

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P4-84-549

З.Лоевски, В.В.Пашкевич, С.Цвёк\*

ВЛИЯНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ  
НА ПРОЦЕСС ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР  
САМЫХ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Направлено в журнал "Nuclear Physics"

---

\* Институт физики, Технический университет,  
Варшава, ПНР

1984



## ВВЕДЕНИЕ

В связи с экспериментами по синтезу самых тяжелых из известных элементов и гипотетических сверхтяжелых ядер в работе /1/ были проведены расчеты соответствующих барьеров деления невозбужденных ядер. В частности, там отмечено наличие промежуточного минимума в энергии деформации в трансфермиевых элементах при деформации  $\beta_2 = 0,4$  и  $\beta_4 \approx 0,1$  и указано на возможное влияние этого минимума на ход реакции ядер под действием слияния тяжелых ионов. Специфика реакций с тяжелыми ионами такова, что даже при "холодном" слиянии образующееся составное ядро оказывается возбужденным до энергии 20-25 МэВ /см., например, обзорный доклад /2/ и ссылки в нем/. В связи с этим представляет интерес модификация выполненных ранее расчетов /1/, позволяющих рассмотреть свойства "нагретых" ядер. Метод расчета деления "нагретых" ядер к настоящему времени разработан весьма подробно /3-14/ и коротко описан в следующем разделе. В разделе 2, где приводятся основные результаты, обсуждаются степень отклонения формы делящегося ядра от аксиальной симметрии и изменение глубины промежуточного минимума с ростом энергии возбуждения.

## 1. МЕТОД РАСЧЕТА

Для статистического описания возбужденных ядер можно использовать различные термодинамические потенциалы. Одним из возможных выборов является энергия  $E$ , рассматриваемая как функция энтропии  $S$ ,

$$E = E_0 + E^*(T(S)), \quad /1/$$

где  $E_0$  - энергия деформации, рассчитываемая методом Струтинского /15,16/,

$$E_0 = E_{LD} + \delta U, \quad /2/$$

$$\delta U = \sum_{i \leq \bar{\lambda}} \epsilon_i - \int_{-\infty}^{\bar{\lambda}} \epsilon \bar{g}(\epsilon) d\epsilon; \quad /3/$$

$$N = \int_{-\infty}^{\bar{\lambda}} \bar{g}(\epsilon) d\epsilon, \quad /4/$$

а энергия возбуждения

$$E^* = \sum_i \epsilon_i n_i(T) - \sum_{i \leq \bar{\lambda}} \epsilon_i; \quad /5/$$

$$N = \sum_i n_i(T), \quad /6/$$

рассчитывалась при температуре  $T(S)$ , соответствующей заданному значению энтропии

$$S = - \sum_i [n_i \ln(n_i) + (1 - n_i) \ln(1 - n_i)]. \quad /7/$$

В формулах /2/-/7/  $E_{LD}$  - гладко зависящая от числа частиц компонента энергии деформации, рассчитываемая в модели жидкой капли /7,8/;  $\epsilon_i$  - одночастичный спектр в потенциале типа Вудса-Саксона /19-22/, вычисленный в работе /1/, где даны подробности расчета;  $\bar{g}$  - плотность уровней в сглаженном спектре /15,16/;  $n_i$  - числа заполнения в "нагретом" ядре,

$$n_i(T) = [1 + \exp(\frac{\epsilon_i - \lambda T}{1})]^{-1}, \quad /8/$$

а  $\lambda T$  подбирается из условия /6/. Экстремумы  $E|_S$  совпадают с экстремумами  $S|_E$ . Минимум  $E|_S$  соответствует равновесной форме нагретого ядра, а плотность уровней в седловой точке определяет вероятность деления. Следует, однако, отметить, что рассмотрение  $E|_S$  не означает необходимости нашего предположения о том, что процесс деления происходит при постоянной энергии.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Зависимость  $E$  от деформации /1/ при различных значениях энтропии  $S$  для ядер  $^{260}\text{No}$ ,  $^{264}\text{Cu}$ ,  $^{268}\text{106}$ ,  $^{272}\text{108}$  представлена на рис.1-4. Соответствующие результаты для соседних ядер весьма похожи на приведенные здесь кривые и потому не представлены.

