

УДК 539.173

МОГУТ ЛИ СУЩЕСТВОВАТЬ В ПРИРОДЕ СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ?

Ю.Ц.Оганесян

На основе экспериментальных и теоретических результатов последних лет по обнаружению острова стабильности тяжелых деформированных ядер вблизи оболочек $Z = 108$ и $Z = 162$ рассматриваются радиоактивные свойства более тяжелых нуклидов вблизи замкнутых сферических оболочек с $Z = 114$ и $Z = 184$. Из рассмотрения следует, что для ядер с $Z = 106 + 108$ и $N = 180 + 184$ можно ожидать большие времена жизни вплоть до $T_{1/2} \sim 10^8$ лет. Подобные сверхтяжелые и сверхстабильные нуклиды, образующиеся в процессе нуклеосинтеза, могли сохраниться в малых количествах до наших дней. В отличие от всех предыдущих экспериментов, нацеленных на поиск спонтанного деления ядра $^{298}_{114}$ (EkaPb), предлагается постановка опытов по обнаружению редких событий радиоактивного распада ядер с $Z = 106 + 108$ (EkaW-EkaOs) с массой около 290. Предполагается, что распад этих нуклидов будет представлять радиоактивный ряд (четвертый к известным трем цепочкам естественной радиоактивности), состоящий из последовательных β - и α -распадов, который может закончиться спонтанным делением. Показано также, что в опытах по поиску коррелированных распадов сверхтяжелых природных излучателей может быть достигнута чувствительность обнаружения вплоть до 10^{-21} г/г в предположении, что время жизни радиоактивных ядер $\geq 10^8$ лет.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Can Superheavy Elements Exist in Nature?

Yu. Ts. Oganessian

Basing on the experimental and theoretical results obtained in recent years on the discovery of the stability domain of heavy deformed nuclei near the shells with $Z = 108$ and $N = 162$, the radioactive properties of heaviest nuclides near the closed spherical shells with $Z = 114$ and $N = 184$ are considered. From the examination of these properties it follows that one can expect long half-lives of up to $T_{1/2} \sim 10^8$ years for the nuclei with $Z = 106 + 108$ and $N = 180 + 184$. Such superheavy and superstable nuclides, formed in the nucleosynthesis process, can still exist in small quantities to the present day. In distinction to all previous experiments aimed at the search for the spontaneous fission of a $^{298}_{114}$ (EkaPb) nucleus, it is proposed to perform experiments on the discovery of rare events of the radioactive decay of nuclei with $Z = 106 + 108$ (EkaW-EkaOs) and $A = 290$. It is assumed that the decay of these nuclides will represent the radioactive chain (the fourth one besides the three known chains of natural radioactivity), consisting of sequential β - and α -decays, which may end with spontaneous fission. It is also shown that in the experiments on the search for natural radioactivity correlated decays of superheavy nuclei the detection sensitivity of up to 10^{-21} g/g may be achieved, assuming that the half-life of radioactive nuclei is $\geq 10^8$ years.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

История вопроса

Экспериментальные и теоретические исследования потенциальной энергии ядер указывают на значительное влияние структуры на форму ядра в основном и деформированном состояниях.

Это обстоятельство играет решающую роль в стабильности очень тяжелых ядер, не устойчивых к спонтанному делению.

Действительно, еще в ранних работах В.Майерса, В.Святецкого [1,2], С.Нильссона [3], В.Струтинского [4], В.Пашкевича [5], Р.Никса [6] и др. было показано, что для сверхтяжелых ядер, в отсутствие макроскопического (капельного) барьера деления, учет эффекта ядерной структуры приводит к появлению барьера деления, резко уменьшающего вероятность спонтанного деления. При всей неопределенности расчетов проницаемости барьера деления запреты на спонтанное деление в области замкнутых сферических оболочек $Z = 114$ и $N = 184$ [7,8] оценивались величиной $\sim 10^{30-35}$.

Нельзя было исключить (хоть и с малой вероятностью), что эти запреты столь велики, что время жизни сверхтяжелых ядер относительно спонтанного деления будет $\geq 10^8$ лет (без эффекта ядерных оболочек $\sim 10^{20}$ с). Другие возможные типы распада — α - и β -распады — определяются, как известно, разностью масс и структурой ядер вблизи основного состояния, которые также зависят от силы эффекта ядерных оболочек. Различные формулы масс указывали на высокую стабильность сверхтяжелых ядер относительно и этих типов распада [9,10].

