

На правах рукописи

ЧЕРНЫШЕВА  
Елена Владимировна

**Экспериментальное исследование процессов слияния-деления и квазиделения в реакциях ионов  $^{48}\text{Ca}$  с мишенями  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{248}\text{Cm}$  при энергиях вблизи кулоновского барьера**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2018

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова  
Объединенного института ядерных исследований.

**Научный руководитель:**

*Козулин Эдуард Михайлович*

кандидат физико-математических наук,  
Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института  
ядерных исследований,  
начальник сектора №5 «Динамика взаимодействия тяжелых ядер, деление  
тяжелых и сверхтяжелых ядер»

**Официальные оппоненты:**

*Еременко Дмитрий Олегович*

доктор физико-математических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова», Физический факультет, Кафедра физики атомного  
ядра и квантовой теории столкновений,  
профессор

*Грудзевич Олег Теофильевич*

доктор физико-математических наук, профессор,  
Акционерное общество «Государственный научный центр Российской  
Федерации – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского»,  
заместитель генерального директора,  
директор Отделения перспективных исследований

**Ведущая организация:**

Кафедра ядерно-физических методов исследования Санкт-Петербургского  
государственного университета

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года в «\_\_\_» часов на  
заседании диссертационного совета Д 720.001.06 на базе Объединенного  
института ядерных исследований (ОИЯИ) по адресу: 141980, Московская  
обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОИЯИ.  
Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

А. Г. Попеко

### Актуальность темы

Исследование конкуренции процессов слияния-деления и квазиделения в области ядер с  $Z > 100$  имеет большое значение для проведения экспериментов по синтезу новых сверхтяжелых ядер. В реакциях слияния дважды магических ионов  $^{48}\text{Ca}$  с актинидными мишенями в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ были получены новые сверхтяжелые ядра с атомными номерами  $Z = 114, 115, 116, 117, 118$  [1, 2]. Результаты этих экспериментов подтверждают существование предсказанного теорией острова стабильности сверхтяжелых элементов, обусловленного влиянием замкнутой нейтронной оболочки  $N = 184$  и замкнутой протонной оболочки в области  $Z = 114 - 126$ . Для получения сверхтяжелых ядер с  $Z > 101$  используются реакции полного слияния с тяжелыми ионами. Однако, как показали исследования [3, 4], с увеличением массы налетающих тяжелых ионов процесс слияния значительно подавляется конкурирующим процессом квазиделения, в котором образовавшаяся на стадии захвата составная система под действием кулоновских сил разделяется на фрагменты без образования составного ядра. Время протекания процесса квазиделения меньше, чем время слияния, образования составного ядра и его последующего деления. Поэтому экспериментально наблюдаются различия в таких характеристиках фрагментов слияния-деления и квазиделения, как их массово-угловые корреляции, дисперсия массовых распределений, угловая анизотропия. На конкуренцию процессов квазиделения и слияния-деления оказывают сильное влияние свойства входного канала реакции: кулоновский фактор  $Z_1Z_2$ , массовая асимметрия, деформация и взаимная ориентация сталкивающихся ядер, их магичность и отношение  $N/Z$ , а также вносимые в систему энергия и угловой момент.

Поскольку сечения образования сверхтяжелых ядер чрезвычайно малы (порядка нескольких пикобарн), чтобы найти оптимальные условия для экспериментов по синтезу сверхтяжелых ядер необходимо знать вклады процессов слияния-деления и квазиделения в сечение захвата. Свойства

процесса квазиделения широко изучаются в настоящее время, как в экспериментальных, так и теоретических работах. Теоретические расчеты [5] показывают, что на поверхности потенциальной энергии сверхтяжелых ядер существуют две глубокие долины, вызванные влиянием оболочечных эффектов и связанные с образованием в выходном канале реакции дважды магических ядер –  $^{208}\text{Pb}$  ( $Z = 82$ ,  $N = 126$ ) и  $^{132}\text{Sn}$  ( $Z = 50$ ,  $N = 82$ ). Первая долина соответствует асимметричному квазиделению  $\text{QF}_{\text{asym}}$  (или квазиделению первого рода  $\text{QF}_1$ ), где массовая асимметрия составляет  $\eta = (M_1 - M_2)/(M_1 + M_2) \sim 0.45$ , а вторая – симметричному квазиделению  $\text{QF}_{\text{sym}}$  (или квазиделению второго рода  $\text{QF}_2$ ), массовая асимметрия в которой равна  $\sim 0.1$ . Таким образом, для понимания механизмов реакций, ведущих к образованию сверхтяжелых ядер, необходимо изучение отличительных характеристик процессов слияния-деления, симметричного и асимметричного квазиделения. Эта информация крайне важна для планирования экспериментов по синтезу сверхтяжелых ядер и оценки возможности перехода к реакциям с более тяжелыми налетающими ионами для образования ядер тяжелее  $Z = 118$ .

**Целью работы** являлось исследование характеристик массовых и энергетических распределений делительно-подобных фрагментов в реакциях ионов  $^{48}\text{Ca}$  с мишенями  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{248}\text{Cm}$  при энергиях вблизи кулоновского барьера для получения метода разделения процессов деления и квазиделения. Также целью было изучение влияния свойств входного канала реакции (сферические и деформированные ядра, вносимая в систему энергия) на конкуренцию каналов слияния-деления и квазиделения для поиска оптимальных условий входного канала реакций, ведущих к образованию сверхтяжелых ядер.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Результаты измерений массово-энергетических распределений бинарных фрагментов и сечений захвата в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{248}\text{Cm}$  при энергиях вблизи кулоновского барьера.

2. Результаты анализа энергетических распределений фрагментов реакций  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{248}\text{Cm}$ , позволившего разделить каналы слияния-деления, симметричного и асимметричного квазиделения, оценить их вклады в сечение захвата и получить верхние оценки сечений слияния-деления  $\sigma_{\text{FF}}$ .
3. Получены вероятности слияния  $P_{\text{CN}}$ , выживания  $W_{\text{sur}}$ , а также величины барьеров деления образованных в реакциях с ионами  $^{48}\text{Ca}$  составных ядер  $^{254-256}\text{No}$ ,  $^{283-286}\text{Cn}$ ,  $^{289-292}\text{Fl}$  и  $^{293-296}\text{Lv}$  с использованием найденных сечений слияния-деления  $\sigma_{\text{FF}}$ .
4. Результаты исследования влияния оболочечных эффектов на формирование фрагментов деления и квазиделения в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{248}\text{Cm}$ .
5. Впервые обнаружено бимодальное деление ядра  $^{256}\text{No}$ , образованного в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$  при энергиях возбуждения  $E^* = 17-35$  МэВ.

### **Научная новизна работы**

Впервые были измерены массово-энергетические распределения и функции возбуждения фрагментов деления и квазиделения в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ . В реакциях взаимодействия ионов  $^{48}\text{Ca}$  с актинидными ядрами  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  на основе анализа энергетических распределений впервые было проведено разделение процессов слияния-деления, симметричного и асимметричного квазиделения, получена верхняя оценка сечения слияния-деления  $\sigma_{\text{FF}}$ , а также величина барьеров деления для ядер  $^{254-256}\text{No}$ ,  $^{283-286}\text{Cn}$ ,  $^{289-292}\text{Fl}$  и  $^{293-296}\text{Lv}$ . Впервые наблюдалось бимодальное деление  $^{256}\text{No}$ , полученного в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$  при энергиях возбуждения  $E^* = 17-35$  МэВ.

### **Практическая значимость работы**

Разработанные методы обработки и анализа экспериментальных данных могут применяться в экспериментах с использованием времяпролетной

методики, что позволит повысить надежность и точность измерений массово-энергетических распределений продуктов реакции и выделения различных каналов реакции. Полученные экспериментальные данные для реакций ионов  $^{48}\text{Ca}$  с ядрами  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{248}\text{Cm}$  при энергиях возбуждения  $E^* = 13\text{-}45$  МэВ, могут быть использованы для тестирования теоретических моделей, описывающих динамику слияния тяжелых ядер. Информация о конкуренции каналов слияния-деления и квазиделения в области сверхтяжелых ядер с  $Z = 102\text{-}116$ , образованных в реакциях с ионами  $^{48}\text{Ca}$ , может быть использована для оценки возможности перехода к реакциям слияния с более тяжелыми ионами, такими, как  $^{50}\text{Ti}$ ,  $^{54}\text{Cr}$  или экзотическими ядрами.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ, а также на совещаниях и конференциях:

- “Mass-energy distributions of fission fragments of superheavy nuclei produced in the reactions with  $^{48}\text{Ca}$  ions”, International Conference on Nuclear Physics at Border Lines, May 21-24, 2001, Lipari (Messina), Italy.
- “Competition in capture reactions in the superheavy region”, Workshop on forthcoming facilities at LNS: EXCYT and MAGNEX, 20th-22nd March 2003, Catania, Italy.
- “Shell effect manifestation in mass-energy distributions of fission and quasi-fission fragments of nuclei with  $Z = 102 - 122$ ”, International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2004), July 5-12, 2004, Peterhof, Russia.
- “From  $^{48}\text{Ca}$  to  $^{50}\text{Ti}$ -projectiles: the results of the experiment  $^{48}\text{Ca} + ^{246}\text{Cm} \rightarrow ^{294}116$  and  $^{50}\text{Ti} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{294}116$ ”, Third SANDANSKI Coordination Meeting on Nuclear Science, 26–30 September, 2005, Albena, Bulgaria.
- “The study of fusion-fission and quasi-fission processes in the reactions  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ”, International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2016), September 5-10, 2016, Kazan, Russia.

