричной модой является  $S3$ , обусловлена образованием в легком осколке оболочки  $Z = 28$  и оболочки  $N = 50$ , проявляется повышенным выходом осколков в области масс 70 а.е.м.

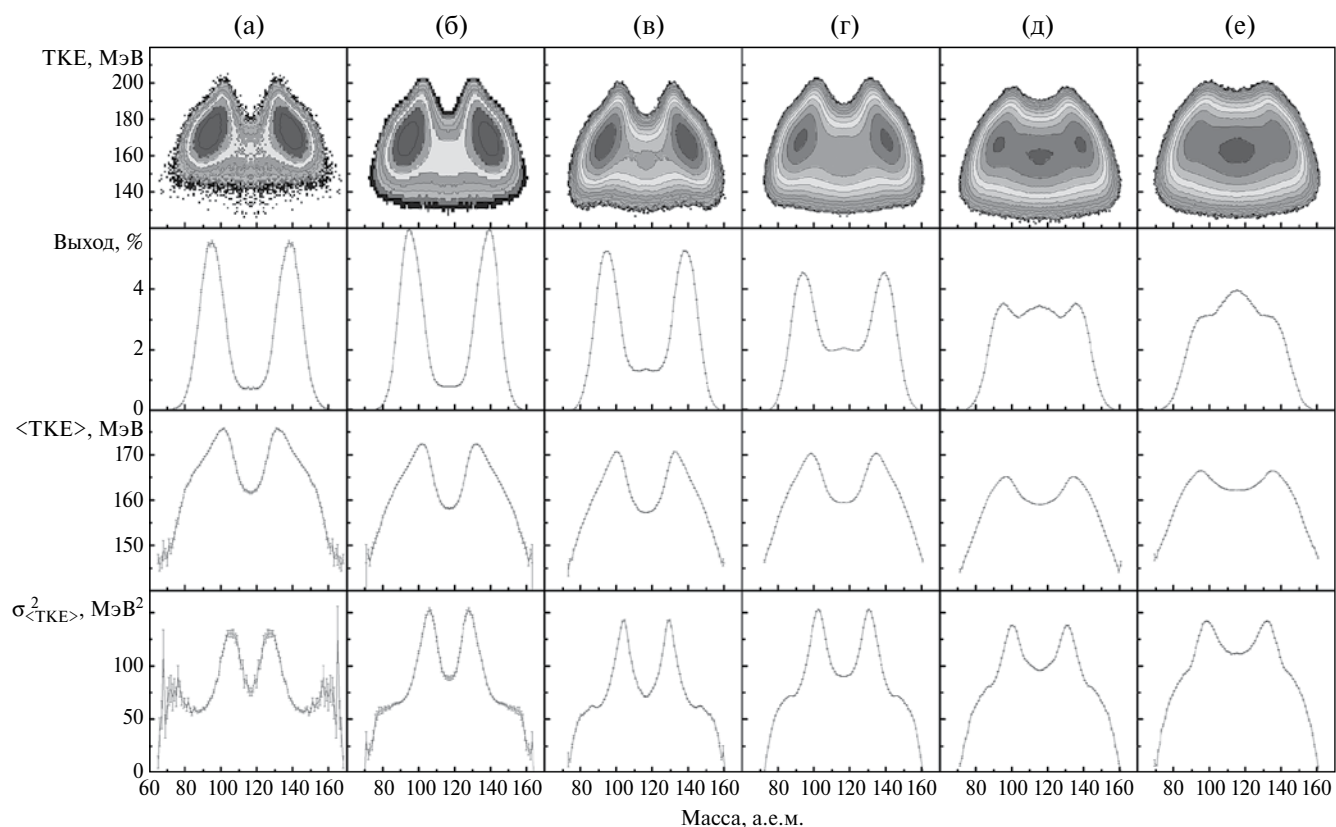
В этой работе проанализированы массово-энергетические распределения осколков деления образовавшихся в реакции  $p + ^{232}\text{Th}$  при энергиях протонов от 7 до 55 МэВ с целью получения информации о воздействии оболочечных эффектов на МЭР в зависимости от энергии возбуждения составного ядра.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