Тогда подобные сверхтяжелые и сверхстабильные ядра, если бы они образовались в процессе нуклеосинтеза, могли сохраниться в природе до наших дней. Предполагалось, что основным типом распада сверхтяжелого ядра будет спонтанное деление.

Идея поиска сверхтяжелых элементов по спонтанному делению принадлежит Г.Н.Флерову и его сотрудникам, которые в 1972—1988 гг. предприняли широкомасштабные эксперименты по обнаружению спонтанного деления в различных природных образцах и в космических лучах.

Исследовались различные минералы, обедненные ураном (основной и, фактически, единственный природный источник фона спонтанного деления с $T_{s.f.} = 10^{16}$ лет), концентраты продуктов химического обогащения тяжелых металлов платино-свинцовой группы, метеоритное вещество и многие другие образцы.

Не вдаваясь в детальный анализ всех экспериментов, которые читатель может найти в оригинальных работах [11—14] и обзорах [15,16], приведем конечный результат. Предполагалось, что деление будет испытывать тяжелое ядро с $Z \geq 110$. Ожидалось, что среднее число нейтронов, возникающих при делении столь тяжелого ядра, будет ~ 10 . Ввиду высокой проникающей способности нейтронов можно было использовать массивные образцы весом 20 + 30 кг, для которых измерялись редкие события множественного рождения нейтронов.

Для исключения фона от взаимодействия космических мюонов с образцом аппарата помещалась в подземную лабораторию на глубину ~ 1000 м водного эквивалента.

Путем тщательного анализа содержания урана в образцах удалось достигнуть высокой чувствительности, соответствующей регистрации одного события в месяц с $\nu \geq 3$. Отдельные события, зарегистрированные в длительных экспозициях, которые нельзя было отнести к распаду урана, имели, к сожалению, малую множественность ($\nu \sim 2$). Эти события разумно было интерпретировать как верхнюю границу ожидаемого эффекта. Она составляла $\sim 10^{-14}$ г/г в предположении, что сверхтяжелое ядро имеет период полураспада $T_{1/2} \sim 10^8$ лет.

Естественно, отсутствие эффекта в подобных экспериментах может найти различные объяснения. Если сверхтяжелые ядра образовались в процессе нуклеосинтеза, то вполне вероятно, что их время жизни значительно меньше 10^8 лет. Однако в целом вопрос о существовании в природе ядер, значительно тяжелее урана, остается открытым.

Ниже мы попытаемся проанализировать эту проблему с современных позиций.

Искусственный синтез и свойства трансактинидных элементов

Известно, что все элементы с $Z > 100$ были синтезированы в ядерных реакциях под действием тяжелых ионов. Однако в любой комбинации мишень — ион реакция слияния ведет к образованию ядер со значительным дефицитом нейтронов; все продукты распада компаунд-ядра значительно удалены от линии β -стабильности. Наоборот, в нуклеосинтезе изотопы имеют значительный нейтронный избыток и расположены за линией β -стабильности.

Вместе с тем, эксперименты, предпринятые в Дармштадте [17—19] и в Дубне [20—23] по синтезу новых элементов в реакциях холодного слияния (на основе Рb-мишени) и горячего слияния (на основе мишени из тяжелых изотопов актиноидов), привели к открытию более 30 новых изотопов с $Z = 102 + 112$ и $N = 150 + 165$. Эти ядра расположены далеко от вершины предполагаемого острова стабильности $Z = 114$ и $N = 184$. Однако все изотопы с $Z \geq 106$ преимущественно испытывали α -распад, что свидетельствовало об их высокой стабильности относительно спонтанного деления.

Объяснение этого явления было найдено в более совершенных и детальных расчетах коллективного движения ядер.

З.Пагиком, Р.Смолянчуком и А.Собичевским [24—26] было показано, что влияние ядерной структуры на процесс деления требует учета высоких порядков деформации для описания ядерных форм. С другой стороны, при проникновении через потенциальный барьер структурной природы массовый коэффициент (инерциальный фактор) испытывает значительные вариации в процессе деформации ядра. Учет этих факторов привел к нетривиальным предсказаниям существования подъема стабильности деформированных ядер вблизи оболочек с $Z = 108$ и $N = 162$.

