

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ АСИММЕТРИЧНОГО ДЕЛЕНИЯ $^{213}\text{At}$

Е.Н. Грузинцев, М.Г. Иткис, В.Н. Околович, А.Я. Русанов,  
Г.Н. Смиренкин, В.Н. Толстиков

Экспериментально исследованы распределения масс осколков при делении ядра  $^{213}\text{At}$  в реакции  $^{209}\text{Bi}(\alpha, f)$  для диапазона энергии  $\alpha$ -частиц 34,7 – 50 МэВ. Установлено, что во всей изученной области энергий асимметричная мода является маловероятным и слабо зависящим от энергии способом деления  $^{213}\text{At}$ . Этим свойством деление  $^{213}\text{At}$  качественно отличается от деления тяжелых ядер.

В физике деления ядер при низких возбуждениях существует пробел, связанный с тем, что в области между  $^{209}\text{Bi}$  и  $^{226}\text{Ra}$  нет пригодных для экспериментальных исследований достаточно долгоживущих ядер-мишеней. Эта трудность особенно сказалась на изучении асимметрии деления, свойства которой резко меняются при переходе через данную область: доактиниды в окрестности  $\text{Bi}$  делятся симметричным способом, ядра тяжелее  $\text{Ra}$  — преимущественно асимметричным. Попытки обнаружить асимметричное деление  $\text{Bi}$  протонами и  $\alpha$ -частицами окончились неудачей [1-4]. Лишь недавно в нашей работе [5] было установлено, что в реакции  $^{209}\text{Bi}(\alpha, f)$  при энергии  $\alpha$ -частиц  $E_\alpha = 37,3 \text{ МэВ}$  [1], приводящей к делению ядра  $^{213}\text{At}$ , распределение масс осколков содержит асимметричную компоненту, вклад которой характеризуется отношением выходов  $Y_a / Y_s \cong 2,5 \cdot 10^{-3}$ . Ей свойственны многие черты асимметричного деления тяжелых ядер: средняя масса тяжелого осколка  $M = 138$ , увеличение средней кинетической энергии осколков, корреляция с оболочечной структурой осколков и др. В то же время, верхняя оценка  $Y_a / Y_s \leq 1\%$  [4], полученная для этой реакции в непосредственной близости от порога деления, свидетельствовала, что асимметричное деление  $^{213}\text{At}$ , в отличие от актинидов и  $\text{Ra}$ , при всех энергиях остается маловероятным процессом. Какова же энергетическая зависимость  $Y_a / Y_s$ , не является ли она тоже загадкой деления  $^{213}\text{At}$  — этот вопрос исследовался в эксперименте, результаты которого приводятся в данном сообщении.

1) В работе [5] была указана энергия  $\alpha$ -частиц 36 МэВ, которая позднее была уточнена. Измерения ее были выполнены двумя способами, давшими совпадающие результаты.