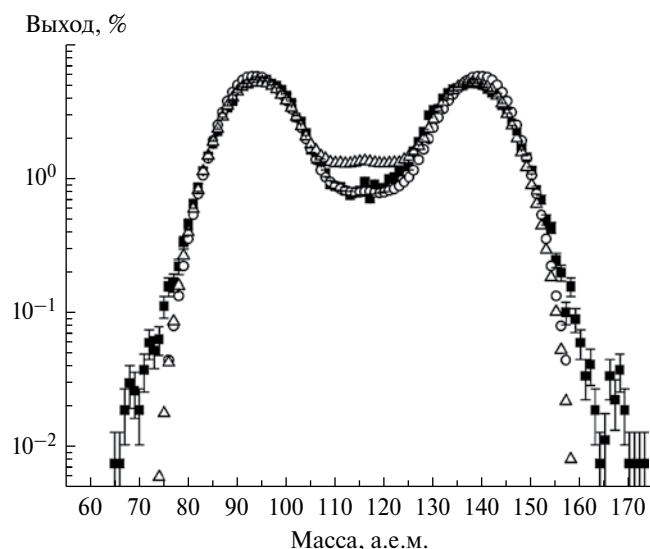
Эксперименты с энергией протонов 13–55 МэВ проводились на пучке циклотрона К-130 Университета Ювяскюля, времена пролета осколков деления регистрировались с помощью спектрометра CORSET. Эксперимент с энергией протонов 7, 10 и 13 МэВ проводился на пучке циклотрона У-150М Института ядерной физики, Алматы, энергия осколков деления регистрировалась с помощью 2E-спектрометра. При сравнении



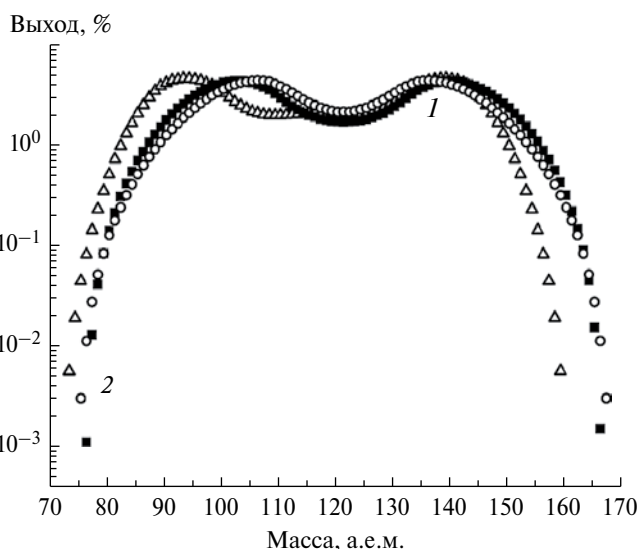
**Рис. 1.** Схемы экспериментальных установок: спектрометр CORSET (а) и  $2E$ -спектрометр (б), 1 и 2 – кремниевые детекторы, 3 – мишень, сплошная стрелка – пучок, штриховые стрелки – пути осколков.