- “The influence of the spectrometer time-angular resolution and physical factors on the mass-energy resolution obtained in 2V-method”, International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2016), September 5-10, 2016, Kazan, Russia.
- ”Исследование процессов слияния-деления и квазиделения в реакциях ионов  $^{48}\text{Ca}$  с мишенями  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ”, Семинар физических секторов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, 27 апреля 2018.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она содержит 135 страниц машинописного текста и включает в себя 6 таблиц, 40 рисунков и библиографический список литературы из 160 наименований.

**Во Введении** рассматривается научная проблема, решению которой посвящена диссертация, обоснована ее актуальность, сформулирована цель работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также изложено содержание диссертации по главам.

**В первой главе** приведен обзор литературы по теме диссертации. Представлена классификация процессов, протекающих в реакциях с тяжелыми ионами. Рассмотрены реакции горячего и холодного слияния, ведущие к образованию трансфермиевых ядер, показана конкуренция между каналами слияния-деления и квазиделения в данной области ядер.

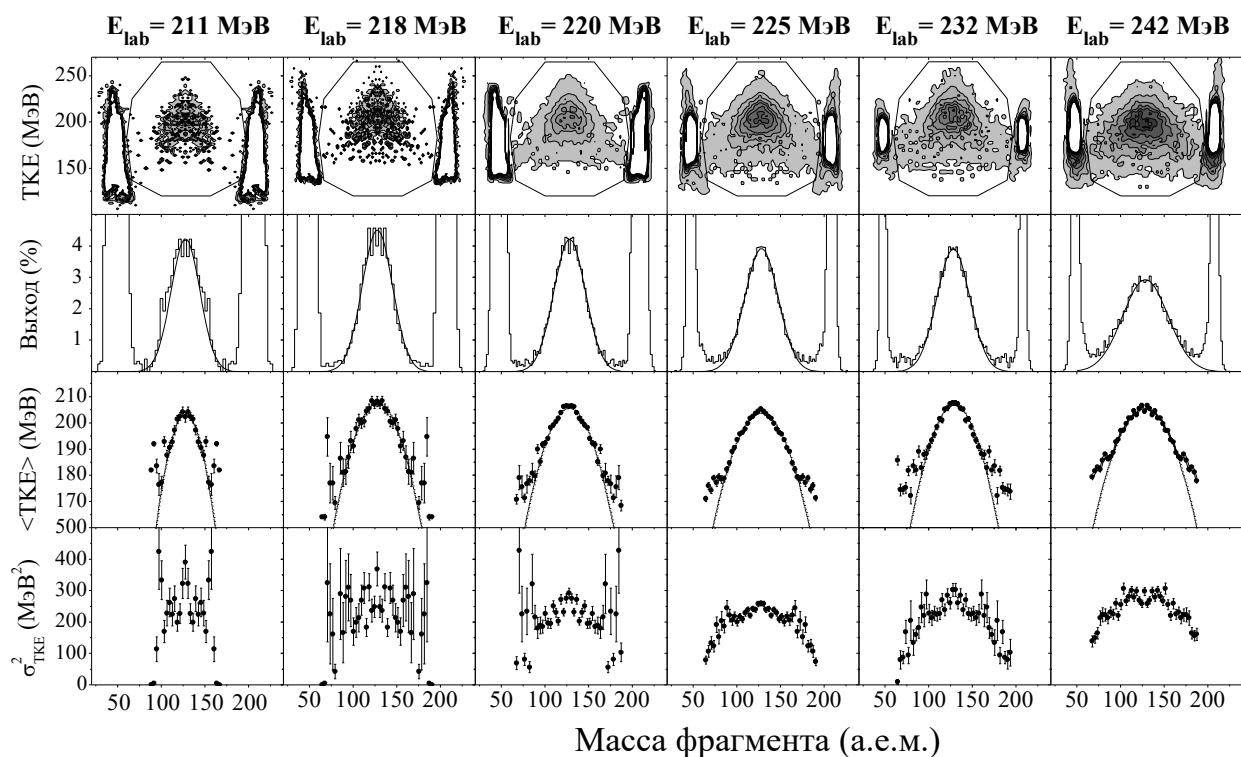
**Во второй главе** описаны основные методы регистрации фрагментов деления/квазиделения, применяемые в современных ядерно-физических экспериментах. Показано, что для детального исследования массово-энергетических распределений (МЭР) фрагментов и анализа их структурных особенностей необходимо проводить измерения с хорошим массовым и энергетическим разрешением, которое может быть достигнуто в методе измерения двух скоростей 2V при использовании детекторов на основе микроканальных пластин.

Представлена установка CORSET, на которой в реакциях с тяжелыми ионами методом измерения двух времен пролета  $ToF_1-ToF_2$  получены массово-энергетические распределения фрагментов и сечения захвата. Приведены схемы стартовых и стоповых детекторов на основе микроканальных пластин. Описана калибровка спектрометрических трактов и настройка детекторов. Оценены массовое и энергетическое разрешения времяпролетного спектрометра CORSET.

**В третьей главе** описан алгоритм обработки экспериментальных данных, включающий в себя сортировку от случайных совпадений, получение массово-энергетических распределений фрагментов, выделение бинарного канала реакции, нормировку полученных двумерных матриц (ТКЕ, М) на геометрическую эффективность регистрации спектрометра, получение сечений захвата.

**В четвертой главе** приведены результаты измерений МЭР фрагментов и сечений захвата реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{256}\text{No}$  при энергиях вблизи кулоновского барьера. Эксперименты проводились в Лаборатории ядерных реакций им. Флерова в Дубне на ускорителе У-400 при энергиях пучка ионов  $^{48}\text{Ca}$   $E_{\text{lab}} = 206, 211, 218, 225, 232, 234, 240$  и  $242$  МэВ. При изготовлении мишеней изотопа  $^{208}\text{Pb}$  ( $180-270$  мкг/см<sup>2</sup>) напылялись на углеродные пленки толщиной  $50$  мкг/см<sup>2</sup>. На Рис. 1 показаны массово-энергетические распределения продуктов реакции для энергий  $E_{\text{lab}} = 211 - 242$  МэВ. Сверху вниз показаны двумерные матрицы (ТКЕ, М), массовые выходы, нормированные для делительно-подобных фрагментов с массами  $60$  а.е.м.  $< M < 196$  а.е.м. на  $200\%$ , зависимости средней полной кинетической энергии  $\langle \text{ТКЕ} \rangle (M)$  и дисперсии  $\sigma_{\text{ТКЕ}}^2 (M)$ . Продукты реакции с массами, близкими к массам налетающего иона и ядер мишени  $A_{p,t} \pm 10$  а.е.м., представляют собой события упругого, квазиупругого и глубоко-неупругого рассеяния.



