

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования "Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова"

Распределение масс осколков деления ^{238}U в области энергий гигантского дипольного резонанса

А. А. Кузнецов

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук

Основная цель работы: измерение выходов осколков фотоделения ^{238}U в области энергий гигантского дипольного резонанса и исследование характеристик массового распределения осколков фотоделения в зависимости от средней энергии возбуждения ядра.

Надежные ядерные данные о выходах осколков деления доступны для реакции под действием тепловых и реакторных нейтронов. Во многих прикладных исследованиях используют данные моделирования. Моделирование воспроизводит лишь основные закономерности процесса. Для уточнения параметров моделей необходимы новые ядерные данные.

Процесс деления атомных ядер представляет собой уникальную возможность для изучения большого ряда физических явлений:

- Изучение первичного взаимодействия налетающей частицы с ядром, механизма поглощения первичной частицы.
- Формирование гигантских резонансов в ядрах. Связь одночастичных и коллективных степеней свободы.
- В процессе деления форма и энергия возбуждения ядра сильно изменяются. Поэтому изучая процесс деления можно получить информацию о характеристиках ядер при разных возбуждениях и деформациях.
- Изучение спуска ядра от седловой точки до момента разделения дает важную информацию о ядерной вязкости,
- Угловое распределение осколков дает информацию о механизме возбуждения делящегося ядра, статистических и динамических аспектах деления ядра, распределении энергии между осколками, кинетической энергии и внутренней энергии возбуждения ядра.
- Формирование осколков деления, девозбуждение осколков деления, вылет нейтронов и гамма-квантов из осколков позволяет исследовать динамику распада делящегося ядра.
- Деление ядер позволяет получать и изучать свойства экзотических ядер - нейтроноизбыточных ядер, изомеров формы, высокоспиновых изомерных состояний.
- Процесс тройного деления позволяет изучать формирование и вылет ядерных кластеров

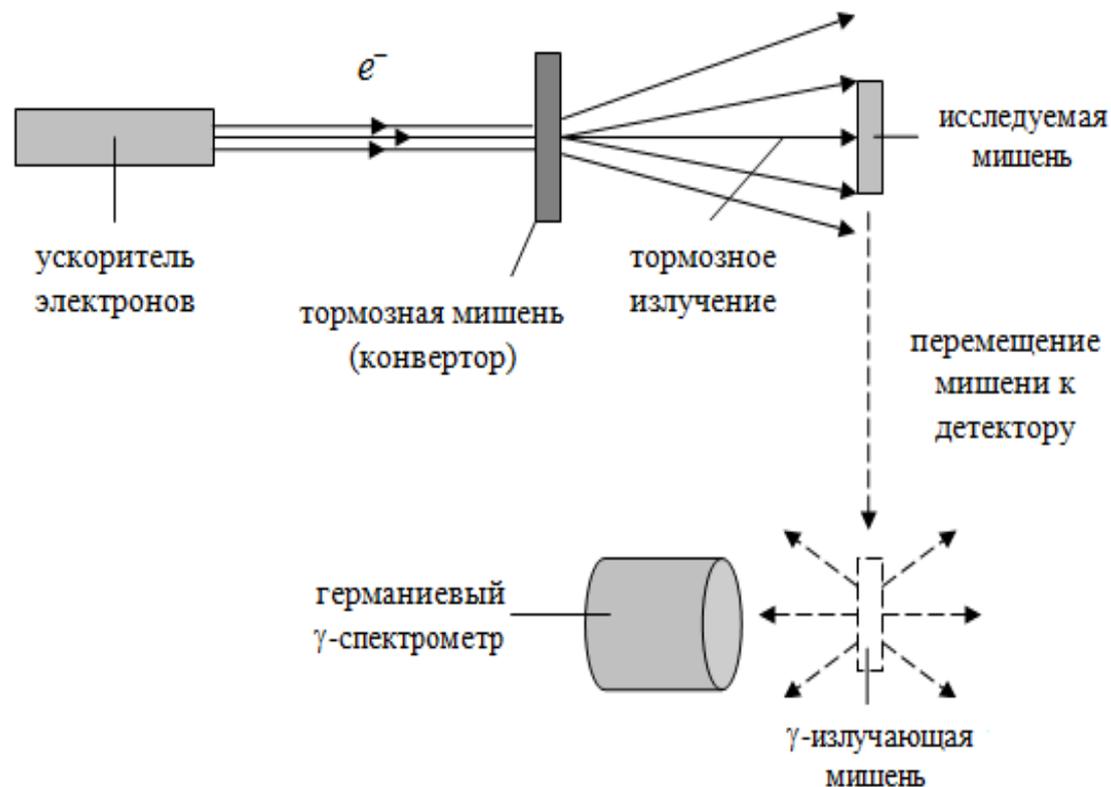
Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

- Впервые проведен совместный анализ и сравнение поведения симметричной и несимметричных мод деления под действием гамма-квантов.
- Впервые выполнено сравнение поведения мод деления изотопов урана под действием гамма-квантов и нейтронов.
- Полученные результаты сравниваются с предсказанием мультимодальной модели о зависимости отдельных мод деления от энергии возбуждения делящегося ядра.

К основным результатам работы также относятся:

- Определение отношений несимметричного и симметричного деления в зависимости от средней энергии возбуждения ядра.
- Определение фракционного независимого выхода образования ядра ^{134}I в цепочке распадов ядер-изобар при четырех энергиях ускорителя.
- Определение среднего числа нейтронов, образующихся в результате фотоделения ^{238}U .
- Расчет отношения $Y(g,F)/Y(g,n)$ выходов реакции фотоделения и фотонейтронной реакции, сравнение с оцененными ядерными данными

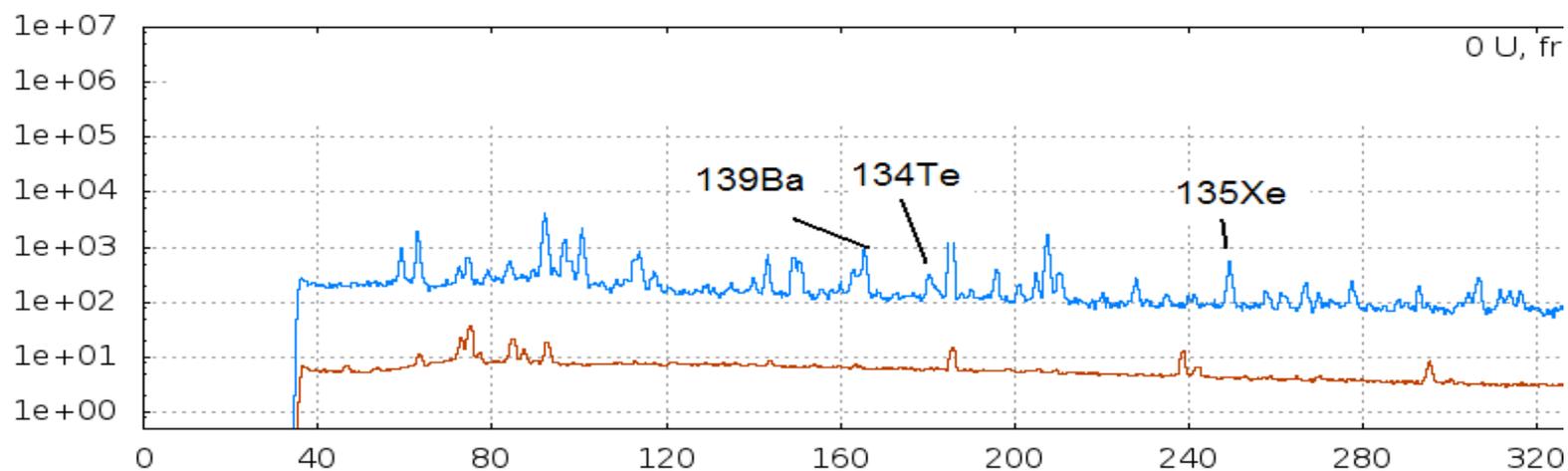
Методика проведения эксперимента



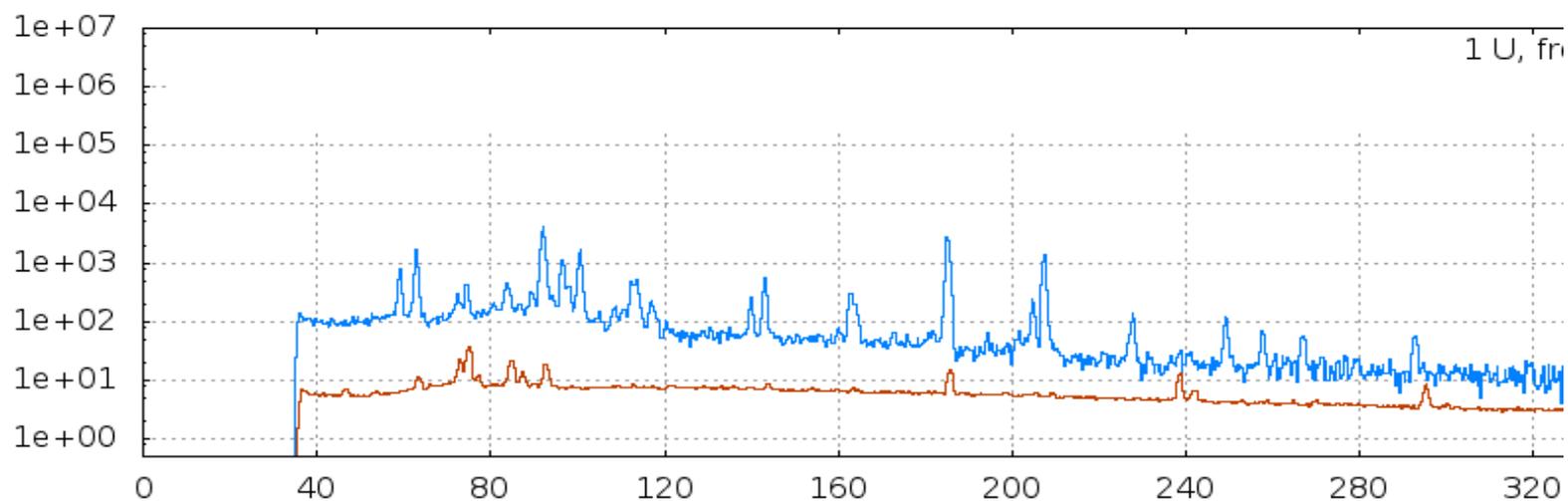
Для измерения выхода осколков фотоделения была использована методика гамма - активационного анализа. Было проанализировано более 2500 спектров остаточной активности облученного образца ^{238}U . Выход каждого осколка фотоделения определен по нескольким гамма - линиям в спектрах остаточной активности облученного образца ^{238}U и периодам полураспада образующихся изотопов. Было проанализировано 40 различных цепочек распадов ядер-изобар и получены массовые распределения осколков фотоделения ^{238}U с учетом зарядового распределения и вылета запаздывающих нейтронов при четырех энергиях ускорителя - 19.5, 29.1, 48.3 и 67.7 МэВ.

Методика проведения эксперимента

Е, МэВ	Время облучения, часы	Время измерения, сутки	Число измеренных спектров
19.5	3.6	8.7	458
29.1	3	5.6	352
48.3	7.5	16.5	821
67.7	5.1	10.7	542



Спектр остаточной активности сразу после облучения и через 2 дня после облучения.



Энергия электронов ускорителя 19.5 МэВ

Критерии расшифровки спектров

- Радиоактивные осколки, образующиеся при делении, идентифицировались по энергетическому спектру остаточной активности и периоду полураспада.
- Так как радиоактивные изотопы, образующиеся в результате деления, имеют несколько возбужденных состояний, в спектрах должны быть видны наиболее интенсивные из них.
- В процессе деления образуются ядра сильно перегруженные нейтронами, которые распадаются либо путем вылета нейтронов либо в результате каскада бета - распадов, поэтому в спектре должны наблюдаться гамма переходы от родительских и дочерних изотопов.
- В процессе деления образуется 2 осколка, поэтому должны быть видны гамма - переходы от ядер - партнеров деления.

