

Экспериментальное исследование фотоядерных реакций в НИИЯФ МГУ

С.С. Бельшев, А.А. Кузнецов
(Физический факультет МГУ, НИИЯФ МГУ)

Активационные эксперименты.

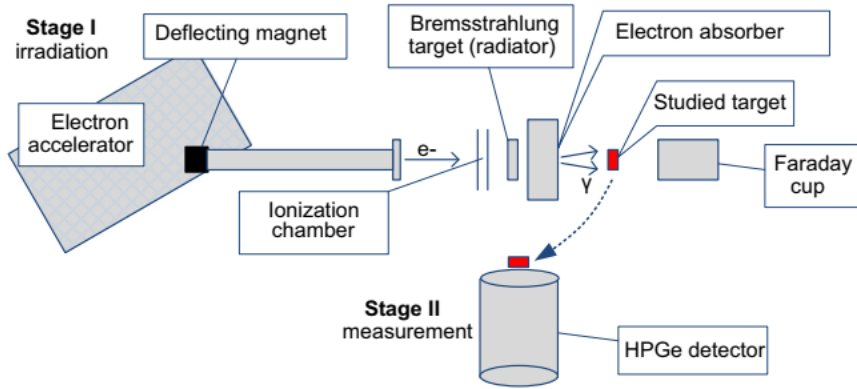
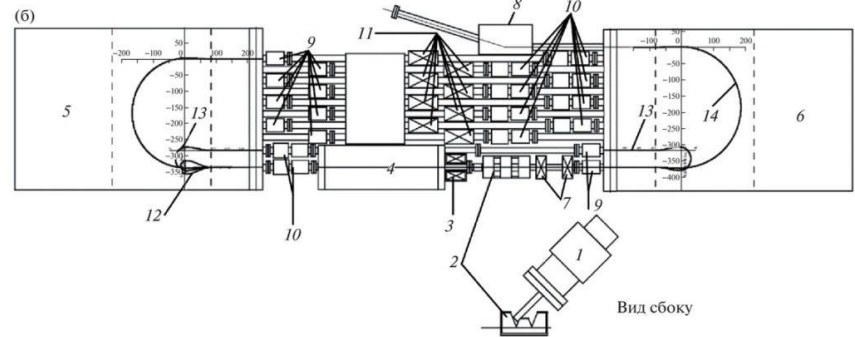
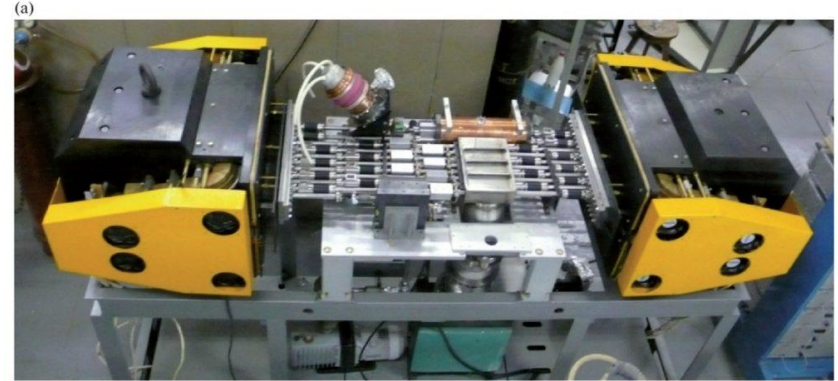


Fig. 1. Schematic view of the setup that is used to irradiate targets with bremsstrahlung radiation.

