



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

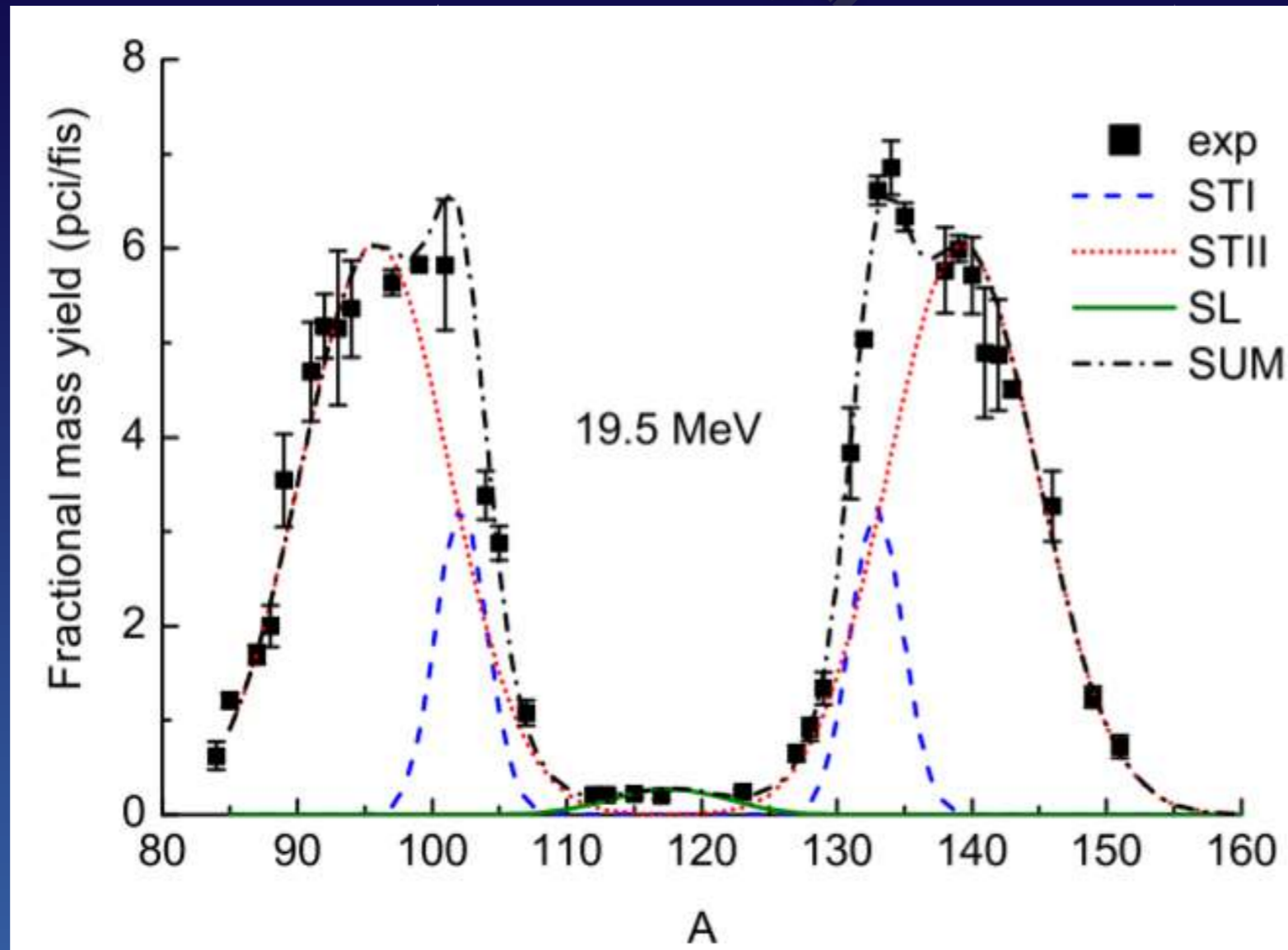
«ЗАРЯДОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ЯДЕР- ИЗОБАР ПРИ ФОТОДЕЛЕНИИ ^{238}U и ^{232}Th »

Выполнил студент 2 курса магистратуры
Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова
Авдонин Евгений Алексеевич

Научный руководитель
доцент, кандидат ф.-м. наук Кузнецов Александр Александрович

Москва
2023

Введение



Массовое распределение осколков деления ^{238}U

Исследуя массовые распределения осколков деления, можно установить, что в тяжелых осколках проявляются оболочечные эффекты.

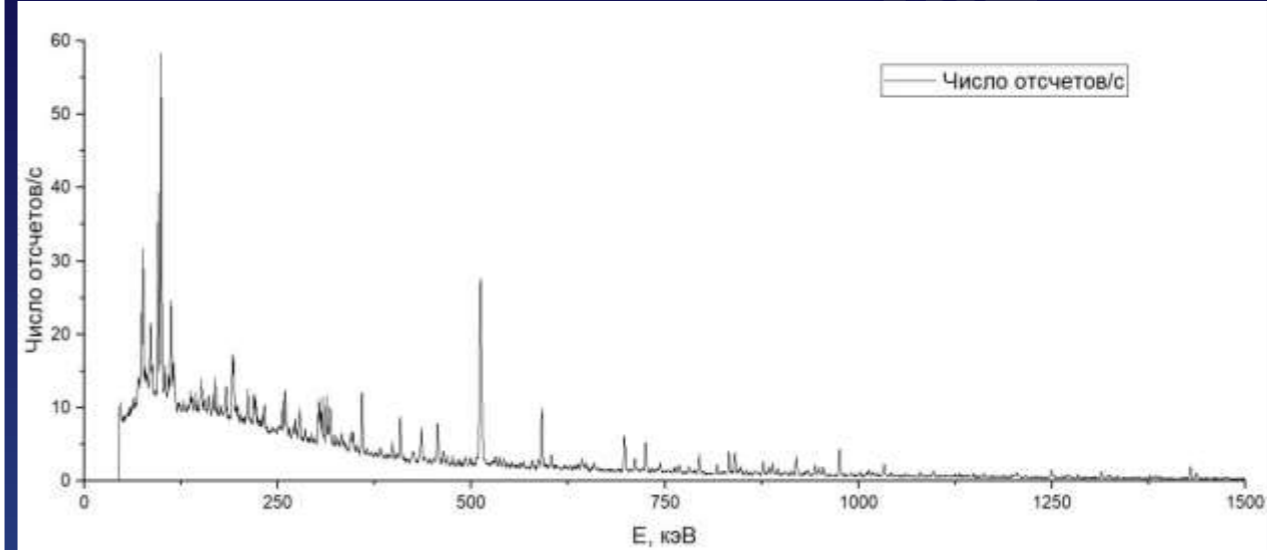
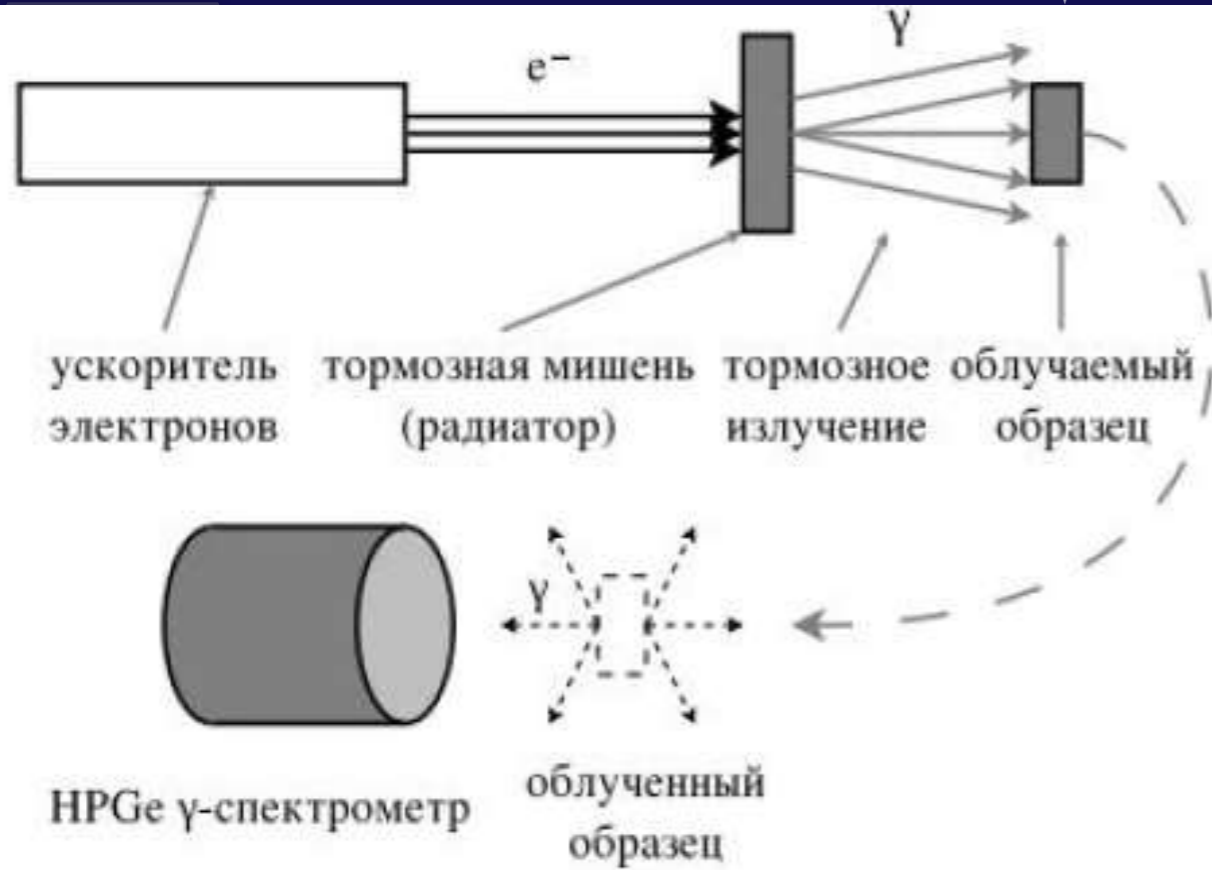
Основная цель данной работы – определить влияние протонных оболочек на деление ядра.

Рисунок взят из работы:

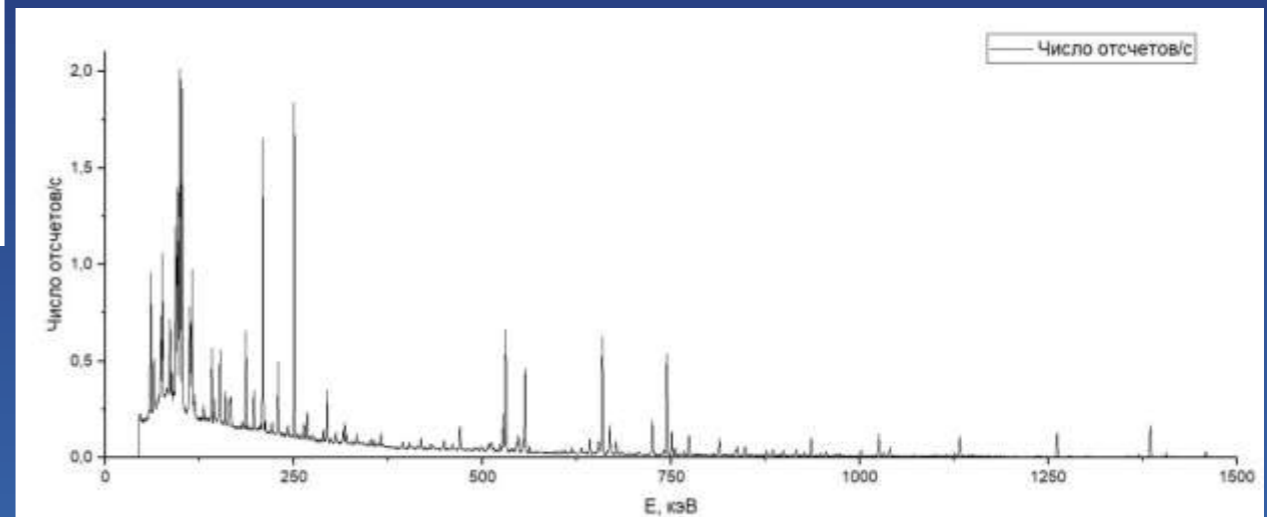
S. S. Belyshev, B. S. Ishkhanov, A. A. Kuznetsov, and K. A. Stopani «Mass yield distributions and fission modes in photofission of ^{238}U below 20 MeV», PHYSICAL REVIEW C 91, 034603 (2015)

Методика проведения эксперимента

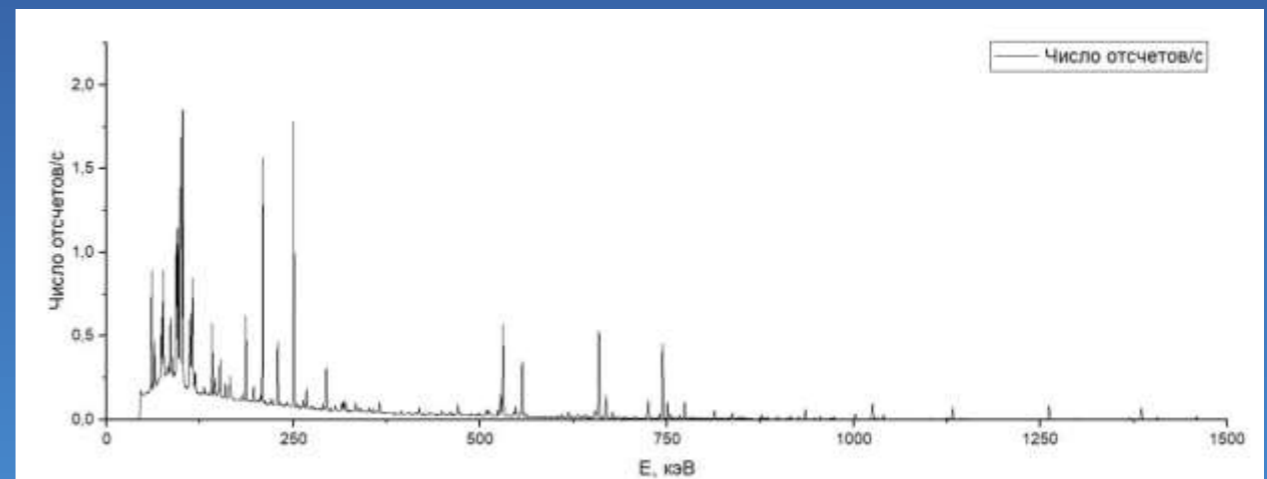
Спектры остаточной активности.:



Статистика за 100 секунд

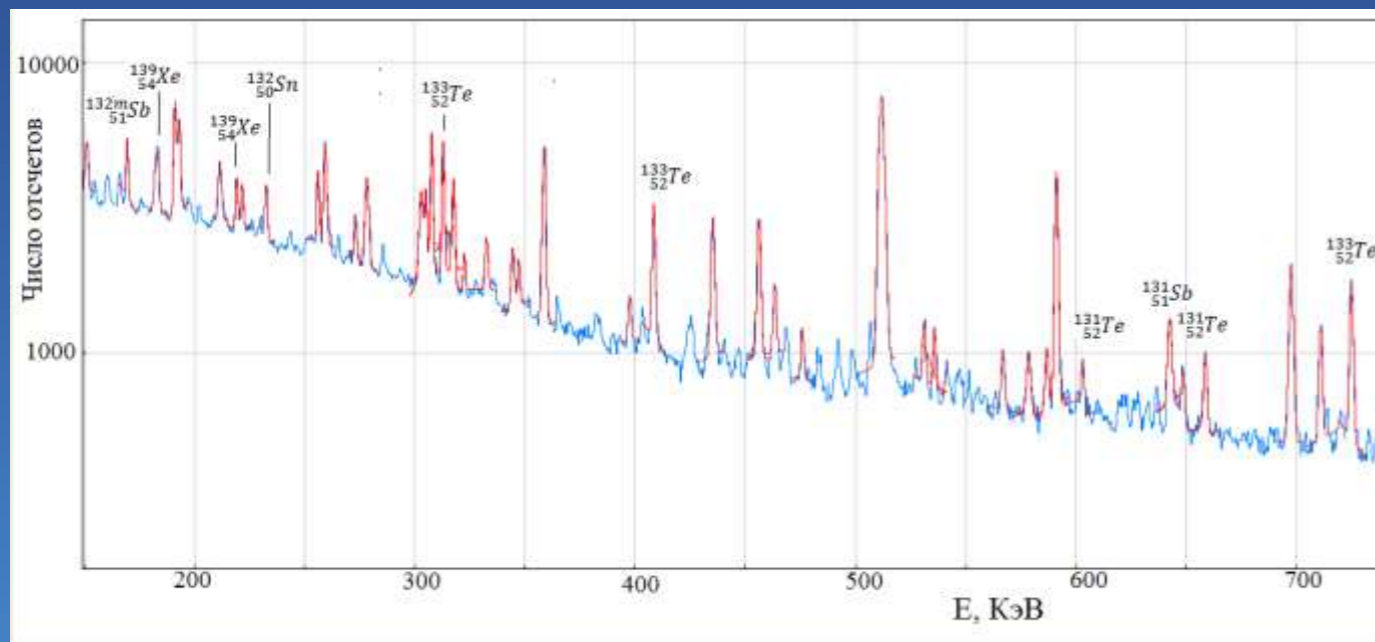


Статистика за 1 час



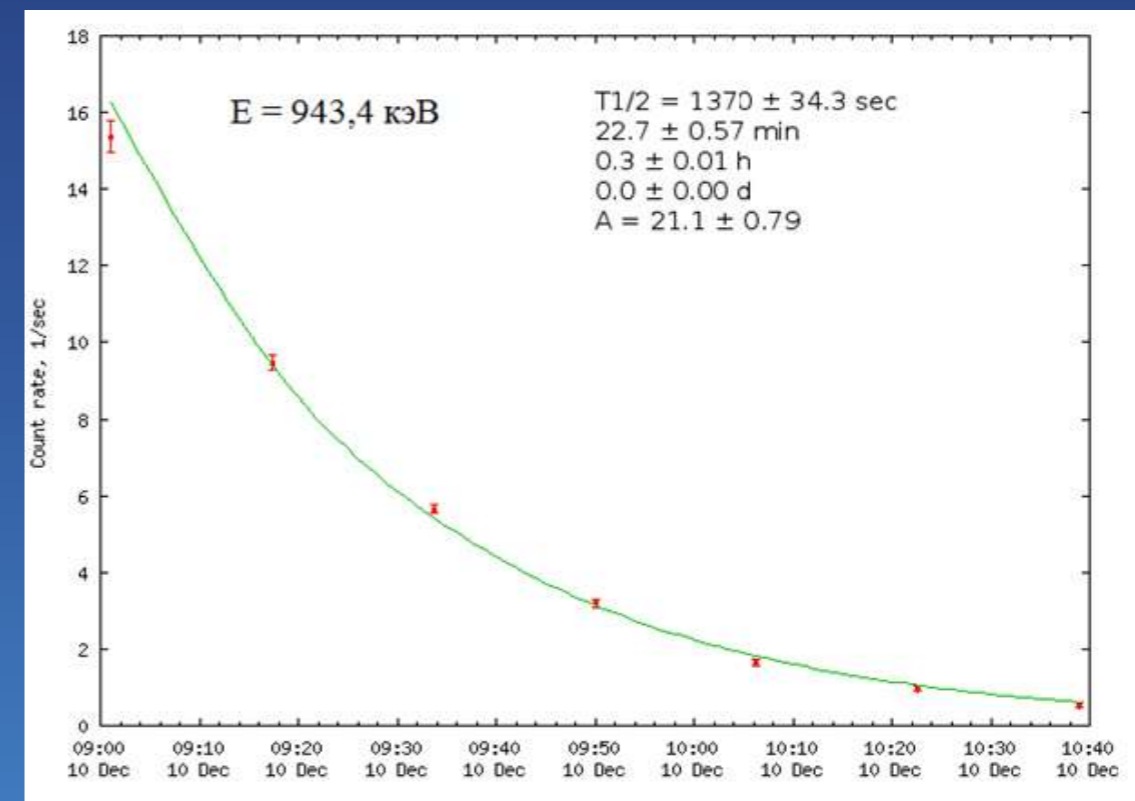
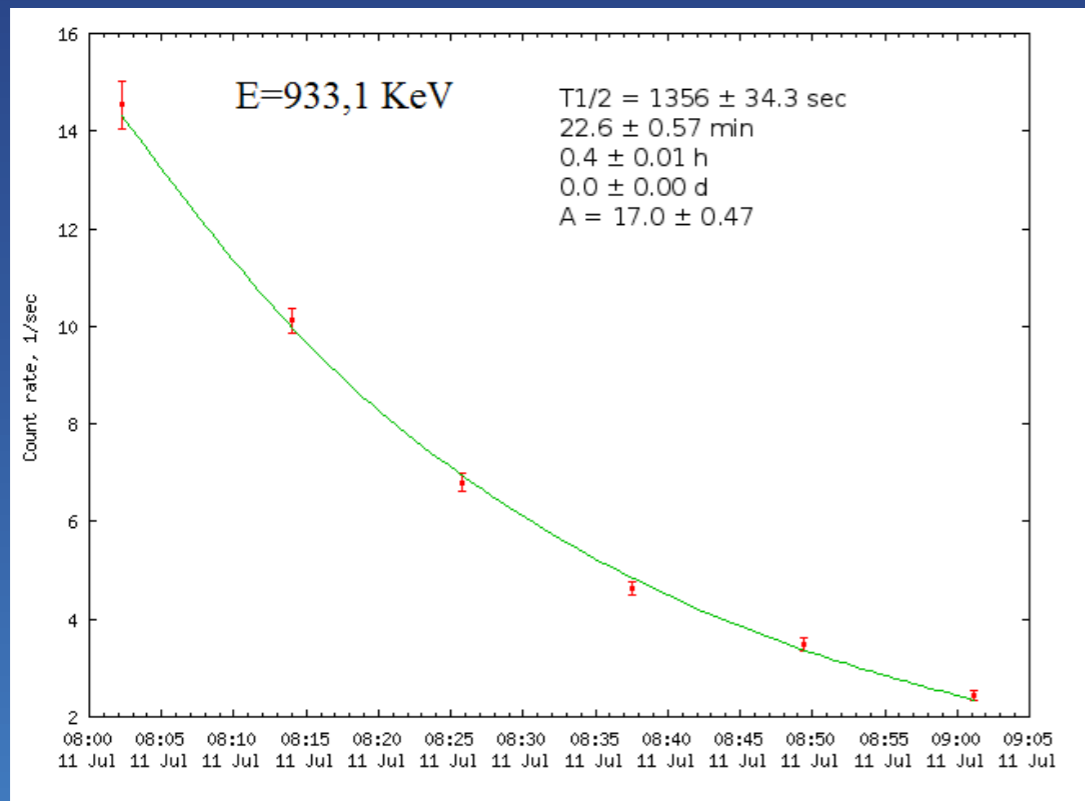
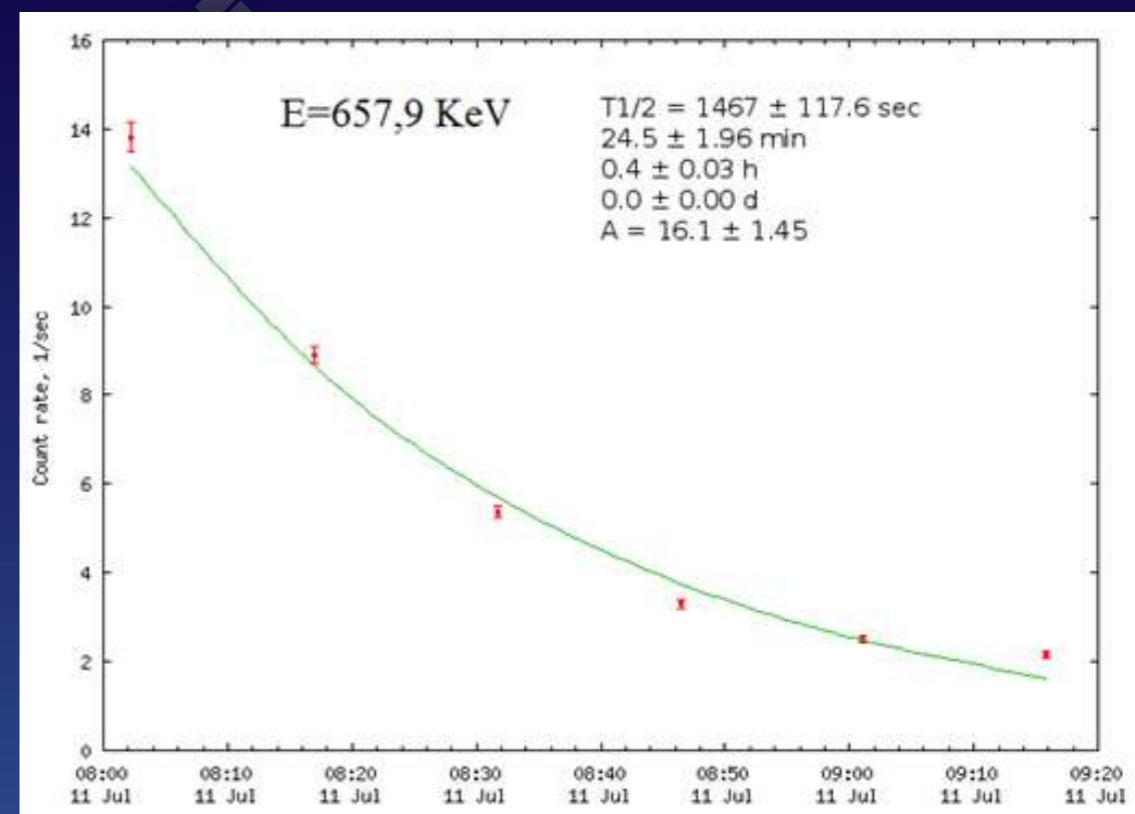
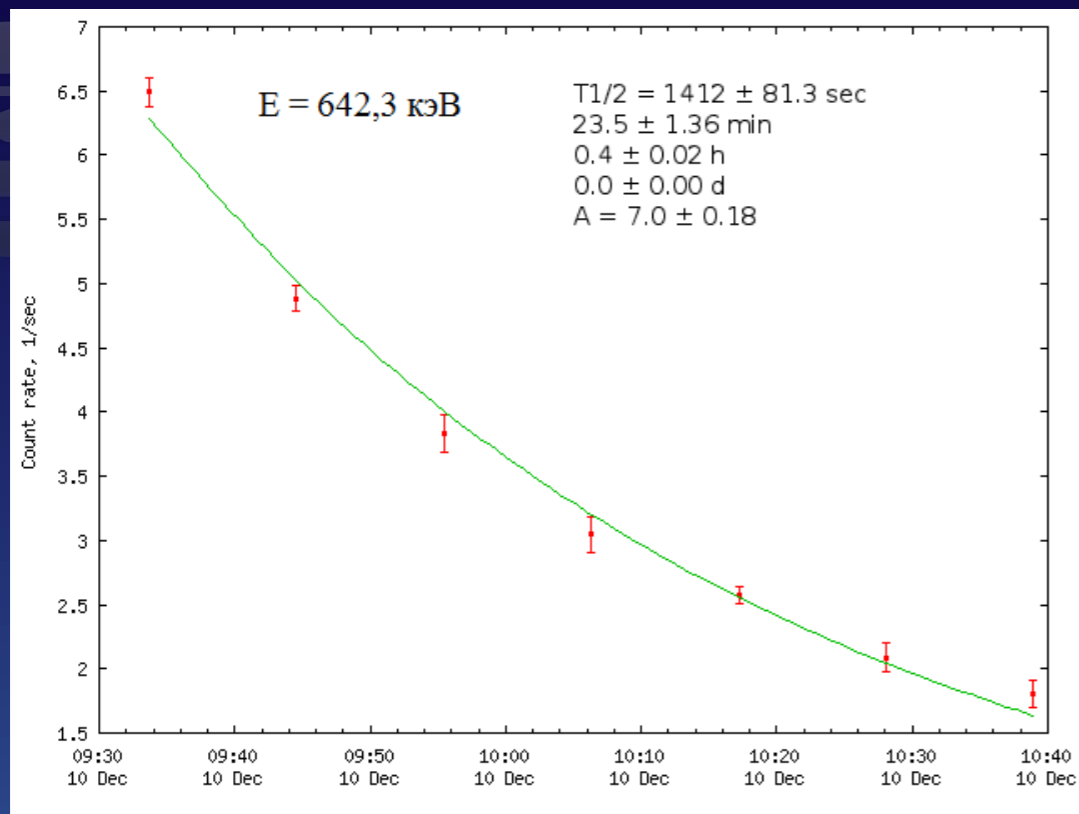
Статистика за 10 часов

Схема проведения эксперимента



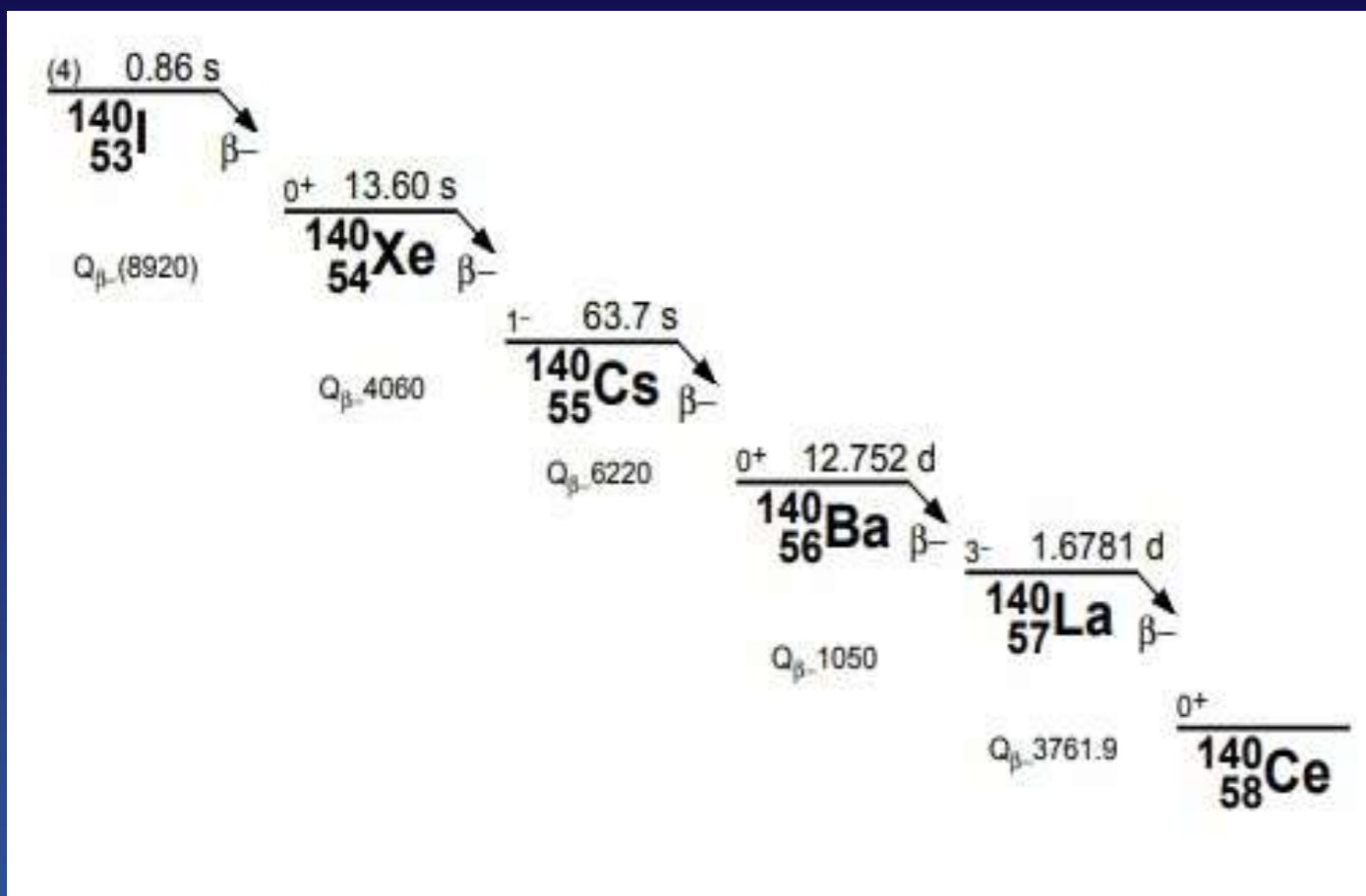
Расшифровка спектра остаточной активности

Расшифровка спектров остаточной активности



В качестве примера рассмотрим распад изотопа ^{131}Sb . В спектрах видны 4 фотопика с энергиями 642,3 кэВ, 657,9 кэВ, 933,1 кэВ и 943,4 кэВ. По энергии все они соответствуют изотопу ^{131}Sb . Необходимо также проверить, совпадает ли период полураспада этих фотопиков с табличным значением (23,03 минуты).

