

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P4-84-726

С.Цвёк, З.Лоевски, В.В.Пашкевич

БАРЬЕРЫ ДЕЛЕНИЯ НЕЧЕТНЫХ ЯДЕР
С $100 \leq Z \leq 111$

Направлено в Nuclear Physics

1984

ВВЕДЕНИЕ

В связи с экспериментами по синтезу ядер новых тяжелых и сверхтяжелых элементов и их поисками в природе ^{/1-3/}, в работе ^{/4/} методом Струтинского ^{/5-6/} были рассчитаны барьеры деления четно-четных ядер с $100 \leq Z \leq 110$. Барьеры деления тяжелых элементов недавно исследовались также в ^{/7-9/}. В отличие от четно-четных ядер, нечетные ядра обладают несколько большей устойчивостью относительно спонтанного деления по сравнению с их четно-четными соседями, поэтому имеется больше экспериментальных данных об их свойствах. В частности, идут экспериментальные исследования ядер с $Z = 107, 109$ ^{/10-13/}. Определенный интерес представляют теоретические оценки свойств этих элементов.

Одним из основных факторов, определяющих вероятность деления ядра, является высота и структура барьера деления. В данной работе, которую можно рассматривать как непосредственное продолжение работы ^{/4/}, проводится расчет высоты барьеров деления и рельефа энергии деформации нечетных ядер с $Z = 100-111$.

Барьеры нечетных ядер рассчитывались ранее в работах ^{/9,14,15/}, в которых использовался модифицированный осцилляторный потенциал ^{/16/}. В расчетах барьеров ^{/14/} и разницы барьеров нечетных и четно-четных ядер ^{/15/} предполагалось, что на протяжении всего процесса деления аксиально- и зеркально-симметричного ядра нечетная частица занимает состояние с определенными проекцией спина и четностью. Рассчитанные таким образом барьеры на несколько МэВ превышают барьеры, полученные интерполяцией барьеров соседних четно-четных ядер. Эта разность, известная под названием "энергии специализации" ^{/17/}, приводит к увеличению времени спонтанного деления нечетных ядер на несколько порядков. Известно, однако, что тяжелые актиниды теряют аксиальную симметрию вблизи первого барьера деления, так что проекция спина нечетной частицы на ось симметрии перестает быть хорошим квантовым числом, и запрет, связанный с требованием постоянства проекции спина, не должен строго выполняться ^{/15/}. В ^{/9/} исследовалось большое число четно-четных и нечетных ядер с $76 \leq Z \leq 100$ с учетом возможной неаксиальности формы ядра, причем считалось, что нечетная частица занимает нижайший свободный уровень на поверхности Ферми. В ^{/9/} использовались тщательно подобранные параметры, входящие в потенциал Нильссона и в модель жидкой капли, а также характеризующие интенсивность спаривания, однако в ней не рассматриваются самые тяжелые элементы с $Z \geq 101$.

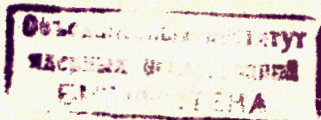


Рис.1. Энергия деформации ядра $^{258}_{105}$ вдоль делительной долины в зависимости от β_2 . Сплошная кривая - расчет с учетом блокировки /23,24/ и в предположении, что нечетная частица занимает нижайший свободный уровень. Штрихи - без учета блокировки, штрихпунктир - расчет, сделанный, как и в /15/, в предположении, что нечетная частица занимает нижайший уровень с определенным спином и четностью.

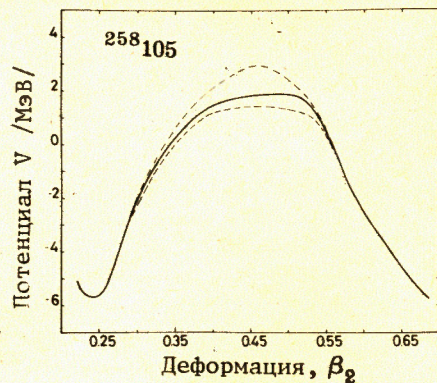
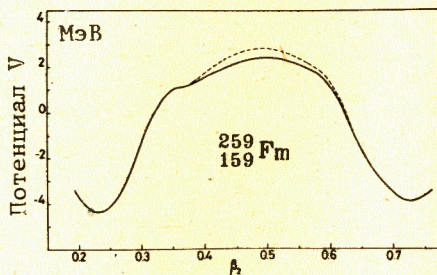


Рис.2. Энергия деформации ядра $^{259}_{159}\text{Fm}$ вдоль делительной долины в зависимости от β_2 . Сплошная кривая - расчет в предположении, что нечетная частица занимает нижайший свободный уровень. Штрихи - частица занимает нижайшее свободное состояние с определенной четностью.