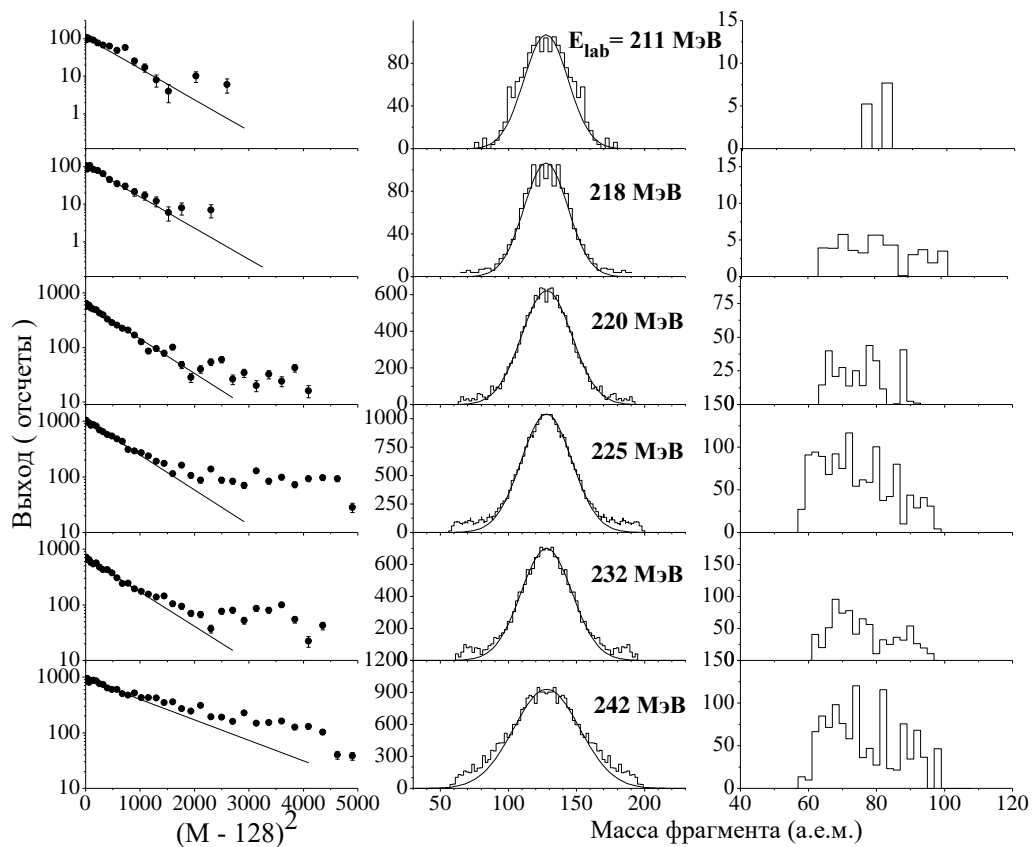


**Рис. 1.** Сверху-вниз: двумерные распределения бинарных продуктов реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ ; массовые выходы, нормированные для фрагментов ( $60 \text{ а.е.м.} < M < 196 \text{ а.е.м.}$ ) на 200%; зависимости  $\langle \text{TKE} \rangle(M)$  и  $\sigma_{\text{TKE}}^2(M)$  для делительно-подобных осколков, выделенных контурами на матрицах  $(\text{TKE}, M)$ .

Массово-энергетические распределения делительно-подобных осколков (фрагментов деления и квазиделения), выделены контурами на матрицах  $(\text{TKE}, M)$ . Массовые распределения фрагментов при  $E_{\text{lab}} = 225\text{--}242 \text{ МэВ}$  в области симметричного деления по форме близки к распределениям Гаусса (показаны тонкой линией), а зависимости средней кинетической энергии от массы  $\langle \text{TKE} \rangle(M)$  близки к параболическим (пунктирные линии). Такое поведение вышеуказанных характеристик фрагментов типично для деления нагретых ядер и находится в согласии с предсказаниями модели жидкой капли [6]. В то же время повышенный массовый выход наблюдается для масс легких фрагментов  $60 \text{ а.е.м.} < M_L < 90 \text{ а.е.м.}$  и соответствующих им масс тяжелых фрагментов.

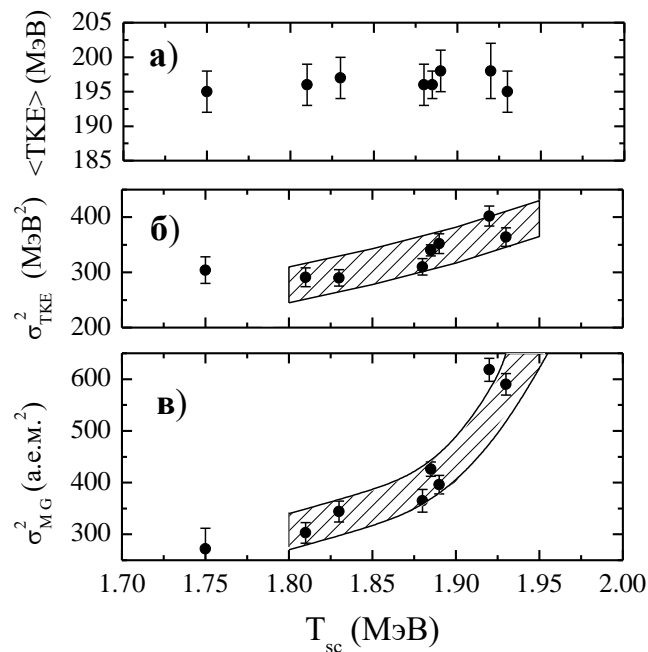
Для того чтобы получить характеристики симметричного деления составного ядра  $^{256}\text{No}$ , мы аппроксимировали экспериментальные массовые распределения фрагментов гауссианами (G) (Рис. 1, 2). На Рис. 2 слева

показаны массовые распределения в логарифмическом масштабе как функции от параметра  $(M - A_{CN}/2)^2$ , где  $A_{CN}$  – масса составного ядра. В выбранных координатах гауссиан является линейной функцией, и, начиная приблизительно с  $(M - 128)^2 \approx 900 - 1000$  ( $M_L \approx 100$  а.е.м.), экспериментальные значения отклоняются от гауссианов, достаточно хорошо описывающих начальную часть шкалы. В центре Рис. 2 те же массовые распределения фрагментов и гауссианы показаны в линейном масштабе. Выходы квазиделительной компоненты для легких фрагментов показаны на Рис. 2 справа. Они были получены как разность между экспериментальными выходами фрагментов и функциями Гаусса, описывающими симметричное деление:  $Y_{QF}(M) = Y_{exp}(M) - Y_G(M)$ .



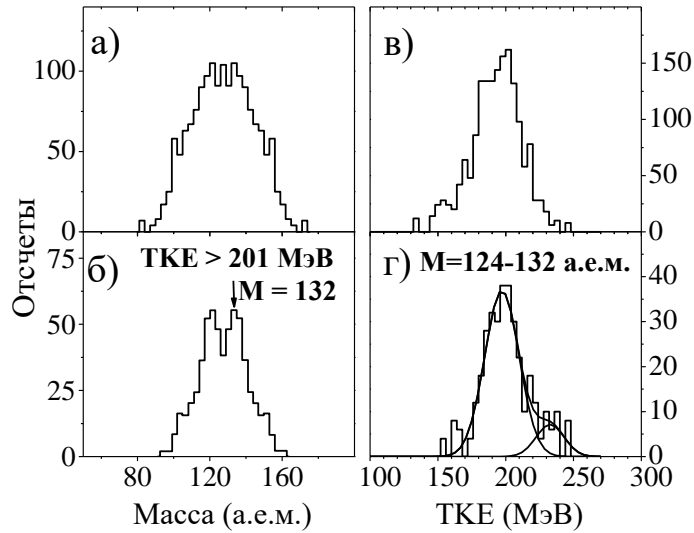
**Рис.2.** Слева – массовые выходы фрагментов (черные кружки) в логарифмическом масштабе в зависимости от параметра  $(M - A_{CN}/2)^2$  и аппроксимация их гауссианами (линии). В центре – массовые выходы в линейном масштабе и их описание теми же гауссианами, которые показаны слева. Справа – выход легких фрагментов квазиделения.

На Рис. 3 показаны экспериментальные зависимости дисперсии массового распределения  $(\sigma_M^2)_G$ , средней полной кинетической энергии  $\langle \text{ТКЕ} \rangle$  и дисперсии  $\sigma_{\text{ТКЕ}}^2$  от температуры ядра в точке разрыва  $T_{sc}$ . Хорошо видно, что  $\langle \text{ТКЕ} \rangle$  в пределах экспериментальных ошибок не зависит от  $T_{sc}$  (возбуждения) (Рис. 3а), что характерно для деления нагретых тяжелых ядер. Дисперсия  $\sigma_{\text{ТКЕ}}^2$  (Рис. 3б) для  $T_{sc} \geq 1.83$  МэВ растет пропорционально  $T_{sc}$ . Заштрихованный участок значений  $\sigma_{\text{ТКЕ}}^2$  показывает область изменений дисперсии, характерную для деления нагретых тяжелых ядер. Эта область была определена в работе [7] для деления ядер, образованных в реакциях с тяжелыми ионами с массой  $A_i < 26$  а.е.м. с учетом возрастания  $\sigma_{\text{ТКЕ}}^2$  с увеличением углового момента  $l$ . Для температуры  $T_{sc} = 1.82$  МэВ ( $E_{\text{lab}} = 218$  МэВ) значения дисперсии  $\sigma_{\text{ТКЕ}}^2$  не уменьшаются, а для  $T_{sc} = 1.75$  МэВ ( $E_{\text{lab}} = 211$  МэВ) она даже возрастает. Это указывает на проявление оболочечных эффектов в МЭР осколков достаточно низкоэнергетического деления  $^{256}\text{No}$ .



**Рис.3.**  $\langle \text{ТКЕ} \rangle$ ,  $\sigma_{\text{ТКЕ}}^2$  и  $(\sigma_M^2)_G$  для реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$  как функции температуры ядра в точке разрыва  $T_{sc}$ . Заштрихованные области показывают области изменения дисперсий  $\sigma_{\text{ТКЕ}}^2$  и  $(\sigma_M^2)_G$  для деления нагретых ядер.