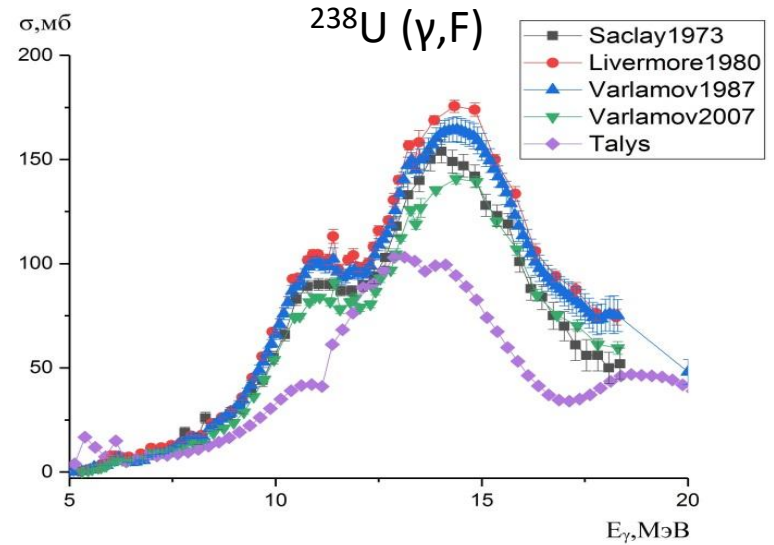
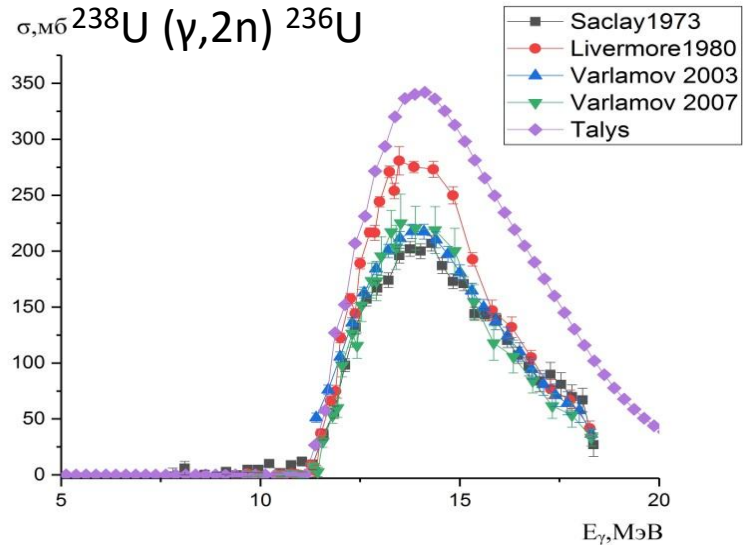
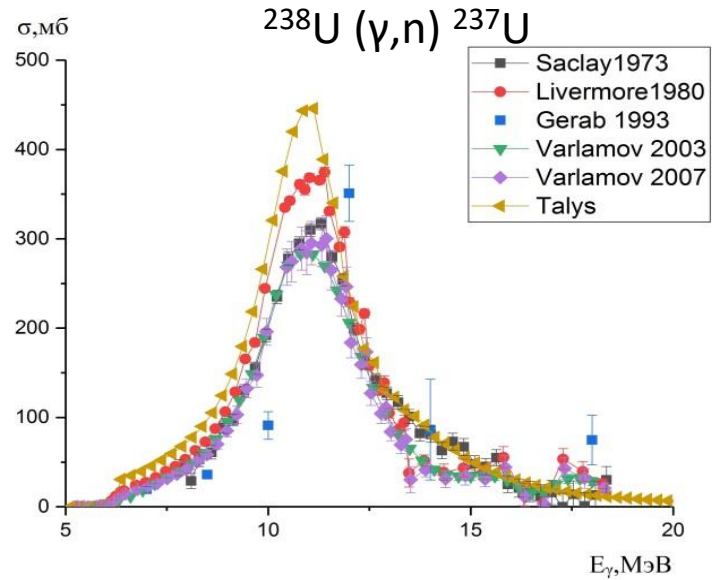
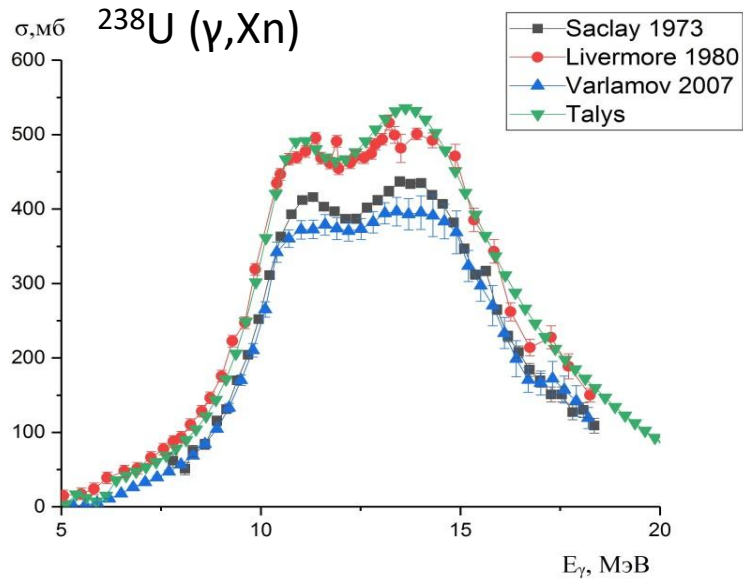


Parameters of the race-track microtrons [11,12].