Выходы продуктов фотоделения



Ядра-изобары, образующиеся в результате деления урана или тория, связаны между собой цепочкой последовательных β^- -распадов

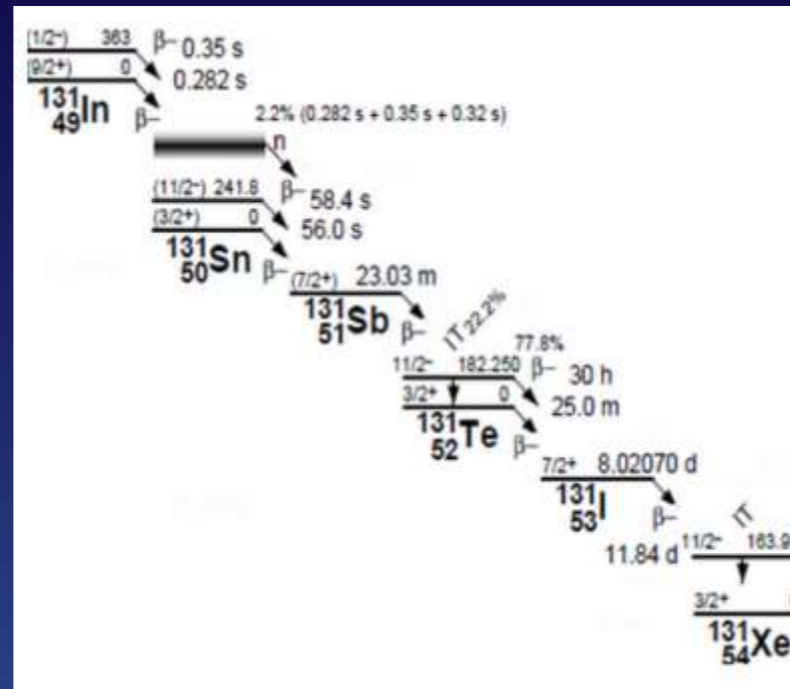
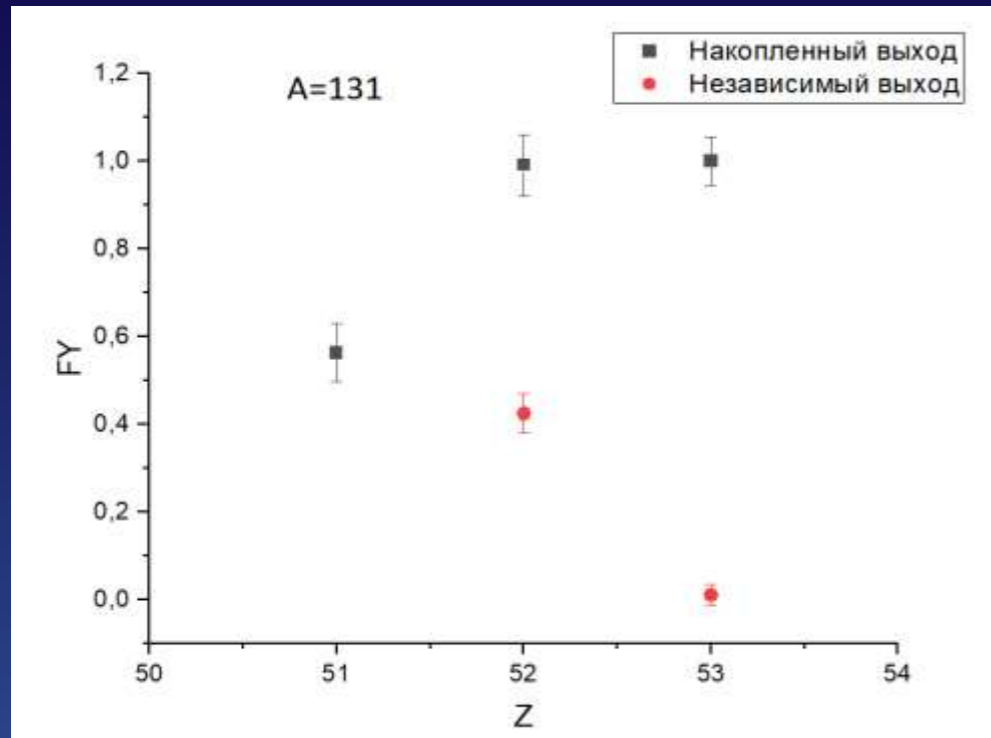
Каждый радиоактивный изотоп в цепочке может образовываться как непосредственно в процессе деления ядер урана, так и путем β^- -распада родительских ядер, которые также образовались в процессе деления. В данной работе экспериментально определялись два вида выходов реакции: независимый и накопленный.

Цепочка последовательных распадов ядер-изобар с массовым числом $A = 140$.

Независимый выход (Англ. Independent yield, IY) – это число радиоактивных ядер определенного нуклида, образовавшегося в результате деления, без учета распада родительских ядер.

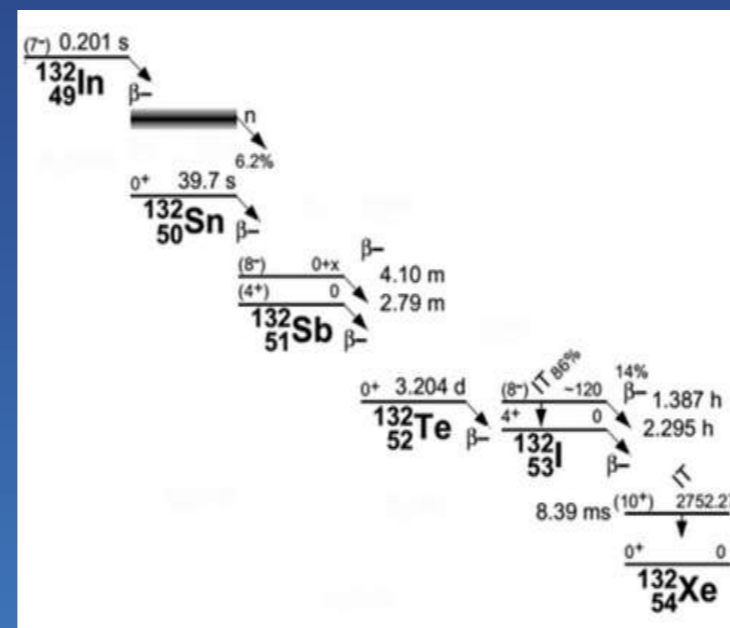
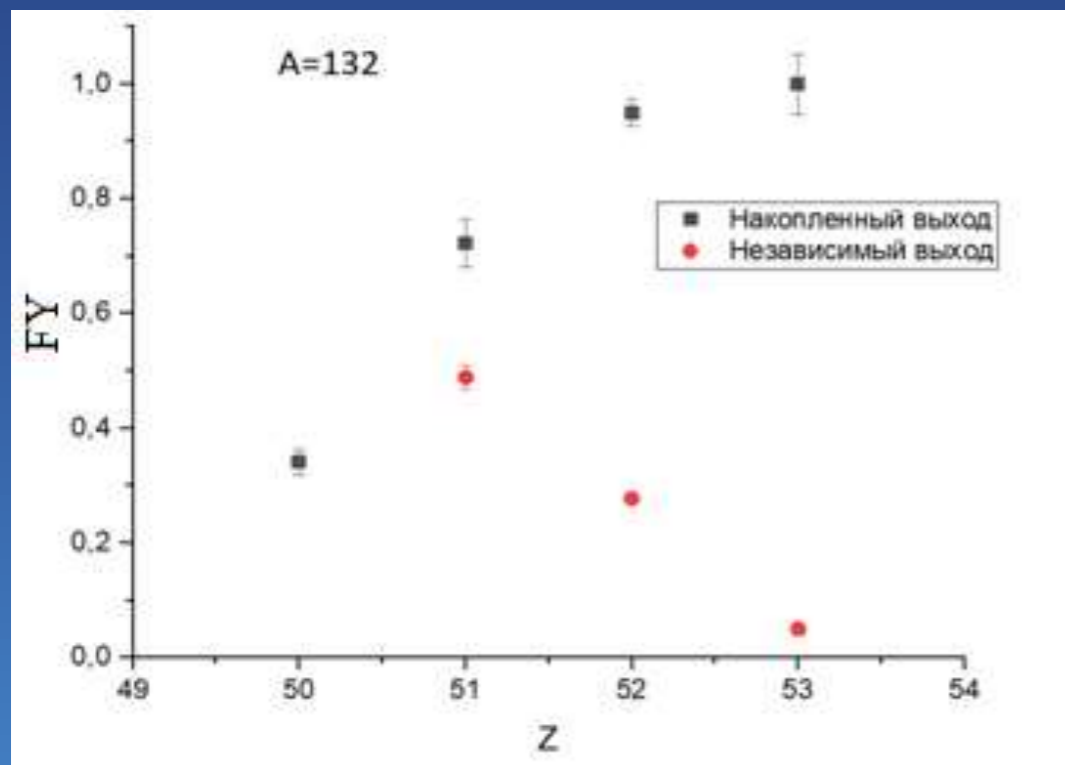
Накопленный выход (Англ. Cumulative yield, CY) – это суммарное число ядер определенного нуклида, образовавшегося как в процессе деления, так и путем β^- -распада родительских ядер.

Зарядовые распределения продуктов фотоделения ^{238}U



Изотоп	$Y_{\text{средн}}$	$\pm \Delta Y_{\text{ср}}$	
$^{131}_{51}\text{Sb}$	0,563	0,066	СУ
$^{131}_{52}\text{Te}$	0,654	0,024	СУ
$^{131m}_{52}\text{Te}$	0,337	0,051	СУ
$^{131}_{53}\text{I}$	1,000	0,055	СУ
$^{131}_{52}\text{Te}$	0,202	0,014	IУ
$^{131m}_{52}\text{Te}$	0,223	0,031	IУ
$^{131}_{53}\text{I}$	0,012	0,024	IУ

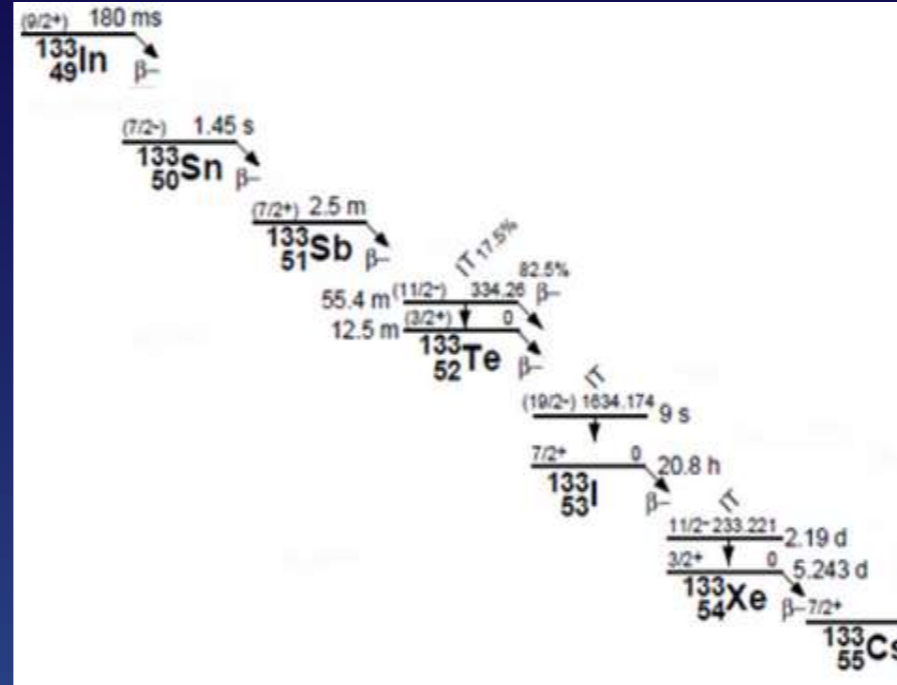
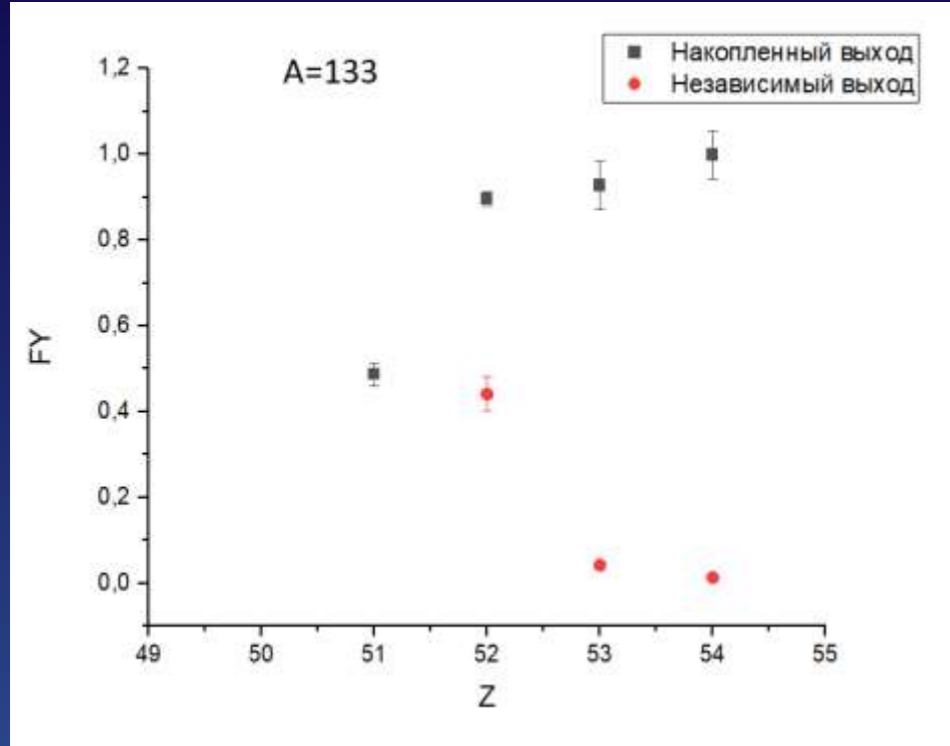
Зарядовые распределения продуктов фотоделения и выходы ядер с $A=131$



Изотоп	$Y_{\text{средн}}$	$\pm \Delta Y_{\text{ср}}$	
$^{132}_{50}\text{Sn}$	0,341	0,022	СУ
$^{132}_{51}\text{Sb}$	0,603	0,029	СУ
$^{132m}_{51}\text{Sb}$	0,112	0,013	СУ
$^{132}_{52}\text{Te}$	0,950	0,023	СУ
$^{132m}_{53}\text{I}$	0,490	0,040	СУ
$^{132}_{53}\text{I}$	0,509	0,012	СУ
$^{132}_{51}\text{Sb}$	0,387	0,019	IУ
$^{132m}_{51}\text{Sb}$	0,102	0,003	IУ
$^{132}_{52}\text{Te}$	0,278	0,006	IУ
$^{132m}_{53}\text{I}$	0,009	0,005	IУ
$^{132}_{53}\text{I}$	0,041	0,004	IУ

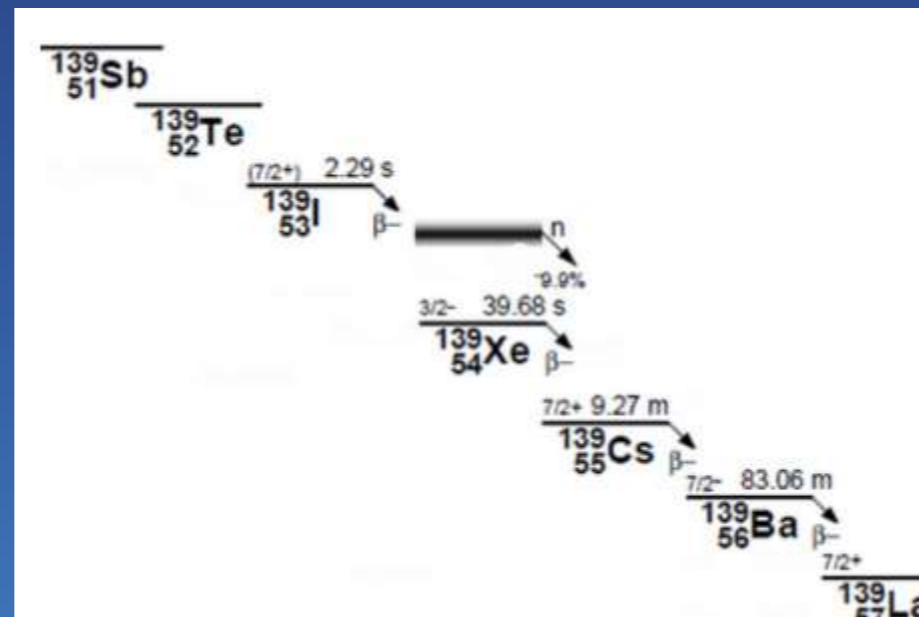
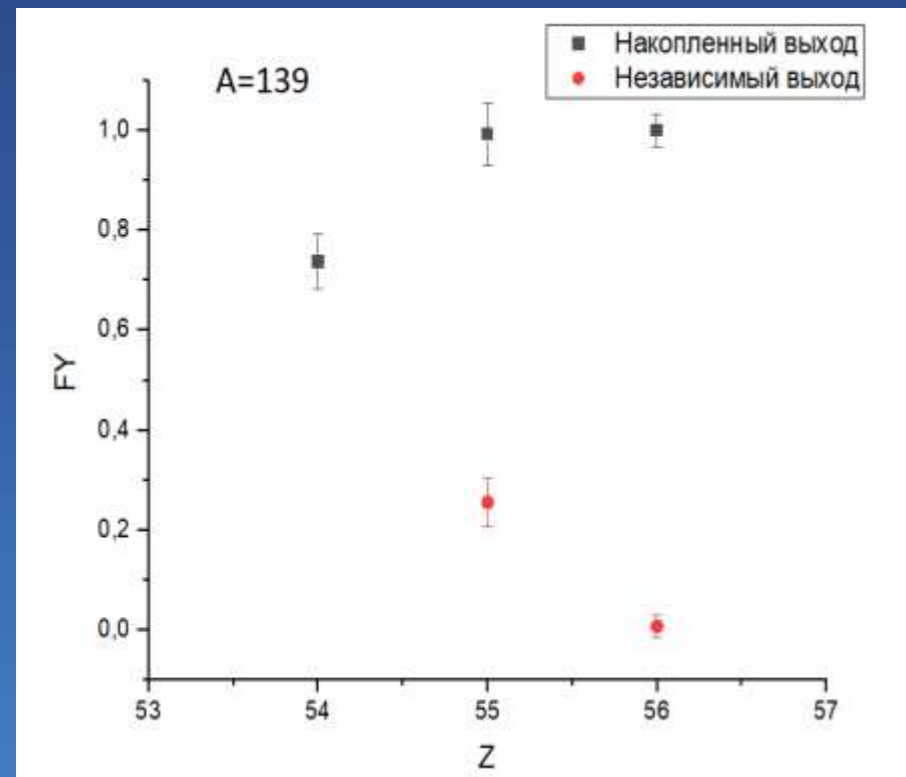
Зарядовые распределения продуктов фотоделения и выходы ядер с $A=132$