На рис.1 изображен барьер деления ядра $^{258}_{105}$, вычисленный в различных предположениях. Видно, что эффект блокировки повышает высоту барьера на 0,3-0,6 МэВ, а гипотеза о постоянстве в процессе деления спина и четности нечетной частицы приводит к увеличению барьера на 1,0-1,5 МэВ, и он становится, по-видимому, слишком большим. На рис.2 сравниваются два расчета, в одном из них в процессе деления сохраняется, а в другом - не сохраняется четность состояния, в котором находится нечетная частица. Видно, что разность энергий в этих двух случаях не превосходит 0,4 МэВ, в других ядрах эта величина меняется от 0,0 до 0,3 МэВ. Она настолько мала, что ею можно пренебречь. Поэтому в наших дальнейших расчетах считалось, как и в /9/, что нечетная частица занимает нижайшее свободное состояние вне зависимости от того, какой оно четности.

Значения потенциальной энергии вдоль делительной долины для всех рассмотренных ядер даны на рис.3-14, где для нечетных Z представлены также ядра с нечетным числом нейтронов. При рассмотрении нечетно-нечетных ядер не учитывалось взаимодействие нечетного нейтрона и протона. Видно, что все рассмотренные ядра деформированы в основном состоянии, хотя в самых тяжелых изотопах элементов с $Z = 110$ и 111 намечается тенденция к уменьшению

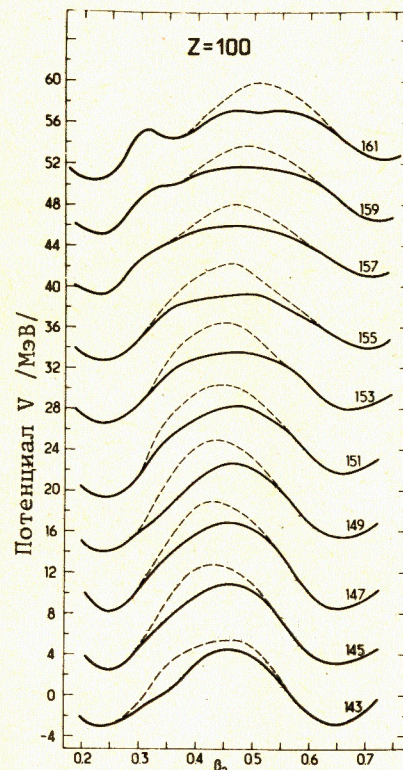


Рис.3. Зависимость энергии деформации ядер с $Z=100$ от квадрупольной деформации β_2 вдоль делительной долины /сплошные кривые/. Пунктир $\gamma = 0$. Шкала слева соответствует нижайшей кривой, каждая следующая кривая сдвинута вверх на 6 МэВ. Цифры справа у кривых указывают на число нейтронов.

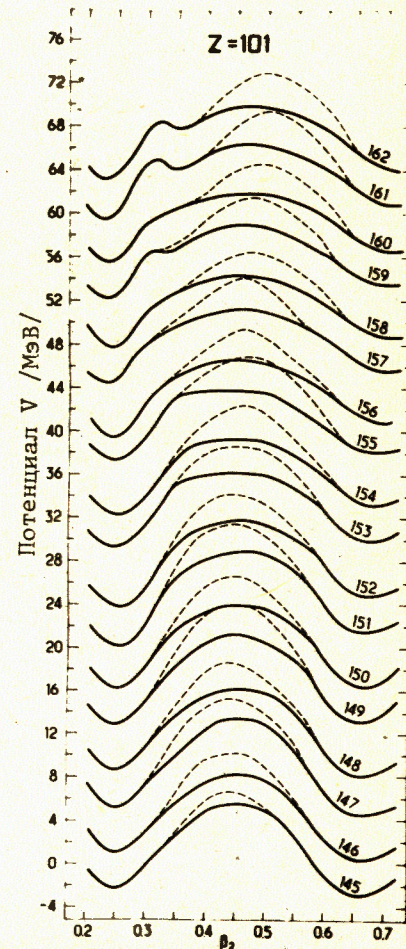


Рис.4. То же, что на рис.3, для ядер с $Z=101$. Каждая следующая кривая сдвинута относительно предыдущей на 4 МэВ.