Целенаправленные эксперименты, поставленные нами, по синтезу самых тяжелых изотопов элементов с $Z = 104, 106, 108$ и 110 показали резкий подъем стабильности ядер по мере приближения к $N = 162$ [21—23]. Поскольку четно-четные изотопы с $Z = 104$ испытывают спонтанное деление, а все синтезированные изотопы с $Z \geq 106$ — α -распад, было проведено прямое сравнение теории с экспериментом. При этом было получено хорошее количественное согласие.

Это важное обстоятельство, так как если теперь данный теоретический метод расчета применить к области более тяжелых ядер, то можно получить значительно более реалистические предсказания свойств сверхтяжелых нуклидов, чем это было сделано раньше.

Эта работа проводится авторами [22,23], и ряд уже полученных результатов заслуживает обсуждения в контексте рассматриваемой нами проблемы.

Ожидаемые свойства сверхтяжелых ядер

Как видно из рис.1, амплитуда оболочечной поправки при переходе от деформированной оболочки $Z = 108, N = 162$ к сферической $Z = 114, N = 184$ меняется в небольших пределах [25]. Однако с ростом числа нейтронов меняется макроскопическая (капельная) составляющая потенциальной энергии ядра, что приводит к значительным изменениям барьера деления ядер. Вследствие этого резко возрастает стабильность сверхтяжелых ядер относительно спонтанного деления.

Расчетные значения периодов α -распада — T_α приведены в нижней части рисунка. Видно, что, например, для ядер с $Z = 110$ переход от $N = 162$ к $N = 184$ приводит к увеличению парциального периода T_α в 10^{13} раз.

Однако величина T_α для изотопов более тяжелого ядра с $Z = 114$ и $N = 180 + 184$ составляет всего $\sim 10^3$ с. Конечно, такое ядро не может существовать в природе.

Вместе с тем, протонная и нейтронная оболочки имеют разную силу и тем самым дают разный вклад в полный эффект результирующей стабильности ядра. Если сильно изменить число протонов, то стабильность ядра будет определяться в основном эффектом нейтронной оболочки $N \sim 184$. Последние расчеты Р.Смолянчука позволяют это сделать [27].

На рис.2 представлены расчетные периоды T_α и $T_{s.f.}$ для изотопов 104 и 114 элементов в зависимости от числа нейтронов. Виден огромный эффект сферической оболочки $N = 184$. Парциальные периоды спонтанного деления и α -распада ядра $^{288}_{104}$ составляют $3 \cdot 10^7$ и $3 \cdot 10^{17}$ лет, соответственно. Для ядра $^{298}_{114}$ парциальный период спонтанного деления составляет также более 10^7 лет, в то время как $T_\alpha \approx 10^3$ с.