В расчетах при  $S = 0$  спаривание учитывалось обычным образом: при  $S = 20$  - только при вычислении  $E_0$ , а при  $S \geq 40$ , что приблизительно соответствует  $T \geq 1,0$  МэВ, спаривание не учитывалось /3,4,6,7,10-14/. Видно, как оболочечные осцилляции сглаживаются с увеличением энергии возбуждения /3-14/. На каждом из рис.1-4 внизу для сравнения указана энергия жидкой капли. При большой энтропии / $S = 80, 100$ / зависимость  $E(S)$  от деформации почти точно соответствует  $E_{LD}$ . Для наглядной иллюстрации этого эффекта на рис.5 показана зависимость высоты барьера деления, понимаемой как разность  $E(S)$  в седловой точке и в основном состоянии, от энергии возбуждения. Видно, что при  $E^* = 20$  МэВ



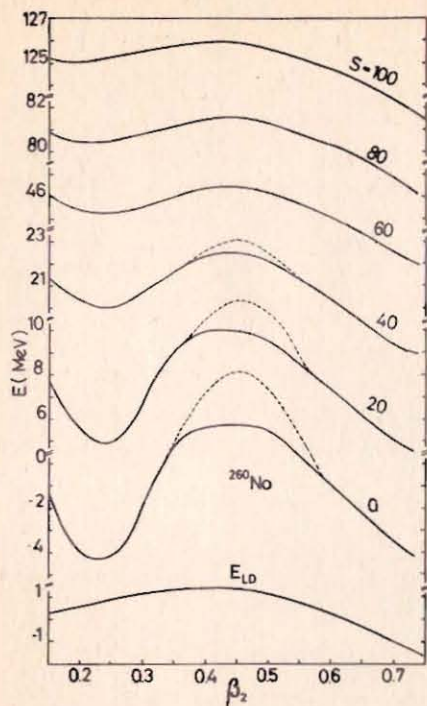


Рис.1. Зависимость энергии  $E(S)$  в ядре  $^{260}\text{No}$  от деформации ядра при постоянной энтропии. Внизу указана жидкокапельная компонента  $E_{LD}$ . Штриховой кривой даны значения  $E(S)$  при аксиально-симметричной форме ядра.

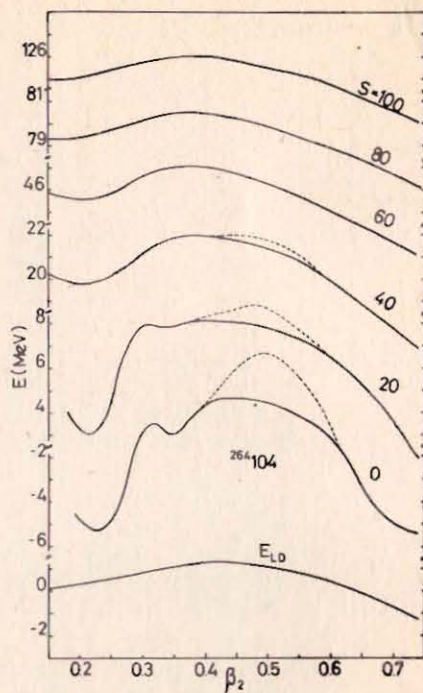


Рис.2. То же, что на рис.1, для ядра  $^{264}\text{104}$ .

высота барьера уменьшается до величины порядка 3-3,5 МэВ и с дальнейшим ростом  $E^*$  быстро выходит на жидкокапельные оценки. Интересно отметить, что скорость уменьшения высоты барьера с увеличением энергии возбуждения разная для рассмотренных ядер.