деформации. Деформация нечетных ядер в основном состоянии мало отличается от деформации соседних четно-четных ядер, а энергия основного состояния, представленная на рис.15, лежит выше энергии соседних четно-четных ядер приблизительно на величину сверхпроводящей щели. На этом рисунке четко видно проявление подболочки с $N=152$. В более тяжелых ядрах намечается подболочка с $N=162-164$.

В самых тяжелых изотопах рассматриваемых элементов барьер расщепляется на два, причем глубина минимума между ними дости-

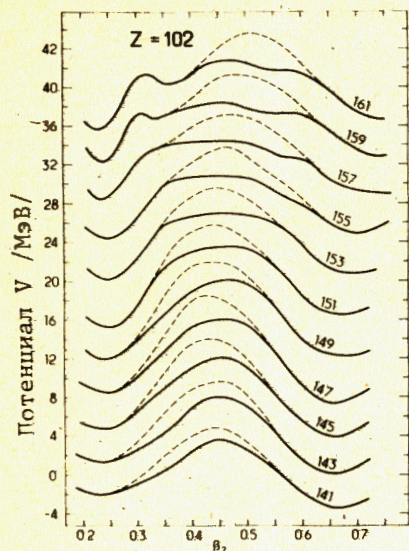


Рис.5. То же, что на рис.4, для ядер с $Z=102$.

Рис.6. То же, что на рис.4, для ядер с $Z=103$.

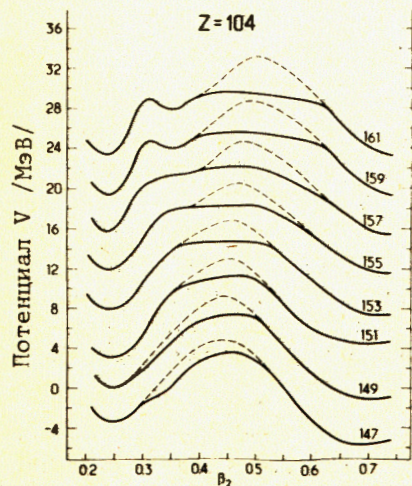
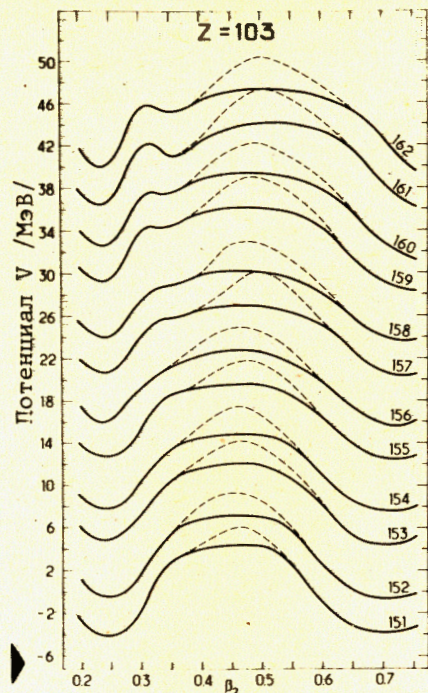


Рис.7. То же, что на рис.4, для ядер с $Z=104$.

Рис.8. То же, что на рис.4, для ядер с $Z=105$.