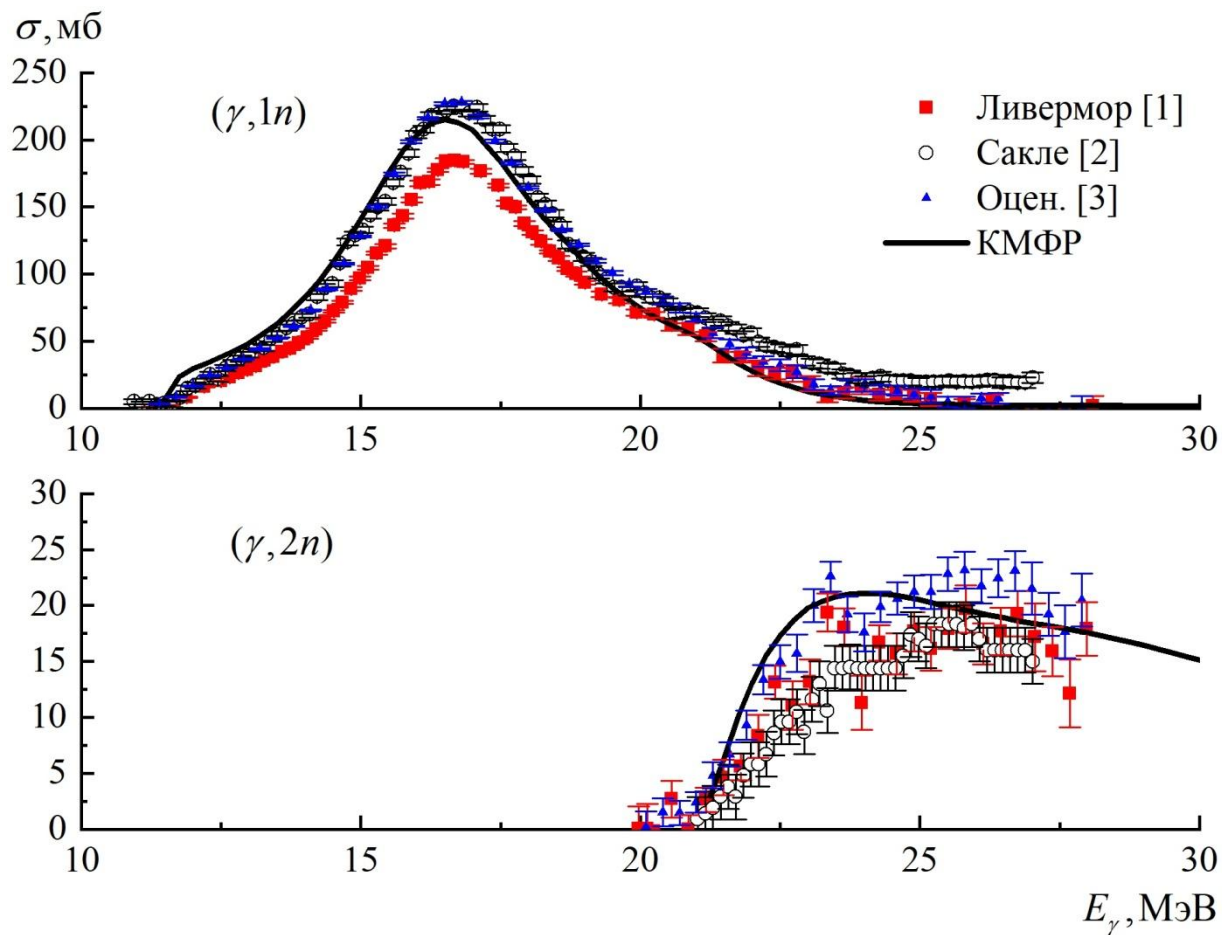
Parameter	67.7 MeV microtron	55 MeV microtron
Output energy	14.8–67.7 MeV	55.5 MeV
Beam energy spread	0.1 MeV at 67.7 MeV (from beam dynamics simulation)	1.1 MeV at 10 MeV (measured at 2nd orbit)
Output current at max. energy	5 mA	10 mA
Pulse duration	5–40 μ s	5 μ s
Orbits	14	11
Energy gain	4.8 MeV/orbit	5 MeV/orbit
Max duty factor	0.4%	0.025%
RTM dimensions	2.2 \times 1.8 \times 0.9 m	2.7 \times 1.7 \times 0.8 m

S. S. Belyshev, A. N. Ermakov, B. S. Ishkhanov, V. V. Khankin, A. S. Kurilik, A. A. Kuznetsov, V. I. Shvedunov, and K. A. Stopani. Studying photonuclear reactions using the activation technique. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 745:133–137, 2014.

Сечения фотоядерных реакций на ^{238}U



Сечения фотоядерных реакций на ^{89}Y



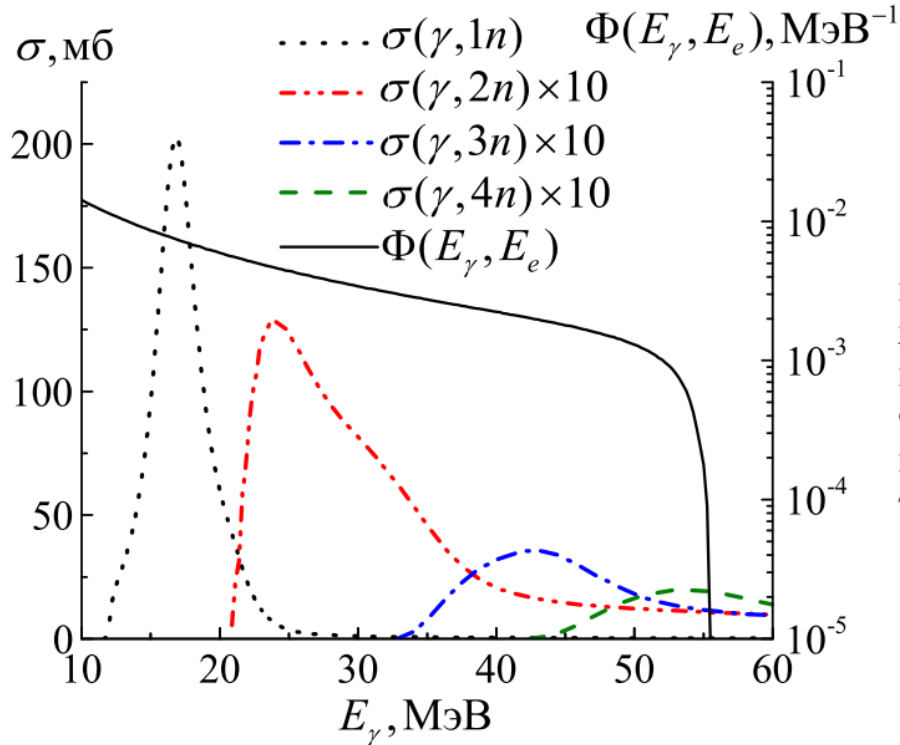
Сечения реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, измеренные в Ливерморе, Сакле, оцененные сечения и сечения рассчитанные по программе TALYS

[1] Berman B. L., Caldwell J. T., Harvey R.R., Kelly M.A., Bramblett R. L., Fultz S. C. // Phys. Rev. 1967. **162**. P. 1098.