Заштрихованная часть Рис. 3в соответствует области изменения дисперсии масс  $(\sigma_M^2)_G$  для деления нагретых ядер. Для температуры  $T_{sc} = 1.92-1.93$  МэВ ( $E_{lab} = 240 - 242$  МэВ) увеличение дисперсии находится вблизи, но за пределами того, что можно ожидать для деления составного ядра. Это связано с увеличением вклада квазиделительной компоненты в массовом распределении фрагментов вследствие массового дрейфа продуктов квазиделения к симметрии с ростом энергии столкновения. Таким образом, характеристики МЭР осколков деления  $^{256}\text{No}$  для области симметричных масс  $100 \text{ а.е.м.} < M < 156 \text{ а.е.м.}$  для энергий  $E_{lab} = 220-234$  МэВ, близки по свойствам к делению составного ядра. Тем не менее, некоторые отклонения от характеристик деления нагретых ядер наблюдаются в распределении дисперсий  $\sigma_{TKE}^2(M)$  в области масс  $M = 115-141$  а.е.м. для всех изученных энергий (Рис. 1) и в массовых выходах фрагментов при  $E_{lab} = 211$  и  $218$  МэВ. Форма массовых распределений при этих энергиях отличается от гауссиана (Рис. 1, 2): видны плоские структурированные вершины с массой тяжелого фрагмента  $M_H \approx 128-135$  а.е.м. При энергии столкновения  $E_{lab} = 211$  МэВ наблюдается увеличенный выход фрагментов по сравнению с гауссообразной формой распределения в области масс  $M_H = 145-155$  а.е.м. Отличие МЭР фрагментов от жидкокапельной формы обусловлено проявлением оболочечных эффектов в низкоэнергетическом делении  $^{256}\text{No}$ . На Рис. 4 показаны полное и дифференциальное массовые (слева) и энергетические (справа) распределения фрагментов для энергии пучка  $E_{lab} = 211$  МэВ. Для  $TKE > 201$  МэВ (Рис. 4б) в области масс тяжелых осколков  $M_H = 131-135$  а.е.м. явно видна двугорбая структура, подобная той, что наблюдалась в спонтанном делении  $^{259}_{103}\text{Lr}$  [8]. Распределение ТКЕ показано на Рис. 4в для всех масс фрагментов и на Рис. 4г – для области симметричных масс  $M = 124-132$  а.е.м.



**Рис. 4.** Слева – массовые распределения фрагментов реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$  при  $E_{\text{lab}} = 211$  МэВ для всех фрагментов (а) и для фрагментов с ТКЕ  $> 201$  МэВ (б). Справа – распределения ТКЕ для всех фрагментов (в) и для области симметричных масс  $M = 124-132$  а.е.м. (г).

Видно, что для симметричных фрагментов распределение ТКЕ состоит из двух компонент: низкоэнергетической с  $\langle \text{ТКЕ} \rangle_{\text{low}} \sim 200$  МэВ, и высокоэнергетической с  $\langle \text{ТКЕ} \rangle_{\text{high}} \sim 233$  МэВ. Эти значения ТКЕ, так же как и массовые выходы соответствуют согласно классификации Брозы [9] модам Standard и Super Short (SS) для спонтанного деления сверхтяжелых ядер. Минимальный вклад SS-моды оценивался по отношению высокоэнергетической компоненты в энергетическом распределении для масс  $M = 124-132$  а.е.м (Рис. 4г) к полному выходу фрагментов (Рис. 4в). В настоящей работе показано, что это отношение составляет  $\approx 2.5\%$  для энергии  $E_{\text{lab}} = 211$  МэВ,  $\approx 1.7\%$  для  $E_{\text{lab}} = 218$  МэВ и снижается до  $\approx 0.3\%$  для  $E_{\text{lab}} = 234$  МэВ.

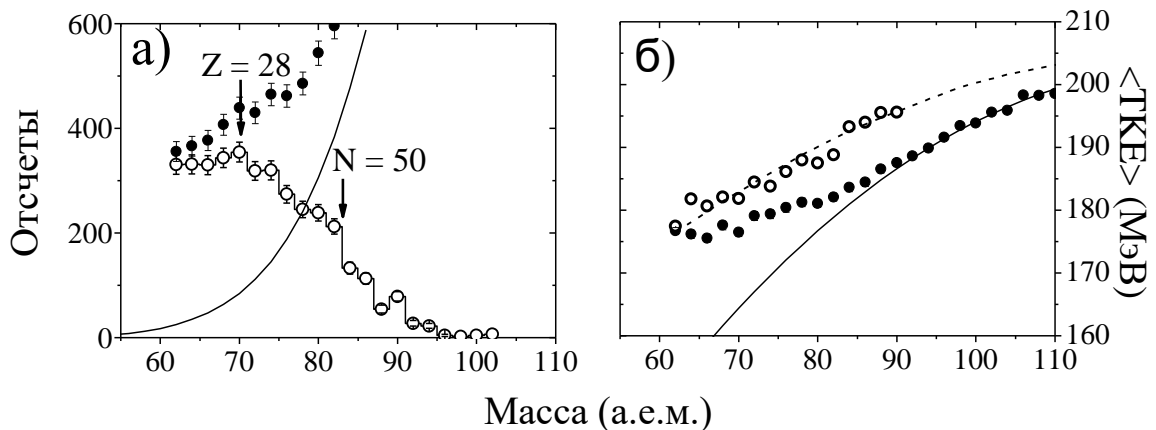
Как было показано на Рис. 2, квазиделение в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$  проявляется в области масс легких фрагментов  $M_L \sim 60-90$  а.е.м. и соответствующих им масс тяжелых фрагментов. На Рис. 5а показаны массовые распределения легких фрагментов квазиделения для энергий пучка ионов  $E_{\text{lab}} = 234$  МэВ, их энергетические зависимости  $\langle \text{ТКЕ} \rangle(M)$  приведены на Рис. 5б. Полная кинетическая энергия фрагментов квазиделения вычислялась по формуле:

$$\langle \text{ТКЕ}_{\text{QF}} \rangle = [\langle \text{ТКЕ}_{\text{exp}} \rangle - \langle \text{ТКЕ}_{\text{FF}} \rangle \cdot (Y_{\text{FF}}/Y_{\text{exp}})] / (Y_{\text{QF}}/Y_{\text{exp}}) \quad (1)$$

здесь подразумевается зависимость всех величин от массы,  $Y_{QF}$  – выход фрагментов квазиделения,  $Y_{FF}$  – выход фрагментов деления,  $Y_{exp}$  – полный экспериментальный выход фрагментов, ТКЕ – средняя полная кинетическая энергия фрагментов. Экспериментальная зависимость  $\langle \text{ТКЕ} \rangle (M)$  на Рис. 5 описывалась уравнением из работы [10]:

$$\langle \text{ТКЕ} \rangle (M) = \langle \text{ТКЕ}_{A/2} \rangle (1 - \eta^2)(1 + \rho \eta^2), \quad \eta = (M - A_{CN}/2)/(A_{CN}/2), \quad (2)$$

где  $\eta$  – параметр масс-асимметричной деформации,  $\rho$  – эмпирический параметр, описывающий степень отклонения экспериментальных значений  $\langle \text{ТКЕ} \rangle (M)$  от параболической зависимости, полученной в жидкокапельной модели [6], где  $\rho = 0$ . Видно, что средняя полная кинетическая энергия квазиделения  $\langle \text{ТКЕ}_{QF} \rangle$  выше для масс  $M_L \approx 60-90$  а.е.м на 7 - 15 МэВ, чем  $\langle \text{ТКЕ}_{FF} \rangle$  для слияния-деления, и также имеет параболическую зависимость от массы фрагмента. Такие свойства МЭР фрагментов квазиделения, как увеличенный массовый выход и более высокую кинетическую энергию  $\langle \text{ТКЕ} \rangle$  для области масс  $60 \text{ а.е.м.} < M_L < 90 \text{ а.е.м.}$  (Рис. 1 и 5), можно объяснить проявлением оболочечных эффектов.