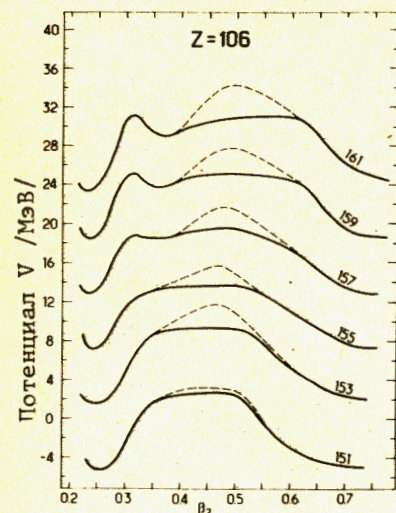
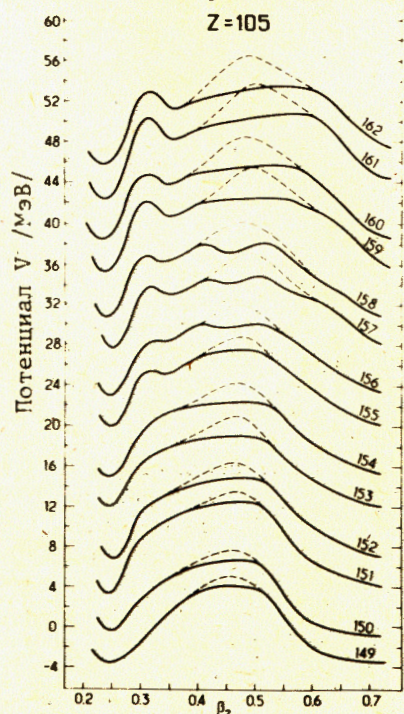


Рис.9. То же, что на рис.3, для ядер с $Z=106$.

Рис.10. То же, что на рис.4, для ядер с $Z=107$.

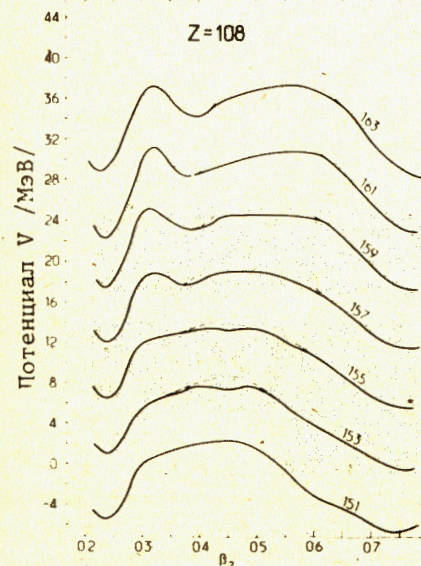
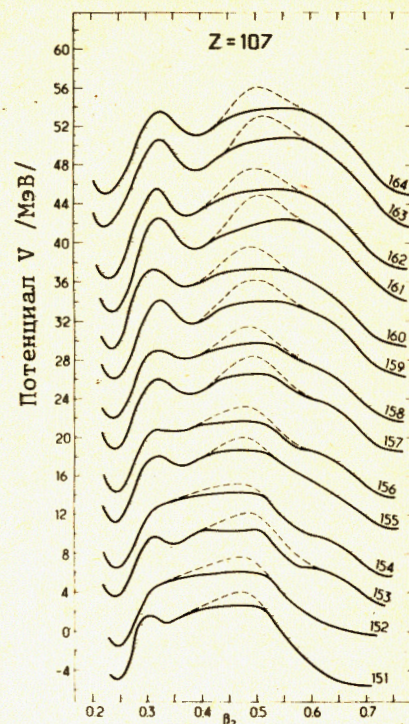


Рис.11. То же, что на рис.3, для ядер с $Z=108$.

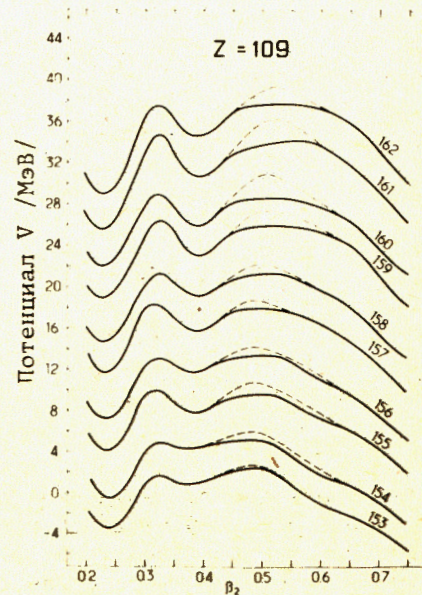


Рис.12. То же, что на рис.4 для ядер с $Z=109$.

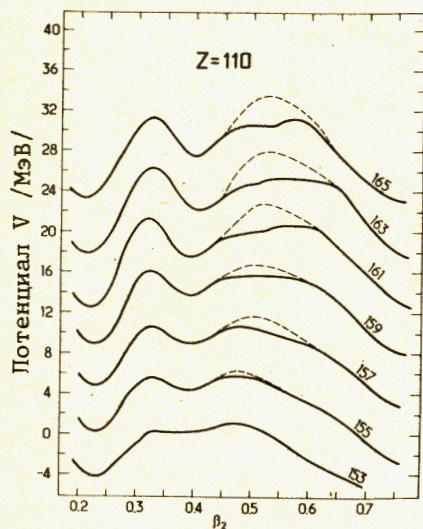


Рис.13. То же, что на рис.3, для ядер с $Z=110$. Каждая следующая кривая сдвинута относительно предыдущей на 5 МэВ.