В работе <sup>1/</sup> показано, что ядро в процессе прохождения через барьер деления приобретает неаксиальную форму. Для оценки важности неаксиальной вариации формы нагретого ядра на рис.1-4 пунктиром показана зависимость  $E(S)$  от деформации  $\beta_2$  при ограничении только аксиально-симметричными формами ядра. Видно, что с ростом энергии возбуждения выигрыш в энергии, приобретаемый при неаксиальной вариации формы, заметно уменьшается и при  $S > 60$ , то есть тогда, когда в  $E(S)$  преобладает жидкокапельная компонента, - исчезает совсем.

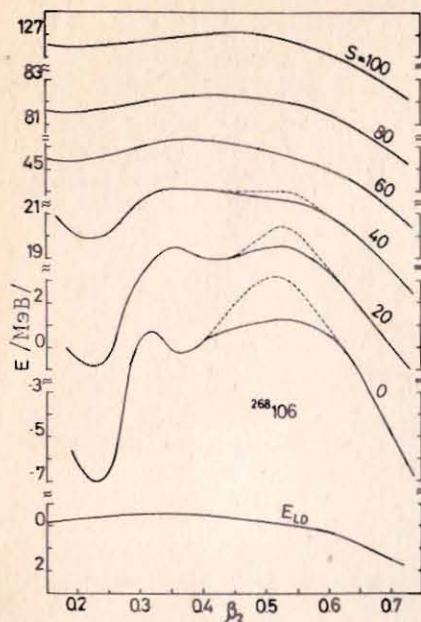


Рис.3. То же, что на рис.1, для ядра  $^{268}\text{106}$ .

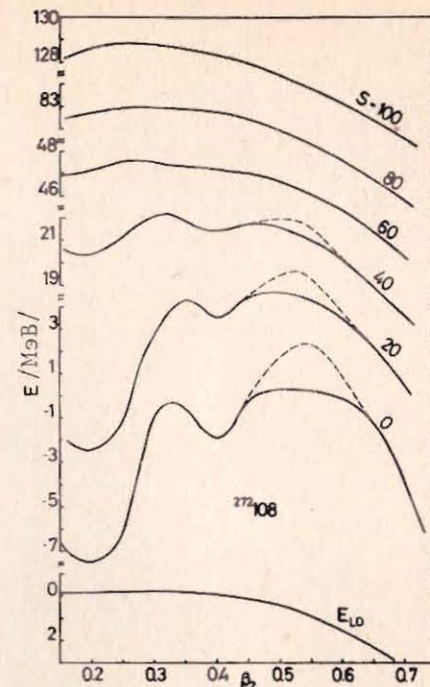


Рис.4. То же, что на рис.1, для ядра  $^{272}\text{108}$ .

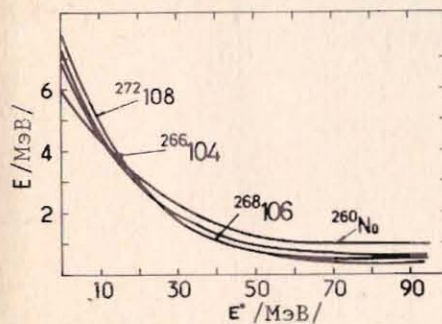


Рис.5. Разность энергии  $E(S)$  в седловой точке и в точке минимума /"барьер деления"/ в зависимости от энергии возбуждения.