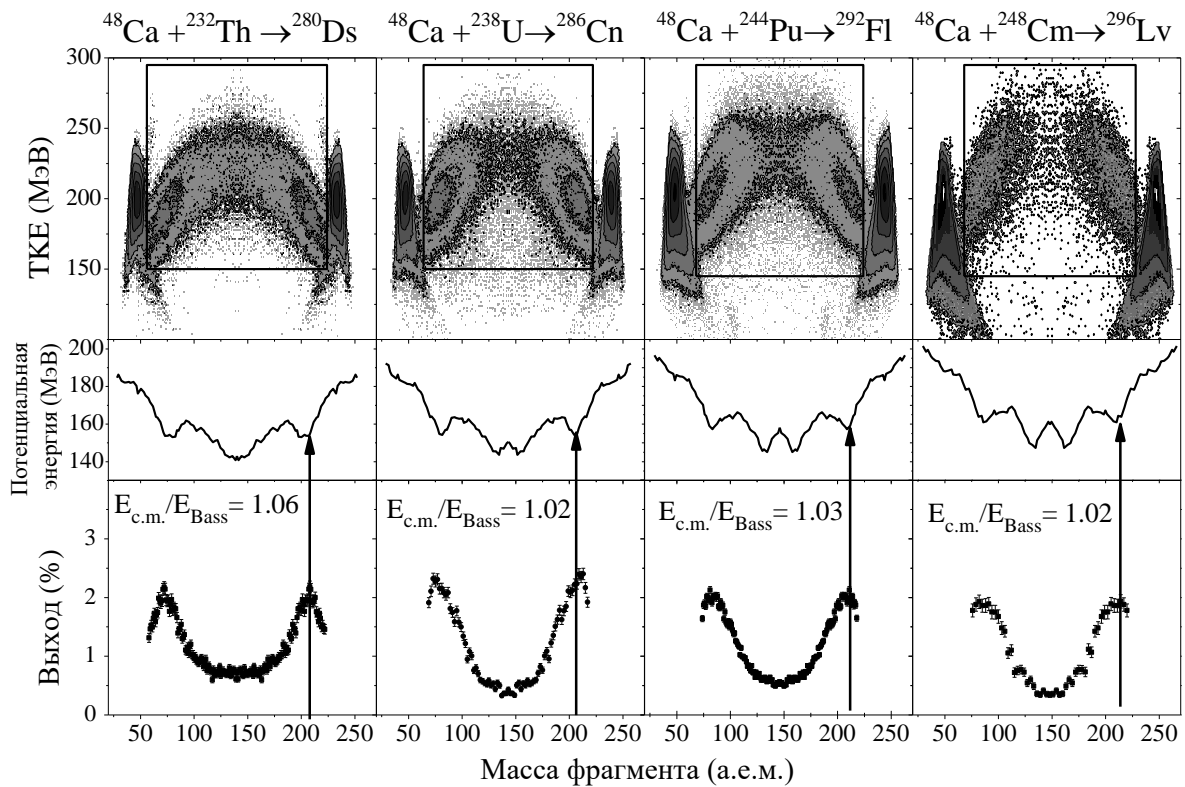
**Рис. 5.** а) Массовые выходы квазиделительной компоненты легкого фрагмента показаны для  $E_{lab} = 234$  МэВ открытыми кружками; черные кружки – экспериментальные массовые выходы. Линия – гауссиан, описывающий симметричное деление  $^{256}\text{No}$ . б) экспериментальные значения  $\langle \text{ТКЕ}_{exp} \rangle (M)$  (черные кружки) и  $\langle \text{ТКЕ}_{QF} \rangle (M)$  для квазиделительной компоненты (открытые кружки); сплошной линией показано описание параболой  $\langle \text{ТКЕ}_{FF} \rangle$  фрагментов симметричного деления, пунктирной линией –  $\langle \text{ТКЕ}_{QF} \rangle$  фрагментов квазиделения.

Стрелками на Рис. 5а показано положение замкнутых оболочек  $Z = 28$  и  $N = 50$ , вычисленное в предположении о неизменной зарядовой плотности. В данной реакции только положение легких квазиделительных фрагментов отвечает замкнутым оболочкам. Ответные тяжелые фрагменты имеют массы  $M \sim 160-190$  а.е.м. и не являются магическими ядрами, поэтому вклад квазиделительной компоненты в сечение захвата для данной реакции относительно мал и не превышает для измеренных энергий 15%.

**В пятой главе** приведены результаты измерений МЭР продуктов реакций ионов  $^{48}\text{Ca}$  на актинидных мишенях  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{248}\text{Cm}$ . Эксперименты были выполнены на циклотроне У-400 ЛЯР ОИЯИ при энергии пучка ионов  $^{48}\text{Ca}$   $E_{\text{lab}} = 226 - 244$  МэВ. Мишени из  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ , и  $^{248}\text{Cm}$  толщиной 180 - 220 мкг/см<sup>2</sup> изготавливались методом напыления изотопов на углеродные пленки толщиной 40 - 50 мкг/см<sup>2</sup>. Мишень  $^{248}\text{Cm}$  (125 мкг/см<sup>2</sup>) была сделана на подложке  $^{27}\text{Al}$  толщиной (20 мкг/см<sup>2</sup>) и покрыта с обеих сторон углеродом  $^{12}\text{C}$  (40 мкг/см<sup>2</sup>).

В отличие от сферического ядра  $^{208}\text{Pb}$ , ядра-актиниды  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  сильно деформированы. Известно, что конкуренция каналов слияния-деления и квазиделения зависит от взаимной ориентации деформированных ядер во входном канале реакции [11]. Компактная конфигурация во входном канале реакции, когда ядра сталкиваются "бок-к-боку", повышает вероятность слияния, а вытянутая конфигурация, когда ядра сталкиваются "нос-к-носу", приводит к квазиделению. На Рис. 6 приведены массово-энергетические распределения бинарных фрагментов, полученных в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{248}\text{Cm}$  при энергиях вблизи кулоновского барьера. МЭР всех исследуемых реакций подобны: доминирующим каналом является асимметричное квазиделение  $QF_{\text{asym}}$  с характерной структурой в форме двух квазиделительных локусов с массой тяжелого фрагмента вблизи дважды магического свинца  $M_{\text{H}} = 208$  а.е.м., однако в области масс  $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$  а.е.м. присутствуют также фрагменты симметричного квазиделения  $QF_{\text{sym}}$  и слияния-деления. Снизу на Рис. 6 показаны массовые

распределения делительно-подобных фрагментов, просуммированные по всем кинетическим энергиям и нормированные на 200 %. Массовые распределения для этих реакций имеют асимметричную двугорбую форму с массой легкого квазиделительного фрагмента  $M_L \approx 55 - 115$  а.е.м. и тяжелого фрагмента  $M_H \approx 170 - 230$  а.е.м. В центре Рис. 6 линиями показаны драйвинг-потенциалы в зависимости от массы фрагмента, вычисленные с помощью сетевой базы знаний по ядерной физике низких энергий NRV [12] в адиабатическом приближении с использованием потенциала короткодействующих сил. При формировании массовых выходов продуктов квазиделения определяющую роль играет оболочка дважды-магического свинца в тяжелом фрагменте ( $Z = 82, N = 126$ ).

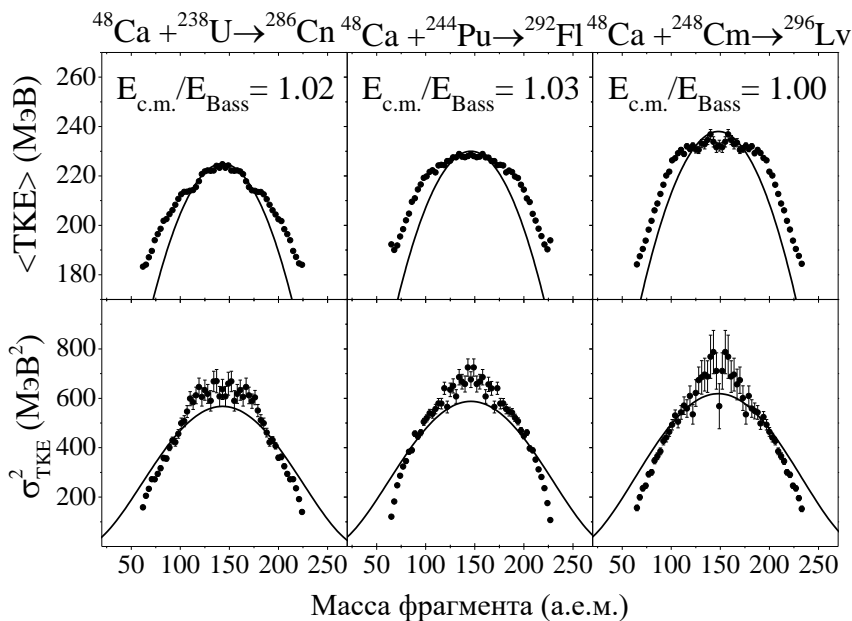


**Рис. 6.** Сверху – массово-энергетические распределения бинарных продуктов реакций  $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{248}\text{Cm}$ ; в центре – потенциальные энергии в контактной конфигурации, снизу – экспериментальные массовые распределения делительно-подобных фрагментов при энергиях вблизи кулоновского барьера, вычисленного в модели Басса [13].