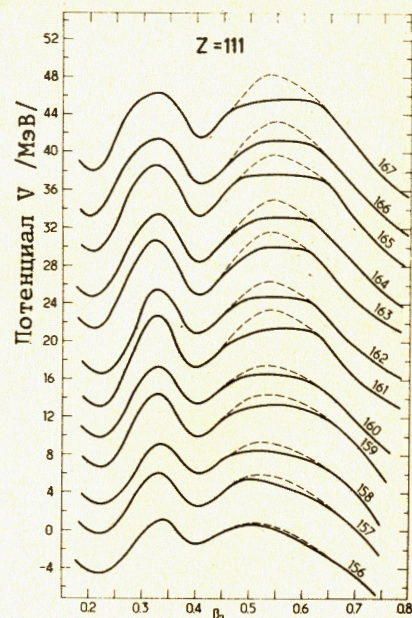
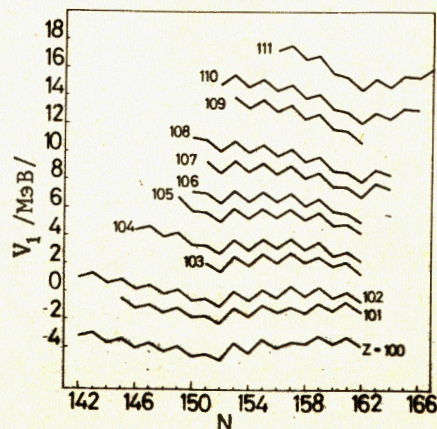


Рис.14. То же, что на рис.3, для ядер с $Z=111$.

Рис.15. Энергия основного состояния V_1 в зависимости от числа нейтронов, отсчитанная от энергии сферической жидкой капли. Около кривых указано число протонов. Энергия нулевых колебаний предполагалась равной 0,5 МэВ. Шкала слева соответствует нижней кривой / $Z=100$ /, каждая последующая кривая сдвинута вверх на 2 МэВ. Значения для четно-четных ядер взяты из ^{4/}.



гает в самых тяжелых элементах величины порядка 4 МэВ. Положение минимума / $\beta_2 = 0,4$; $\beta_4 = 0,08-0,12$ / почти не меняется от ядра к ядру и совпадает с его положением в соседних четно-четных ядрах ^{4/}. Возможное существование изомеров формы и влияние этого промежуточного минимума на ход реакции слияния тяжелых ионов при низкой энергии возбуждения уже обсуждалось ранее ^{4/}.

Барьеры деления нечетных ядер представлены на рис.16 и 17 вместе с результатами работы ^{4/}. Такое сопоставление вполне правомочно, так как оба расчета проводились при одном и том же наборе параметров и с использованием одного и того же метода расчета. Из этих рисунков видно, что высота барьеров деления нечетных ядер в среднем на 0,5-1,0 МэВ превосходит соответствующую величину в соседних четно-четных ядрах.

Таким образом, в расчетах находит отражение тот факт, что нечетные ядра более стабильны относительно спонтанного деления, чем их четно-четные соседи / см., например, ^{10-13/}. Локальные максимумы в барьерах деления достигаются при числе нейтронов, равном 151 и 161, что является отражением отмеченных выше подорожек в основном состоянии и отражением четно-нечетного эффекта. Наиболее примечателен тот факт, что высота барьеров деления для ядер с $Z=108-111$ и $N=155-165$ достаточно высока, чтобы можно было говорить об экспериментальном получении и исследовании этих ядер в реакциях с тяжелыми ионами ^{25/}.