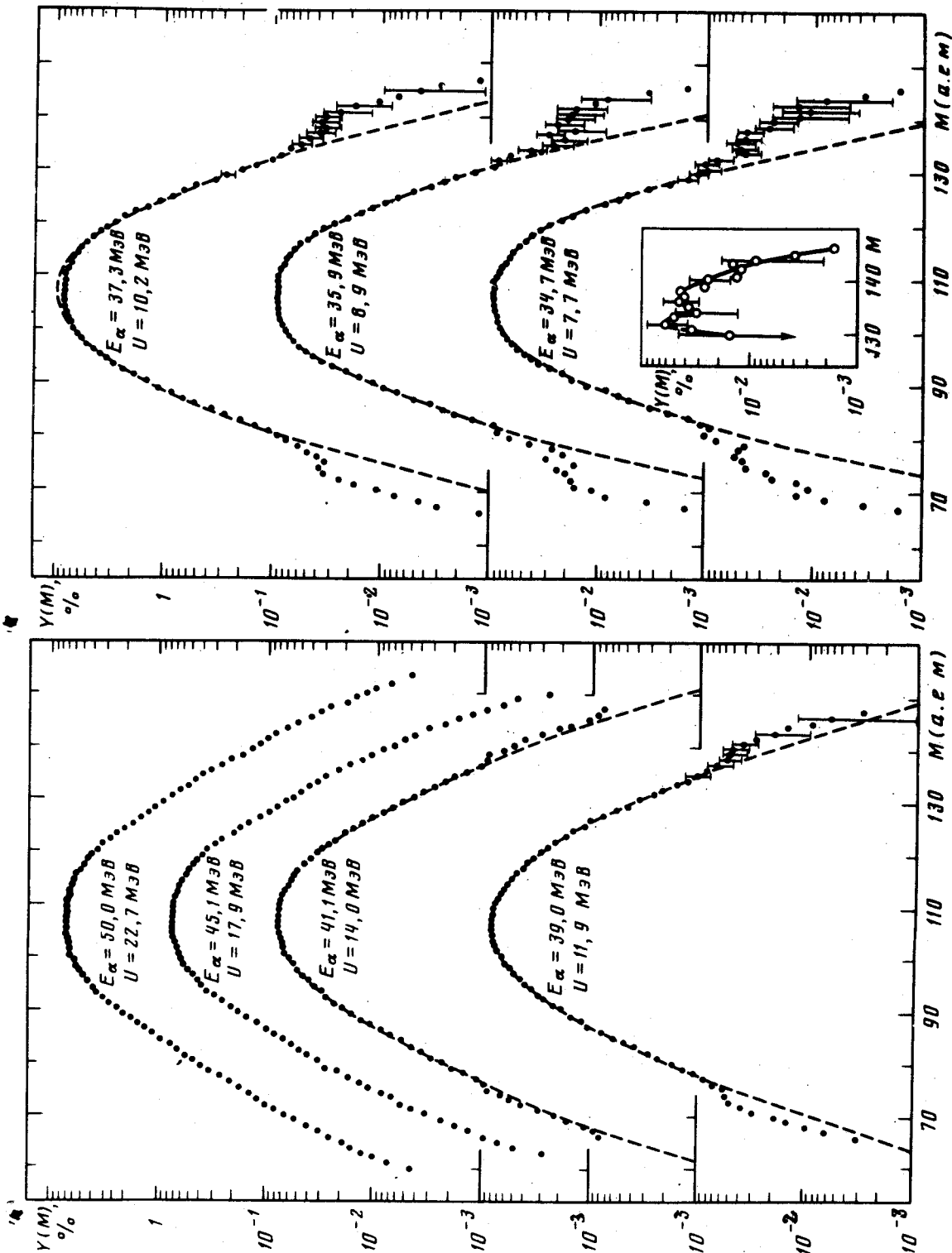


Рис.1. Массовые распределения деления  $Y(M)$  для ядра  $^{213}\text{At}$ .  
 На вставке: асимметричная компонента  $Y(M)$  для  $E_\alpha = 34,7\text{МэВ}$  (см, текст)