Зарядовые распределения продуктов фотоделения ^{238}U



Изотоп	$Y_{\text{средн}}$	$\pm \Delta Y_{\text{ср}}$	
$^{133}_{51}\text{Sb}$	0,487	0,026	СУ
$^{133}_{52}\text{Te}$	0,361	0,016	СУ
$^{133\text{m}}_{52}\text{Te}$	0,536	0,040	СУ
$^{133}_{53}\text{I}$	0,928	0,023	СУ
$^{133}_{54}\text{Xe}$	0,989	0,055	СУ
$^{133\text{m}}_{54}\text{Xe}$	0,012	0,001	СУ
$^{133}_{52}\text{Te}$	0,216	0,007	IУ
$^{133\text{m}}_{52}\text{Te}$	0,234	0,043	IУ
$^{133}_{53}\text{I}$	0,042	0,005	IУ
$^{133}_{54}\text{Xe}$	0,012	0,001	IУ
$^{133\text{m}}_{54}\text{Xe}$	0,0039	0,0004	IУ

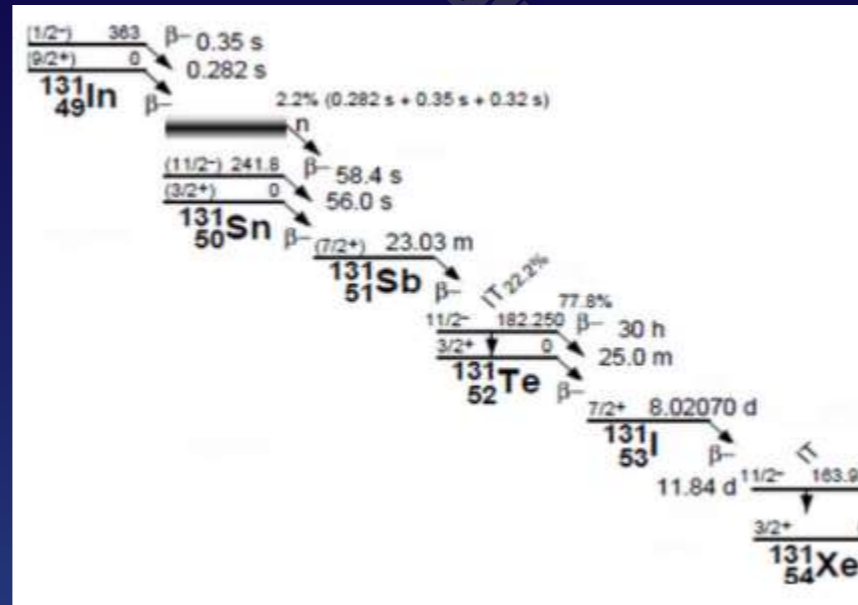
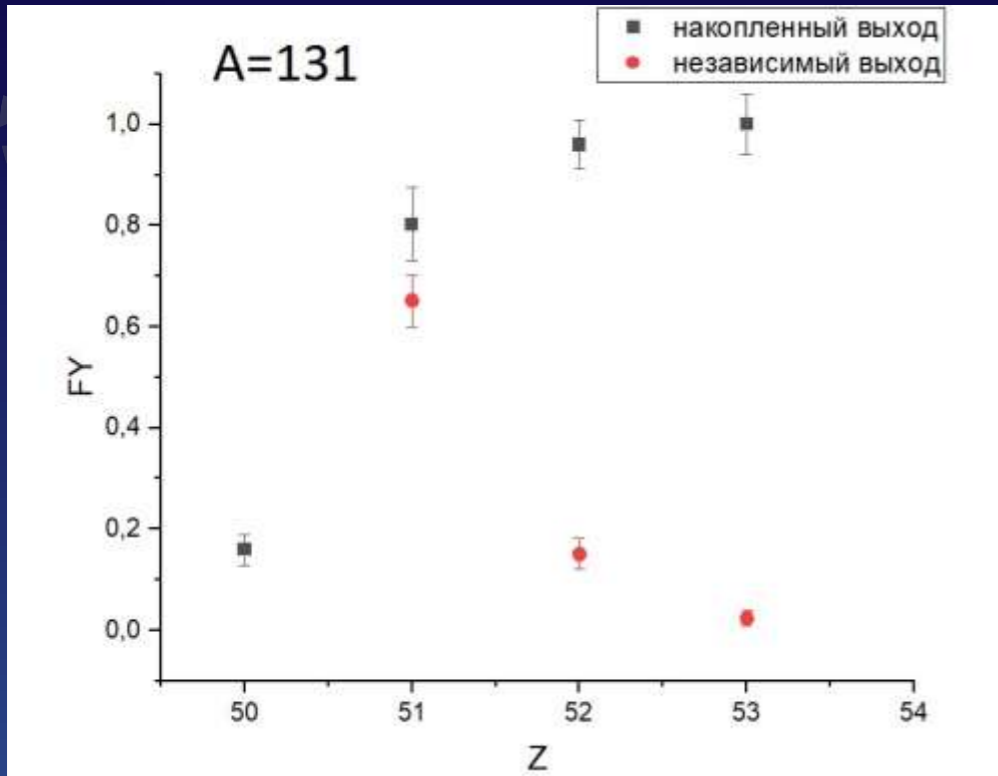
Зарядовые распределения продуктов фотоделения и выходы ядер с A=133



Изотоп	$Y_{\text{средн}}$	$\pm \Delta Y_{\text{ср}}$	
$^{139}_{54}\text{Xe}$	0,737	0,055	СУ
$^{139}_{55}\text{Cs}$	0,992	0,061	СУ
$^{139}_{56}\text{Ba}$	1,000	0,032	СУ
$^{139}_{55}\text{Cs}$	0,256	0,049	IУ
$^{139}_{56}\text{Ba}$	0,008	0,022	IУ

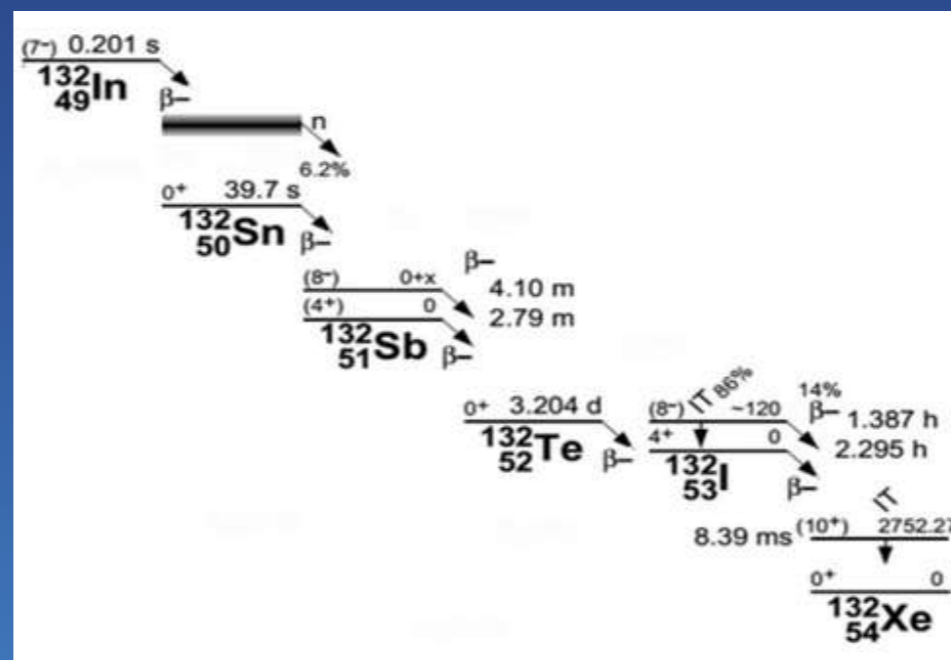
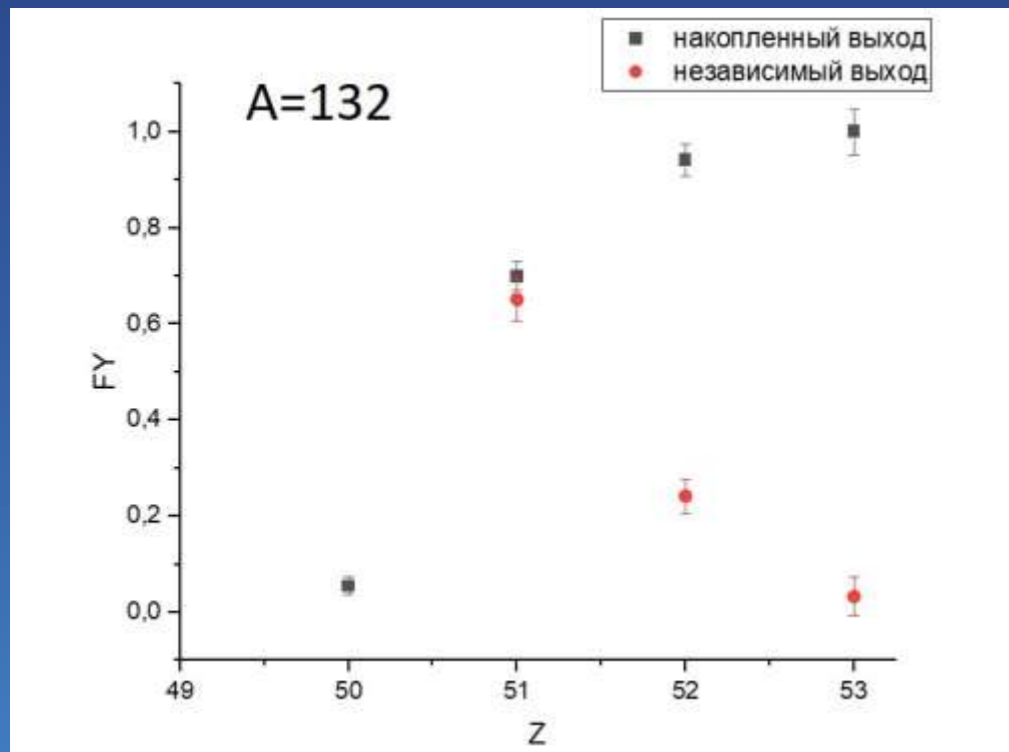
Зарядовые распределения продуктов фотоделения и выходы ядер с A=139

Зарядовые распределения продуктов фотоделения ^{232}Th



ИЗОТОП	$Y_{\text{средн}}$	$\pm \Delta Y_{\text{ср}}$	
$^{131}_{50}\text{Sn}$	0,159	0,031	CY
$^{131}_{51}\text{Sb}$	0,803	0,073	CY
$^{131}_{52}\text{Te}$	0,641	0,048	CY
$^{131m}_{52}\text{Te}$	0,319	0,047	CY
$^{131}_{53}\text{I}$	1,000	0,059	CY
$^{131}_{51}\text{Sb}$	0,652	0,051	IY
$^{131}_{52}\text{Te}$	0,074	0,031	IY
$^{131m}_{52}\text{Te}$	0,077	0,029	IY
$^{131}_{53}\text{I}$	0,024	0,015	IY

Зарядовые распределения продуктов фотоделения и выходы ядер с A=131



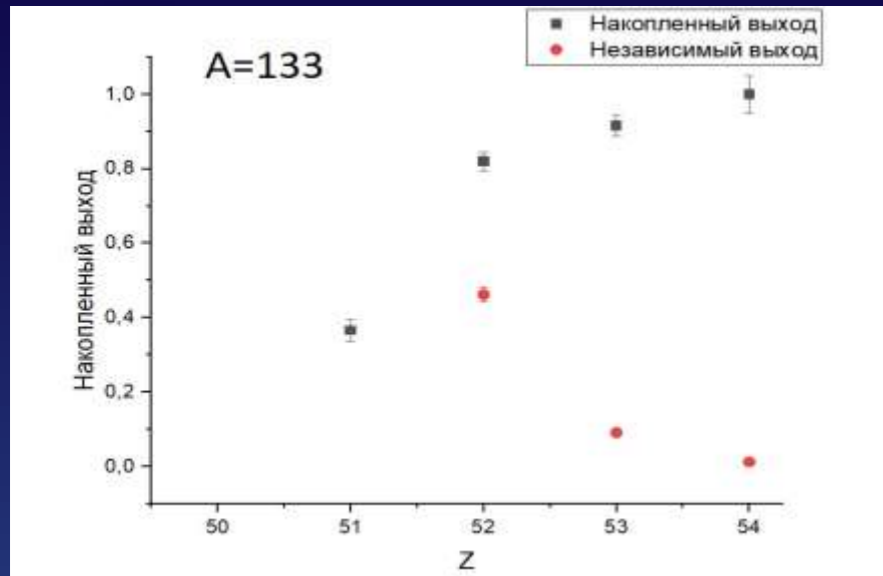
ИЗОТОП	$Y_{\text{средн}}$	$\pm \Delta Y_{\text{ср}}$	
$^{132}_{50}\text{Sn}$	0,055	0,018	CY
$^{132}_{51}\text{Sb}$	0,517	0,032	CY
$^{132m}_{51}\text{Sb}$	0,182	0,028	CY
$^{132}_{52}\text{Te}$	0,941	0,034	CY
$^{132}_{53}\text{I}$	0,526	0,040	CY
$^{132m}_{53}\text{I}$	0,474	0,047	CY
$^{132}_{51}\text{Sb}$	0,544	0,033	IY
$^{132m}_{51}\text{Sb}$	0,107	0,058	IY
$^{132}_{52}\text{Te}$	0,242	0,036	IY
$^{132}_{53}\text{I}$	0,026	0,044	IY
$^{132m}_{53}\text{I}$	0,007	0,023	IY

Зарядовые распределения продуктов фотоделения и выходы ядер с A=132

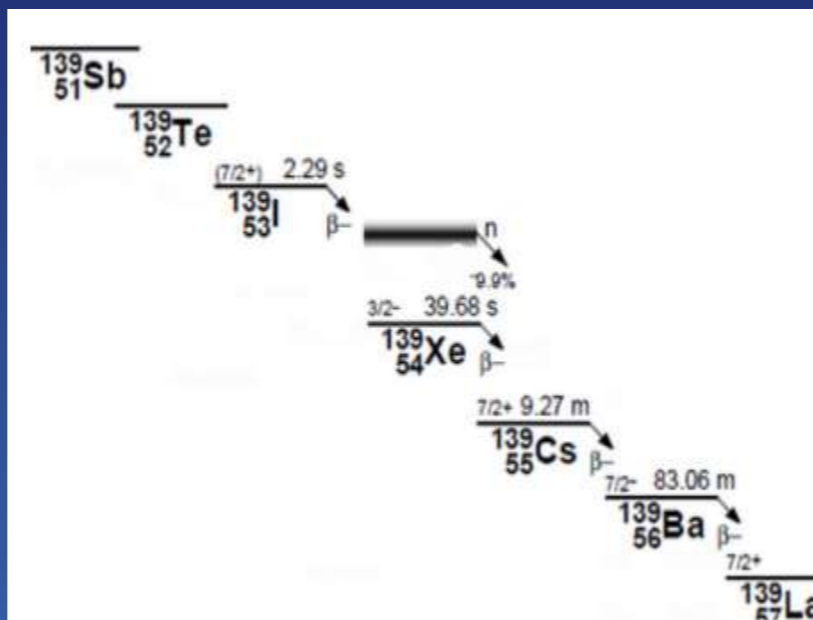
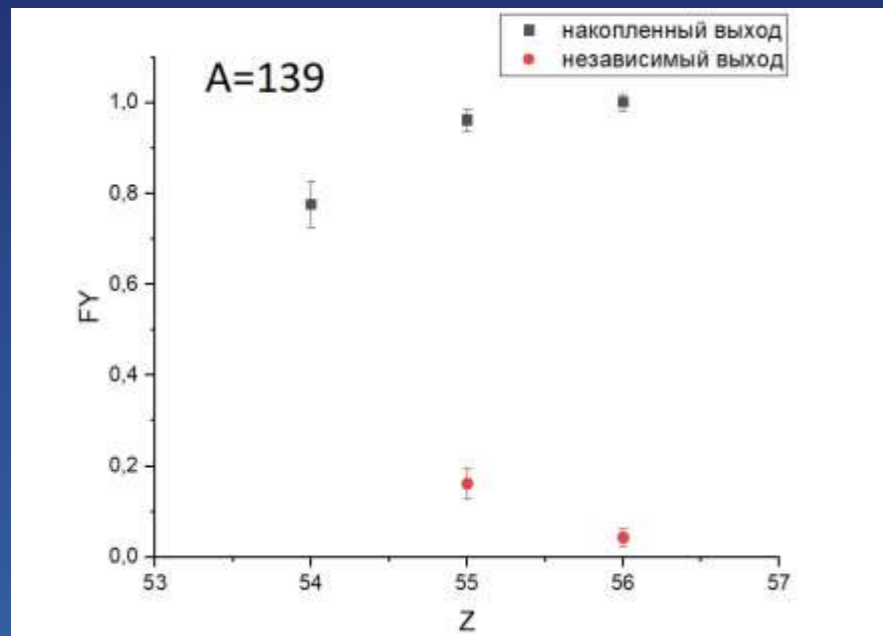
Зарядовые распределения продуктов фотоделения ^{232}Th