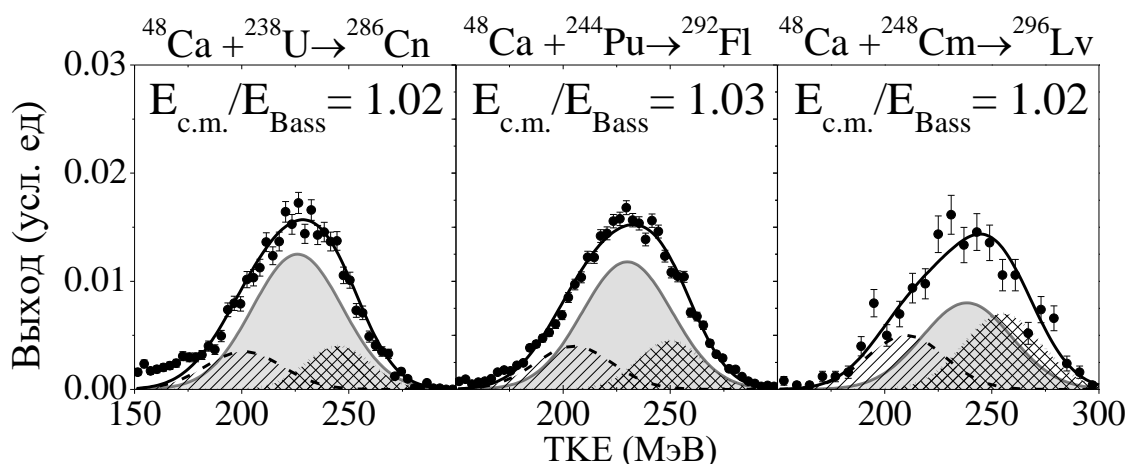
При этом максимум квазиделительного пика смещается от 206 а.е.м в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$  к 211-212 а.е.м. для реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ , что объясняется влиянием замкнутых оболочек  $Z=28$  и  $N=50$  в легком фрагменте. Расчеты драйвинг-потенциала показывают, что положение его минимума смещается от 208 а.е.м. в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$ , к 211 а.е.м. в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ , что соответствует положению пиков в экспериментальных массовых распределениях  $QF_{\text{asym}}$  (стрелки на Рис. 6).

На Рис. 7 показаны измеренные экспериментальные значения  $\langle \text{TKE} \rangle (M)$  и  $\sigma_{\text{TKE}}^2 (M)$  для реакций ионов  $^{48}\text{Ca}$  на мишенях  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{248}\text{Cm}$  при энергиях вблизи кулоновского барьера. Линиями на Рис. 7 показаны расчеты  $\langle \text{TKE} \rangle (M)$  и  $\sigma_{\text{TKE}}^2 (M)$  в рамках жидкокапельной модели [6]. Видно, что  $\langle \text{TKE} \rangle$  симметричных фрагментов реакций  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  хорошо аппроксимируется параболической зависимостью, характерной для деления нагретых ядер, в то время как в реакции на ядре  $^{248}\text{Cm}$  наблюдаются структурные особенности и  $\langle \text{TKE} \rangle$  ниже предсказанных значений. Для масс  $M_H = 200-210$  а.е.м. экспериментальные значения  $\langle \text{TKE} \rangle (M)$  на 10-15 МэВ выше, чем расчеты в рамках жидкокапельной модели для всех представленных реакций.



**Рис. 7.**  $\langle \text{TKE} \rangle (M)$  (сверху) и  $\sigma_{\text{TKE}}^2 (M)$  (снизу) для делительно-подобных фрагментов, образованных в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  при энергиях вблизи барьера Басса.

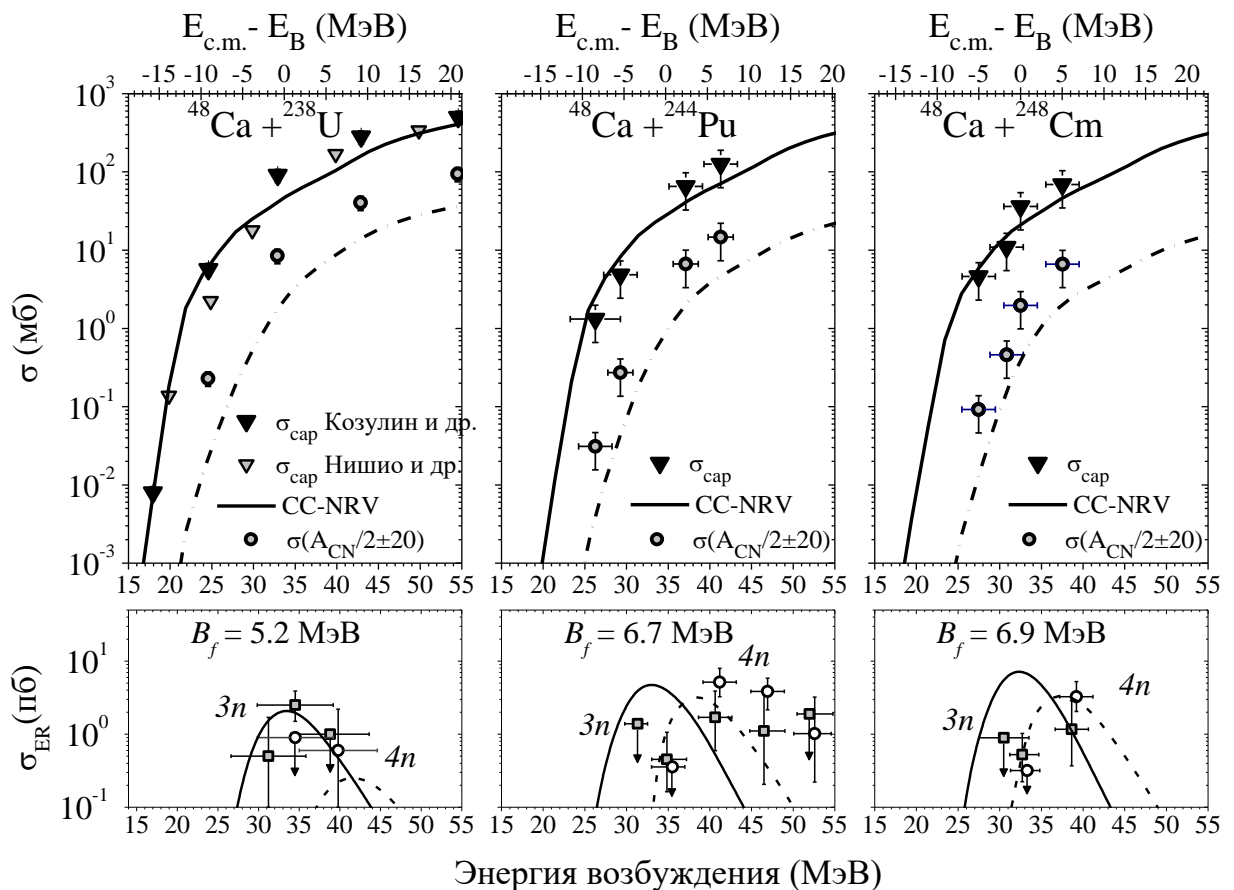
Отклонение характеристик от жидкокапельной модели также проявляется в распределении дисперсий  $\sigma_{\text{TKE}}^2$  (М). Как было показано в работе [14] в реакциях с тяжелыми ионами, ведущих к образованию Hs, дисперсия  $\sigma_{\text{TKE}}^2$  (М) меньше для процесса квазиделения, чем для процесса деления, что также наблюдается для фрагментов асимметричного квазиделения реакций  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  (Рис.7 снизу). При этом увеличение дисперсии  $\sigma_{\text{TKE}}^2$  (М) для симметричных фрагментов может указывать на присутствие нескольких процессов с различной энергией  $\langle \text{TKE} \rangle$ . Высокостатистические измерения МЭР фрагментов реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$  при энергии  $E_{\text{lab}} = 232$  МэВ [15] показали, что распределение ТКЕ для фрагментов с массами  $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$  а.е.м. имеет сложную структуру и состоит из трех компонент. Одна из них соответствует делению составного ядра, вторая – симметричному квазиделению  $\text{QF}_{\text{sym}}$  (высокоэнергетическая компонента), а третья обусловлена массовым дрейфом фрагментов асимметричного квазиделения  $\text{QF}_{\text{asym}}$  (низкоэнергетическая компонента). Поэтому в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  в области масс  $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$  а.е.м. мы рассматривали распределения ТКЕ как сумму трех гауссианов, соответствующих делению составного ядра, а также симметричному и асимметричному квазиделению (Рис. 8).



**Рис. 8.** Распределения ТКЕ фрагментов с массами  $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$  а.е.м. для реакций  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{248}\text{Cm}$ . Заполненная область соответствует распределению ТКЕ для деления составного ядра. Заштрихованные области соответствуют асимметричному (низкоэнергетическая компонента) и симметричному (высокоэнергетическая компонента) квазиделению.

Значения  $\langle \text{TKE} \rangle$  и  $\sigma_{\text{TKE}}^2$  для делительной компоненты были получены из систематик для деления нагретых ядер [16] и [7], соответственно.

Проведенный анализ энергетических распределений в области симметричных масс  $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$  а.е.м. позволяет оценить сечения слияния-деления  $\sigma_{\text{FF}}$  и вероятность слияния  $P_{\text{CN}}$ . Сечение образования испарительных остатков в рассматриваемых реакциях составляет приблизительно несколько пикобарн [2] и дает незначительный вклад в сечение слияния. Вероятность слияния  $P_{\text{CN}}$  оценивалась как отношение числа событий, соответствующих делению составного ядра, к числу всех делительно-подобных фрагментов.