[2] Lepretre A., Beil H., Bergere R., Carlos P., Veyssiere A., Sugawara M. // Nucl. Phys. A. 1971. **175**. P. 609.

[3] Варламов В.В., Давыдов А.И., Орлин В.Н., Песков Н.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. **81**. С. 738.

Активационные эксперименты. Методика.



$$Y(in) = \alpha \int_{E_{nop}}^{55 \text{ МэВ}} \sigma(\gamma, in) \Phi(E_\gamma, 55 \text{ МэВ}) dE_\gamma,$$

где α — нормировочная константа, учитывающая характеристики мишени и тормозного спектра γ -квантов, $\sigma(\gamma, in)$ — сечение исследуемой реакции, $\Phi(E_\gamma, 55 \text{ МэВ})$ — плотность распределения числа тормозных фотонов с энергией E_γ на 1 электрон ускорителя.

Рис. 3: Плотность распределения числа тормозных фотонов $\Phi(E_\gamma, 55 \text{ МэВ})$ на один электрон ускорителя при энергии электронов ускорителя 55 МэВ, рассчитанная с помощью GEANT4. Сечения реакций $^{89}\text{Y}(\gamma, 1n) - (\gamma, 4n)$, рассчитанные с помощью программы TALYS

Активационные эксперименты. Методика.

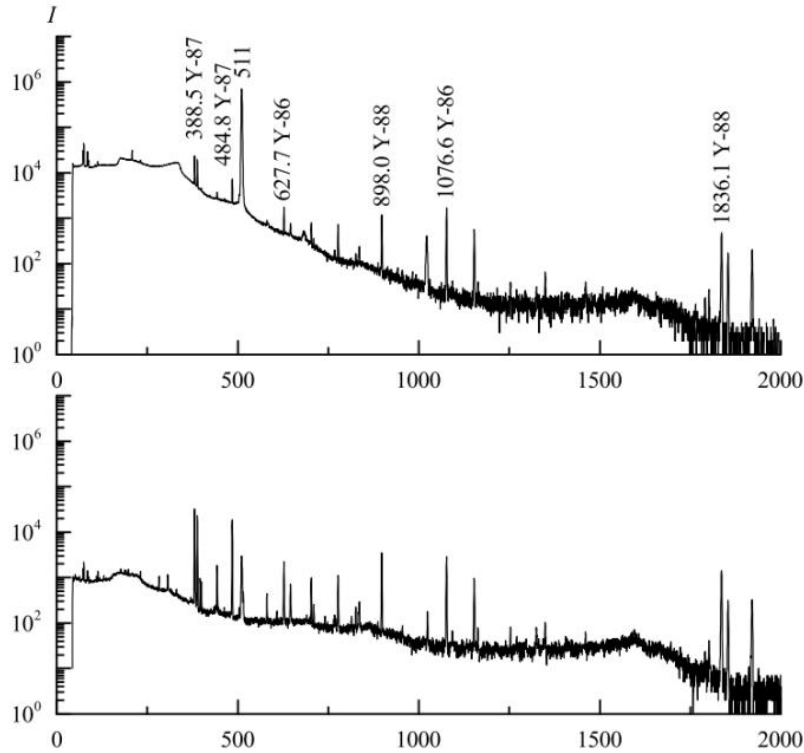


Рис. 2: Спектр γ -квантов от облученного образца ^{89}Y , измеренный HPGe спектрометром через 5 мин и 12 часов (сверху вниз) после облучения. Время измерения — 3 часа. Надписи над пиками — энергии γ -линий в кэВ и соответствующие им радиоизотопы иттрия

$$Y = \frac{N_0}{e^{-\lambda t_1} \int_0^{t_1} I(t) e^{\lambda t} dt}, \quad (1)$$

где t_1 — время облучения, N_0 — число радиоактивных ядер исследуемого изотопа на момент окончания облучения.

$$N_0 = \frac{S}{k(e^{-\lambda(t_2-t_1)} - e^{-\lambda(t_3-t_1)})}, \quad (2)$$

где S — площадь фотопика в спектрах остаточной активности, соответствующего γ -переходу при распаде конечного ядра за время измерения, t_2 — время начала измерения, t_3 — время окончания измерения, λ — постоянная распада, k — коэффициент, равный произведению эффективности детектора, коэффициента каскадного суммирования и квантового выхода γ -кванта при γ -переходах.

Активационные эксперименты. Методика.