A=133

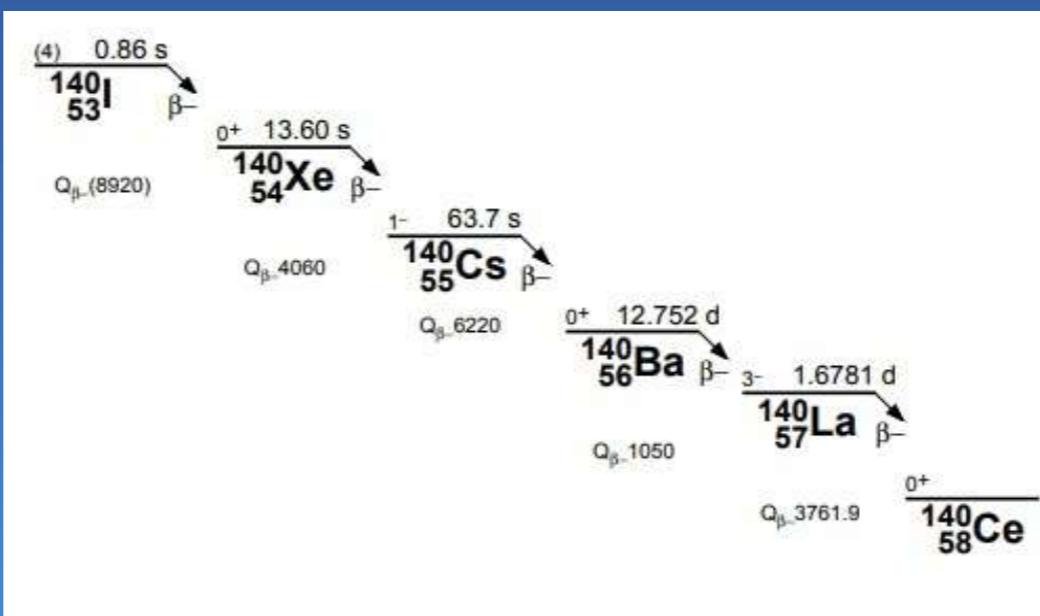
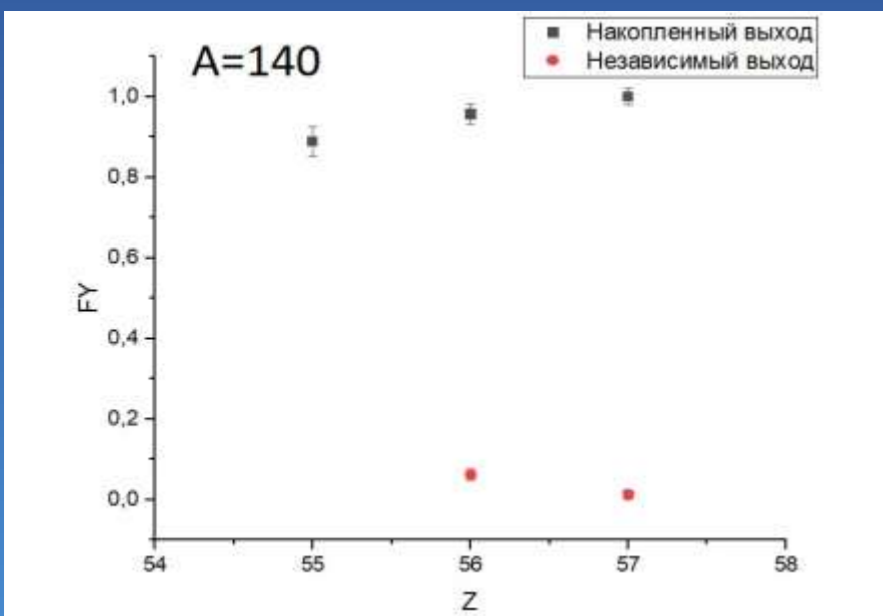


ИЗОТОП	$Y_{\text{средн}}$	$\pm \Delta Y_{\text{ср}}$	
$^{133}_{51}\text{Sb}$	0,365	0,028	CY
$^{133}_{52}\text{Te}$	0,321	0,019	CY
$^{133m}_{52}\text{Te}$	0,499	0,026	CY
$^{133}_{53}\text{I}$	0,916	0,027	CY
$^{133m}_{54}\text{Xe}$	0,026	0,004	CY
$^{133}_{54}\text{Xe}$	0,974	0,061	CY
$^{133}_{52}\text{Te}$	0,205	0,008	IY
$^{133m}_{52}\text{Te}$	0,257	0,019	IY
$^{133}_{53}\text{I}$	0,091	0,007	IY
$^{133m}_{54}\text{Xe}$	0,002	0,001	IY
$^{133}_{54}\text{Xe}$	0,010	0,003	IY



ИЗОТОП	$Y_{\text{средн}}$	$\pm \Delta Y_{\text{ср}}$	
$^{139}_{54}\text{Xe}$	0,776	0,051	CY
$^{139}_{55}\text{Cs}$	0,961	0,023	CY
$^{139}_{56}\text{Ba}$	1,000	0,018	CY
$^{139}_{55}\text{Cs}$	0,162	0,034	IY
$^{139}_{56}\text{Ba}$	0,043	0,021	IY

A=139



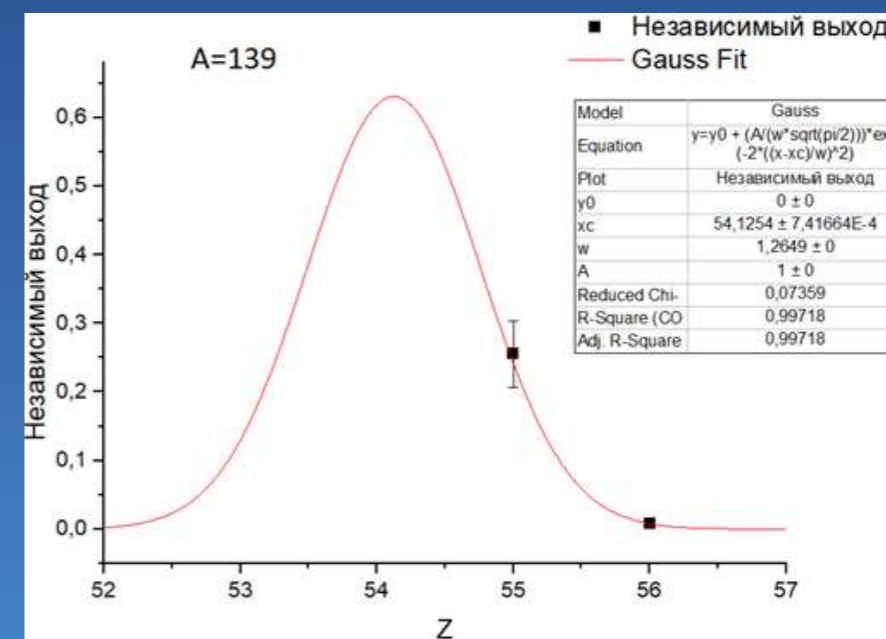
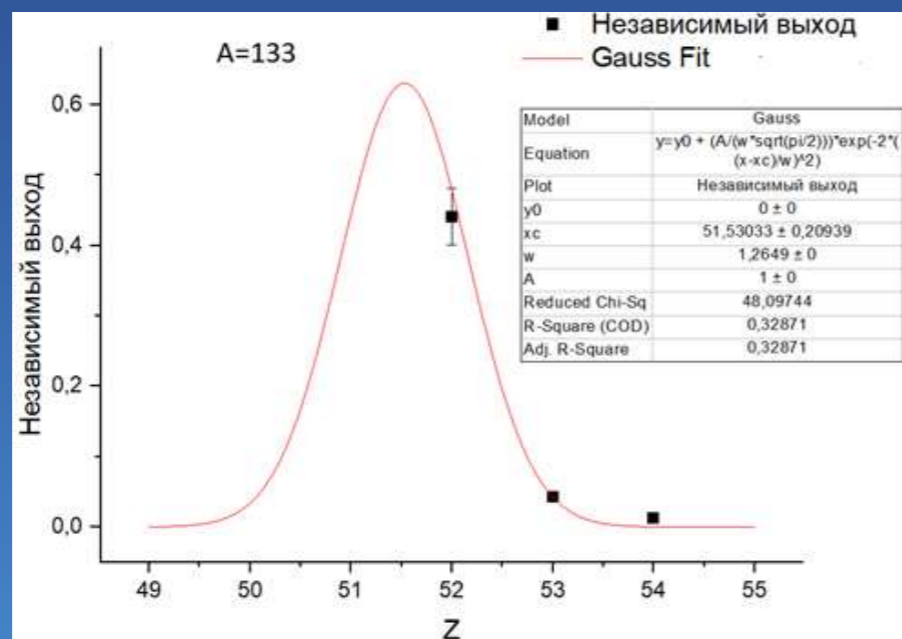
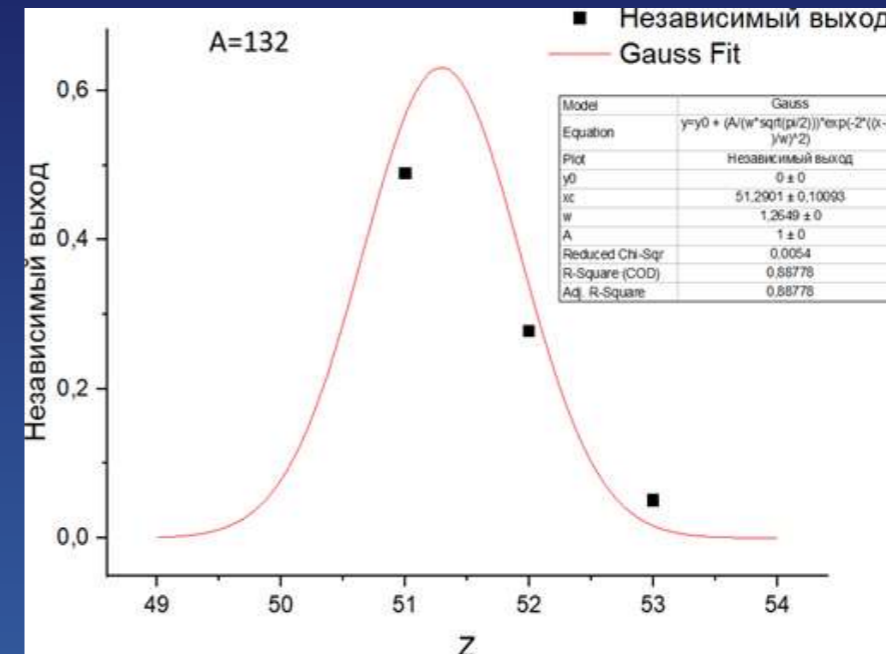
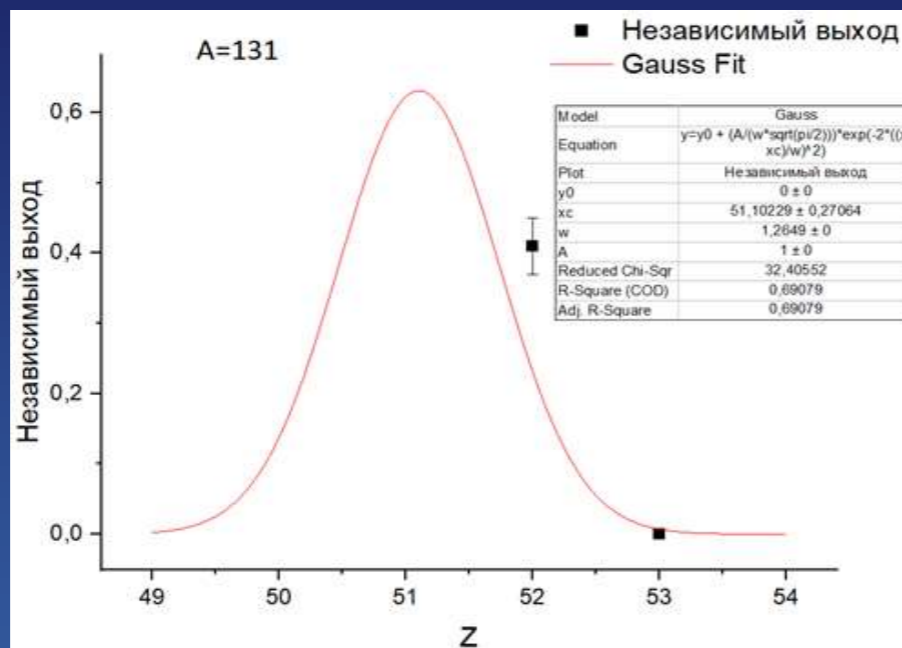
ИЗОТОП	$Y_{\text{средн}}$	$\pm \Delta Y_{\text{ср}}$	
$^{140}_{55}\text{Cs}$	0,889	0,037	CY
$^{140}_{56}\text{Ba}$	0,957	0,025	CY
$^{140}_{57}\text{La}$	1,000	0,021	CY
$^{140}_{56}\text{Ba}$	0,062	0,014	IY
$^{140}_{57}\text{La}$	0,013	0,011	IY