Выход реакции деления

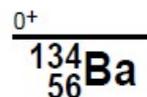
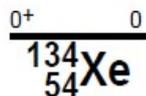
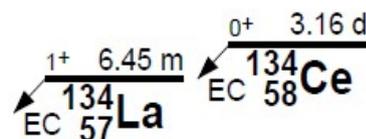
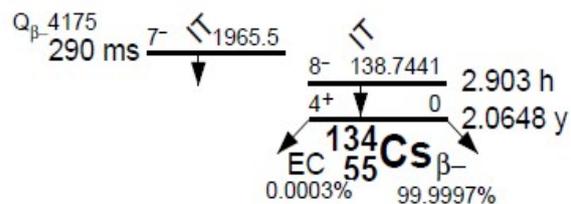
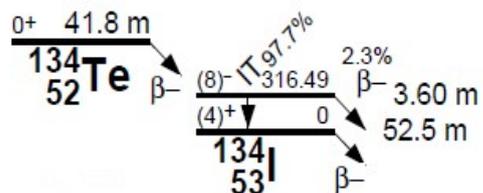
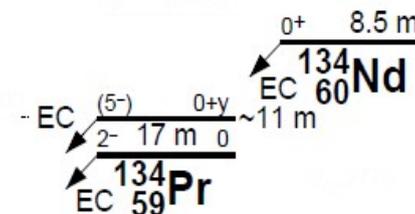
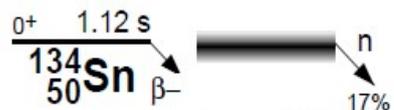
$$Y(T) = \alpha \int_0^T \sigma(E_\gamma) W(E_\gamma, T) dE_\gamma$$

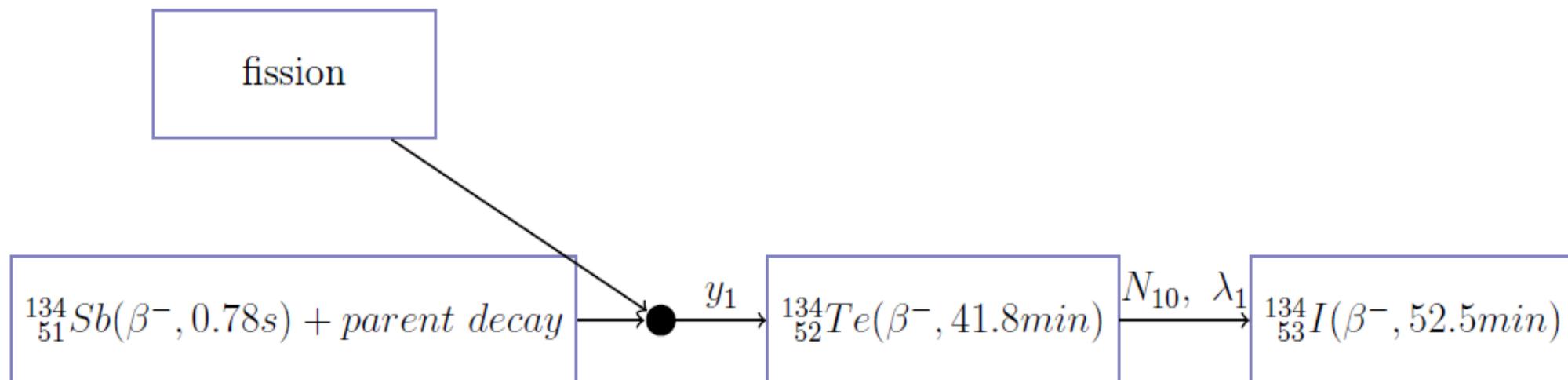
Выходом реакции называется количество реакций происходящих в образце в единицу времени.

Ядро может получиться как в результате деления, так и в результате распада на него родительского ядра, которое в свою очередь получается в результате деления.

В зависимости от способа образования ядра мы можем определять независимый или накопленный выход реакции.

- Независимый выход (%) - число ядер определенного нуклида, произведенного непосредственно в результате деления (не через радиоактивный распад родительских ядер) в 100 реакциях расщепления.
- Накопленный выход (%) - общее число ядер определенного произведенного нуклида (непосредственно и после распада родительских ядер) в 100 реакциях расщепления.
- Полный выход цепи - общий выход для ядер изобар, получаемых в результате деления. Выход ядер с конкретным массовым числом. Эти ядра связаны между собой цепочкой распадов.
 - Это сумма накопленных выходов или просто накопленный выход долгоживущих ядер, находящихся в конце цепи распадов изобар с данным массовым числом.
 - Сумма независимых выходов ядер с данным массовым числом.





В этом случае уравнение изменения количества радиоактивных ядер во время и после облучения будет иметь вид:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1 + y_1$$

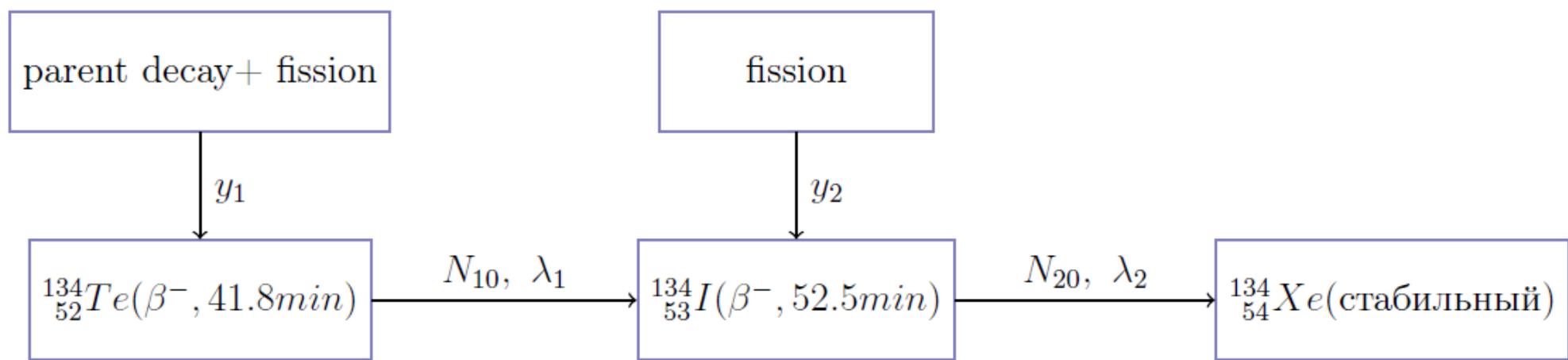
Здесь y_1 - накопленный выход ядер $^{134}_{52}\text{Te}$.

$$y_1 = \frac{N_{10} \cdot \lambda_1}{(1 - e^{-\lambda_1 t_1})}$$

$$N_{10} = \frac{S}{k_1(e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)})}$$

^{134}Te

	$T, \text{M}\bar{\text{e}}\text{B}$	$E_\gamma, \text{K}\bar{\text{e}}\text{B}$	I_γ	N_{10}	dN_{10}	Y	dY	Y_{CP}	dY_{CP}
$^{134}_{52}\text{Te}$	19.5	180.891	2.70	546	31	0.157	0.009	0.160	0.008
	19.5	565.992	1.12	568	51	0.164	0.015		
	19.5	712.97	0.29	578	117	0.166	0.034		
$^{134}_{52}\text{Te}$	29.1	79.445	20.9	439	31	0.128	0.009	0.124	0.005
	29.1	180.891	18.3	414	24	0.121	0.007		
	29.1	565.992	18.6	431	39	0.125	0.011		
	29.1	712.97	4.7	439	98	0.128	0.029		
$^{134}_{52}\text{Te}$	48.3	180.891	2.70	413	21	0.114	0.006	0.115	0.004
$^{134}_{52}\text{Te}$	67.7	180.891	18.3	194	23	0.054	0.006	0.053	0.005
	67.7	565.992	18.6	186	27	0.052	0.007		



Случай, когда можно разделить сколько ядер образовалось в результате деления, а сколько в результате распада на него родительских ядер.

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 + y_1 \\ \frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1 + y_2 \end{cases}$$

λ_1, λ_2 - постоянные распада,

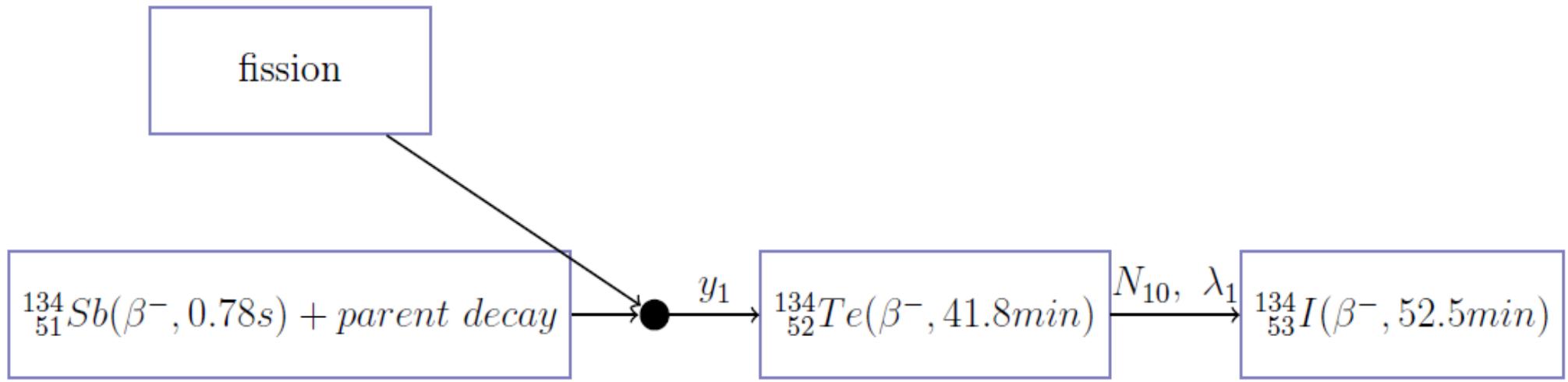
y_1 , - накопленный выход образования ядра 1 ($^{134}_{52}Te$),

y_2 , - независимый выход образования ядра 2 ($^{134}_{53}I$) в результате деления,

N_{10}, N_{20} количество ядер 1 и 2 на момент окончания облучения.

$$y_2 = \frac{\lambda_2 N_{20}}{1 - e^{-\lambda_2 t_1}} - y_1 \frac{\lambda_2(1 - e^{-\lambda_1 t_1}) - \lambda_1(1 - e^{-\lambda_2 t_1})}{(\lambda_2 - \lambda_1)(1 - e^{-\lambda_2 t_1})}$$

$$N_{20} = \frac{S(t_2, t_3)}{k_2(e^{-\lambda_2(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_2(t_3-t_1)})} + \frac{N_{10}\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} - \frac{N_{10}\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{(e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)})}{(e^{-\lambda_2(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_2(t_3-t_1)})}$$



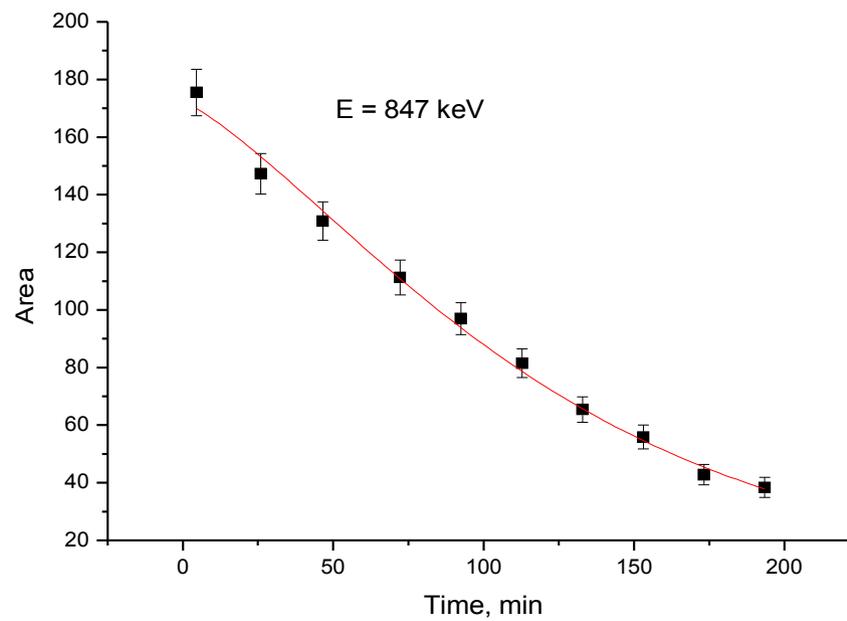
В этом случае уравнение изменения количества радиоактивных ядер во время и после облучения будет иметь вид:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1 + y_1$$

Здесь y_1 - накопленный выход ядер $^{134}_{52}\text{Te}$.