Таблица I: Абсолютные экспериментально измеренные выходы фотонейтронных реакций на ядре ^{89}Y , выходы, рассчитанные на основе теоретических сечений рассчитанных по модели TALYS

Изотоп	Реакция	$Y_{\text{эксп.}}, 1/e-$	$Y_{\text{TALYS}}, 1/e-$
^{88}Y	$^{89}\text{Y}(\gamma, 1n)^{88}\text{Y}$	$(5.05 \pm 0.25) \cdot 10^{-6}$	$5.66 \cdot 10^{-6}$
^{87}Y	$^{89}\text{Y}(\gamma, 2n)^{87}\text{Y}$	$(5.76 \pm 0.27) \cdot 10^{-7}$	$4.55 \cdot 10^{-7}$
^{86}Y	$^{89}\text{Y}(\gamma, 3n)^{86}\text{Y}$	$(6.96 \pm 0.24) \cdot 10^{-8}$	$7.34 \cdot 10^{-8}$
^{85}Y	$^{89}\text{Y}(\gamma, 4n)^{85}\text{Y}$	$(1.09 \pm 0.09) \cdot 10^{-8}$	$1.41 \cdot 10^{-8}$

Преимущества метода:

- При правильной нормировке мы однозначно определяем выход конкретной реакции и не можем спутать реакции с вылетом одного и двух нейтронов на одном изотопе. Надежно различаются выходы (g, 1n) и (g, 1n1p) реакции.
- В качестве облучаемой мишени можно использовать немонаоизотопные мишени.
- В рамках одного эксперимента можно проследить зависимости выходов фотоядерных реакций от массового числа.
- Выходы определяются по нескольким гамма-линиям.

Недостатки метода

- Можно определить не все выходы реакций, например, когда в конечном состоянии образуются стабильные ядра
- При достаточно больших энергиях вклад в выход дают все реакции, проходящие по порогу
- Сложность в обработке и необходимость учитывать множество факторов – эффективность детектора, эффекты сложения пиков в детекторе при ближней геометрии, зависимость живого времени детектора от загрузки детектора, нормировка - измерение тока ускорителя.
- Ограничение на период полураспада конечного изотопа из-за оффлайн измерений – 30 сек

Активационные эксперименты. Методика.

Абсолютные выходы фотоядерных на тормозных пучках в экспериментах, выполненных в различной геометрии, будут отличаться друг от друга из-за различий в потоке тормозных фотонов. Для сравнения результатов различных экспериментов необходимо предположение, что формы тормозного спектра в сравниваемых экспериментах не различаются, а различие есть только в общем числе фотонов, и отнести выходы реакций к числу тормозных фотонов, а не к заряду пучка. Очевидный способ нормировки на число фотонов сталкивается с трудностью: число фотонов увеличивается в области низкоэнергетической части тормозного спектра как $1/E$. Возможны два способа решить эту проблему:

1. Нормировать выход на число фотонов в тормозном спектре только от порога конкретной реакции (среднее сечение):

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\int_{E_i \text{ порог}}^{E^m} \sigma(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\int_{E_i \text{ порог}}^{E^m} W(E, E^m) dE}.$$

$$\langle \sigma^{nat} \rangle = \frac{\sum_i \eta_i \int_{E_i \text{ порог}}^{E^m} \sigma_i(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\sum_i \eta_i \int_{E_i \text{ порог}}^{E^m} W(E, E^m) dE}.$$

Активационные эксперименты. Методика.

2. Нормировать выход на число эквивалентных квантов (сечение на эквивалентный квант):

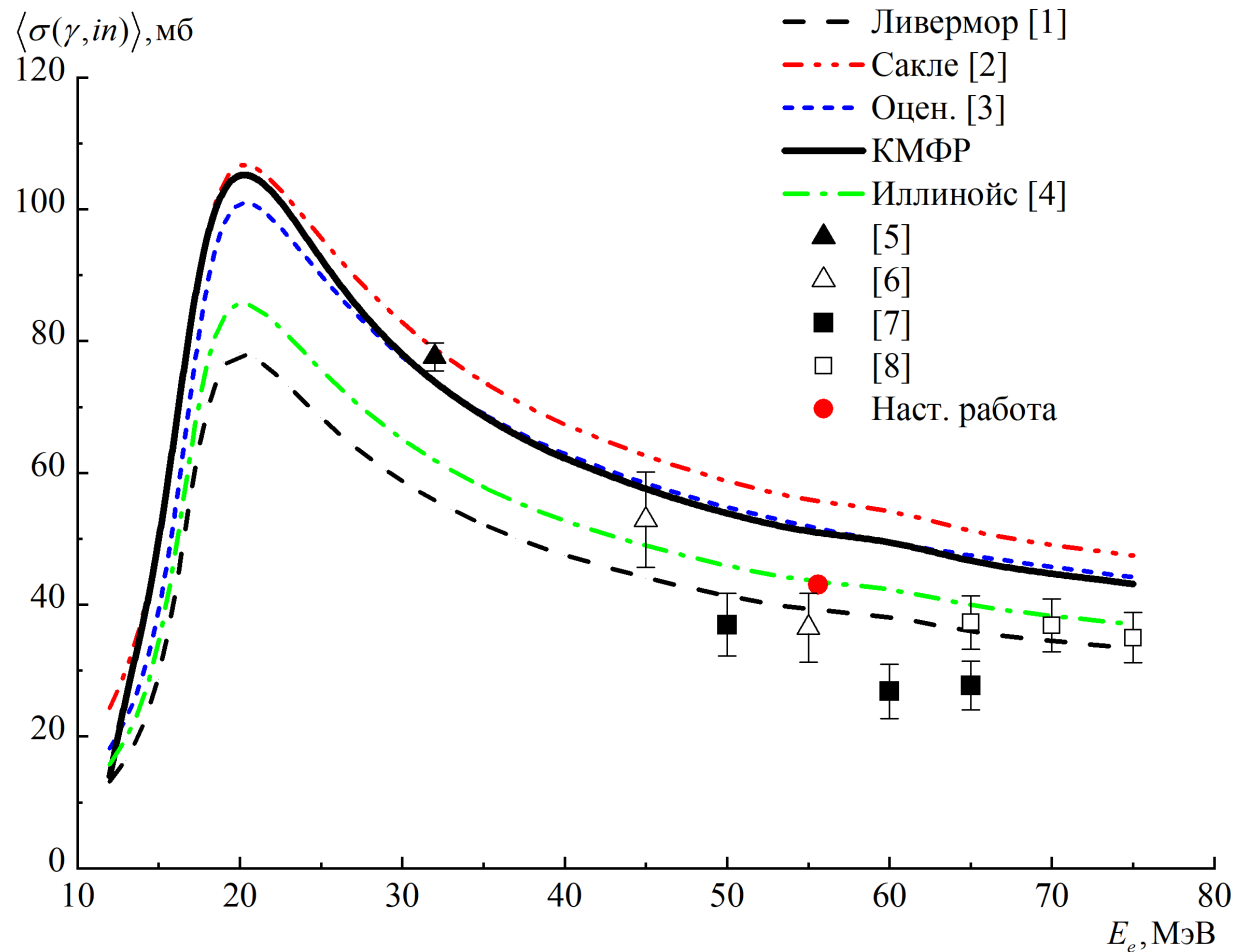
$$\sigma_q = \frac{\int_{E_{\text{порог}}}^{E^m} \sigma(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\frac{1}{E^m} \int_0^{E^m} EW(E, E^m) dE}.$$