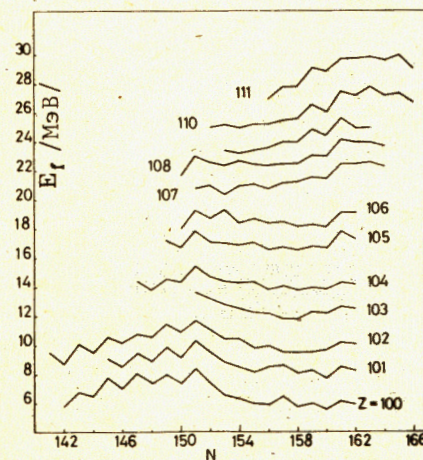


Рис.16. Барьеры деления в зависимости от числа нейтронов. Шкала слева соответствует нижней кривой / $Z=100$ /, каждая последующая кривая сдвинута вверх на 2 МэВ. Цифры у кривых означают число протонов. Значения для четно-четных ядер взяты из ^{4/}.

Z	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111
142	5,8		4,7									
143	6,8		6,1									
144	6,5		5,5									
145	7,8	7,1	6,6									
146	7,0	6,5	6,2									
147	8,1	7,5	6,8		6,4							
148	7,4	6,9	6,6		6,8							
149	8,0	7,8	7,5		6,6	7,2						
150	7,4	7,1	6,9		6,4	6,7	6,0		5,7			
151	8,4	8,3	7,7	7,6	7,5	7,9	7,3	6,8	7,1			
152	7,4	7,5	7,1	7,2	6,7	7,1	6,8	7,0	6,6			
153	6,5	6,8	6,4	6,8	6,4	7,0	7,4	6,4	6,4	5,4	5,2	
154	6,3	6,5	6,4	6,5	6,3	7,0	6,4	7,0	6,7	5,2	5,0	
155	6,0	6,1	5,8	6,3	7,1	6,6	7,1	6,5	5,4	5,2		
156	5,9	6,5	5,9	6,2	5,8	6,6	6,4	6,8	6,4	5,6	5,2	5,0
157	6,5	6,6	5,5	5,8	5,9	6,6	6,4	7,2	6,5	6,0	5,5	5,7
158	5,7	6,1	5,5	5,8	5,8	6,6	6,2	7,3	6,5	6,0	5,6	5,8
159	6,0	6,3	5,5	6,0	6,0	6,8	6,2	7,4	7,1	6,9	6,6	7,2
160	5,6	5,7	5,7	5,9	5,9	6,7	6,1	7,5	7,0	6,4	6,0	6,9
161	6,1	6,5	6,2	6,3	6,3	7,9	7,2	8,5	8,4	8,5	8,3	8,1
162	5,9	6,2	6,1	6,2	6,2	7,3	7,1	8,5	8,0	8,0	7,3	8,0
163								8,6	8,0	8,0	7,8	8,1
164								8,3	7,7		7,2	7,6
165											7,4	8,0
166											6,7	7,0

Рис.17. Барьеры деления в МэВ. Значения для четно-четных ядер взяты из ^{4/}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом Струтинского были проведены расчеты величины и структуры барьеров деления нечетных ядер с $100 \leq Z \leq 111$ и $140 \leq N \leq 165$ с учетом неаксиальных вариаций формы ядра. Полученный набор результатов совместно с данными для четно-четных ядер из работы /4/ позволяет исследовать изменение характеристик барьеров деления в широкой области изменения числа нейтронов и протонов. В тяжелых изотопах тяжелых элементов / $Z=107-111$, $N=160-165$ / возможно появление изомеров формы при деформации $\beta_2 \approx 0,4$. Барьеры деления нечетных элементов на 0,5-1,0 МэВ превосходят барьеры деления соседних четно-четных ядер. Рассмотрено влияние эффекта блокировки и учета сохранения проекции спина и четности на высоту барьера деления. Барьеры деления в рассмотренной области ядер не проявляют тенденции к уменьшению их величины, что свидетельствует о сравнительной устойчивости ядер относительно спонтанного деления.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Flerov G.N., Ter-Akopian G.M. Pure and Appl.Chem., 1981, 53, p. 909.
2. Oganessian Yu.Ts. et al. Nucl.Phys., 1978, A294, p. 213.
3. Munzenberg G. et al. Z.Phys., A300, p. 107.
4. Cwiok S. et al. Nucl.Phys., 1983, A410, p. 254.
5. Strutinsky V.M. Nucl.Phys., 1967, A295, p. 420.
6. Strutinsky V.M. Nucl.Phys., 1968, A122, p. 1.
7. Randrup J. et al. Phys.Rev., 1976, C13, p. 229.
8. Junker K., Hadermann J.Z. Z.Phys., 1977, A282, p. 391.
9. Howard W.M., Moller P. Atom.Data and Nucl. Data Tables, 1980, vol.25, No 3.
10. Oganessian Yu.Ts. et al. Nucl.Phys., 1976, A273, p. 505.
11. Munzenberg G. et al. Z.Phys., 1978, A309, p. 89.
12. Munzenberg G. et al. Z.Phys., 1984, A315, p. 145.
13. Оганесян Ю.Ц. Труды Межд. школы-семинара по физике тяжелых ионов. /Алушта, 1983/; ОИЯИ, Д7-83-644, Дубна, 1983, с. 55.
14. Nilson S.G. et al. Phys.Lett., 1969, 30B, p. 437.
15. Randrup J. et al. Nucl.Phys., 1973, A217, p. 221.
16. Nilsson S.G. et al. Nucl.Phys., 1969, A131, p. 1.
17. Wheeler J.A. Physica, 1956, 22, p. 103.
18. Dudek J., Werner T. J.Phys., 1978, 64, p. 1543.
19. Dudek J. et al. J.Phys., 1979, 65, p. 1359.
20. Myers W.D., Swiatecki W.J. Arkiv Fyzik, 1967, 36, p. 343.