**Рис. 9.** Сверху: треугольники – сечения делительно-подобных фрагментов в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$  вместе с данными из [15, 17],  $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ ,  $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ . Сплошные линии – вычисления методом связанных каналов [12], кружки – сечения фрагментов с массами  $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$  а.е.м., пунктирные линии с точками – оценки сечений слияния-деления  $\sigma_{\text{FF}}$ . Снизу: функции возбуждения для  $3n$  (квадраты) и  $4n$  (круги) испарительных каналов реакции из работы [2]. Сплошными и пунктирными линиями показаны сечения испарительных остатков для  $3n$  и  $4n$ -каналов, вычисленные по полученным в настоящей работе сечениям слияния-деления  $\sigma_{\text{FF}}$ .

На Рис. 9 сверху показаны сечения захвата  $\sigma_{\text{cap}}$  вместе с выполненными в коде NRV [12] вычислениями методом связанных каналов, сечения образования фрагментов с массами  $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$  а.е.м. и полученные из анализа энергетических распределений сечения слияния-деления  $\sigma_{\text{FF}}$ . Снизу показаны сечения образования испарительных остатков, измеренные в ЛЯР ОИЯИ [2]. Из отношения сечений образования испарительных остатков  $\sigma_{\text{ER}}$  и сечений слияния-деления  $\sigma_{\text{FF}}$  были оценены выживаемости составных ядер  $W_{\text{sur}}$  и в рамках модели Ферми-газа [18] вычислены величины их барьеров деления  $V_f$ . Поскольку сечения  $\sigma_{\text{FF}}$  представляют собой верхние пределы сечений слияния-деления, можно получить только нижние пределы барьеров деления ядер. Они составляют 5.9 МэВ для  $^{254-256}\text{No}$ , 5.2 МэВ для  $^{283-286}\text{Cn}$ , 6.7 МэВ для  $^{289-292}\text{Fl}$  и 6.9 МэВ для  $^{293-296}\text{Lv}$ .

**В заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертации:

Измерены массово-энергетические распределения фрагментов и сечения захвата  $\sigma_{\text{cap}}$  для реакций дважды-магических ионов  $^{48}\text{Ca}$  на мишенях  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  при энергиях вблизи кулоновского барьера ( $E^* = 13-45$  МэВ).

Установлено, что основным каналом реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$  является процесс слияния-деления, в то время как для реакций  $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  основным каналом реакции является асимметричное квазиделение.

Обнаружено, что в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$  квазиделение проявляется в области масс легких фрагментов  $M_L \sim 60-90$  а.е.м. и соответствующих им масс тяжелых фрагментов  $M_H \sim 166-196$  а.е.м. Вклад квазиделения в сечение захвата составляет  $\approx 15\%$  при  $E_{\text{lab}} = 242$  МэВ и уменьшается с понижением энергии столкновения. Основную роль в формировании квазиделительных фрагментов играют магические оболочки в легком фрагменте с  $Z = 28$ ,  $N = 50$ .  $\langle \text{TKE}_{\text{QF}} \rangle$  для квазиделения в области масс  $M_L \approx 60-90$  а.е.м. в данной реакции выше на 7-15 МэВ, чем  $\langle \text{TKE}_{\text{FF}} \rangle$  для слияния-деления.

В работе показано, что для квазиделительного процесса в реакциях с ионами  $^{48}\text{Ca}$  на актинидных мишенях характерны широкие двугорбые массовые распределения с пиком тяжелого квазиделительного фрагмента в области дважды магического свинца ( $M_H \approx 208$  а.е.м.), обусловленные влиянием замкнутых оболочек  $Z=82$  и  $N=126$  в тяжелом фрагменте и  $Z=28$ ,  $N=50$  в легком фрагменте. Обнаружено, что  $\langle \text{TKE}_{\text{QF}} \rangle$  для квазиделения в области асимметричных масс  $M_L \approx 60-80$  а.е.м. и  $M_H \approx 200-220$  а.е.м., выше на 10-15 МэВ, чем  $\langle \text{TKE}_{\text{FF}} \rangle$  для слияния-деления.

Установлено, что, несмотря на доминирующую роль асимметричного квазиделения в реакциях ионов  $^{48}\text{Ca}$  с актинидными мишенями, в области симметричных масс ( $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$  а.е.м.) присутствуют также фрагменты слияния-деления и симметричного квазиделения. В качестве метода разделения процессов деления и квазиделения использовался анализ энергетических распределений фрагментов, позволивший получить верхние оценки сечений слияния-деления  $\sigma_{\text{FF}}$ . Показано, что в этих реакциях значительная часть фрагментов с массами  $M = A_{\text{CN}}/2 \pm 20$  а.е.м. по энергетическим характеристикам соответствует процессу слияния-деления. Были получены оценки сечений слияния-деления  $\sigma_{\text{FF}}$ , вероятности слияния  $P_{\text{CN}}$ , вероятности выживания  $W_{\text{sur}}$  и нижние пределы барьеров деления ядер  $B_f$  (5.9 МэВ для  $^{254-256}\text{No}$ , 5.2 МэВ для  $^{283-286}\text{Cn}$ , 6.7 МэВ для  $^{289-292}\text{Fl}$  и 6.9 МэВ для  $^{293-296}\text{Lv}$ ).

Впервые наблюдалось бимодальное деление ядра  $^{256}\text{No}$ , образованного в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$  при энергиях возбуждения  $E^* = 17-35$  МэВ. Вклад моды Super Short составляет  $\approx 2.5\%$  для энергии  $E_{\text{lab}} = 211$  МэВ и снижается до  $\approx 0.3\%$  для  $E_{\text{lab}} = 234$  МэВ.

### **Результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. Э. М. Козулин, А. А. Богачев, М. Г. Иткис, Ю. М. Иткис, Г. Н. Княжева, Н. А. Кондратьев, Л. Крупа, И. В. Покровский, Е. В. Прохорова; Времяпролетный спектрометр CORSET для измерения бинарных

- продуктов ядерных реакций // *Приборы и Техника Эксперимента*. – 2008. –Т.51, №.1. – С.44-58.
2. E. V. Prokhorova, A. A. Bogachev, M. G. Itkis, I. M. Itkis, G. N. Knyazheva, N. A. Kondratiev, E. M. Kozulin, L. Krupa, Yu. Ts. Oganessian, I. V. Pokrovsky, V. V. Pashkevich, A. Ya. Rusanov; The fusion-fission and quasi-fission processes in the reaction  $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$  at energies near the Coulomb barrier // *Nuclear Physics A*. –2008.–Vol.802.– Pp.45-66.
  3. E. M. Kozulin, G. N. Knyazheva, I. M. Itkis, M. G. Itkis, A. A. Bogachev, E. V. Chernysheva, L. Krupa, F. Hanappe, O. Dorvaux, L. Stuttgé, W. H. Trzaska, C. Schmitt, G. Chubarian; Fusion-fission and quasifission of superheavy systems with  $Z = 110-116$  formed in  $^{48}\text{Ca}$ -induced reactions // *Phys. Rev. C*.–2014. –Vol.90.– P. 054608.
  4. E. V. Chernysheva, E. M. Kozulin, I. M. Itkis, G. N. Knyazheva, L. Krupa; The study of fusion-fission and quasifission processes in the reactions  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ // Int.Symposium on Exotic Nuclei, Kazan, Russia, 2016.– Singapore: World Scientific, 2017. Pp.143-154.
  5. E. V. Chernysheva, E. M. Kozulin, I. M. Itkis, G. N. Knyazheva; Mass and energy resolutions in 2V-method// Int.Symposium on Exotic Nuclei, Kazan, Russia, 2016. – Singapore: World Scientific, 2017. –Pp.309-314.
  6. M. G. Itkis, A. A. Bogachev, E. V. Chernysheva, I. M. Itkis, G. N. Knyazheva, E. M. Kozulin; Fission and Quasifission in the “Warm” Fusion Reactions// *AIP Conf. Proc.* – 2010.– Vol. 1238. – Pp. 52-59.
  7. M. G. Itkis, A. A. Bogachev, I. M. Itkis, J. Kliman, G. N. Knyazheva, N. A. Kondratiev, E. M. Kozulin, L. Krupa, Yu. Ts. Oganessian, I. V. Pokrovsky, E. V. Prokhorova, A. Ya. Rusanov; The processes of fusion-fission and quasi-fission of superheavy nuclei// *Nuclear Physics A*. –2007. –Vol.787. –Pp. 150-159.
  8. E. V. Prokhorova, A. A. Bogachev, I. M. Itkis, M. G. Itkis, J. Kliman, G. N. Knyazheva, N. A. Kondratiev, E. M. Kozulin, L. Krupa, Yu. Ts. Oganessian, I. V. Pokrovsky, A. Ya. Rusanov, *et al.*; Shell effect manifestation in mass-energy distributions of fission and quasi-fission fragments of nuclei with  $Z=102-122$ // Int.Symposium on Exotic Nuclei, Peterhof, Russia, 2004. Singapore: World Scientific, 2005. –Pp.325-332.
  9. M. G. Itkis, A. A. Bogachev, I. M. Itkis, G. N. Knyazheva, N. A. Kondratiev, E. M. Kozulin, L. Krupa, Yu. Ts. Oganessian, I. V. Pokrovsky, E. V. Prokhorova, A. Ya. Rusanov; The Process of Fusion-Fission of Superheavy Nuclei // *Int. Journ. of Modern Physics E*. –2007. –Vol.16. –Pp.957-968.
  10. M. G. Itkis, J. Äystö, S. Beghini, A. A. Bogachev, L. Corradi, O. Dorvaux, A. Gadea, G. Giardina, F.Hanappe, I.M.Itkis, M.Jandel, J.Kliman, S.V.Khlebnikov, G.N.Kniajeva, N.A.Kondratiev, E.M.Kozulin, L.Krupa, A. Latina, T. Materna, G. Montagnoli, Yu. Ts. Oganessian, I. V. Pokrovsky,