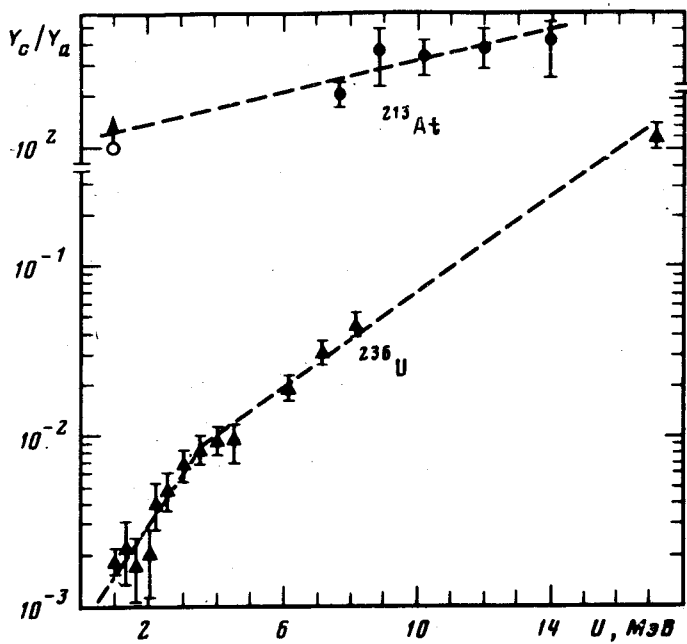


Рис.2. Зависимость отношения максимумов симметричного и асимметричного деления  $Y_s / Y_a$  от энергии возбуждения в седловой точке для ядер  $^{213}\text{At}$  (● — настоящая работа, ⬇ — <sup>4</sup>) и  $^{236}\text{U}$  (▲ — <sup>6</sup>).

В настоящей работе, как и в первом опыте <sup>5</sup> для измерения распределения масс  $Y(M)$  использовался метод спектрометрии энергии парных осколков полупроводниковыми Si — Au-детекторами. Результаты измерений распределений  $Y(M)$ , нормированных так, чтобы  $\sum Y(M) = 200\%$ , включая данные работы <sup>5</sup>, показаны на рис.1. Из него видно, что с уменьшением  $E_a$  асимметричное деление проявляется все более отчетливо и при самых низких энергиях обнаруживает структуру в окрестности массы  $M=132$  и дополнительного ей осколка  $M=81$ . Это происходит потому, что с охлаждением ядра падает дисперсия  $\sigma^2 \sim \sqrt{U}$  преобладающей симметричной компоненты  $Y_s(M)$ , на рис.1 описанной гауссовыми распределениями (пунктирные кривые), где  $U = E - E_f$  — энергия возбуждения в седловой точке,  $E_f = 17$  МэВ — высота барьера деления  $^{213}\text{At}$ . Для каждого распределения  $Y(M)$  приведены значения  $E_a$  и  $U$ .

Как разности полного и симметричного выхода были восстановлены распределения масс асимметричного деления  $Y_a(M) = Y(M) - Y_s(M)$ , наиболее яркий пример которых для самой низкой энергии показан на вставке к рис.1. Для всей совокупности данных в области  $E_a = 34,7 - 41,1$  МэВ ( $U = 7,7 - 14,0$  МэВ), где удалось выделить асимметричную компоненту, по максимумам  $Y_a(M)$  и  $Y_s(M)$  построена зависимость отношения  $Y_s / Y_a$  от  $U$ , которая приведена на рис.2. Там же точкой со стрелкой показана нижняя оценка этого отношения из работы <sup>4</sup>. Из сравнения с аналогичными данными для  $^{236}\text{U}$  — типичного представителя актиноидов, хорошо видно насколько изменяется энергетическая зависимость в новой области ядер. Итак,  $^{213}\text{At}$  резко отличается от тяжелых ядер не только абсолютной величиной  $Y_s / Y_a$  (на пять порядков на рис.2), но и скоростью его изменения с энергией  $U$  (в изученном здесь интервале  $U$  в пять раз, от порога деления  $> 50$  раз).

Различные теоретические модели дают качественно правильный результат для преобладающего типа деления в обеих областях ядер. Однако в литературе нет теоретических предсказаний для асимметричного деления доактиноидов: ни по масштабу эффекта, ни по его энергетической зависимости. Исходя из статистической модели отношение выходов  $Y_s / Y_a$  и его производную по энергии возбуждения  $E$  можно упрощенно представить соотношениями:

$$\ln \frac{Y_s}{2Y_a} = 2(\sqrt{a_s U_s} - \sqrt{a_a U_a}) \cong \sqrt{a U} \left( \frac{\delta_a}{a} - \frac{\delta V}{U} \right), \quad (1)$$

$$\frac{d}{dE} \left( \ln \frac{Y_s}{2Y_a} \right) = \sqrt{\frac{U_s}{a_s}} - \sqrt{\frac{U_a}{a_a}} \cong (1/2) \sqrt{a/U} \left( \frac{\delta_a}{a} + \frac{\delta V}{U} \right), (2)$$