21. Myers W.D., Swiatecki W.J. Ann.Phys. AN.Y.), 1969, 55, p. 395.
22. Brack M. et al. Rev.Mod.Phys., 1972, 44, p. 320.
23. Арсеньев Д.А. и др. Известия АН СССР, сер.физ., 1968, 32, с. 866.
24. Соловьев В.Г. Теория сложных ядер. "Наука", М., 1971.
25. Oganessian Yu.Ts. et al. Preprint JINR, Dubna, 1984, E7-84-307.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 ноября 1984 года,

Принимается подписка на препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований.

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ, включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

ИНДЕКС	ТЕМАТИКА	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	10 р. 80 коп.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	17 р. 80 коп.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	4 р. 80 коп.
4.	Теоретическая физика низких энергий	8 р. 80 коп.
5.	Математика	4 р. 80 коп.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	4 р. 80 коп.
7.	Физика тяжелых ионов	2 р. 85 коп.
8.	Криогеника	2 р. 85 коп.
9.	Ускорители	7 р. 80 коп.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	7 р. 80 коп.
11.	Вычислительная математика и техника	6 р. 80 коп.
12.	Химия	1 р. 70 коп.
13.	Техника физического эксперимента	8 р. 80 коп.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	1 р. 70 коп.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	1 р. 50 коп.
16.	Дозиметрия и физика защиты	1 р. 90 коп.
17.	Теория конденсированного состояния	6 р. 80 коп.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	2 р. 35 коп.
19.	Биофизика	1 р. 20 коп.

Подписка может быть оформлена с любого месяца текущего года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.

Цвек С., Лоевски З., Пашкевич В.В.
Барьеры деления нечетных ядер с $100 \leq Z \leq 111$

P4-84-726

Методом Струтинского и с использованием реалистического потенциала типа потенциала Вудса-Саксона рассчитаны величина и структура барьеров деления нечетных ядер с $100 \leq Z \leq 111$. Учитывались неаксиальные вариации формы ядра. Рассмотрено влияние эффекта блокировки и учета сохранения проекции спина и четности на высоту барьера деления. Как и в соседних четно-четных ядрах, в тяжелых изотопах тяжелых элементов ($Z = 107-111$, $N = 160-165$) возможно появление изомеров формы. Барьеры деления в рассмотренной области ядер не обнаруживают тенденции к уменьшению их величины.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод Л.В.Пашкевич

Cwiok S., Lojewski Z., Pashkevich V.V.
Fission Barriers of Odd-Mass Nuclei with $100 \leq Z \leq 111$

P4-84-726

The height and structure of fission barriers for odd-mass nuclei with $100 \leq Z \leq 111$ are calculated by the Strutinsky method and using realistic Woods-Saxon potential. The non-axial variations of nuclear shape are taken into account. The influence of the blocking effect and the account of the conservation of spin and parity on the height of the barriers are considered. As in the adjacent even-even nuclei, in heavy isotopes of the heavy elements ($Z=107-111$, $N=160-165$) the occurrence of a shape isomer is possible. In the nuclei considered the fission barrier heights do not show a tendency of decreasing with increasing mass number.

The investigation has been performed at the Laboratory of Theoretical Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984