E. V. Prokhorova, N. Rowley, V. A. Rubchenya, A. Ya. Rusanov, R. N. Sa-  
gaidak, F. Scarlassara, A. M. Stefanini, L. Stuttge, *et al.*; Fusion-fission and  
quasi-fission of heavy and superheavy nuclei // *Nuclear Physics A*  
–2004.–Vol.734. –Pp. 136-147

11. M. G. Itkis, B. Benoit, A. A. Bogachev, D. M. Gorodisskiy, F. Hanappe,  
I.M. Itkis, M. Jandel, J. Kliman, N.A. Kondratiev, E.M. Kozulin, L.Krupa,  
T.Materna, Yu.Ts.Oganessian, I. V. Pokrovsky, E. V. Prokhorova, A. Ya. Ru-  
sanov, L.Stuttge, V.M.Voskressenski; Energy balance in fission and  
quasifission of  $^{256}\text{No}$  // *Nuclear Physics A*. –2004.–Vol. 734, Suppl. 1. –Pp.  
E29-E32.
12. M. G. Itkis, A. A. Bogatchev, I. M. Itkis, M. Jandel, J. Kliman, G. N. Kniajeva,  
N. A. Kondratiev, I. V. Korzyukov, E. M. Kozulin, L. Krupa,  
Yu. Ts. Oganessian, I. V. Pokrovsky, V. A. Ponomarenko, E. V. Prokhorova,  
V. M. Voskresenski, A. Ya. Rusanov, A. A. Goverdovski, L. Corradi, A. Ga-  
dea, L. Latina, A. M. Stefanini, S. Szilner, M. Trotta, A. M. Vinodkumar,  
S. Beghini, G. Montagnoli, F. Scarlassara, F. Hanappe, T. Materna,  
O. Dorvaux, N. Rowley, L. Stuttge, G. Giardina, K. J. Moody; Fusion-Fission  
of Heavy and Superheavy Nuclei // VII Int. School-Seminar "Heavy Ion  
Physics", Dubna 2002 / Eds. Yu.Ts.Oganessian & R.Kalpakchieva; *Ядерная  
Физика*,–2003. –Т.66, №.6. –С.1154-1160.
13. M. G. Itkis, A. A. Bogatchev, I. M. Itkis, M. Jandel, J. Kliman G. N. Kniajeva,  
N. A. Kondratiev, I. V. Korzyukov, E. M. Kozulin, L. Krupa,  
Yu. Ts. Oganessian, I. V. Pokrovsky, V. A. Ponomarenko, E. V. Prokhorova,  
A. Ya. Rusanov, V. M. Voskresensky, A. A. Goverdovski, F. Hanappe, T. Ma-  
terna, C.Shmitt, N. Rowley, L. Stuttge, G. Giardina, K. J. Moody; Fusion-  
Fission of Superheavy Nuclei // *Journ. of Nucl. and Radiochem. Science*.  
–2002.–Vol.3,№1.–Pp.57-61.
14. E. V. Prokhorova, M. G. Itkis, Yu. Ts. Oganessian, E. M. Kozulin, A. A. Boga-  
tchev, I. M. Itkis, M. Jandel, J. Kliman, G. N. Kniajeva, N. A. Kondratiev,  
I. V. Korzyukov, L. Krupa, I. V. Pokrovsky, A. Ya. Rusanov, V. M. Voskre-  
senski, F. Hanappe, B. Benoit, T. Materna, N. Rowley, L. Stuttge, G. Giardina;  
Mass-Energy Distributions of Fission Fragments of Superheavy Nuclei  
Produced in The Reactions With  $^{48}\text{Ca}$  Ions // Intern. Conf. on Nuclear Physics  
at Border Lines, Lipari (Messina), Italy, 2001. – Singapore: World Scientific,  
2002. – Pp.275-279.

### Список цитируемой литературы

- [1] Yu. Ts. Oganessian, Heaviest nuclei from  $^{48}\text{Ca}$ -induced reactions // *J. Phys. G*.  
– 2007. – Vol. 34. – Pp. R165-R242.
- [2] Yu. Ts. Oganessian, F. Sh. Abdullin, *et al.* Measurements of cross sections and  
decay properties of the isotopes of elements 112, 114, and 116 produced in the  
fusion reactions  $^{233,238}\text{U}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ , and  $^{248}\text{Cm}+^{48}\text{Ca}$  // *Phys. Rev. C*.–2004.–Vol. 70.–  
P. 064609.

- [3] W.Q. Shen, J. Albinski, A. Gobbi *et al.*, Fission and Quasifission in U-induced Reactions // *Phys. Rev. C.* –1987. –Vol. 36.– Pp. 115-142.
- [4] R. Bock, Y.T. Chu, M. Dakowski *et al.*, Dynamics of the fusion process // *Nucl. Phys. A.* –1982. –Vol. 388. – Pp. 334-380.
- [5] V. I. Zagrebaev, W. Greiner, Unified consideration of deep inelastic, quasi-fission and fusion-fission phenomena // *J.Phys.G.*– (2005) .–Vol.31 825-844
- [6] J. R. Nix, W. J. Swiatecki; Studies in the liquid-drop theory of nuclear fission // *Nucl. Phys.* –1965. –Vol.71. – Pp.1-94.
- [7] М. Г. Иткис, А. Я. Русанов; Деление нагретых ядер в реакциях с тяжёлыми ионами: статические и динамические аспекты // *ЭЧАЯ.*–1998. – Т.29, №2. – С. 389-488.
- [8] T. M. Hamilton, K. E. Gregorich, D. M. Lee, *et al.* ; Spontaneous fission properties of  $^{103}_{259}\text{Lr}$  // *Phys. Rev. C.* –1992. –Vol. 46. – Pp. 1873-1879.
- [9] U. Brosa, S. Grossmann, A. Müller; Nuclear Scission // *Phys. Rep.* –1990. –Vol. 197. – P. 167-262.
- [10] М. Г. Иткис, В. Н. Околович, А. Я. Русанов, Г. Н. Смиренкин; Симметричное и асимметричное деление ядер легче тория // *ЭЧАЯ.*–1988. –Т.19, №4. –С. 701-784.
- [11] D. J. Hinde, M. Dasgupta, *et al.*; Fusion-Fission versus Quasifission: Effect of Nuclear Orientation // *Phys. Rev. Lett.* –1995.–Vol.74 . – Pp. 1295-1298.
- [12] <http://nrv.jinr.ru/nrv>. A.V. Karpov, A. S. Denikin, *et al.*, NRV web knowledge base on low-energy nuclear physics // *Physics of Atomic Nuclei.*–2016.– Vol. 79. – Pp. 749–761.
- [13] R. Bass; Fusion of heavy nuclei in a classical model // *Nucl. Phys. A.* –1974.– Vol. 231. – Pp. 45–63.
- [14] I. M. Itkis, E. M. Kozulin, M. G. Itkis, G. N. Knyazheva *et al.*; Fission and quasifission modes in heavy-ion-induced reactions leading to the formation of Hs\* // *Phys. Rev. C.*– 2011.– Vol. 83. – P. 064613.
- [15] E. M. Kozulin, G. N. Knyazheva, *et al.*; Investigation of the reaction  $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$  being an option of synthesizing element 120 // *Phys. Lett. B.* –2010. –Vol. 686. – Pp. 227-232.
- [16] V. E. Viola, K. Kwiatkowski, M. Walker; Systematics of fission fragment total kinetic energy release // *Phys.Rev.C.*–1985 .–Vol. 31. – Pp. 1550-1552.
- [17] K. Nishio, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, H. Makii, Y. Wakabayashi, *et al.*; Fusion probabilities in the reactions  $^{40,48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$  at energies around the Coulomb barrier // *Phys. Rev. C.* –2012.– Vol 86. – P. 034608.
- [18] R. Vandenbosch and J. R. Huizenga; Nuclear Fission // *Academic*, New York. –1973. – P. 323.