где  $U_i = E - V_i$  — энергия возбуждения,  $V_i$  — потенциальная энергия деформации,  $a_i$  — параметр плотности уровней делящегося ядра в момент разрыва для  $i$ -го ( $s$  или  $a$ ) типа деления. В приближенных выражениях используется малость  $\delta V = V_s - V_a = -\delta U$  и  $\delta_a = a_s - a_a$  в сравнении с  $U \cong U_s \cong U_a$  и  $a \cong a_s \cong a_a$ , соответственно, фактор 2 в левой части (1) и (2) возникает из-за нормировки суммы выходов на 200%. Точно к таким же соотношениям приводит альтернативный подход к объяснению асимметричного деления, который исходит из того, что способ деления формируется в седловой точке, а не в точке разрыва, как в предыдущем случае. Роль  $V_i$  в этом подходе играет высота барьеров деления для двух путей деления на одном из которых конфигурация ядра сохраняет зеркальную асимметрию, а на другом — утрачивает (асимметричный способ).

В области тяжелых ядер  $\delta V > 0$  и  $\delta_a > 0$ , и это объясняет преимущественно асимметричный характер деления и быстрый рост симметричной компоненты при низких энергиях возбуждения. Чтобы получить из соотношений (1) и (2) преобладание симметричного деления в области доактинидов необходимо предложить противоположный знак  $\delta V < 0$ , т.е.  $V_s < V_a$ . В этом случае слагаемые в правой части (2) оказываются разных знаков и могут компенсировать друг друга, приводя как в опыте, к слабой зависимости отношения  $Y_s / Y_a$  не только на ограниченном участке энергий. Интерпретация нового типа энергетической зависимости  $Y_s / Y_a$ , обнаруженной у  $^{213}\text{At}$ , нуждается в обстоятельном теоретическом анализе и в новых экспериментах, хотя каждый шаг из-за сильного падения вероятности деления с уменьшением  $U$  и  $Z$  дается с большим трудом.

Расчеты потенциальной энергии деформации по методу оболочечной поправки показывают <sup>7</sup>, что условие  $V_s < V_a$  может обеспечиваться в седловой точке. Согласно <sup>7</sup> именно в районе свинца существуют две седловые точки, из которых более высокорасположенная сильно асимметрична  $M_1 / M_2 \cong 2$ , что примерно соответствует наблюдаемой асимметрии деления  $^{213}\text{At}$ . Большой интерес представило бы теоретическое предсказание для асимметричного деления более широкого круга доактинидов не только в подходе работы <sup>7</sup>, но и в рамках моделей, в которых способ деления формируется в точке разрыва, в том числе для ядер легче  $^{213}\text{At}$ , экспериментальные исследования которых уже начаты. Мы надеемся, что восполнение пробелов в экспериментальном и теоретическом исследованиях процесса деления в области доактинидов окажется важным для решения многих спорных вопросов современного описания асимметрии деления.

#### Литература

1. Sugihara T., Roesner J., Meadows J.W. Phys. Rev., 1961, 21, 1179.
2. Plasil F. et al. Phys. Rev., 1973, c7, 1196.
3. Иткис М.Г. и др. ЯФ, 1975, 22, 864.
4. Кукс И.М. и др. ЯФ, 1978, 27, 54.
5. Грузинцев Е.Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 449.
6. Дьяченко П.П., Кузьминов, Б.Д., Тараско М.З. ЯФ, 1968, 8, 28.
7. Пашкевич В.В. Препринт Р4-5581, Дубна, 1971.