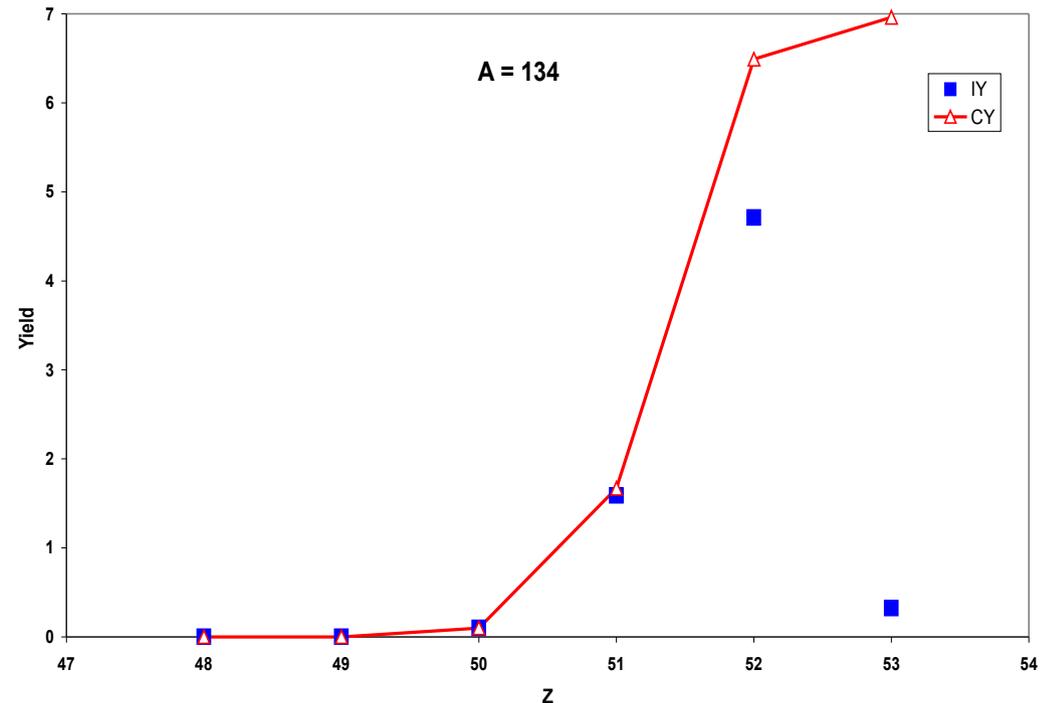
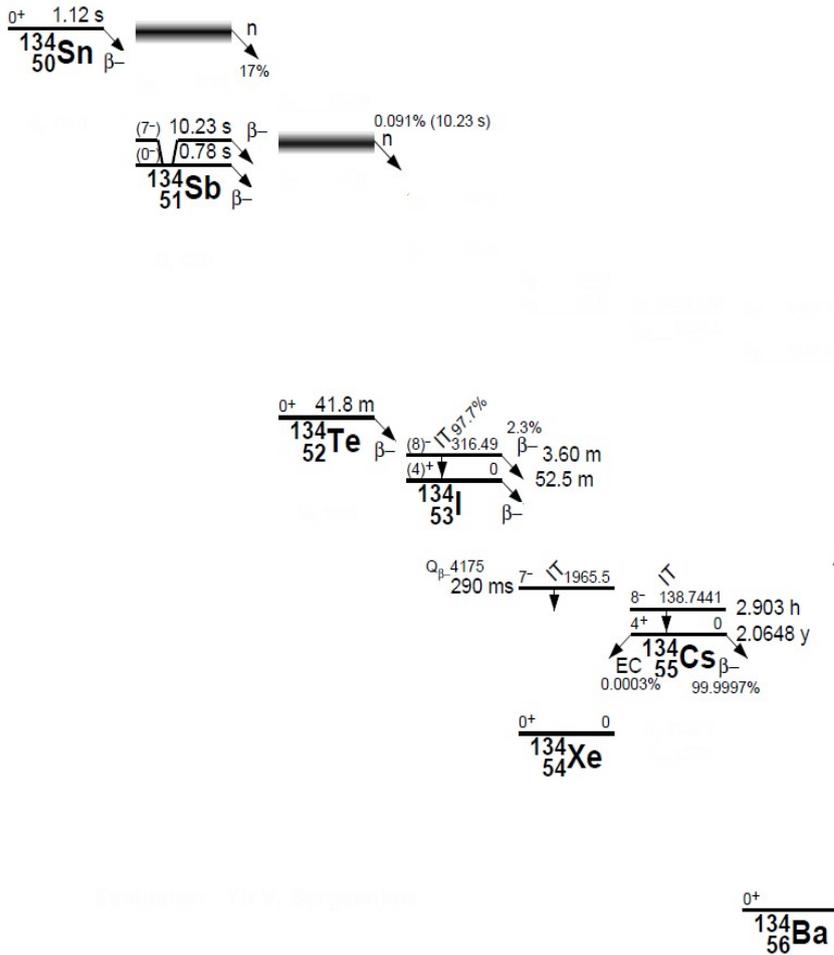
$$y_1 = \frac{N_{10} \cdot \lambda_1}{(1 - e^{-\lambda_1 t_1})}$$

$$N_{10} = \frac{S}{k_1(e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)})}$$



	$T, \text{M}\beta\text{B}$	$E_\gamma, \text{K}\beta\text{B}$	I_γ	N_{10}	dN_{10}	Y	dY	Y_{CP}	dY_{CP}
$^{134}_{53}\text{I}$	19,5	847,025	60,64	683	42	0,028	0,002	0,026	0,001
	19,5	884,09	39,13	652	36	0,021	0,002		
$^{134}_{53}\text{I}$	29,1	847,025	60,64	533	18	0,028	0,001	0,030	0,003
	29,1	884,09	39,13	553	24	0,033	0,002		
$^{134}_{53}\text{I}$	67,7	847,025	60,64	335	29	0,016	0,002	0,016	0,002

Зарядовое распределение осколков деления A = 134



Зарядовое распределение продуктов фотоделения ^{238}U при энергии возбуждения 5 МэВ

Зарядовое распределение осколков деления $A=134$

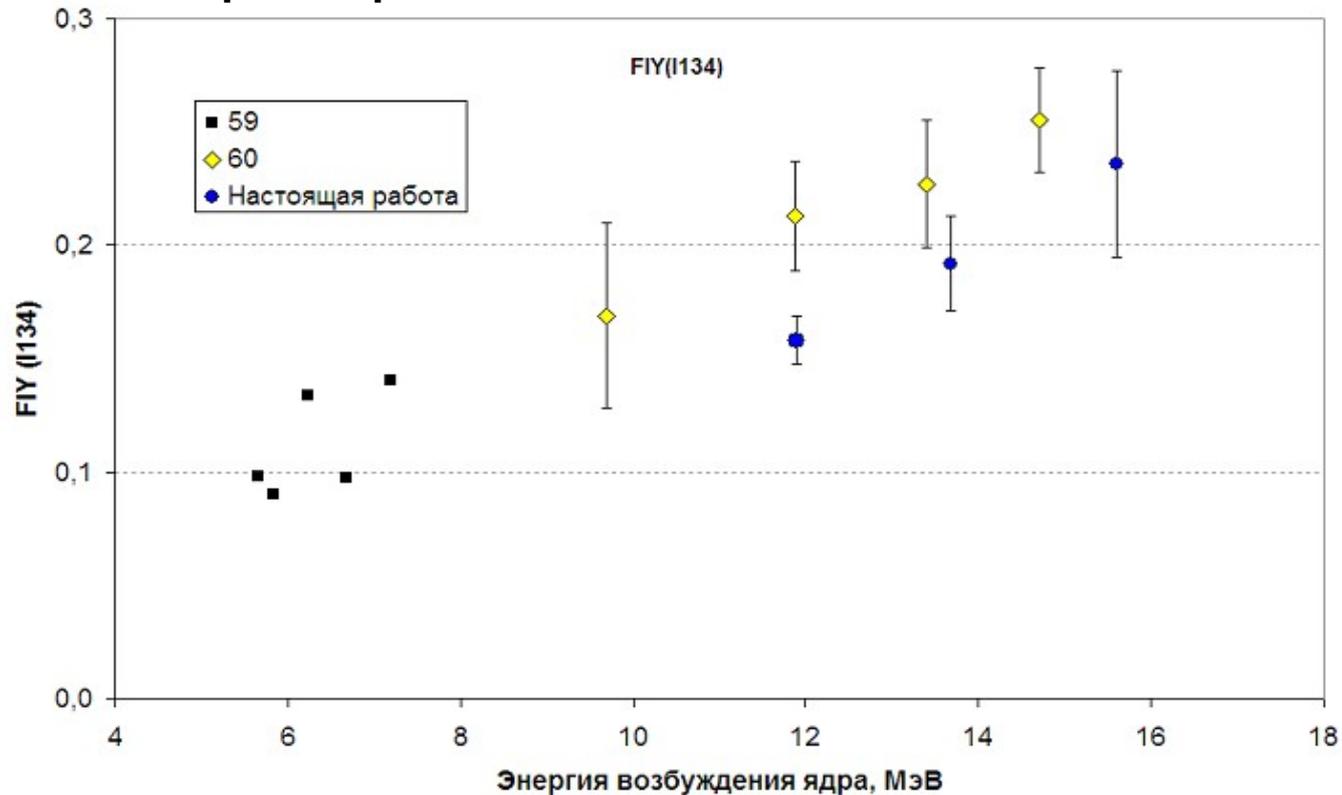
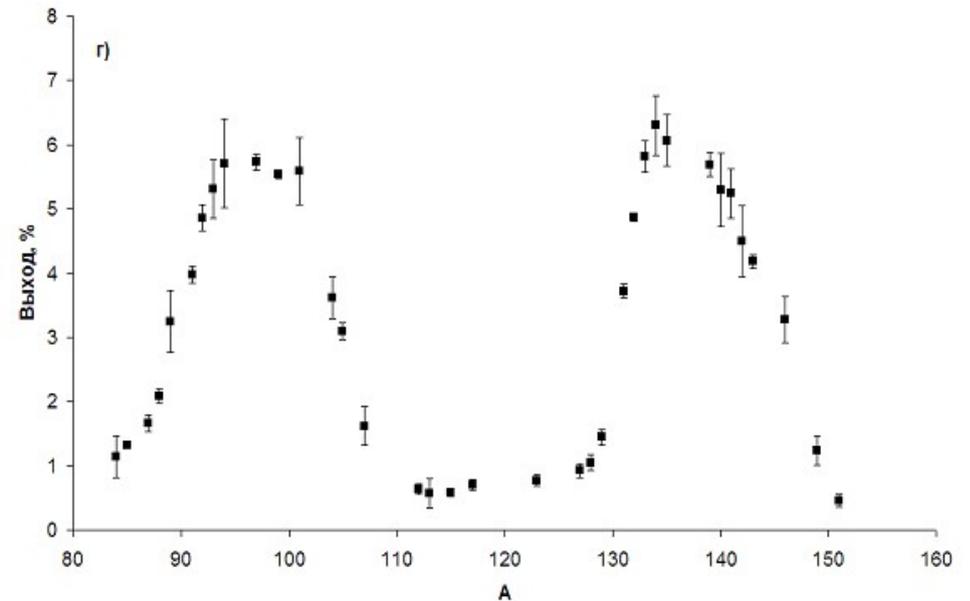
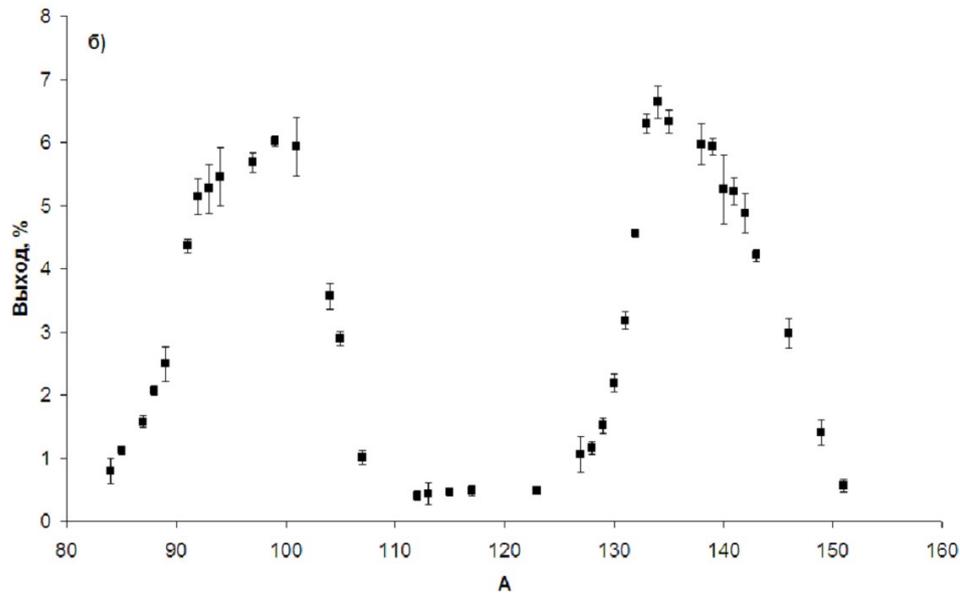
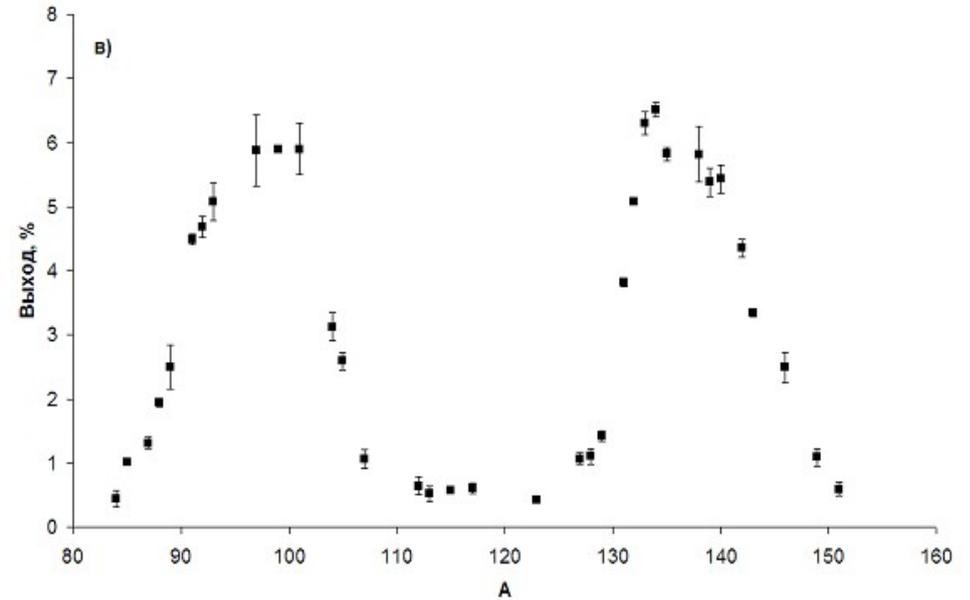
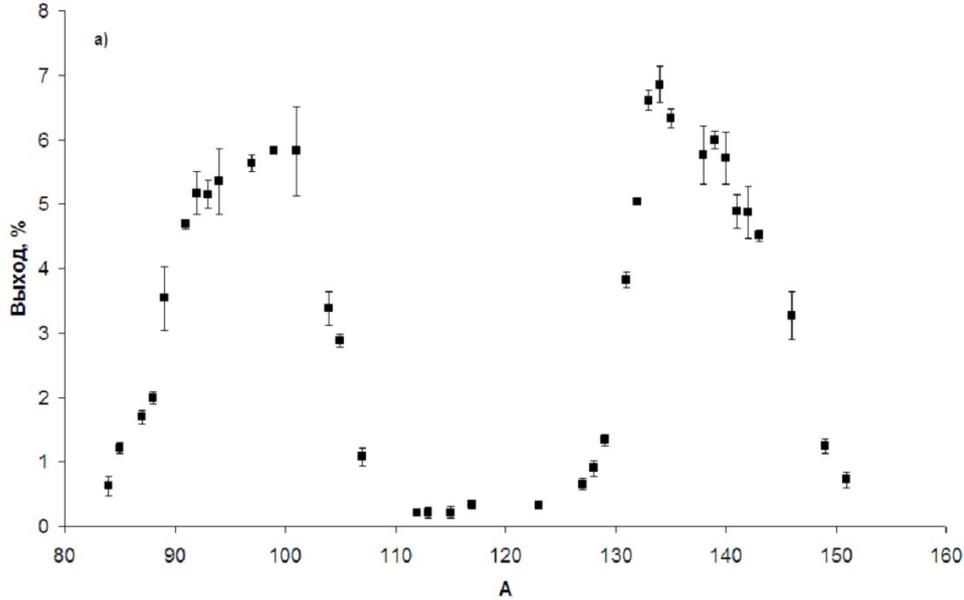