Преимущество данного определения в том, что нормировочный коэффициент не зависит от порога реакции.

Сечение на эквивалентный квант в случае реакций на природной смеси изотопов будет включать все возможные каналы образования конечного изотопа с учетом процентного содержания исходных ядер:

$$\sigma_q^{prod} = \frac{\sum_i \eta_i \int_{E_{\text{порог}}}^{E^m} \sigma(E) \cdot \sigma(E, E^m) dE}{\frac{1}{E^m} \int_0^{E^m} E \sigma(E, E^m) dE},$$

Активационные эксперименты. Методика.



[1] Berman B. L., Caldwell J. T., Harvey R.R., Kelly M.A., Bramblett R. L., Fultz S. C. // Phys. Rev. 1967. **162**. P. 1098.

[2] Lepretre A., Beil H., Bergere R., Carlos P., Veysiere A., Sugawara M. // Nucl. Phys. A. 1971. **175**. P. 609.

[3] Варламов В.В., Давыдов А.И., Орлин В.Н., Песков Н.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. **81**. С. 738.

[4] Young L.M. // PhD Thesis, Champaign: Illinois University, 1972.

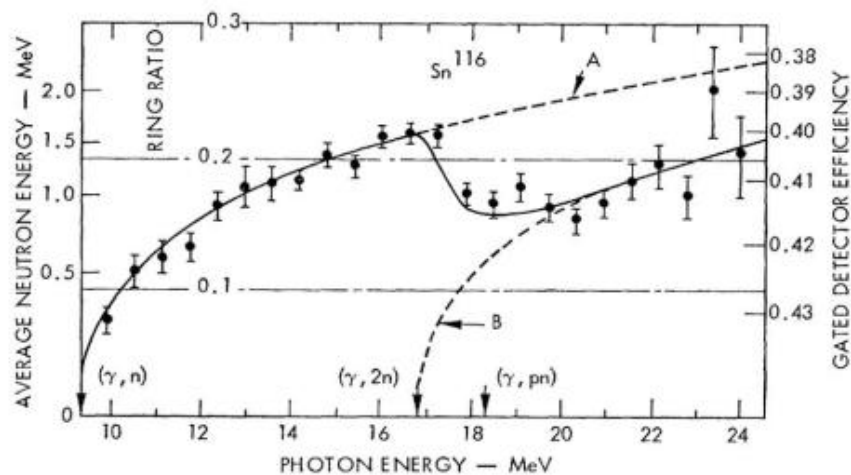
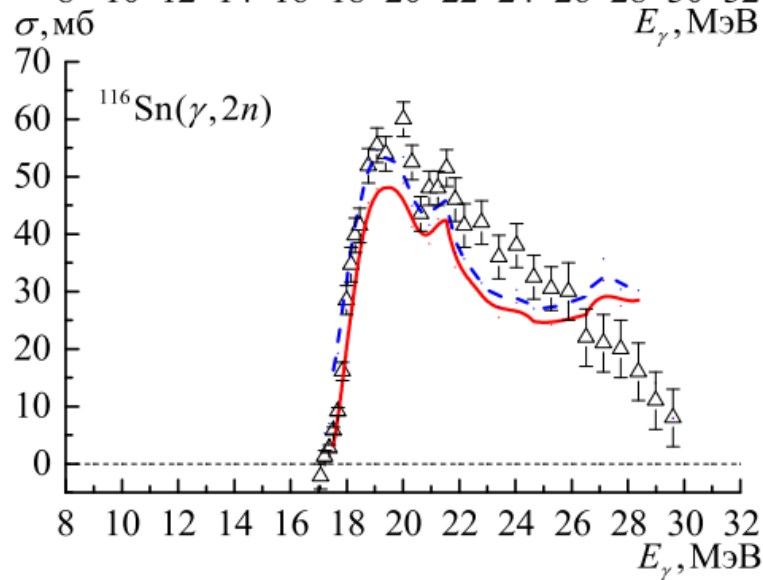
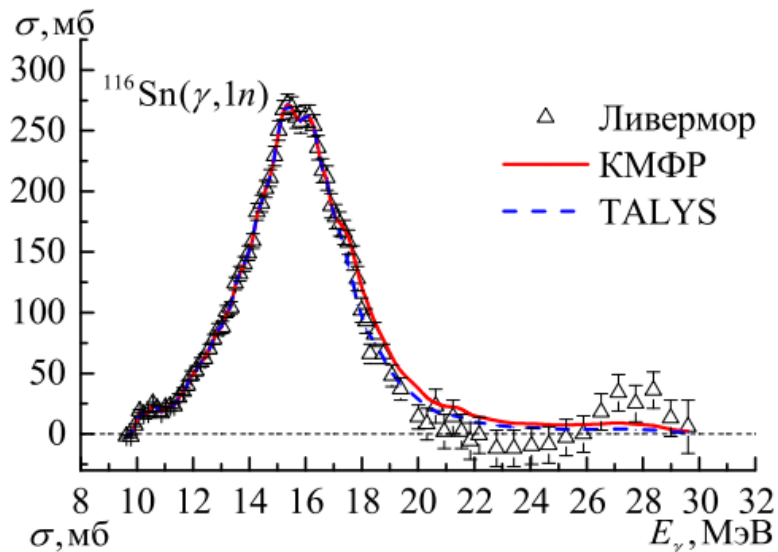
[5] Rahman A., Kato K., Arima H., Shigyo N., Ishibashi K., Hori J., Nakajima K. // J. Nucl. Sci. Tech. 2010. **47**. P. 618.