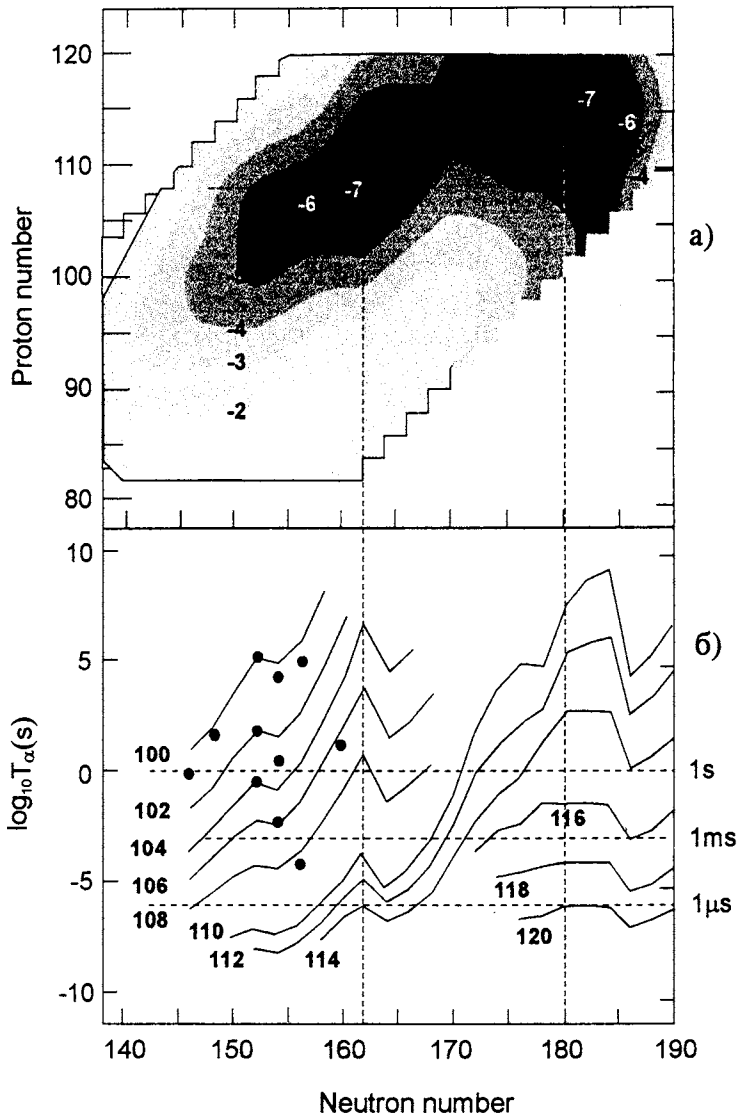


Рис.1. а) Контурная карта расчетных значений амплитуд оболочечных поправок (в МэВ) к макроскопической (капельной) энергии деформации ядер с различными Z и N . б) Парциальные периоды α -распада (в секундах) в зависимости от числа нейтронов для изотопов с $Z \geq 100$. Сплошные линии — расчет [25], точки — экспериментальные значения

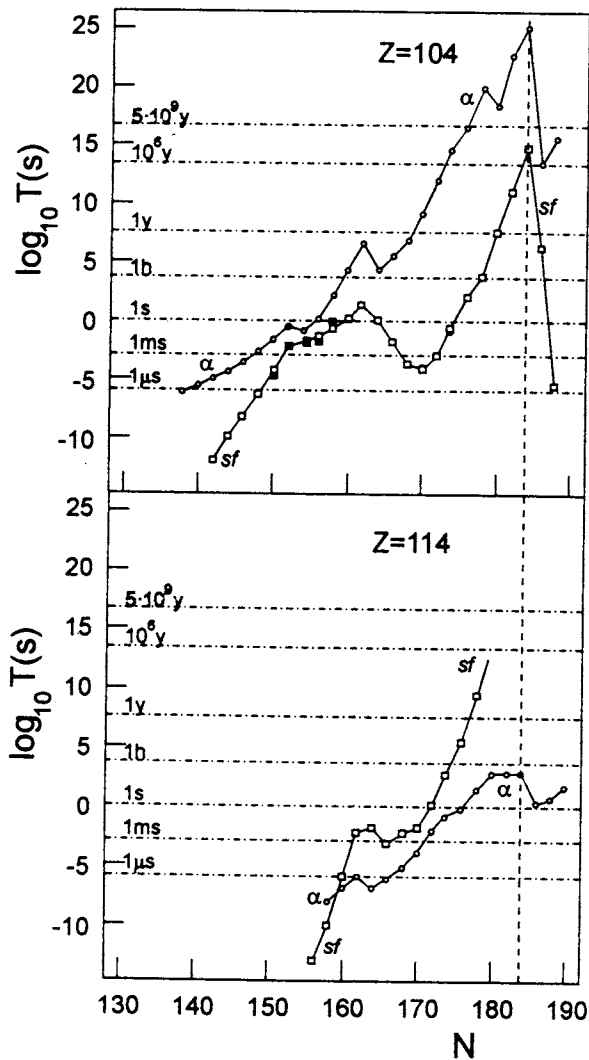


Рис.2. Парциальные периоды спонтанного деления (квадраты) и α -распада (кружки) изотопов 104 и 114 элементов. Открытые символы — расчет [26,27], черные точки и квадраты — экспериментальные значения, полученные для изотопов с $Z = 104$. Сплошные линии проведены через расчетные значения

В любом случае эти значения на много порядков величины выше тех значений $T_{s.f.}$ и T_{α} , которые предсказывались и подтверждены экспериментом для изотопов, расположенных вблизи деформированной нейтронной оболочки $N = 162$.

Могут ли существовать в природе сверхтяжелые элементы?