Рис. 31. Фракционный независимый выход образования ядра йода $^{134}_{53}\text{I}$ в зависимости от средней энергии возбуждения ядра ^{238}U .

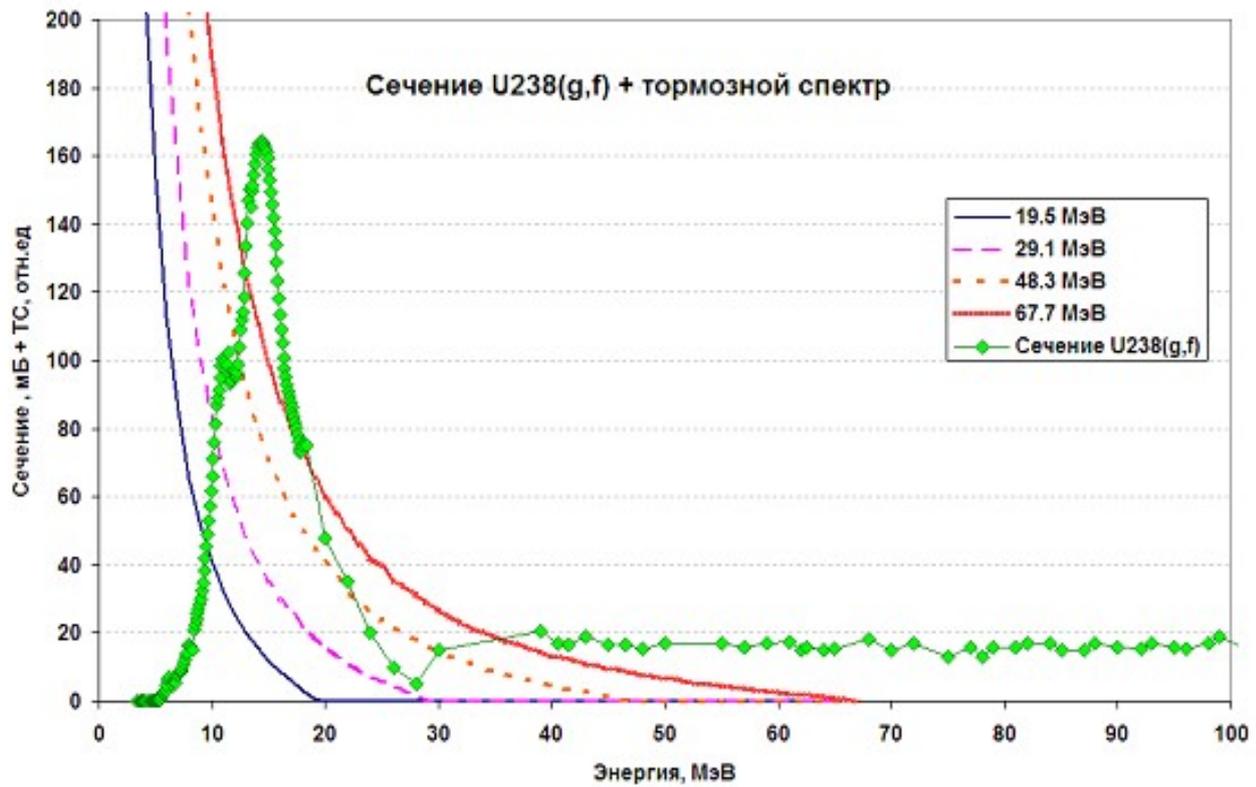
- [59] Isotopic distributions and elemental yields for the photofission of $^{235,238}\text{U}$ with 12-30-mev bremsstrahlung / D. De Frenne, H. Thierens, B. Proot et al. // Phys. Rev. C. — 1984. — Vol. 29. — P. 1908–1911.
- [60] Fragment characteristics for the photofission of ^{238}U with 6.1–13.1 mev bremsstrahlung / S. Pomme, E. Jacobs, M. Piessens et al. // Nucl. Phys. A. — 1994. — Vol. 572. — P. 237–266.

Массовое распределение



Массовое распределение продуктов фотоделения ^{238}U энергиях ускорителя электронов - а)19.5, б)29.1, в)48.3 и г)67.7 МэВ.

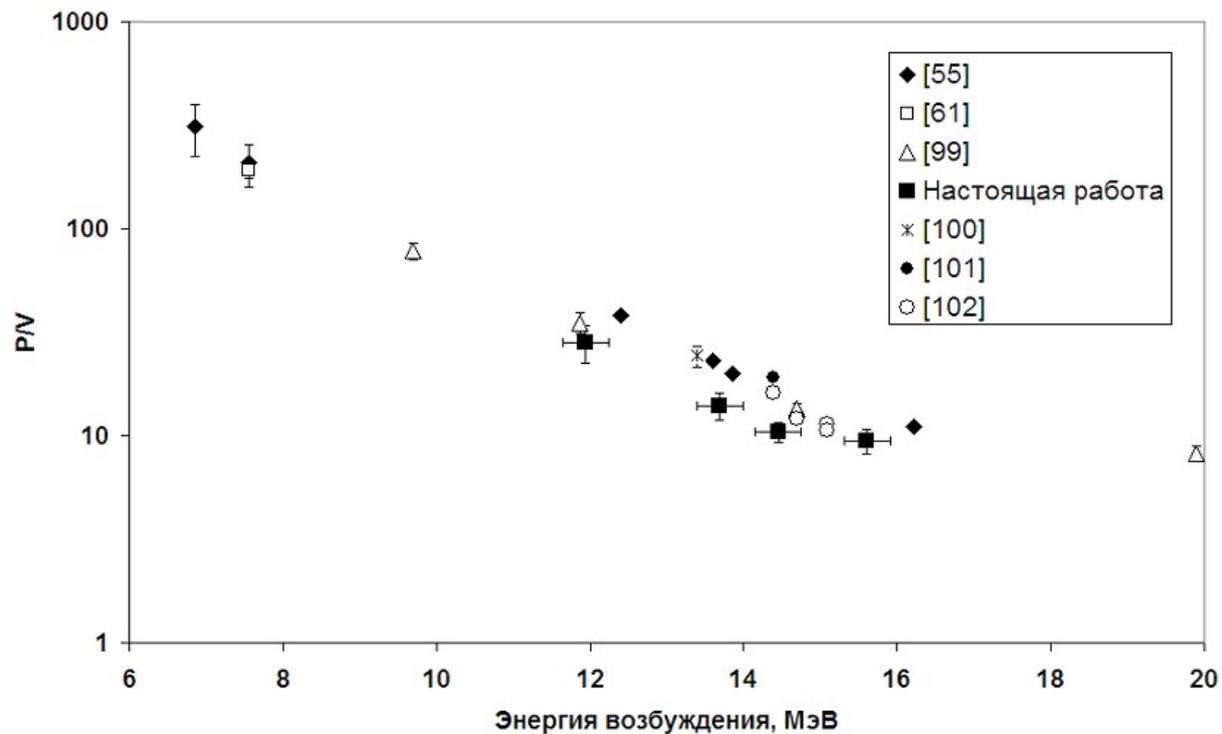
Средняя энергия возбуждения делящегося ядра



$T, \text{ МэВ}$	$\langle E^*(T) \rangle, \text{ МэВ}$
19.5	11.9 ± 0.3
29.1	13.7 ± 0.3
48.3	14.4 ± 0.3
67.7	15.6 ± 0.3