A=140

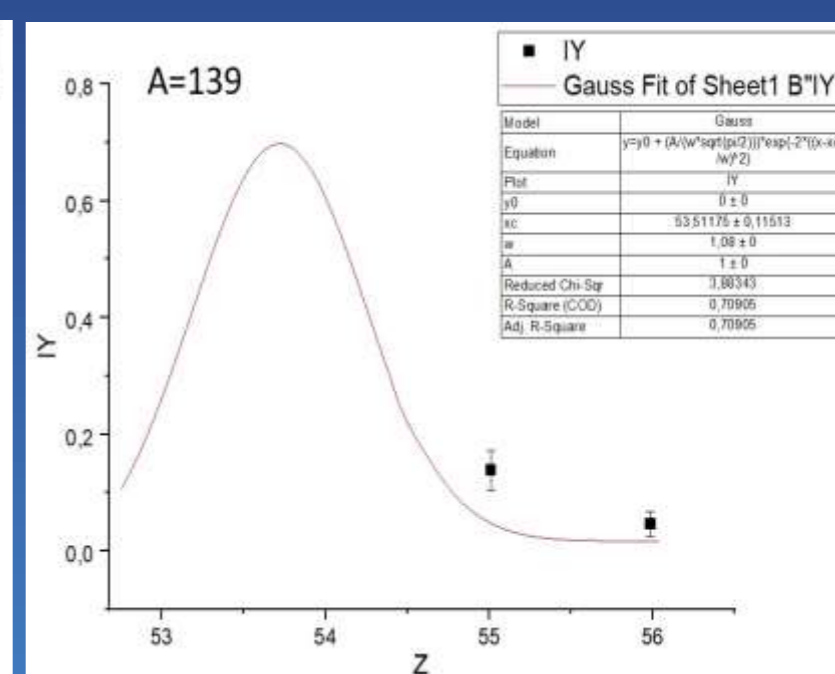
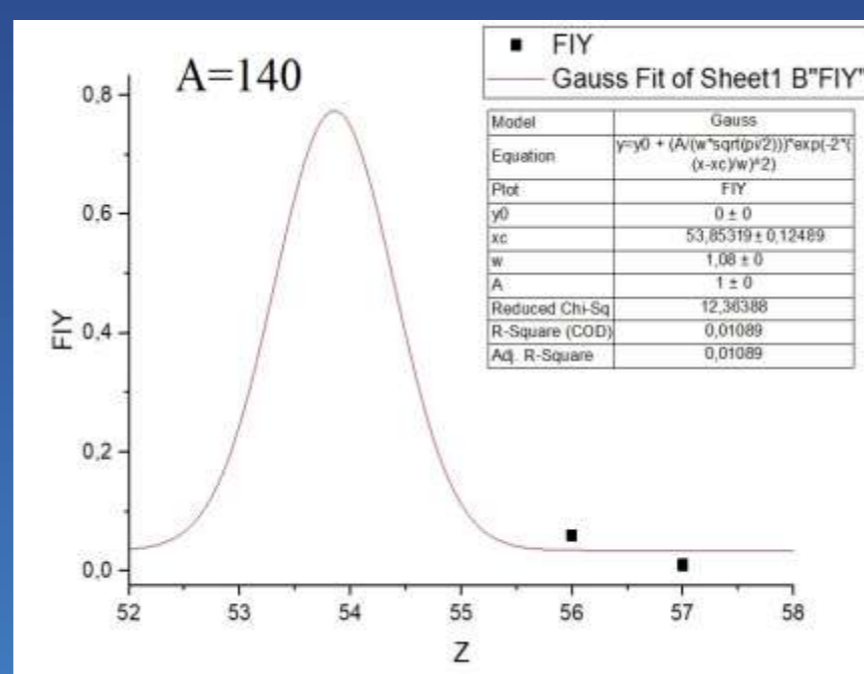
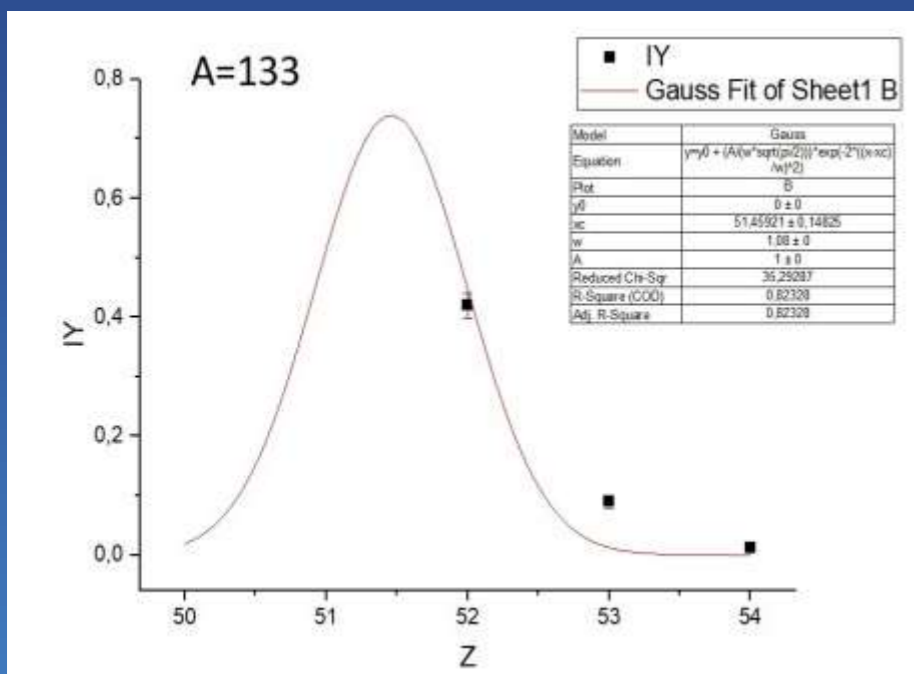
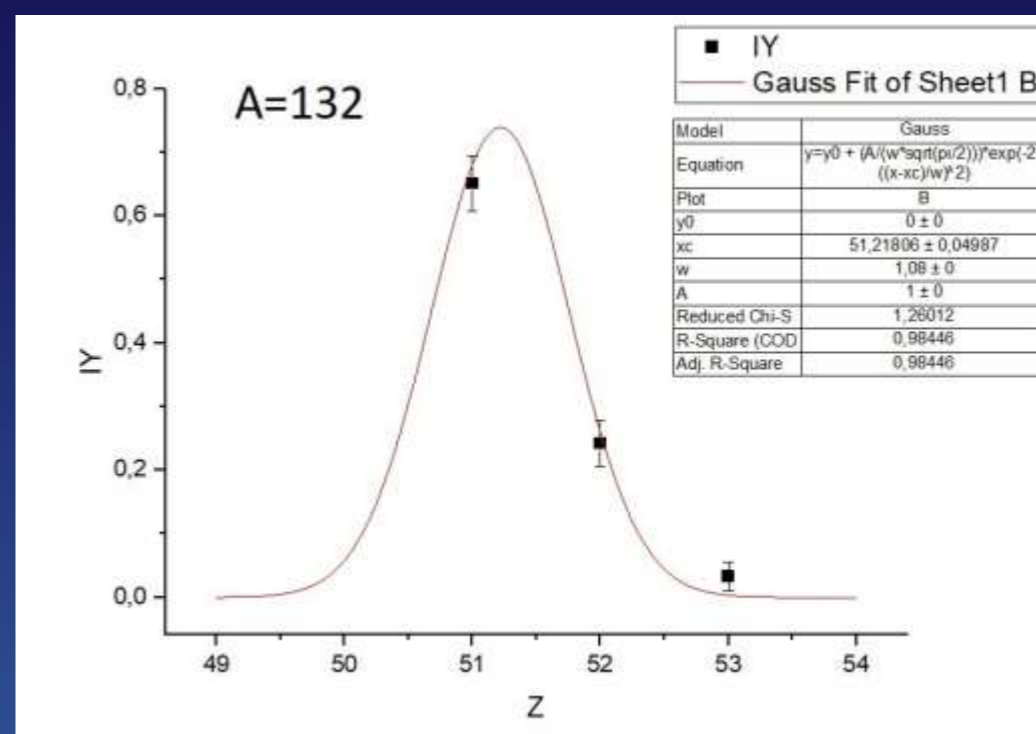
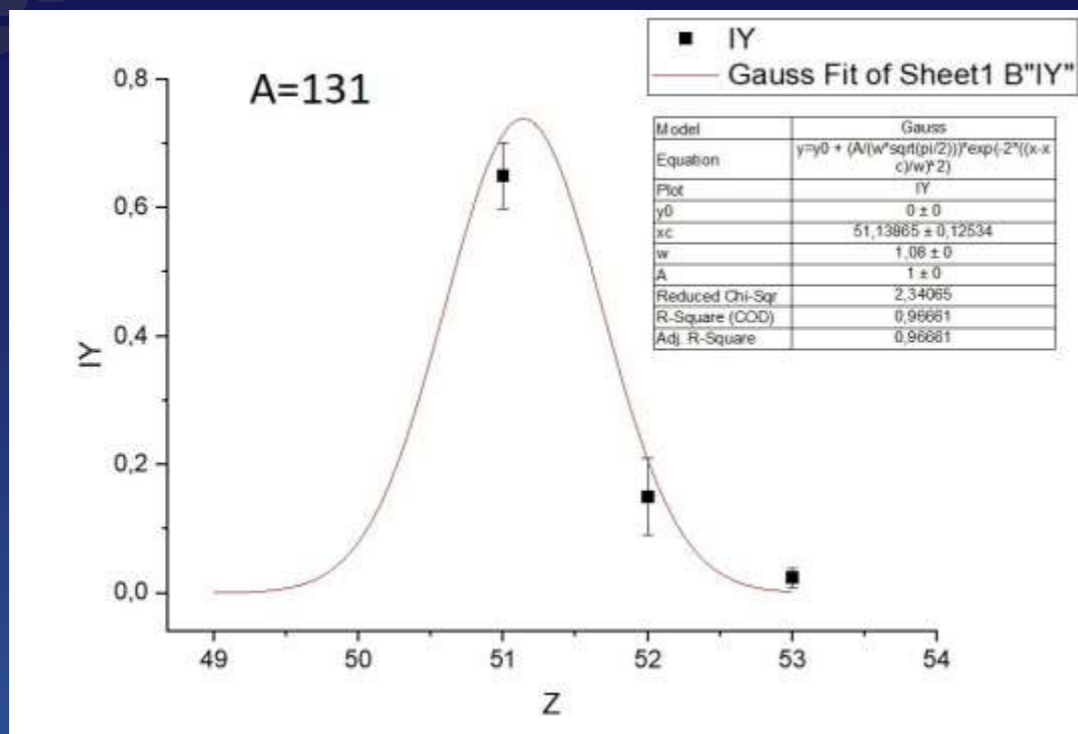
Аппроксимация зарядового распределения функцией Гаусса

$$IY(A, Z) = \frac{MY(A)}{\sqrt{\pi C}} \exp \left[-\frac{(Z - Z_p)^2}{C} \right]$$

Где $IY(Z,A)$ - это независимый выход ядер с определенными A и Z , $MY(A)$ - это полный выход цепочки с массовым числом A , Z_p – наиболее вероятный заряд, C – ширина зарядового распределения. Для деления ядер ^{238}U параметр ширины $C=0,8$.



Аппроксимация зарядового распределения функцией Гаусса



Аппроксимация зарядового распределения функцией Гаусса (^{232}Th). Нахождение Zp.

Определение наиболее вероятного заряда

При построении функции Гаусса, аппроксимирующей экспериментальное зарядовое распределение, $MY(A)$ и C используются как фиксированные параметры. Величина Z_p определяется из аппроксимации. Экспериментальное значение наиболее вероятного заряда можно сравнить с предсказанием гипотезы неизменного распределения заряда:

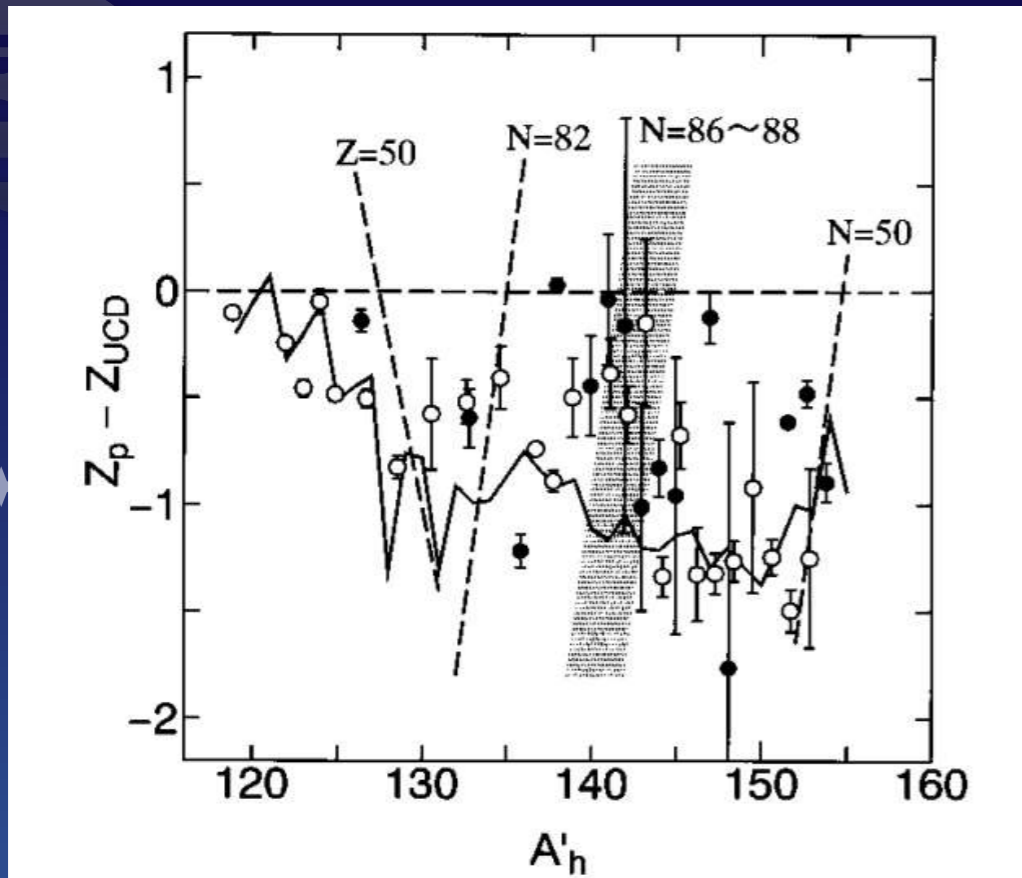
Гипотеза неизменного распределения заряда (Англ. UCD – unchanged charge distribution) утверждает, что соотношение числа протонов и нейтронов в обоих осколках деления такое же, как и в делящемся ядре. Согласно этой гипотезе, наиболее вероятный заряд определяется соотношением:

$$Z_{UCD} = \frac{Z_f}{A_f} A$$

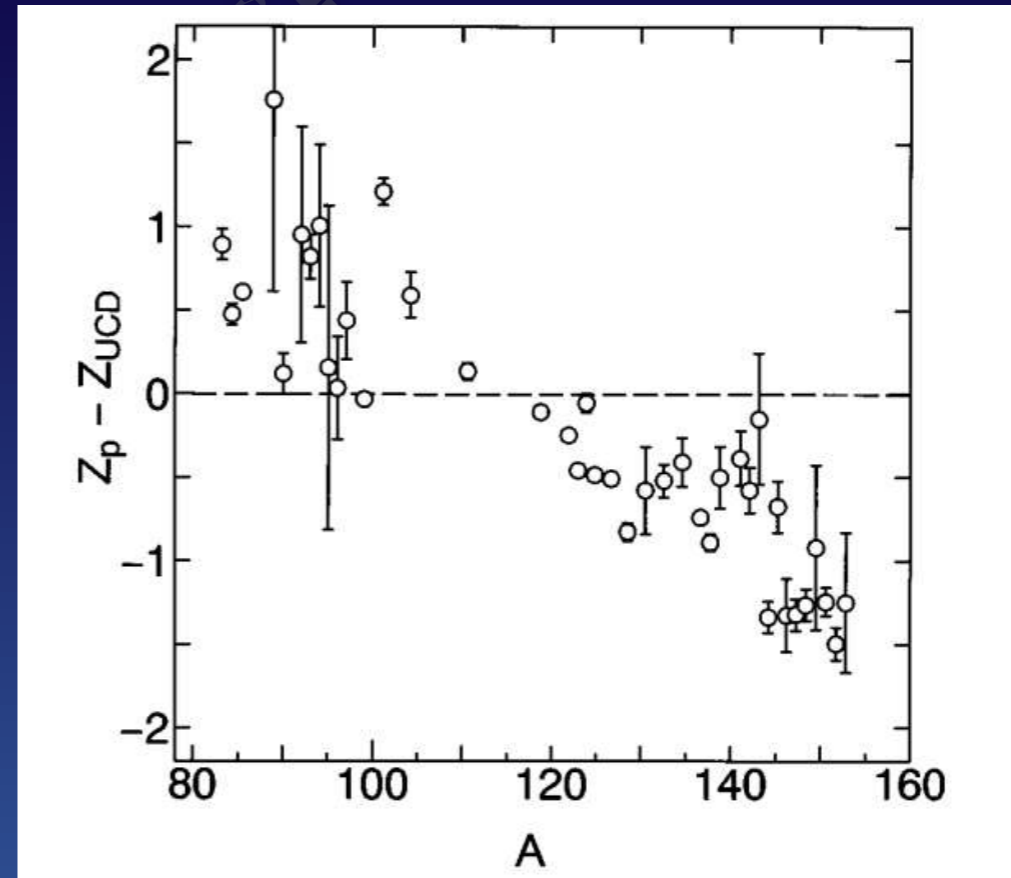
Здесь Z_f и A_f – зарядовое и массовое число делящегося ядра, A – массовое число продукта фотоделения.

Отклонение экспериментальных значений Z_p от теоретически предсказанных гипотезой UCD будет свидетельствовать о влиянии оболочечных эффектов на распределение заряда при делении ядра. Далее будет сделан обзор существующих экспериментальных данных, которые также сравниваются с гипотезой UCD.

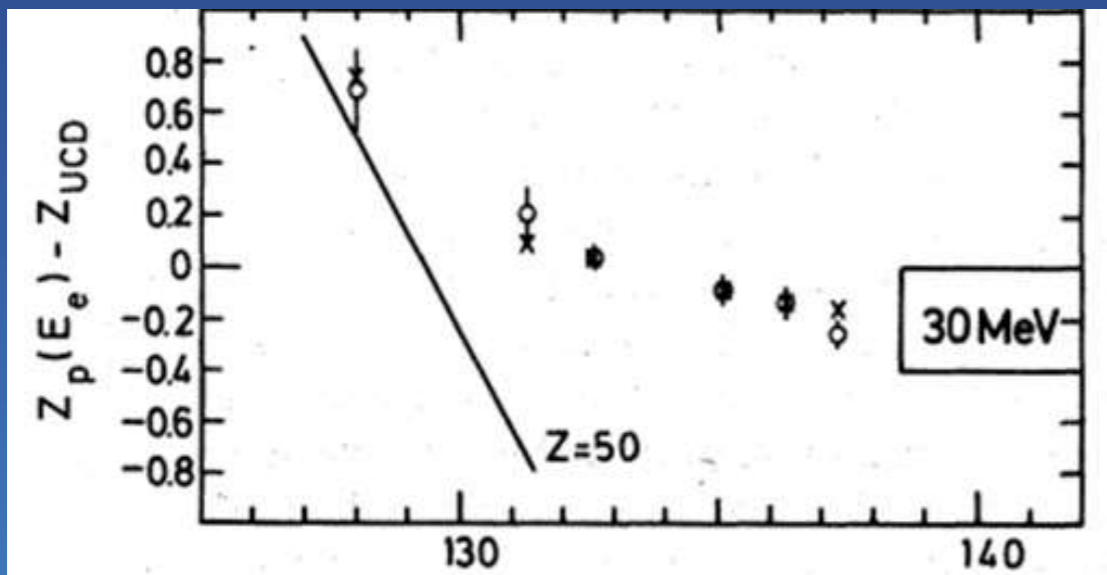
Обзор существующих экспериментальных данных (^{238}U)



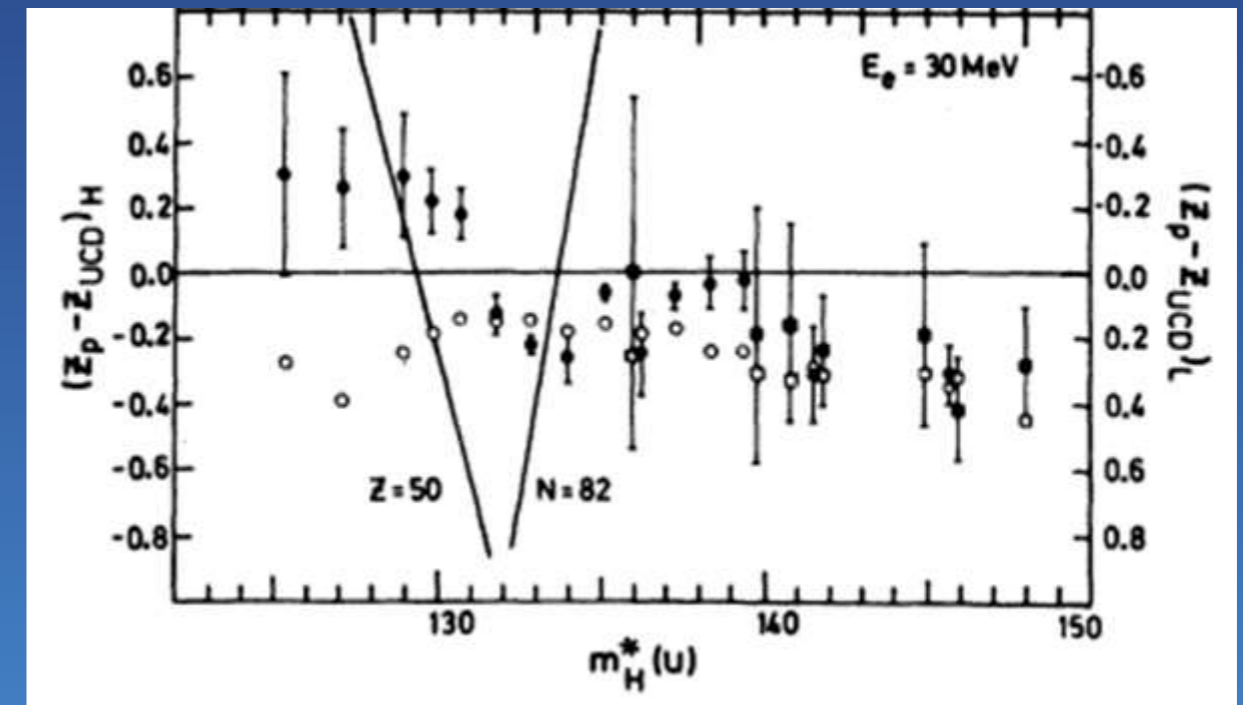
Сравнение Z_p с предсказаниями гипотезы UCD [1].