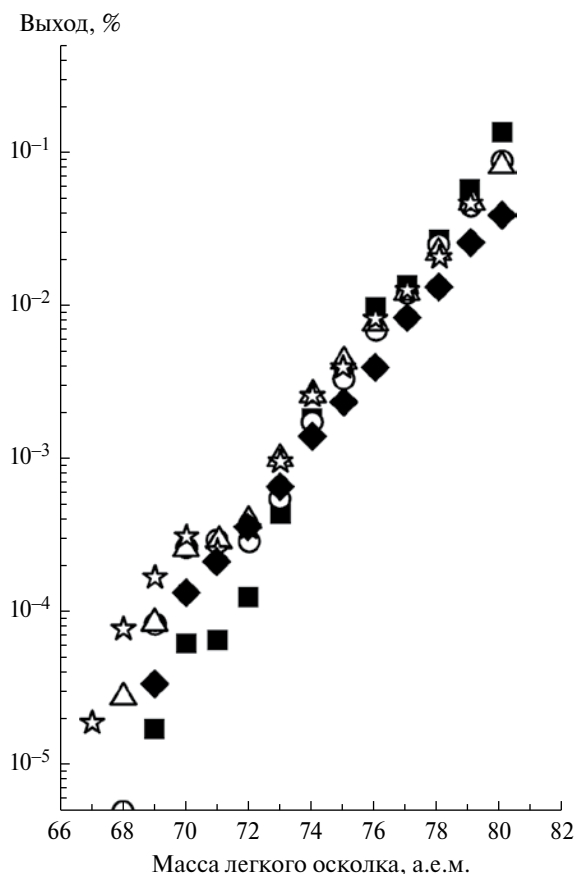
**Рис. 2.** Массово-энергетические распределения осколков деления, образующихся в реакции  $p + ^{232}\text{Th}$  при энергии протонов 7 МэВ (а), 10 МэВ (б), 13 МэВ (в), 20 МэВ (г), 40 МэВ (д) и 55 МэВ (е). Сверху вниз показаны: двумерные распределения выходов осколков в зависимости от их массы и полной кинетической энергии ТКЕ, массовые распределения осколков деления (выход), среднее значение полной кинетической энергии  $\langle \text{ТКЕ} \rangle$  и ее дисперсия  $\sigma_{\langle \text{ТКЕ} \rangle}^2$ .



**Рис. 3.** Массовые распределения осколков деления, образующихся в реакции  $p + {}^{232}\text{Th}$  при энергиях протонов 7 МэВ (квадраты), 10 МэВ (кружки), 13 МэВ (треугольники).



**Рис. 5.** Массовые распределения осколков, образующихся при делении  ${}^{232}\text{Th}$ ,  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{242}\text{Pu}$  протонами с энергией 20 МэВ [6]. Массовое распределение при делении  ${}^{242}\text{Pu}$  обозначено квадратами, при делении  ${}^{238}\text{U}$  — кружками, при делении  ${}^{232}\text{Th}$  — треугольниками. Распределения сходятся в области 140 а.е.м. (цифра 1), а также в области 70 а.е.м. (цифра 2).



**Рис. 4.** Массовые распределения легких осколков деления тепловыми нейтронами актинидов:  ${}^{235}\text{U}$  (квадраты),  ${}^{239}\text{Pu}$  (кружки),  ${}^{242}\text{Am}$  (треугольники),  ${}^{245}\text{Cm}$  (звезды),  ${}^{249}\text{Cf}$  (ромбы) [5].

экспериментов с энергией протона 13 МэВ было получено хорошее согласие экспериментальных данных.

Мишень для эксперимента на циклотроне К-130 представляла собой слой  ${}^{232}\text{Th}$  толщиной  $100 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$  на подложке из углерода толщиной  $40 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$ . Мишень находилась в центре камеры под углом  $43^\circ$  к оси пучка. Мишень для экспериментов на циклотроне У-150М представляла собой слой  ${}^{232}\text{Th}$  толщиной  $53 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$  на подложке из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной  $58 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$  под углом  $45^\circ$  к оси пучка.

Геометрия эксперимента, проводившегося с помощью спектрометра CORSET, представлена на рис. 1а. Спектрометр состоит из двух стартовых детекторов (St1 и St2 на рис. 1а), двух позиционно-чувствительных стоповых детекторов (Sp1 и Sp2 на рис. 1а) [4]. Расстояние между стартовым и стоповым детекторами составляло 20 см. Плечи спектрометра были размещены симметрично относительно оси пучка под углами  $88^\circ$ . Временное разрешение спектрометра определялось с помощью источника альфа-частиц  ${}^{226}\text{Ra}$ .

Схема эксперимента, проведенная на 2E-спектрометре, представлена на рис. 1б. Расстояния от мишени до детекторов составляли 7 см. Детекторы обозначены цифрами 1, 2. Спектрометр калибровался измерением спектра осколков деления  ${}^{252}\text{Cf}$ .