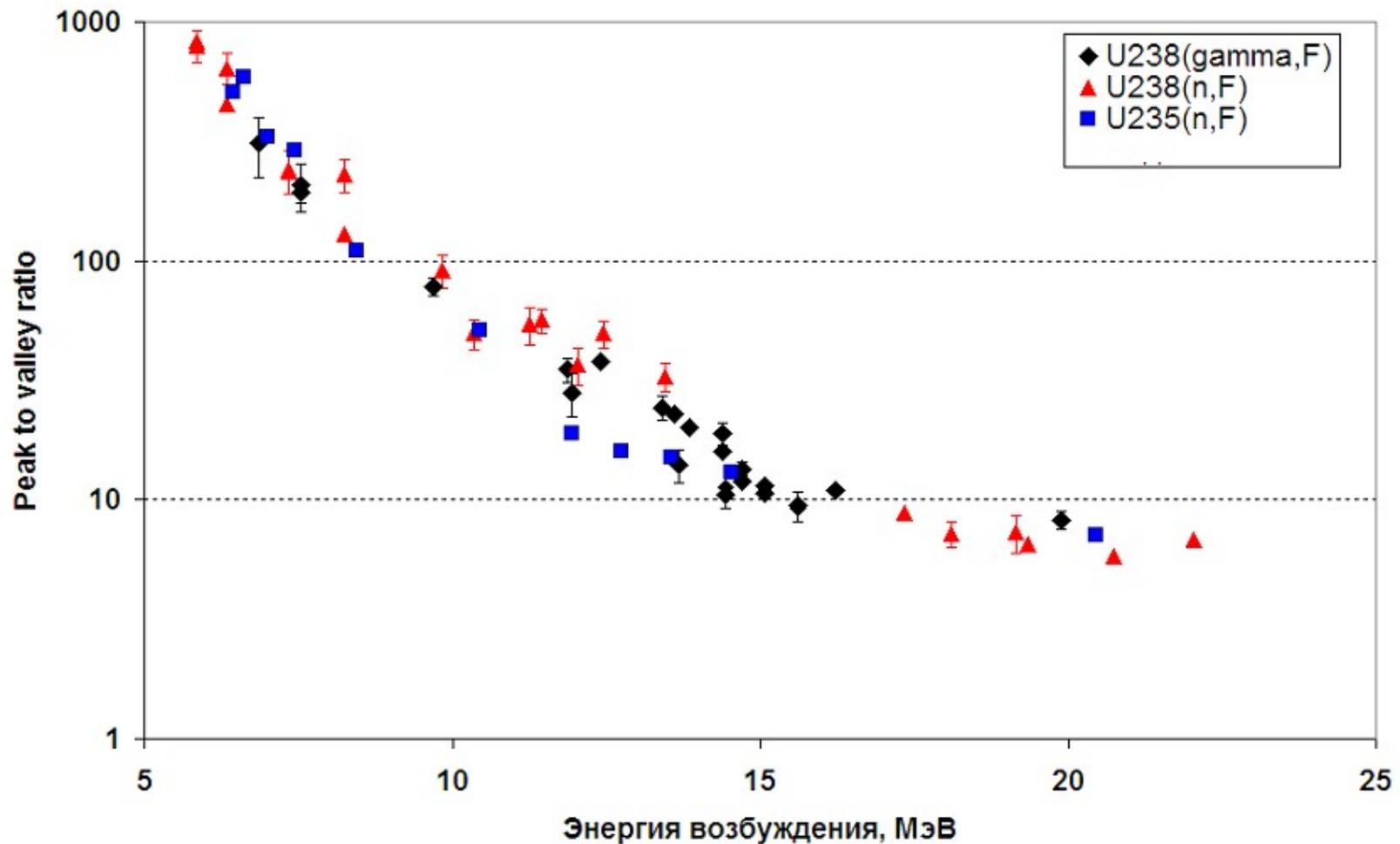
$$\langle E^*(T) \rangle = \frac{\int_0^T E N(T, E) \sigma_{\gamma, F}(E) dE}{\int_0^T N(T, E) \sigma_{\gamma, F}(E) dE}$$

Отношение несимметричного и симметричного фотоделения



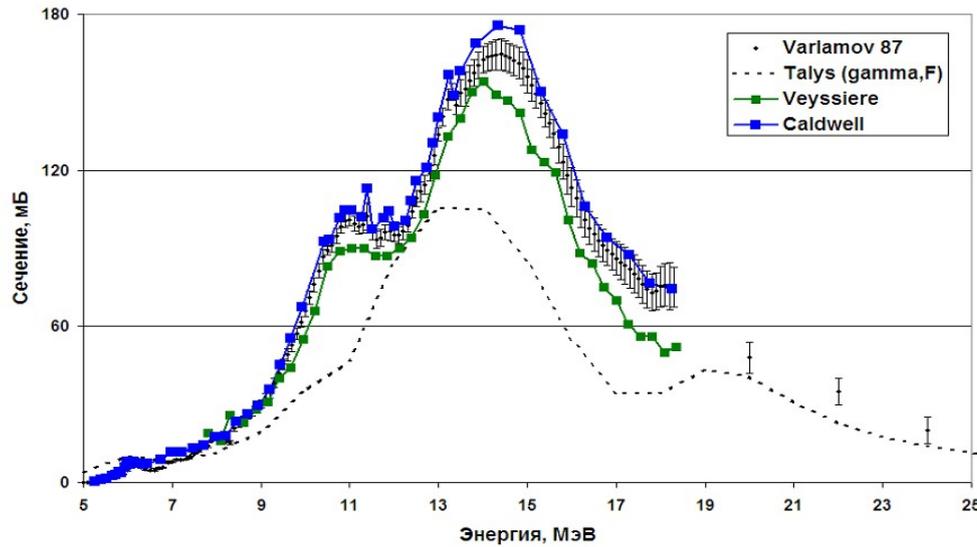
Отношение несимметричного и симметричного деления (peak to valley ratio) в зависимости от средней энергии возбуждения ядра.

Отношение несимметричного и симметричного фотоделения ^{238}U и деления под действием нейтронов ^{238}U и ^{235}U



Отношение несимметричного и симметричного деления (peak to valley ratio) для фотоделения ^{238}U и деления ядер ^{235}U и ^{238}U под действием моноэнергетических нейтронов в зависимости от средней энергии возбуждения ядра

Сечение фотоделения ^{238}U



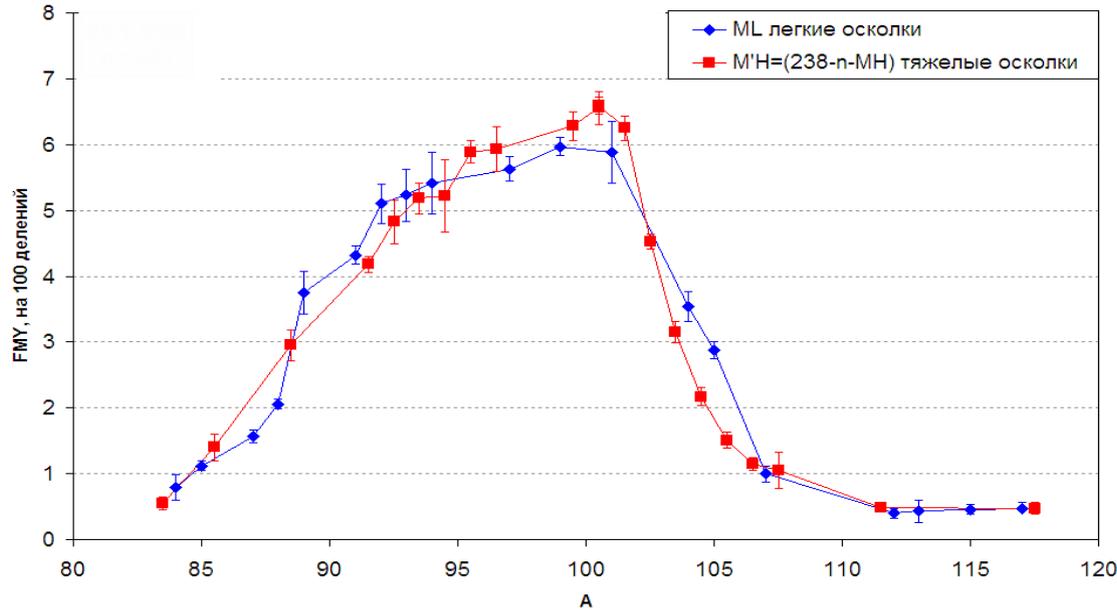
Сечения фотоделения $^{238}_{92}\text{U}$, оцененные сечения, сечения Talys

Зависимости средней энергии возбуждения ядра $E_{\text{возб}}$, отношение интегральных выходов реакции фотоделения и реакции с вылетом одного нейтрона из оцененных данных $Y_{\gamma,F}/Y_{\gamma,n}$ и полученные в данной работе $Y_{\gamma,F}/Y_{\gamma,n}$ (наст. работа) от верхней границы тормозного спектра T .

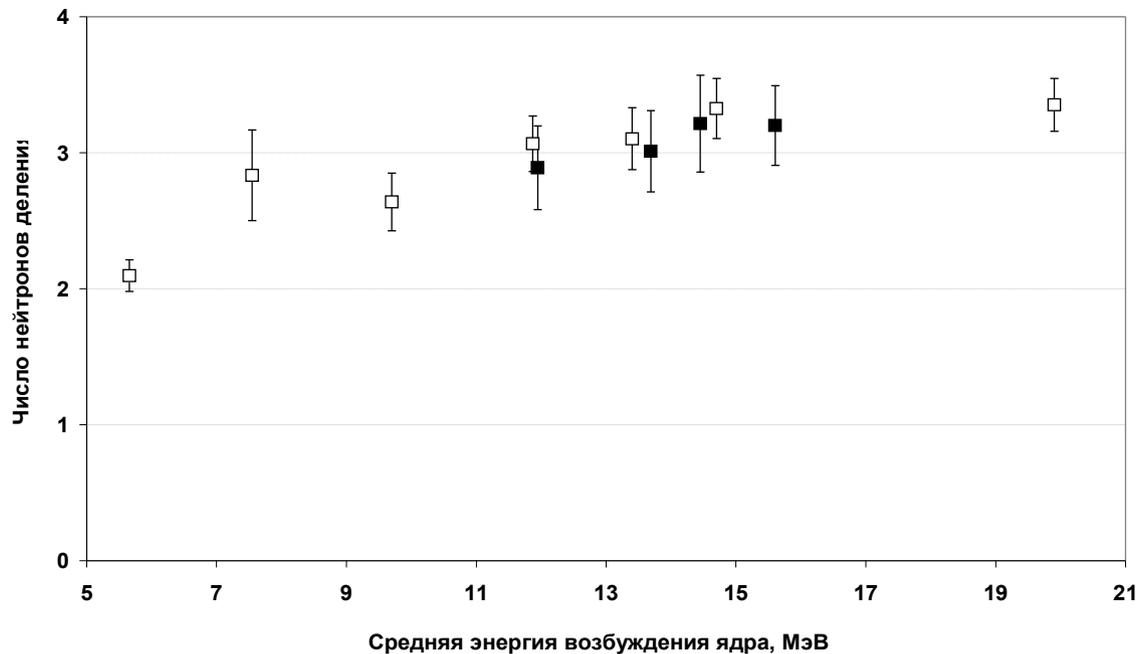
T , МэВ	$E_{\text{возб}}$, МэВ	$Y_{\gamma,F}/Y_{\gamma,n}$	$Y_{\gamma,F}/Y_{\gamma,n}$ (наст. работа)
19.5	12.0	0.583	0.547 ± 0.034
29.1	13.0	0.743	0.748 ± 0.046
48.3	13.8	0.789	0.724 ± 0.046
67.7	14.7	0.836	0.838 ± 0.047

$$Y_{\gamma,F}/Y_{\gamma,n} = \frac{\int_0^T \sigma_{\gamma,F}(E)W(E, T)dE}{\int_0^T \sigma_{\gamma,n}(E)W(E, T)dE}$$