Сравнение Z_p с предсказаниями гипотезы UCD [1].

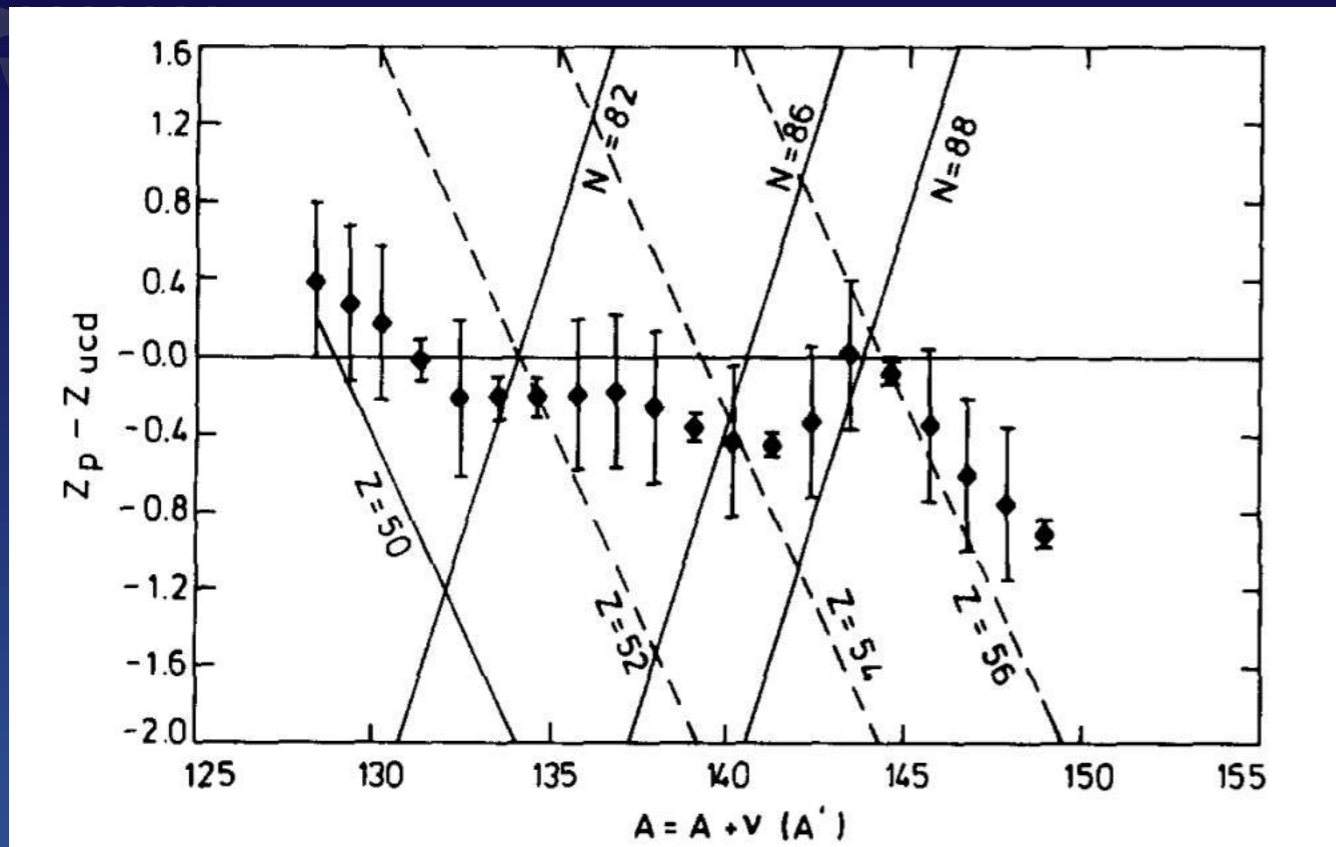


Сравнение Z_p с предсказаниями гипотезы UCD [2].

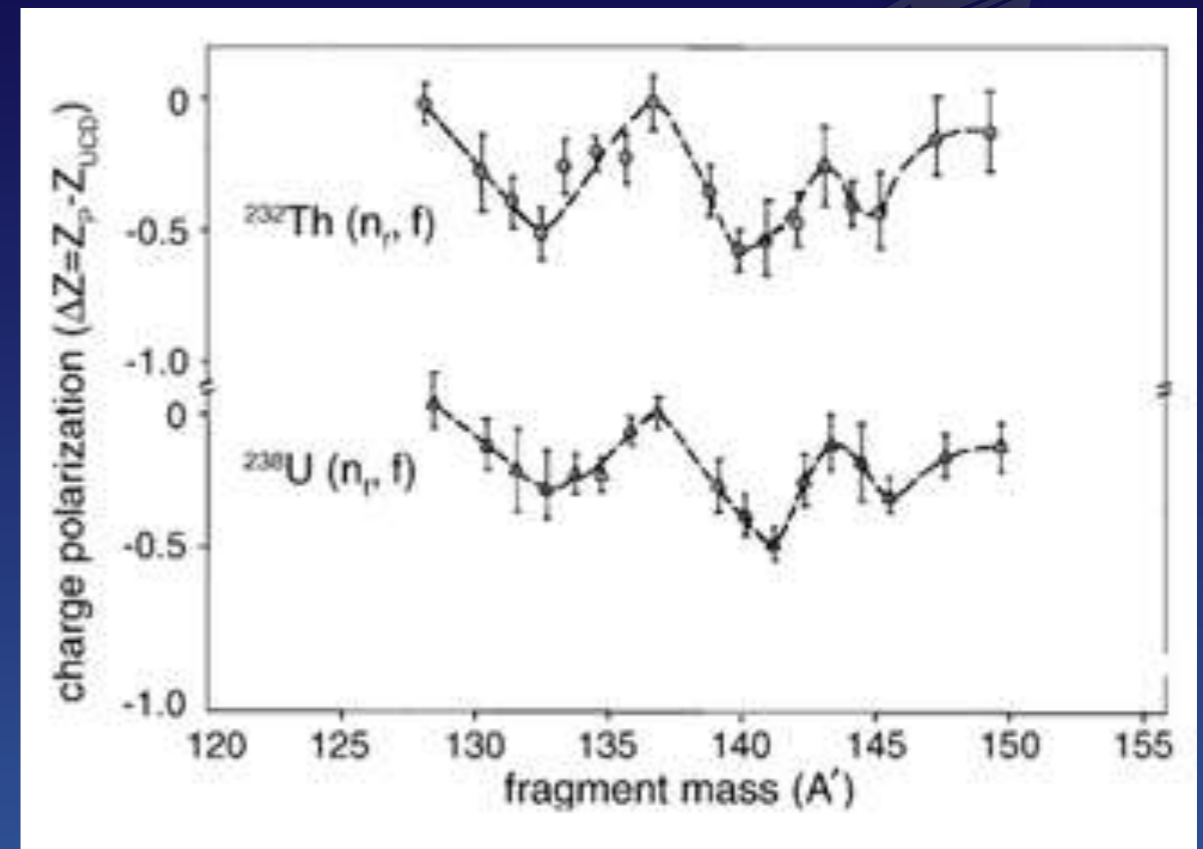


Сравнение Z_p с предсказаниями гипотезы UCD [3].

Обзор существующих экспериментальных данных (^{232}Th)



Сравнение экспериментальных результатов и расчетов по модели UCD [4]. Энергия тормозного гамма-излучения составляла 7 МэВ. На рисунке нанесены линии для $Z=50, 52, 54$ и 56 .

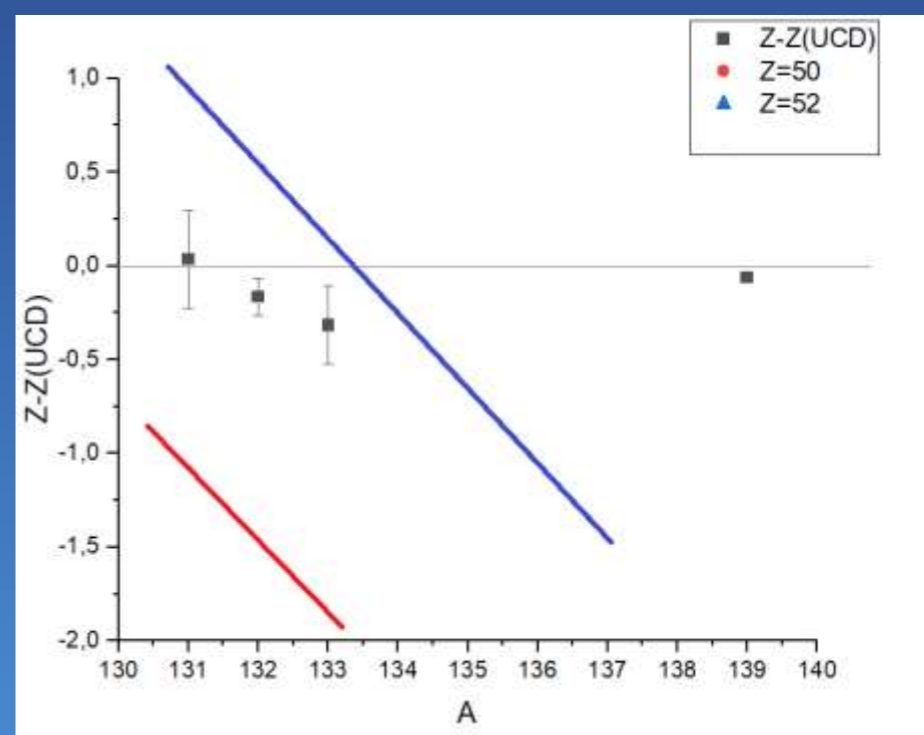
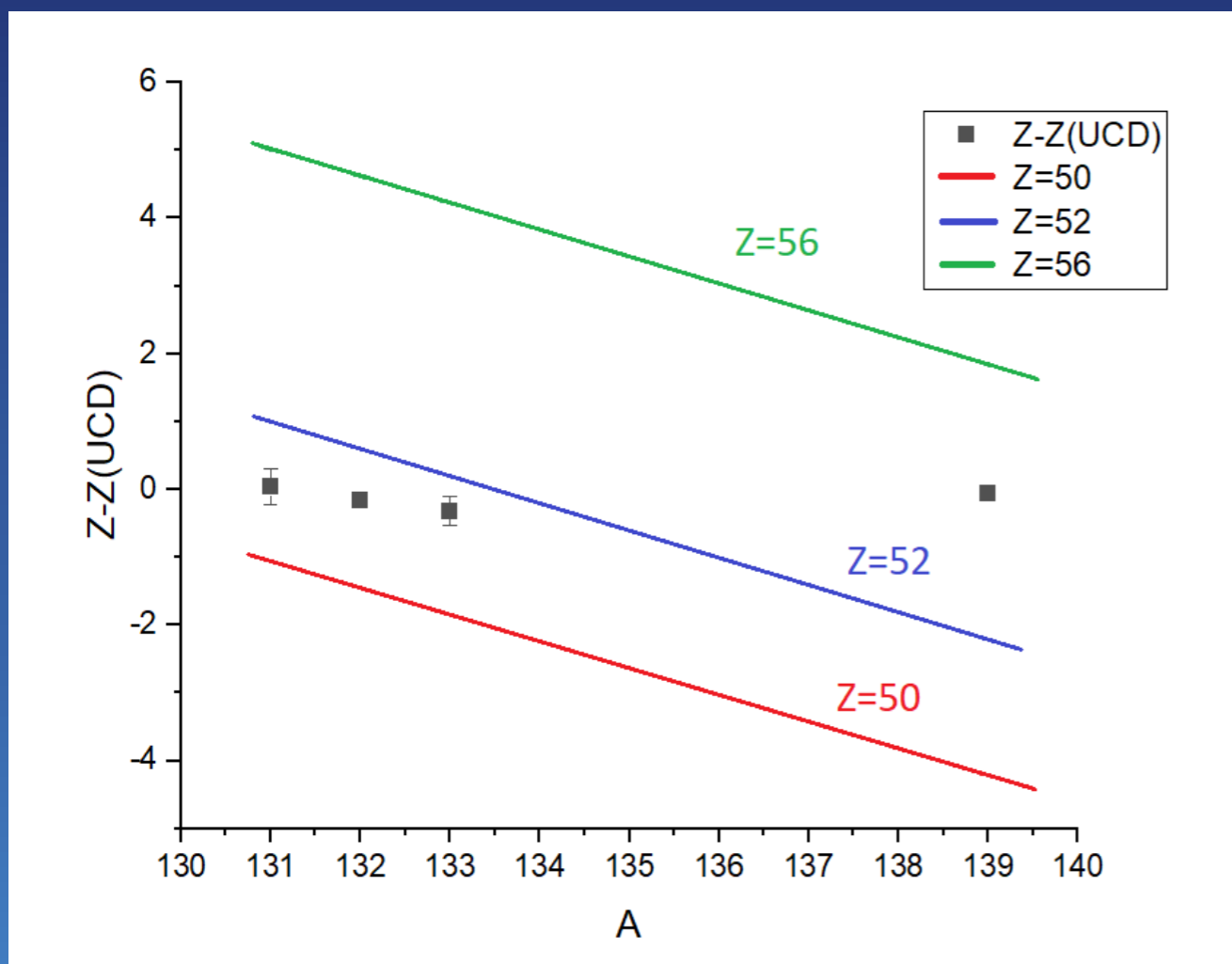


Изменение зарядовой поляризации в зависимости от массового числа осколка деления [5].

Сравнение экспериментальных результатов с предсказаниями гипотезы UCD (^{238}U)