Приведенное выше, в качестве примера, ядро $^{288}_{104}$ будет, по всей вероятности, испытывать β^- -распад. Однако в процессе последовательных β^- -распадов парциальные периоды T_{β^-} образующихся ядер с $Z > 104$ будут возрастать вследствие приближения к линии β -стабильности. Другая ситуация с α -распадом и спонтанным делением. При наличии эффекта нейтронной оболочки $N = 184$ увеличение Z должно усиливать эффект протонной оболочки по мере приближения к $Z = 108$. Это обстоятельство должно привести к увеличению стабильности более тяжелых ядер относительно спонтанного деления в пределах $N = 180 + 184$. Наоборот, с ростом Z парциальные периоды ядер относительно α -распада будут уменьшаться.

Если наложить условие, что полное время жизни ядра должно быть $\geq 10^8$ лет, то круг возможных кандидатов сильно ограничивается областью Z от 106 до 108 и N от 180 до 184. Более детальные расчеты по макромикроскопической теории еще сильнее сузят эти границы, если не отвергнут целиком возможность существования столь стабильных нуклидов.

Однако, в любом случае, проблема поиска сверхтяжелых природных излучателей меняется коренным образом. Наиболее стабильным ядром будет не $E_{ka}Pb$, как предполагалось раньше, а нуклиды на $6 + 8$ атомных номеров ниже (область $E_{ka}W—E_{ka}Os$) с массой $A \sim 290$. Подобные ядра будут испытывать последовательные β^- - и α -распады с образованием новых ядер, удаляющихся от оболочки $N = 184$. Для четно-четных ядер подобная цепочка последовательных распадов должна окончиться спонтанным делением. Длина цепочек будет определяться конкуренцией между α - и β^- -излучением на всех ступенях распада. Для длинных цепочек не исключено, что конечно ядро, удаленное от оболочки $N = 184$, но все еще обладающее избытком нейтронов, будет испытывать ту моду деления, которая характеризуется узким симметричным распределением масс осколков, высокой кинетической энергией и малым числом нейтронов. Подобный тип деления был наблюден в области тяжелых актинидных ядер [28].

Постановка экспериментов по поиску сверхтяжелых элементов в природе

Постановка экспериментов по поиску сверхтяжелых элементов теперь будет сильно отличаться от ранее предпринятых опытов [11—16]. По сути задача сводится к поиску нового радиоактивного ряда, отличного от уже известных цепочек распада ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th . Основным признаком обнаружения этой цепочки будут последовательные α -распады и β -распады, которые могут закончиться спонтанным делением. В

качестве объектов исследования наиболее перспективными могут быть гомологи вольфрама, рения, осмия. Пока, не имея всех расчетных данных, предпочтение можно отдать EkaOs.

Измерительная аппаратура должна быть рассчитана на поиск редких событий α -распадов с эффективностью, близкой к 100%, с высоким энергетическим и пространственным разрешением. Если процессы химического обогащения Os и EkaOs одинаковы, то можно определить предельную чувствительность эксперимента по обнаружению радиоактивного распада EkaOs. Для исходного вещества Os весом 1 г (приготовленного в виде тонкого слоя $\sim 0,1$ мг/см²) обнаружение одного акта коррелированного распада в год (α - α - или s.f.-корреляции) будет соответствовать концентрации ядер EkaOs в образце на уровне $5 \cdot 10^{-14}$ при $T_{1/2} = 10^8$ лет.

Это соответствует распространенности EkaOs в земной коре на уровне $5 \cdot 10^{-22}$ г/г.

Поскольку массы ядер стабильного Os и гипотетического EkaOs отличаются в 1,5 раза, можно существенно повысить обогащение EkaOs и, соответственно, понизить предел обнаружения сверхтяжелого ядра. Возможно также увеличить чувствительный объем детектора и вес образца.

Заключение

1. Экспериментальные исследования последних лет по синтезу тяжелых элементов и расчеты макромикроскопической модели ядер предсказывают значительное повышение стабильности сверхтяжелых сферических ядер вблизи оболочки $N = 184$.

2. Не исключено, что в области трансактинидных элементов изотопы с массой ~ 290 могут обладать сверхвысокой стабильностью, сопоставимой с природными радиоактивными ядрами ($T_{1/2} \geq 10^8$ лет). Более определенные заключения о радиоактивных свойствах наиболее долгоживущего ядра и цепочек его распада могут быть сделаны на основе расчетов масс и вероятностей деления сверхтяжелых ядер с учетом эффекта ядерных оболочек. Экспериментальная проверка теоретических данных может быть осуществлена в экспериментах по синтезу и исследованию радиоактивных свойств изотопов 112 и 114 элементов с $N = 170 + 171$ и $174 + 175$, образующихся в реакциях слияния ядер ^{238}U и ^{244}Pu с ионами ^{48}Ca .