Мгновенные нейтроны деления

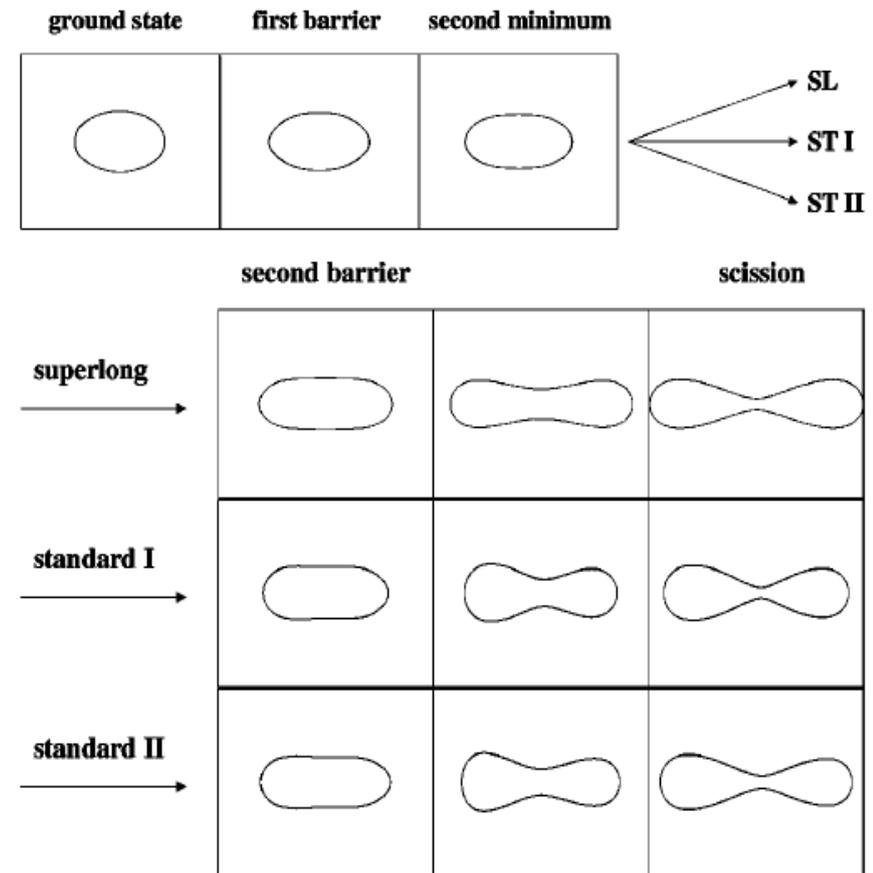
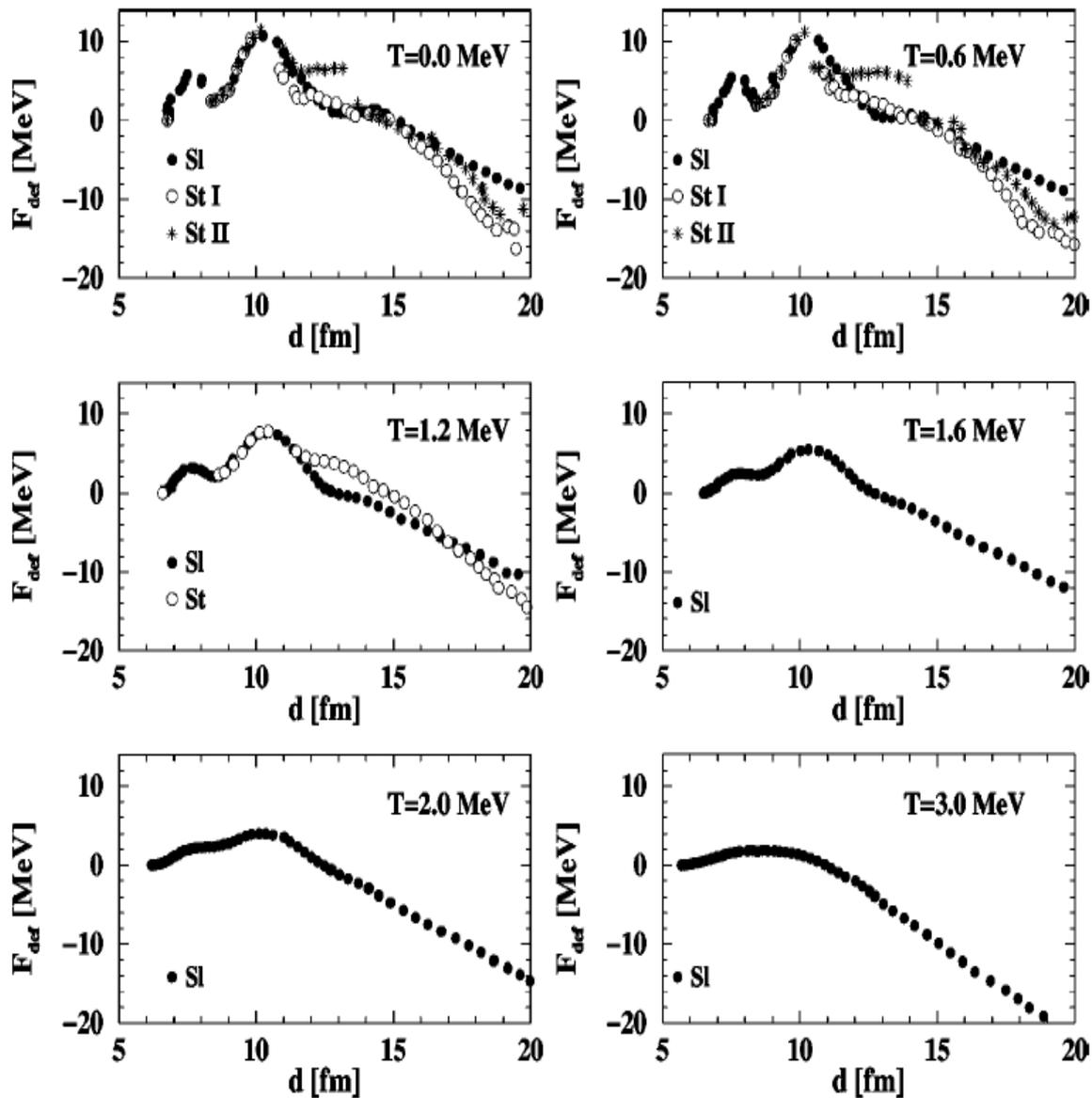


Массовое распределение ^{238}U совмещенная легкая и тяжелая группа осколков при 29.1 МэВ.
 n - число мгновенных нейтронов = 3



Число мгновенных нейтронов деления ^{238}U в зависимости от средней энергии возбуждения ядра

Мультимодальная модель деления



M. C. Duijvestijn, A. J. Koning, F.-J. Hamsch. Mass distributions in nucleon-induced fission at intermediate energies. PHYSICAL REVIEW C, V. 64, 014607 (2001)

Моды деления

Суммарный выход изотопа с данным массовым числом A есть сумма симметричных и несимметричных мод деления. Каждая мода деления соответствует прохождению через барьер деления определенной формы. Для каждой моды деления выходы описывается в виде гауссианы.

Суммарный выход осколков с данным массовым числом A определяется соотношением:

$$Y(A) = Y_{SL}(A) + Y_{STI}(A) + Y_{STII}(A) = K_{SL} \exp \left[-\frac{(A - \bar{A}_{SL})^2}{2\sigma_{SL}^2} \right] + \\ + K_{STI} \exp \left[-\frac{(A - \bar{A}_{SL} - D_{STI})^2}{2\sigma_{STI}^2} \right] + K_{STI} \exp \left[-\frac{(A - \bar{A}_{SL} + D_{STI})^2}{2\sigma_{STI}^2} \right] + \\ + K_{STII} \exp \left[-\frac{(A - \bar{A}_{SL} - D_{STII})^2}{2\sigma_{STII}^2} \right] + K_{STII} \exp \left[-\frac{(A - \bar{A}_{SL} + D_{STII})^2}{2\sigma_{STII}^2} \right], \quad (1)$$

параметры гауссиан $K_{SL}, K_{STI}, K_{STII}, \sigma_{SL}, \sigma_{STI}, \sigma_{STII}$ — амплитуды и ширины симметричной (SL) и несимметричных мод (STI, STII) деления, \bar{A}_{SL} — наиболее вероятное значение массы для симметричной моды деления, $\bar{A}_{SL} - D_{STI}, \bar{A}_{SL} + D_{STI}$ — наиболее вероятные значения масс для легкого и тяжелого осколка несимметричной моды деления STI, $\bar{A}_{SL} - D_{STII}, \bar{A}_{SL} + D_{STII}$ — наиболее вероятные значения масс для легкого и тяжелого осколка несимметричной моды деления STII.

Моды деления

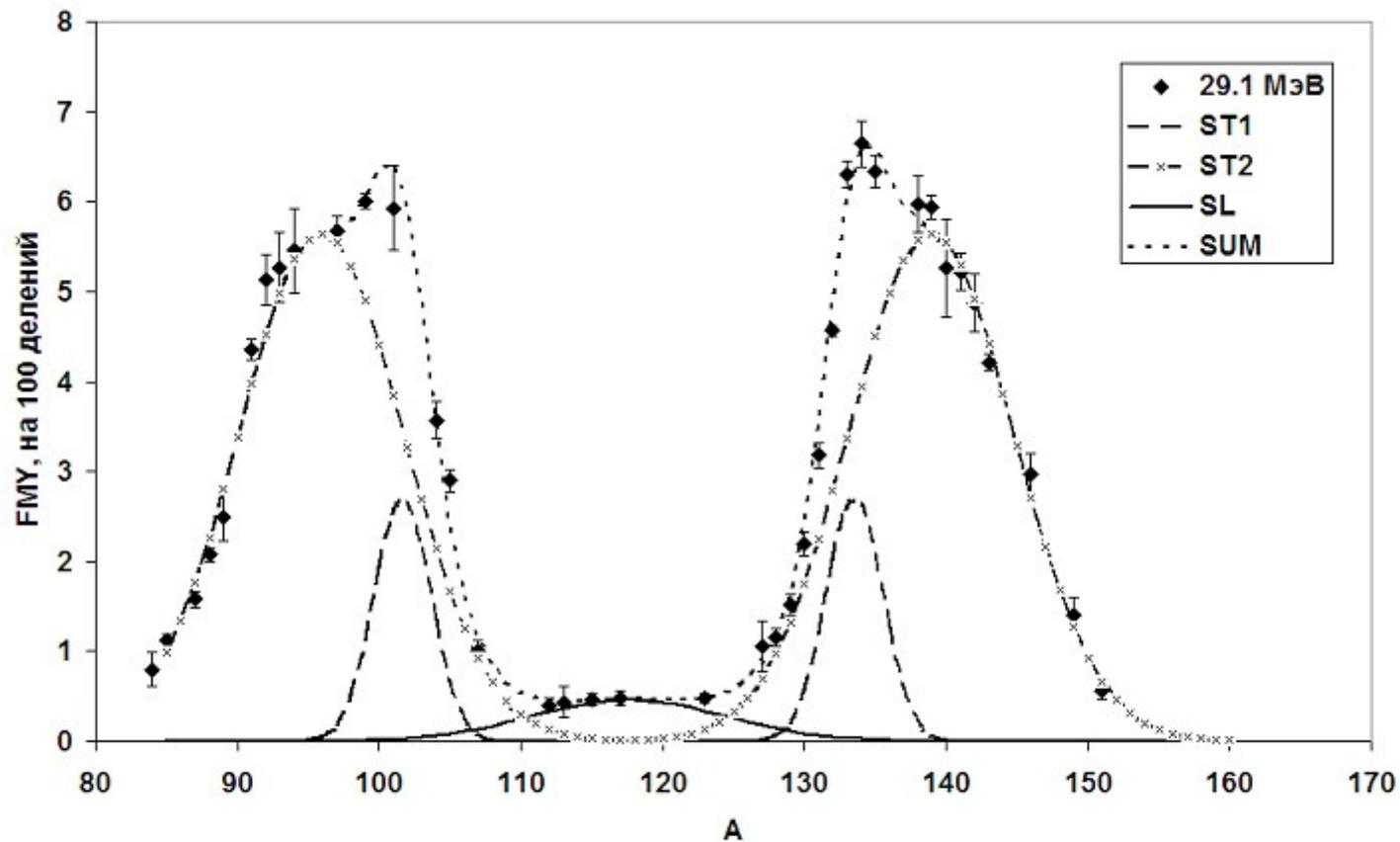
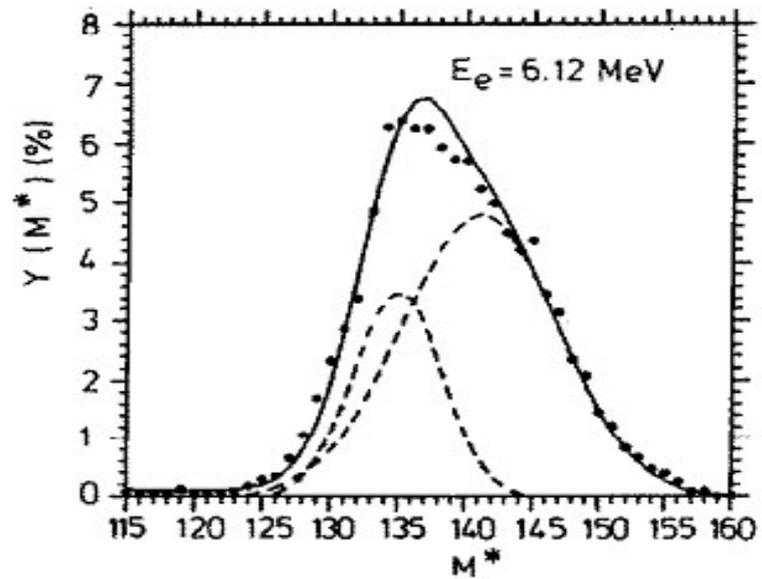
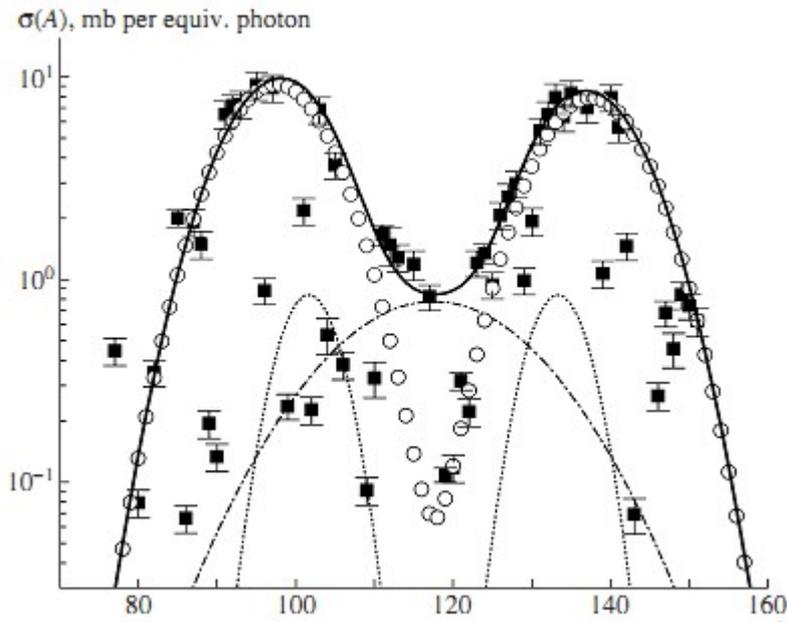