На рис.3-4 при  $S = 0$  виден локальный минимум для  $\beta_2 = 0,4$  в ядрах  $^{268}\text{106}$  и  $^{272}\text{108}$ , который едва заметен при  $S = 40 / T \approx 1,0$  МэВ,  $E^* \approx 23$  МэВ/ и совсем исчезает при  $S = 60 / T \approx 1,5$  МэВ,  $E^* \approx 47$  МэВ/. Отсюда следует, что сделанный в работе <sup>1/</sup> вывод о том, что этот минимум может оказать заметное влияние на ход реакции слияния тяжелых ионов, ограничен в области своей применимости энергиями возбуждения до 20 МэВ.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное рассмотрение показывает, что неаксиальность формы ядра на барьере деления, исследованная в работе<sup>/1/</sup> в холодных ядрах, имеет место и при делении нагретых ядер до тех пор, пока заметны оболочечные эффекты в структуре барьера деления  $E^* \leq 50$  МэВ/. Обсуждаемый также в работе<sup>/1/</sup> промежуточный минимум в энергии деформации исчезает несколько раньше. По всей видимости, он уже не оказывает никакого влияния на процесс слияния ядер при энергии возбуждения больше 25 МэВ.

Авторы благодарны В.Г.Соловьеву за постоянный интерес к работе и Ю.Ц.Оганесяну и В.В.Волкову - за полезные дискуссии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Swiok S. et al. Nucl.Phys., 1983, A410, p.254.
2. Оганесян Ю.Ц. Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983. ОИЯИ, Д7-83-644, Дубна, 1983, с.
3. Игнатюк А.В., Ставинский В.С., Шубин Ю.Н. Nuclear Data for Reactors. IAEA, Vienna, 1970, vol.2, p.885.
4. Brack M. et al. Rev.Mod.Phys., 1972, 44, p.320.
5. Moretto L.G. Nucl.Phys., 1972, A180, p.337.
6. Moretto L.G. Nucl.Phys., 1972, A182, p.641.
7. Jensen A.S., Damgaard J. Nucl.Phys., 1973, A203, p.578.
8. Adeev G.D., Cherdantsev P.A. Phys.Lett., 1972, 39B, p.485.
9. Адеев Г.Д., Черданцев П.А. ЯФ, 1973, 18, с.741.
10. Струтинский В.М., Коломиец В.М. Материалы VIII зимней школы ЛИЯФ по физике ядра и элементарных частиц. Изд-во ЛИЯФ, Л., 1973, ч.2, с.483.
11. Ignatyuk A.V. Nuclear Theory in Neutron Data Evaluation. Proc.Int.Meet. Trieste, 1975. IAEA, Vienna, 1976, vol.1, p.223.
12. Bohr A., Mottelson B. Nuclear Structure. New York, Amsterdam, 1974, vol.1, II.
13. Diebel M. et al. Nucl.Phys., 1981, A355, p.66.
14. Игнатюк А.В. Статистические свойства возбужденных атомных ядер. Энергоатомиздат, М., 1983.
15. Strutinsky V.M. Nucl.Phys., 1967, A95, p.420.
16. Strutinsky V.M. Nucl.Phys., 1968, A122, p.1.
17. Myers W.D., Swiatecki W.J. Ark.Fys., 1967, 36, p.343.
18. Myers W.D., Swiatecki W.J. Ann.Phys.(N.Y.), 1969, 55, p.395.
19. Пашкевич В.В., Струтинский В.М. ЯФ, 1969, 9, с.56.
20. Damgaard J. et al. Nucl.Phys., 1969, A135, p.432.
21. Dudek J., Werner T. J.Phys., 1968, G4, p.1543.
22. Dudek J. et al. J.Phys., 1979, G5, p.1359.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 июля 1984 года.

Лоевски З., Пашкевич В.В., Цвёк С. Р4-84-549  
Влияние возбуждения на процесс деления ядер  
самых тяжелых элементов

Проведены расчеты барьеров возбужденных ядер для элементов с  $Z=102-108$ . Нагревание ядра включено по стандартным формулам квантовой статистики. При учете одночастичных состояний использован реалистический потенциал Вудса-Саксона. Показана структура барьеров для различных энергий возбуждения. Обсуждаются степень отклонения формы делящегося ядра от аксиальной симметрии и изменение глубины промежуточного минимума.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод авторов

Лоевски З., Пашкевич В.В., Цвёк С. Р4-84-549