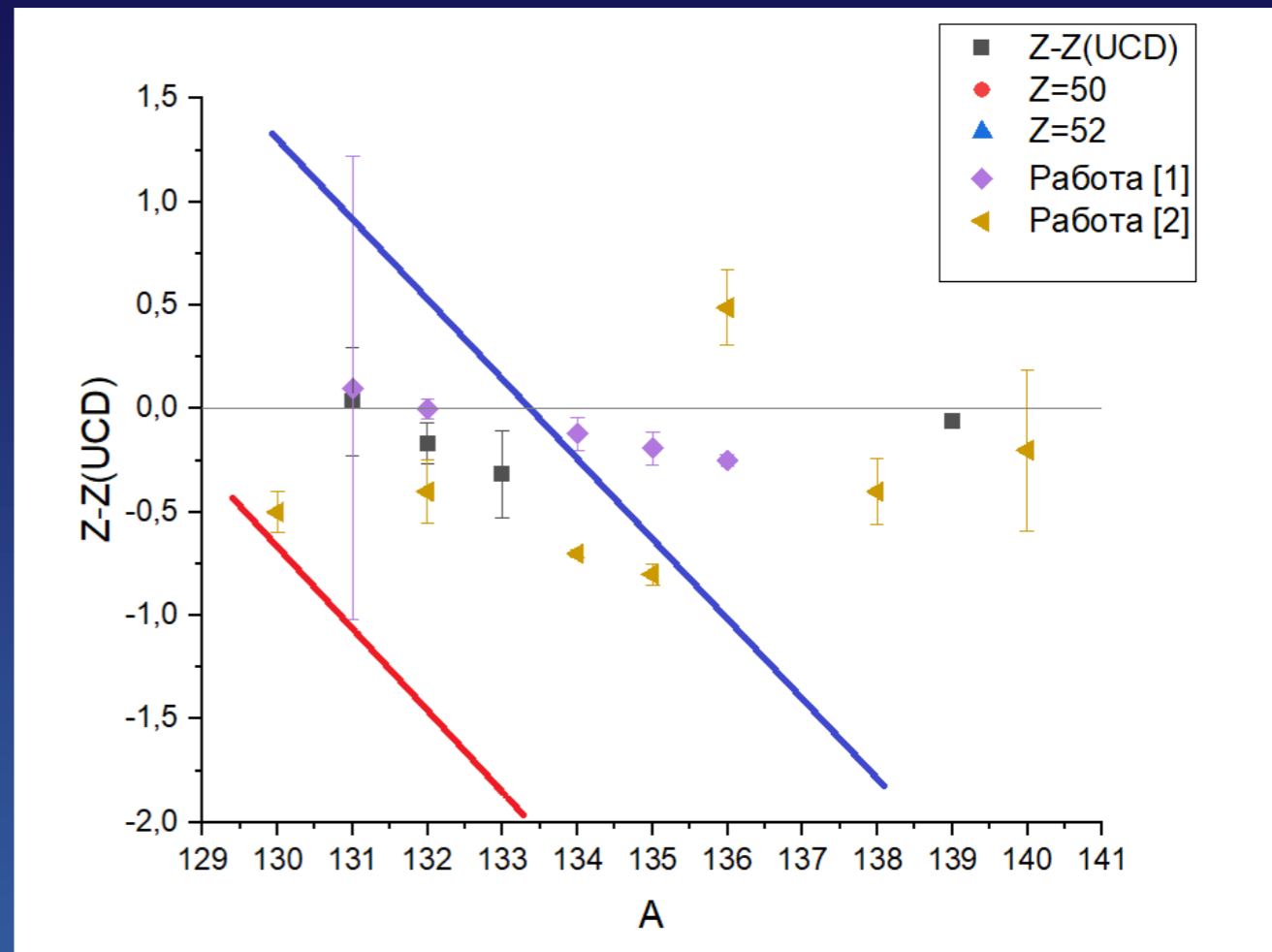
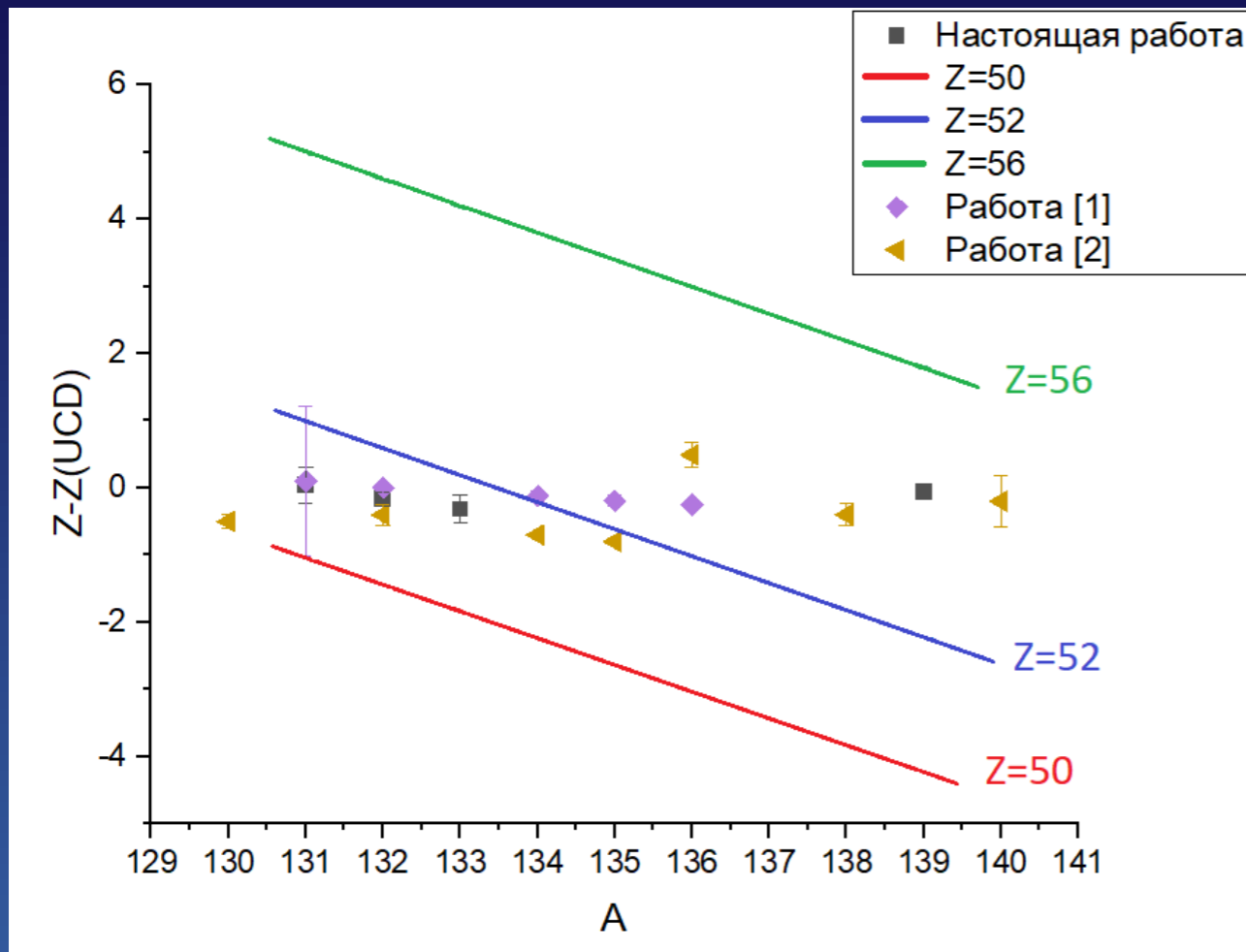
A	$Z_p(\text{эксп})$	Z(UCD)	$Z_p - Z(\text{UCD})$
131	$51,102 \pm 0,271$	51,068	$0,035 \pm 0,271$
132	$51,290 \pm 0,101$	51,457	$-0,167 \pm 0,101$
133	$51,530 \pm 0,209$	51,848	$-0,317 \pm 0,209$
139	$54,125 \pm 0,001$	54,186	$-0,061 \pm 0,001$

На рисунке показано отклонение экспериментальных значений от предсказаний модели неизменного зарядового распределения. На рисунке также показаны линии для $Z=50$, 52 и 56. При делении тяжелых ядер происходит в основном асимметричное расщепление. Без существования оболочечных эффектов ядра делились бы симметрично. Наиболее сильно оболочечные эффекты проявляются в сферических магических ядрах, например в ядрах с $Z=50$. Однако, систематические исследования показали, что тяжелые осколки деления обладают зарядовыми числами $Z=52-56$. Это происходит потому, что осколки деления не являются сферическими, и вместо $Z=50$ формируются деформированные оболочки с $Z = 52$ и $Z = 56$.



Сравнение с предсказаниями UCD

Сравнение с существующими экспериментальными данными (^{238}U)



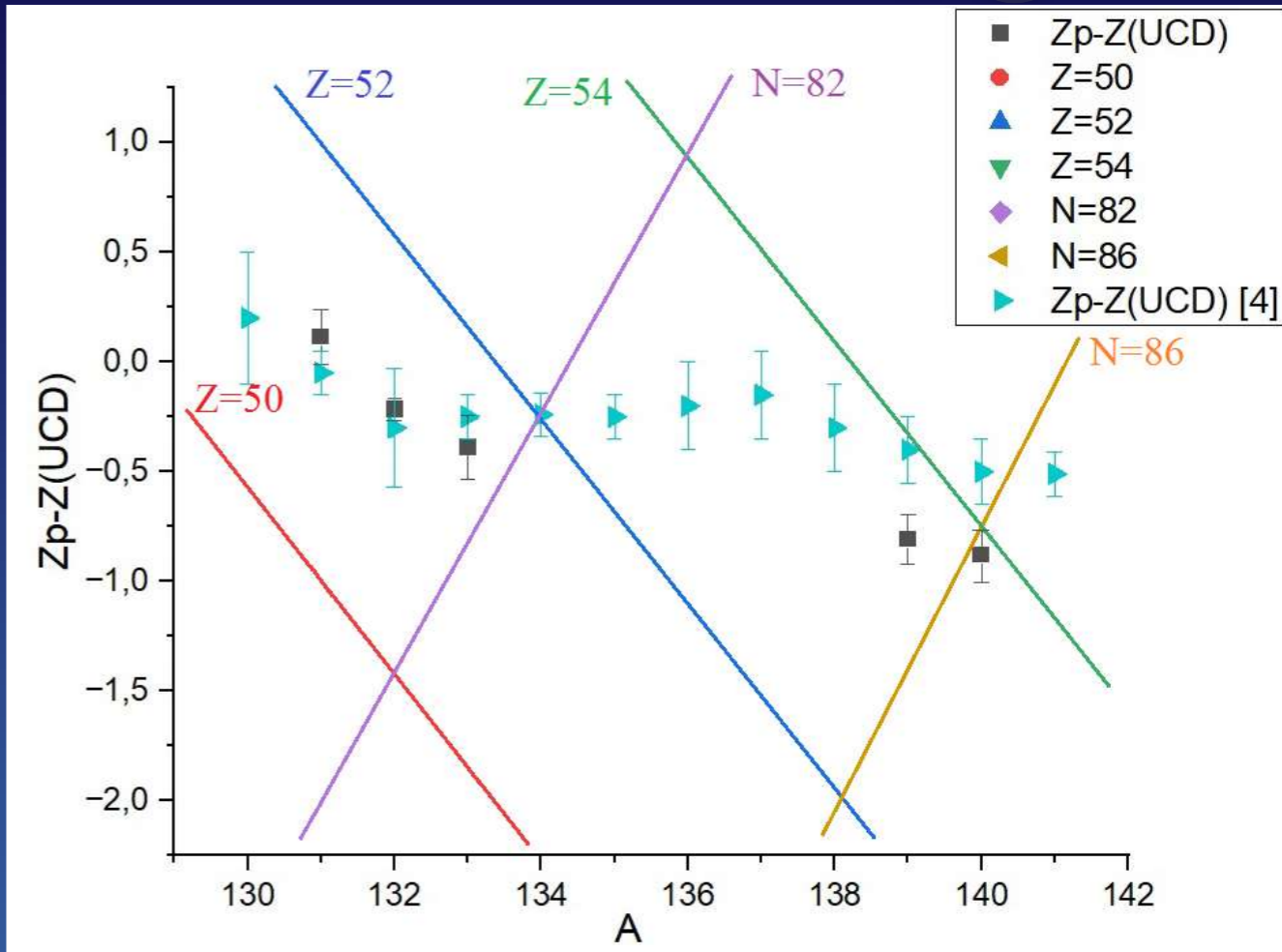
Сравнение экспериментальных результатов с результатами работ [1] и [2]

[1] H. Kudo, M. Maruyama, and M. Tanikawa T. Shinozuka and M. Fujioka Most probable charge of fission products in 24 MeV proton induced fission of ^{238}U , PHYSICAL REVIEW C, VOLUME 57, NUMBER 1, Department of Chemistry, Faculty of Science, Niigata University, Niigata, Japan, JANUARY 1998.

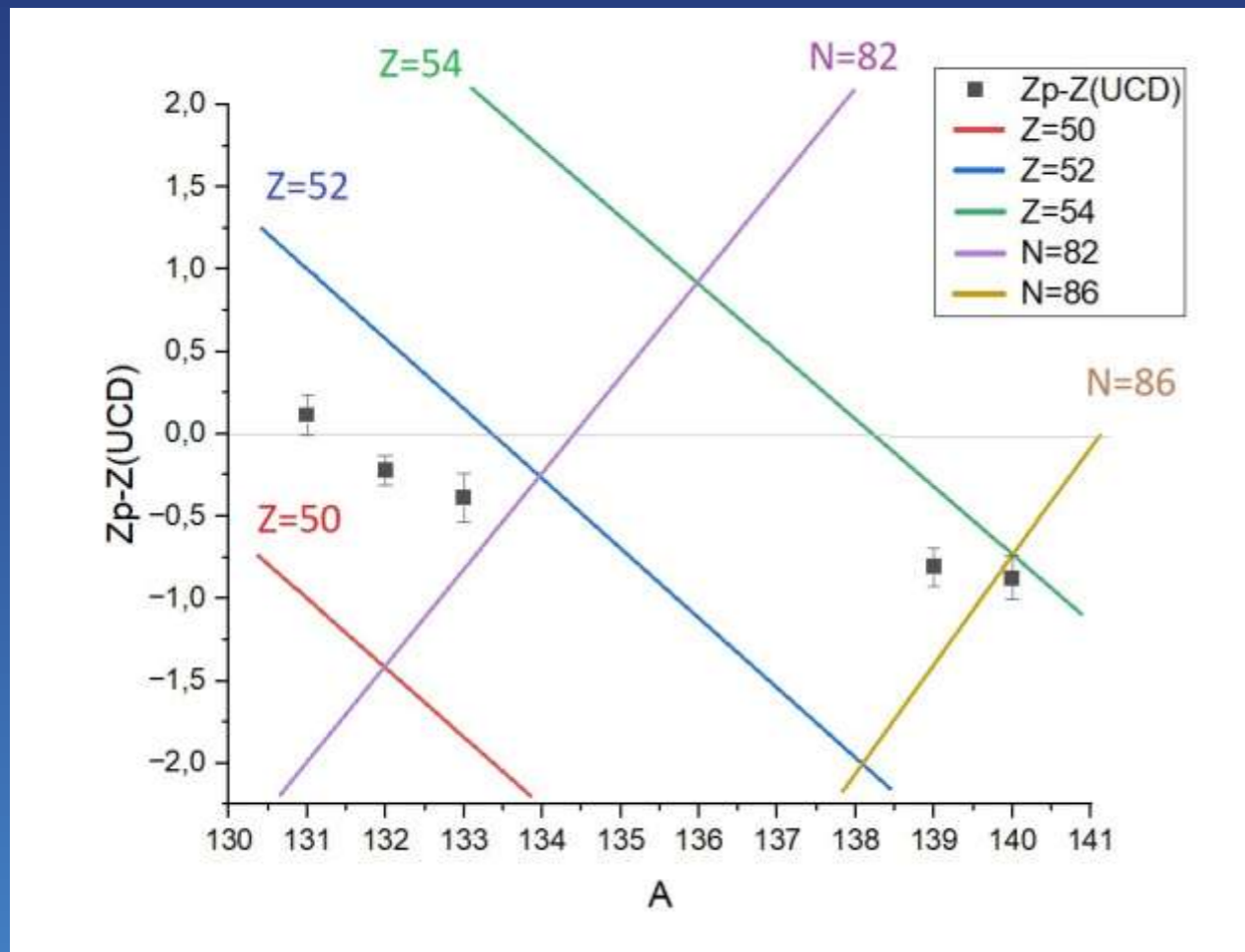
[2] E. Jacobs, H. Thierens, D. De Frenne, A. De Clercq, P. D'hondt, P. De Gelder, and A. J. Deruytter Product yields for the photofission of U^{238} with 12-, 15-, 20-, 30-, and 70-Mevbremsstrahlung. Nuclear Physics Laboratory, Proeftuinstraat 86, 8-9000 Gent, Belgium. 17 October 1978.

Сравнение экспериментальных результатов с предсказаниями гипотезы UCD (^{232}Th)

A	Zp(Эксп.)	Z(UCD)	Zp-Z(UCD)
131	$51,138 \pm 0,125$	51,024	$0,115 \pm 0,125$
132	$51,218 \pm 0,049$	51436	$-0,218 \pm 0,049$
133	$51,459 \pm 0,148$	51,848	$-0,389 \pm 0,148$
139	$53,512 \pm 0,115$	54,320	$-0,808 \pm 0,115$
140	$53,853 \pm 0,125$	54,732	$-0,879 \pm 0,125$



Сравнение экспериментальных результатов с работой [4]



Сравнение экспериментальных результатов с предсказаниями UCD

ИТОГИ И ВЫВОДЫ

В данной работе были получены выходы продуктов фотоделения ядер урана и тория – выходы ядер-изобар с массовыми числами 131-133 , 139 и 140. Построены зарядовые распределения и найдены наиболее вероятные заряды образующихся при фотоделении ядер-изобар для некоторых цепочек последовательных β^- - распадов. Проведены теоретические расчеты, согласно гипотезе неизменного зарядового распределения . Проведено сравнение с существующими экспериментальными данными.

В работе было определено отклонение наиболее вероятного заряда Z_p от Z_{UCD} . Если бы при делении не происходило перераспределения ядерного заряда, Z_p был бы равен Z_{UCD} . Однако эксперимент показывает, что наиболее вероятный заряд Z_p для цепочек с массовыми числами, соответствующими более тяжелому осколку деления, оказывается меньше значения, предсказанного гипотезой UCD. Это наблюдение показывает, что в процессе деления происходит перераспределение заряда. Кроме того, при делении наблюдается оболочечный эффект - наблюдается влияние деформированной протонной оболочки на зарядовое распределение.

Список литературы:

[1] H. Kudo, M. Maruyama, and M. Tanikawa T. Shinozuka and M. Fujioka Most probable charge of fission products in 24 MeV proton induced fission of ^{238}U , PHYSICAL REVIEW C, VOLUME 57, NUMBER 1, Department of Chemistry, Faculty of Science, Niigata University, Niigata, Japan, JANUARY 1998.

[2] E. Jacobs, H. Thierens, D. De Frenne, A. De Clercq, P. D'hondt, P. De Gelder, and A. J. Deruytter Product yields for the photofission of U^{238} with 12-, 15-, 20-, 30-, and 70-Mevbremsstrahlung. Nuclear Physics Laboratory, Proeftuinstraat 86, 8-9000 Gent, Belgium. 17 October 1978.

[3] D. De Frenne, H. Thierens, B. Proot, E. Jacobs, P. De Gelder, A. De Clercq, and W. Westmeier Charge distributions for the photofission of ^{235}U and ^{238}U with 12—30 MeV bremsstrahlung. Phys. Rev. C 26, 1356. 1 October 1982.

[4] Persyn, K., Jacobs, E., Pommé, S., De Frenne, D., Govaert, K., & Yoneama, M. L. Excitation energy dependence of fragment characteristics for the photofission of ^{232}Th . Nuclear Physics A, 620(2), 171–190. Vakgroep Subatomaire en Stralingsfysica, Proeftuinstraat 86, B-9000 Gent, Belgium. 3 April 1997.

[5] H. Naik, R.J. Singh, and R.H. Iyer. Charge distribution studies in the fast-neutron-induced fission of ^{232}Th , ^{238}U , ^{240}Pu and ^{244}Cm . THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL A. 16, 495–507 (2003).

[6] S Pommé, Etienne Jacobs, K Persyn, D De Frenne, Kurt Govaert, M-L Yoneama. Excitation energy dependence of charge odd-even effects in the fission of ^{238}U close to the fission barrier. Nuclear Physics Laboratory, Proeftuinstraat 86, B-9000 Gent, Belgium. 8 March 1993.

[7] S. S. Belyshev, B. S. Ishkhanov, A. A. Kuznetsov, and K. A. Stopani «Mass yield distributions and fission modes in photofission of ^{238}U below 20 MeV», PHYSICAL REVIEW C 91, 034603 (2015).



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