## 2. МАССОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ

Массово-энергетические распределения осколков деления, полученных в реакции  $p + ^{232}\text{Th}$  в диапазоне энергий протонов 7–55 МэВ, показаны на рис. 2. Из представленных данных видно, что с уменьшением энергии налетающего протона в области симметричных осколков выход падает, тогда как в области асимметричных осколков выход увеличивается. Во всем диапазоне энергий (от 7 до 55 МэВ) видно влияние оболочек  $Z = 50$  и  $N = 82$ ,  $N = 88$  на массовые, энергетические распределения и дисперсию кинетической энергии осколков деления, что соответствует проявлениям мод деления  $S1$  и  $S2$ . Даже при энергии налетающего протона  $E_p = 55$  МэВ мы видим проявление этих мод, хотя известно, что для большинства актинидов оболочечные эффекты начинают исчезать при энергии возбуждения делящегося составного ядра 30–40 МэВ.

При рассмотрении массовых распределений осколков деления при энергиях протонов от кулоновского барьера и ниже, 13, 10 и 7 МэВ, представленных на рис. 3, можно заметить, что при  $E_p = 7$  МэВ начинает проявляться повышенный выход осколков с массой 70 а.е.м. Такого не наблюдается при энергиях протонов 10, 13 МэВ и выше. Следует отметить влияние суперасимметричной моды деления, проявление которой связано с образованием в легком осколке замкнутых магических оболочек с  $Z = 28$  и  $N = 50$ .

Повышенный выход осколков в районе 70 а.е.м. наблюдался также при делении актинидов тепловыми нейтронами (рис. 4), что дает схожую энергию возбуждения составного ядра и, так же, как и протоны, вносит очень малый угловой момент [5]. Влияние суперасимметричной моды также подтверждает сближение массовых распределений, полученных в реакциях деления различных актинидов протонами с энергией 20 МэВ (рис. 5) [6], которые также сходятся в области 140 а.е.м., что соответствует хорошо изученным асимметричным модам  $S1$  и  $S2$ , и в области, близкой к 70 а.е.м. Однако окончательно утверждать о присутствии суперасимметричной моды деления в реакции

$p + ^{232}\text{Th}$  при энергии протонов 7 МэВ будет возможно после измерения осколков деления более надежным и точным методом 2E-2ТОФ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были измерены массово-энергетические распределения осколков в реакции  $p + ^{232}\text{Th}$  при энергии налетающих протонов от 7 до 55 МэВ. При всех значениях энергии протонов в массово-энергетических распределениях осколков четко видны симметричная и асимметричная моды деления. С уменьшением энергии налетающего протона выход симметричных продуктов уменьшается, выход асимметричных увеличивается. Однако даже при энергии протонов 55 МэВ значительный вклад асимметричного деления проявляется в виде “плеч” в массово-энергетическом распределении. При энергии налетающих протонов значительно ниже кулоновского барьера (7 МэВ) намечается проявление суперасимметричной моды деления, связанной с повышенным выходом осколков с массой в области 70 а.е.м. Следует отметить, что эксперимент по измерению осколков реакции  $p + ^{232}\text{Th}$  при энергии протонов 7 МэВ методом 2E-2ТОФ даст более точную и надежную информацию о наличии либо отсутствии проявления суперасимметричной моды деления в этой реакции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Turkevich A., Niday J.B.* // Phys. Rev. 1951. V. 84. P. 52.
2. *Brosa U., Grossmann S., Muller A. et al.* // Phys. Rep. 1990. V. 197. P. 167.
3. *Mulgin S.I., Okolovich V.N., Zhdanova S.V.* // Phys. Lett. B. 1999. V. 462. P. 29.
4. *Козулин Э.М., Богачев А.А., Иткис М.Г. и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 1. С. 51; *Kozulin E.M., Bogachev A.A., Itkis M.G. et al.* // Instrum. and Experim. Tech. 2008. V. 51. № 1. P. 44.
5. *Rochmann D.* // Nucl. Phys. A. 2004. V. 735. P. 3.
6. *Rubchenya V.A., Trzaska W.H., Itkis I.M. et al.* // Nucl. Phys. A. 2004. V. 734. P. 253.