[6] Zaman M., Kim G., Naik H., Kim K., Shin S.-G., Tatari M., Cho M.-H. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2014. **299**. P. 1739.

[7] Zaman M., Kim G., Kim K., Shahid M., Naik H., Yang S., Shin S.-G., Cho M.-H. // J. Korean Phys. Soc. 2015. **67**. P. 1482.

[8] Tatari M., Naik H., Kim G., Kim K., Shin S.-G., Cho M.-H. // Radiochim. Acta. 2017. **105**. P. 789.

Проблемы методов измерения нейтронов.

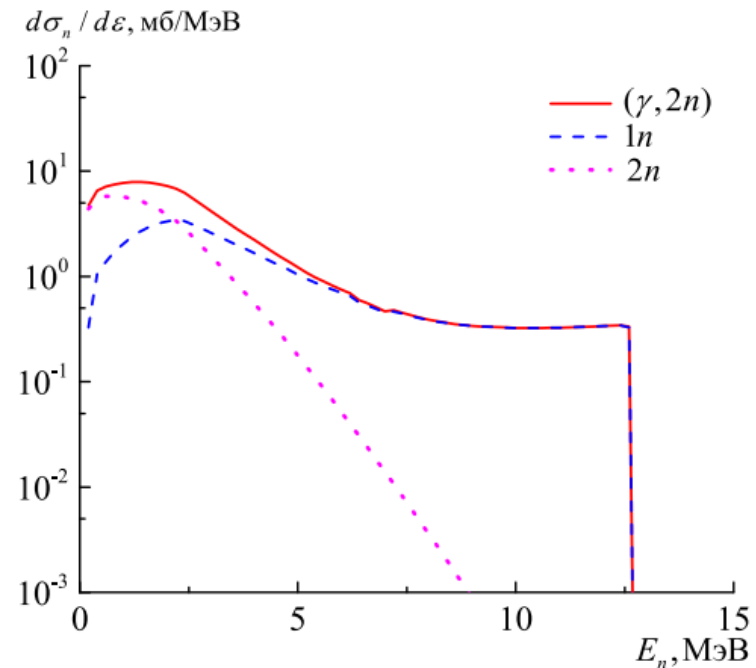
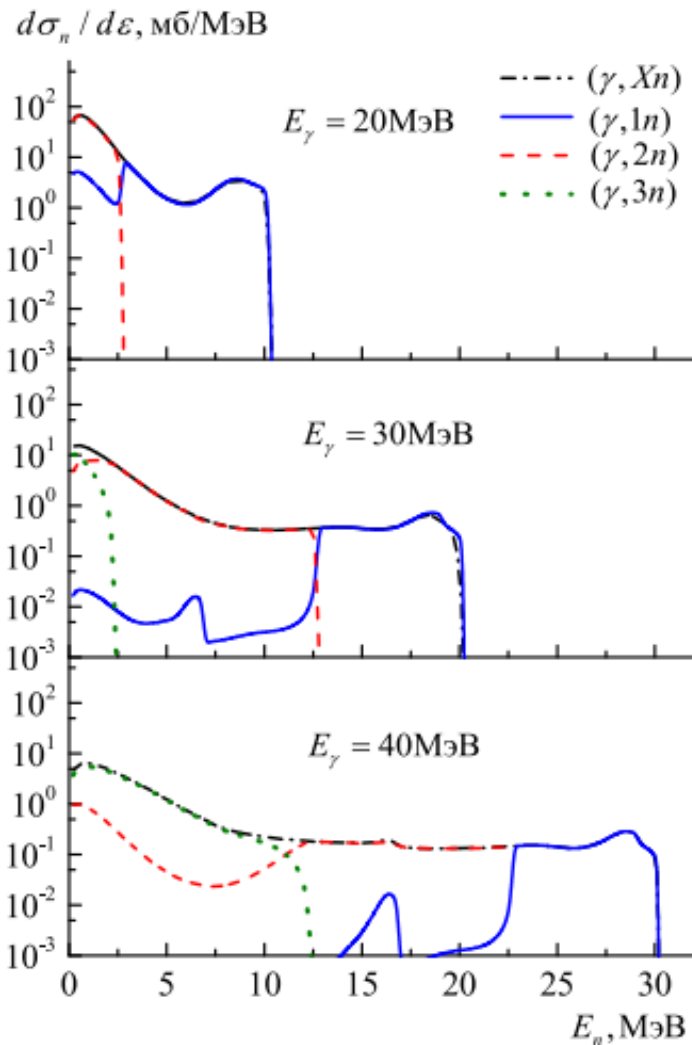