Рис. 1. Аппроксимация массового распределения 5-ю гауссовыми кривыми при фотоделении ^{238}U тормозными гамма - квантами в верхней границей спектра 29.1 МэВ.

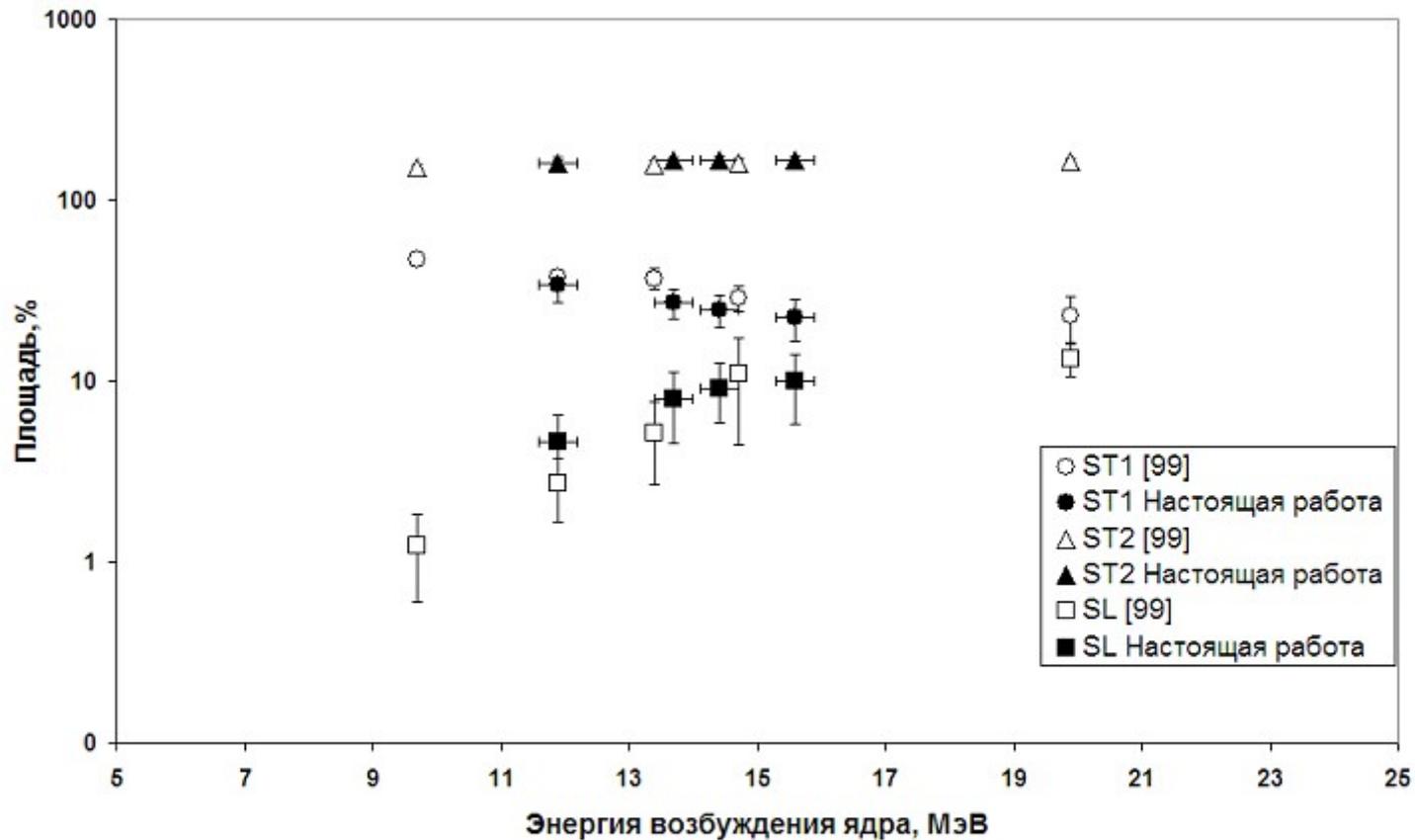
Моды деления



Demekhina N., Karapetyan G. Multimode approximation for ^{238}U photofission at intermediate energies // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2008. — Vol. 71, no. 1. — P. 27–35.

Fragment characteristics for the photofission of ^{238}U with 6.1–13.1 meV bremsstrahlung / S. Pomme, E. Jacobs, M. Piessens et al. // *Nucl. Phys. A*. — 1994. — Vol. 572. — P. 237–266.

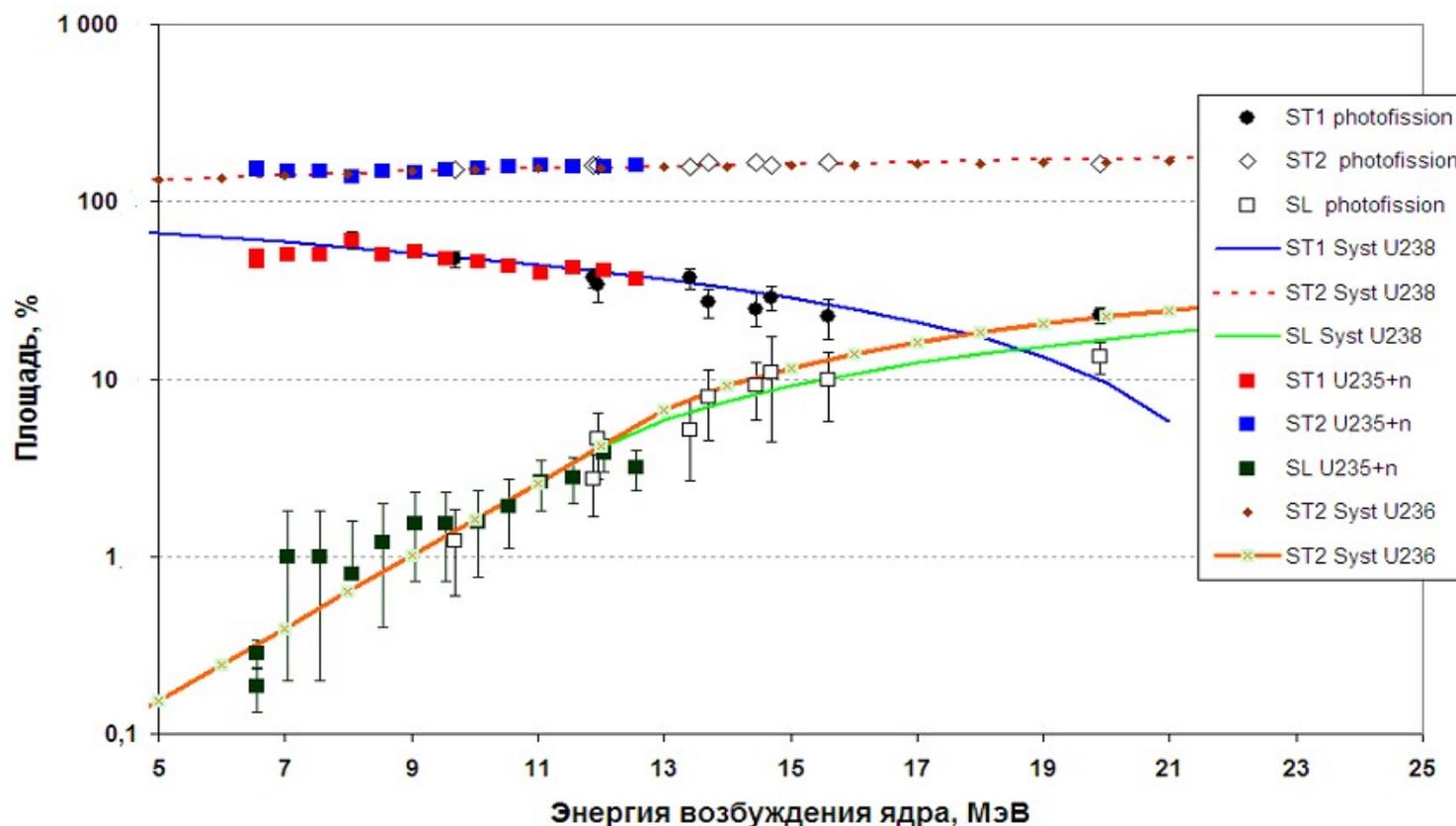
Моды фотоделения ^{238}U



Вклады различных мод деления в массовое распределение в зависимости от энергии возбуждения делящегося ядра.

Fragment mass and kinetic energy distributions for the photofission of ^{238}U with 12-, 15-, 20-, 30-, and 70-mev bremsstrahlung / E. Jacobs, A. De Clercq, H. Thierens et al. // Phys. Rev. C. — 1979. — Vol. 20. — P. 2249–2256.