3. Возможность образования таких сверхтяжелых ядер в процессе нуклеосинтеза требует отдельного рассмотрения. Необходимы расчеты парциальных периодов $T_{s.f.}$ и T_{β} актинидных ядер с $Z = 98 + 102$ с $N = 184 + 190$.

4. Эксперименты по поиску сверхтяжелых природных ядер, по всей вероятности, должны быть нацелены на обнаружение последовательных α - и β -распадов, а также спонтанного деления.

Современные методы регистрации радиоактивного распада и детальный анализ событий дают возможность, в принципе, обнаружить новые излучатели в природных образцах вплоть до уровня их содержания $\sim 10^{-21}$ г/г в предположении, что их период полураспада составляет 10^8 лет.

Благодарности

Приношу благодарности моим коллегам д-рам И.Зваре, С.Дмитриеву, М.Иткису, Ю.Музычке и Б.Пустыльнику за ценные замечания при обсуждении данной работы.

Считаю своим приятным долгом поблагодарить д-ров Р.Смолянчука и А.Собичевского за интересные и плодотворные дискуссии о стабильности сверхтяжелых ядер.

Благодарю Е.Щукину за помощь в оформлении статьи.

Литература

1. Myers W.D., Swiatecki W.J. — Nucl. Phys., 1966, 81, p.1.
2. Myers W.D., Swiatecki W.J. — Ark. Phys., 1967, 36, p.343.
3. Nilsson S.G. et al. — Nucl. Phys., 1969, A131, p.1.
4. Brack M. et al. — Rev. Mod. Phys., 1972, 44, p.320.
5. Pashkevich V.V. — Nucl. Phys. A, 1971, 169, p.275.
6. Nix J.R. — Ann.Rev. Sci., 1972, 22, p.65.
7. Gareev F.A., Kalinkin B.N. — Phys. Lett., 1966, 22, p.500.
8. Meldner H. — Ark. Phys., 1967, 36, p.593.
9. Ю.А.Музычка, В.В.Пашкевич, В.М.Стругинский — ЯФ, 1968, 8, с.716.
10. Muzychka Yu.A. — Phys. Letters 28B, 1969, p.539.
11. Флеров Г.Н., Тер-Акопян Г.М., Скобелев Н.К. — ЯФ, 1974, 20, с.472.
12. Флеров Г.Н. и др. — ЯФ, 1977, 26, с.449.
13. Флеров Г.Н. и др. — Радиохимия, 1982, 24, с.782.
14. Dmitriev S.N. et al. — JINR Rapid Commun., N5(31)88, Dubna, 1988, p.13.
15. Flerov G.N., Ter-Akopian G.M. — Pure and Appl. Chem., 1981, 53, p.909.
16. Flerov G.N., Ter-Akopian G.M. — in Treatise on Heavy Ion Physics, Edit. D.A.Bromley, New York, Plenum Press, 1985, v.4, p.333.
17. Muenzenberg G. — Rep. Prog. Phys., 1988, 51, p.57.
18. Hofmann S. et al. — Z. Phys., 1995, A350, p.277.
19. Hofmann S. et al. — Z. Phys., 1996, A354, p.229.
20. Oganessian Yu.Ts. — Radiochim. Acta, 1984, 37, p.113.
21. Lazarev Yu.A. et al. — Phys. Rev. Lett., 1994, 73, p.624.
22. Lazarev Yu.A. et al. — Phys. Rev. Lett., 1995, 75, p.1903.
23. Lazarev Yu.A. et al. — Phys. Rev., 1996, 54, p.620.
24. Patyk Z., Sobiczewski A. — Nucl. Phys., 1991, A533, p.132.

25. Smolanczuk R., Skalsi J., Sobiczewski A. — *Phys. Rev.*, 1995, C52, p.1871.
26. Smolanczuk R., Sobiczewski A. — *Low Energy Nuclear Dynamics* (World Scientific, Singapore, 1995), p.313.
27. Smolanczuk R. — *Third Intern. Conf. on Dynamical Aspects of Nucl. Fission*, Casta-Papernicka, Slovak Rep. August 30 — Sept. 4, 1996. In press.
28. Hulet E.K. et al. — *Phys. Rev. C*, 1989, 40, p.770.