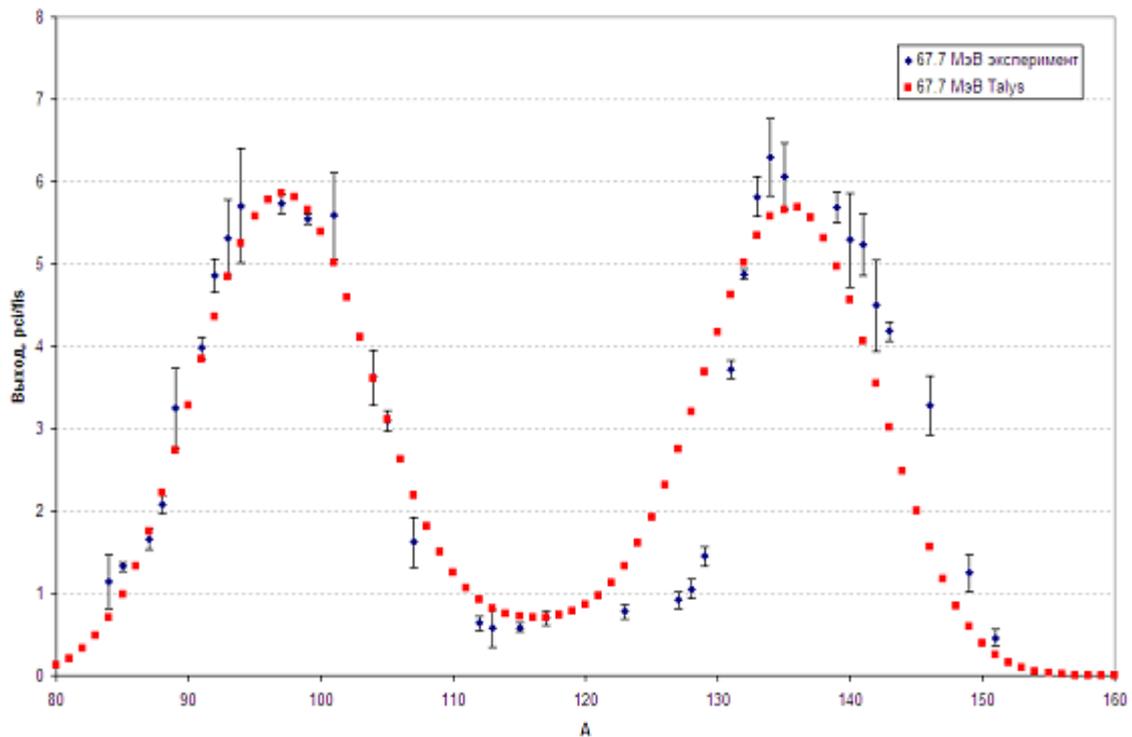
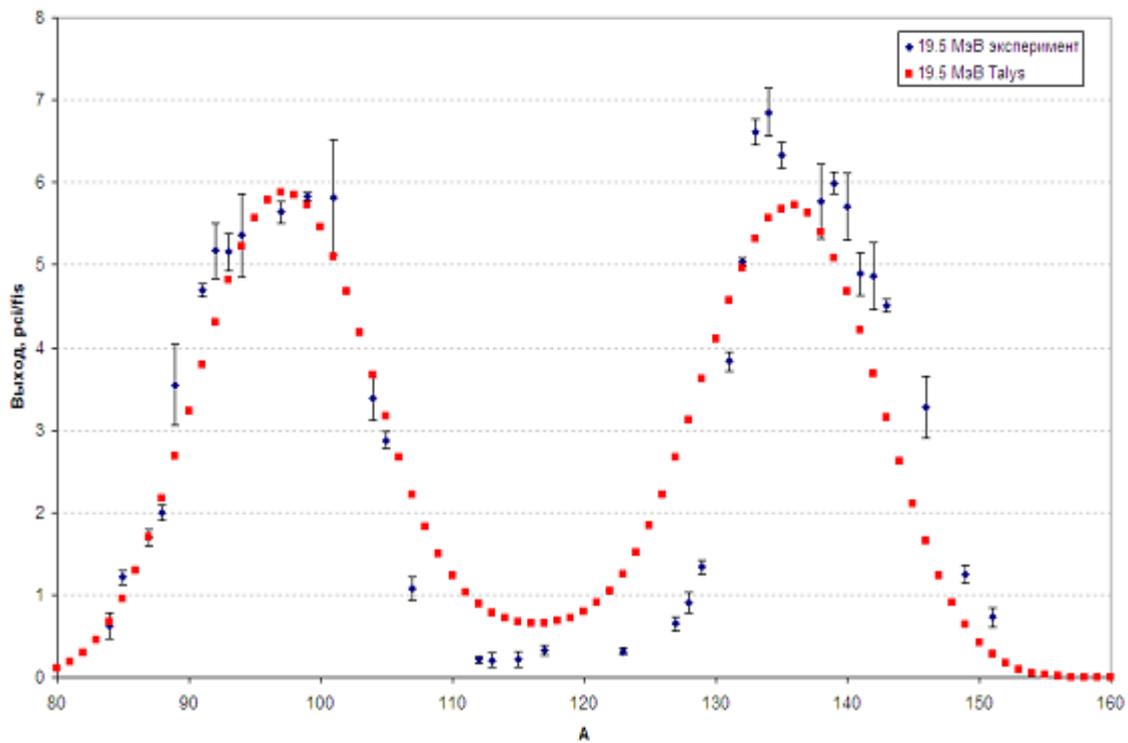
Моды фотоделения ^{238}U и деления под действием нейтронов ^{237}U и ^{235}U



Вклады различных мод деления при фотоделении ^{238}U и делении ^{235}U под действием нейтронов, линиями показаны расчеты для деления составного ядра с $A = 238$ выполненные по систематике [Wahl]

Systematics of Fission-Product Yields / Ed. by Arthur C. Wahl. — Los Alamos National Laboratory., 2002.

Сравнение экспериментального массового распределения фотоделения и массового распределения полученного с помощью модели Talys



Заключение

- Измерены выходы осколков фотоделения ^{238}U в области энергий гигантского дипольного резонанса. при энергиях ускорителя электронов Было проанализировано 40 различных цепочек распадов ядер-изобар и получены массовые распределения осколков фотоделения ^{238}U с учетом зарядового распределения и вылета запаздывающих нейтронов при четырех энергиях ускорителя - 19.5, 29.1, 48.3 и 67.7 МэВ. Проведено исследование характеристик массового распределения осколков фотоделения в зависимости от средней энергии возбуждения ядра.
- Впервые проведен совместный анализ и сравнение поведения симметричной и несимметричных мод деления под действием гамма-квантов. Совместный анализ полученных данных показывает, что вклад моды отвечающей за симметричное разделение на осколки растет при увеличении энергии возбуждения ядра ^{238}U Вклад мод, отвечающих за несимметричное разделение осколков падает. Вклад несимметричной моды STI падает значительно быстрее, чем вклад моды STII. Вклад несимметричной моды STII, связанной с деформированной нейтронной оболочкой $N = 86 - 88$ почти не изменяется.
- При низких энергиях возбуждения составного ядра массовое распределение имеет структуру в районе массового числа $A=134$, которая исчезает при увеличении энергии возбуждения. Показано, что сглаживание структуры в районе массового числа $A = 134$ связано с поведением несимметричной моды деления STI при увеличении энергии возбуждения ядра.
- Вся несимметричная компонента при увеличении энергии возбуждения ядра изменяется слабо. Это свидетельствует о том, что в процессе деления большую роль играют не только сферические оболочки $Z = 50$ и $N = 82$. В деформированном потенциале появляется новое магическое число $N = 88$, которое и проявляется в массовом распределении.

Заключение

- В работе получен фракционный независимый выход образования в результате фотоделения ядра ^{134}I . При увеличении энергии возбуждения ядра ^{238}U от 6 до 16 МэВ фракционный независимый выход образования нечетного ядра йода ^{134}I увеличивается в 2.5 раза от 10 до 25 % от массового выхода образования ядер с $A = 134$, что указывает уменьшение роли оболочечных эффектов при увеличении энергии возбуждения ядра.
- Анализ поведения отношения несимметричного и симметричного деления показывает, что симметричная компонента увеличивается в 3-4 раза относительно несимметричной при увеличении средней энергии возбуждения ядра ^{238}U от 12 до 16 МэВ. Характер изменения этого отношения обусловлен экспоненциальной зависимостью вероятности прохождения ядра через барьер деления. Дальнейшее замедление этого спада связано с открытием нового канала деления после предварительного вылета нейтрона из составного ядра.
- Впервые было проведено сравнение характеристик массового распределения продуктов деления под действием гамма-квантов и нейтронов. При получении характеристик массового распределения деления под действием нейтронов использовалась систематика продуктов деления, полученная для нейтронов и протонов. Показано, что отношение несимметричного и симметричного деления для фотоделения ^{238}U и деления составного ядра ^{238}U образованного под действием нейтронов, а также поведение отдельных мод деления совпадают.
- Проведены оценки среднего числа нейтронов, вылетевших в результате деления. Среднее число нейтронов деления совпадает с результатами полученными на пучках квазимонохроматических фотонов в зависимости от энергии возбуждения ядра.
- Получена оценка отношения $Y(\text{gamma},F)/Y(\text{gamma},n)$ выходов реакции фотоделения и фотонейтронной реакции под действием тормозных гамма-квантов. Эти отношения совпадают с оцененными ядерными данными.
- Полученные результаты сравниваются с предсказанием мультимодальной модели зависимости отдельных мод деления от энергии возбуждения делящегося ядра. Сравнение с результатами, полученными при моделировании фотоделения с помощью статистической модели деления в программе Talys, показывает в целом качественное согласие. Однако количественные характеристики сечения и массового распределения различаются. Необходимо проводить дальнейшее уточнение параметров модели.

Апробация работы: Используемая методика и основные результаты были опубликованы в статьях в реферируемых журналах:

- Ишханов Б. С., Кузнецов А. А. Фоторасщепление ^{238}U в области энергий гигантского дипольного резонанса // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2013. — N 1. — С. 27–32. [65]
- Ишханов Б. С., Кузнецов А. А. Массовое распределение осколков фотоделения ^{238}U // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2013. — N 3. — С. 10–20. [66]
- Ускоритель РТМ-70 как импульсный источник нейтронов и фотонов / А.А. Кузнецов, С.С. Бельшев, А.Н. Ермаков и др. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия.— 2007.— N 6.— С. 25–28. [67]
- Выходы фотонейтронных реакций на ядре ^{197}Au в области гигантского дипольного резонанса / С.С. Бельшев, А.Н. Ермаков, Б.С. Ишханов и др. // Ядерная физика.— 2011.— Т. 74, N 11.— С. 1576–1580. [68]
- Определение выходов ядерных реакций на основе анализа цепочек распадов / С.С. Бельшев, К.А. Стопани, А.А. Кузнецов и др. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия.— 2011.— N 4.— С. 42–47. [69]

Тезисы докладов на конференциях:

- Photofission of a natural mix of $^{235},^{238}\text{u}$ isotopes / S.S. Belyshev, A.N. Ermakov, V.V. Khankin et al. // LVII International Conference on Nuclear Physics NUCLEUS-2007 "Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Power Engineering and Nuclear Technologies June 25 - 29, 2007, Voronezh. — Saint-Petersburg, 2007. — P. 46. [70]

- Фоторасщепление естественной смеси изотопов $^{235,238}\text{U}$ / С.С. Бельшев, А.Н. Ермаков, А.А. Кузнецов и др. // Труды VIII межвузовской школы молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине 19-20 ноября, 2007 г. — Издательство МГУ Москва, 2007.— р. 1. [\[71\]](#)
- Исследование фоторасщепления естественной смеси изотопов $^{235,238}\text{U}$ на ускорителе ртм-70 / С.С. Бельшев, А.Н. Ермаков, А.А. Кузнецов и др. // 58 Международное Собрание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра "Ядро-2008". Проблемы фундаментальной ядерной физики. Разработка ядерно-физических методов для нанотехнологий, медицинской физики и ядерной энергетики. Тезисы докладов.— Санкт-Петербург, 2008.— С. 149. [\[72\]](#)
- Автоматизация обработки данных гамма-активационных экспериментов / С.С. Бельшев, А.А. Кузнецов, А.С. Курилик, К.А. Стопани // 58 Международное Собрание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра "Ядро-2008". Проблемы фундаментальной ядерной физики. Разработка ядерно-физических методов для нанотехнологий, медицинской физики и ядерной энергетики. Тезисы докладов.— Санкт-Петербург, 2008.— С. 282. [\[73\]](#)
- Определение выходов осколков при фотоделении естественной смеси изотопов $^{235,238}\text{U}$ тормозными гамма-квантами / С.С. Бельшев, А.Н. Ермаков, А.А. Кузнецов и др. // 59 Международное собрание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра "Ядро 2009". Тезисы докладов. 15 – 19 июня 2009 г. Чебоксары.— СпБГУ Санкт-Петербург, 2009.— С. 156. [\[74\]](#)
- Кузнецов А., Курилик А. Калибровка эффективности HPGe детектора по экспериментальным измерениям и моделированию GEANT4 // 59 Международное собрание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра "Ядро 2009". Тезисы докладов. 15 – 19 июня 2009 г. Чебоксары.— СпБГУ Санкт-Петербург, 2009.— С. 314. [\[75\]](#)

- Mass distribution of ^{238}U photofission products / S.S. Belyshev, A.N. Ermakov, B.S. Ishkhanov et al. // LXII International Conference NUCLEUS 2012 "Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Power Engineering and Nuclear Technologies June 25 – 30, 2012, Voronezh, Russia. Book of Abstracts. — Saint-Petersburg, 2012. — P. 95. [77]

Система сбора и анализа данных, используемая в данной работе описана в препринте:
Бельшев С. С., Кузнецов А. А., Макаренко И. В. Автоматизированная система накопления и анализа данных гамма -- активационного анализа. — 2005. — Препринт НИИЯФ МГУ. [78]

Спасибо за внимание