Зависимость кольцевых отношений эффективности детектора нейтронов от энергии γ -квантов в эксперименте на ядре ^{116}Sn . Рисунок взят из работы [15]

Экспериментальные [15] и оцененные сечения реакций $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n)$ и $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$ по модели КМФР и TALYS

[15] Fultz S. C., Berman B. L., Caldwell J. T. et al. *Phys. Rev.* 1969. **186** P. 1255.

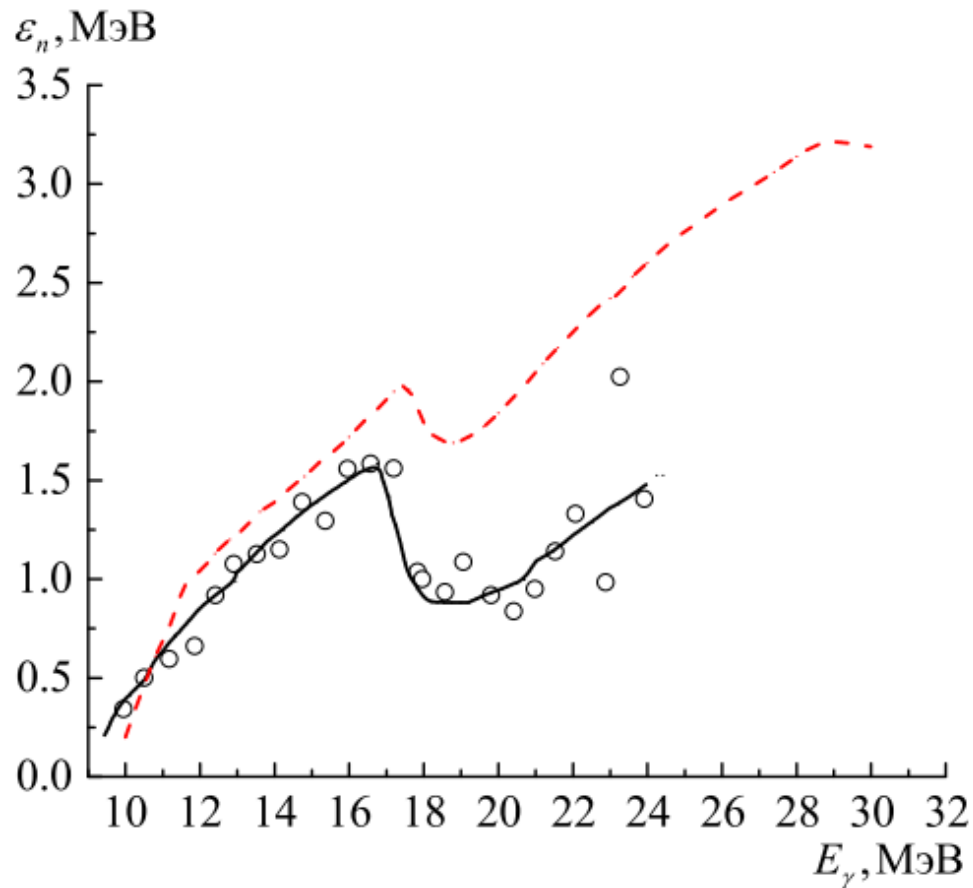
Проблемы методов измерения нейтронов.



Спектры первого и второго нейтронов образующихся в реакции $(\gamma, 2n)$, рассчитанные по КМФР, при энергии возбуждения ядра ^{116}Sn $E_\gamma = 30$ МэВ. Сплошной линией приведен суммарный спектр нейтронов в реакции $(\gamma, 2n)$

Спектры нейтронов, образующихся в реакциях (γ, Xn) , $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ при энергии возбуждения ядра ^{116}Sn $E_\gamma = 20, 30, 40$ МэВ, рассчитанные в КМФР

Проблемы методов измерения нейтронов.



Сравнение средней энергии нейтронов, определенной в эксперименте [15] на основе кольцевых отношений (точки — экспериментальные значения, сплошная кривая — аппроксимация) с результатами расчетов на основе комбинированной модели (штриховая линия)

Активационные эксперименты. Программа исследований.

1. Исследования фотовозбуждения ядер в области порога ($\gamma, 1n$) реакции. Данные о сечениях в области порога необходимы для изучения пигми-резонанса и р-процесса образования обойденных ядер в процессе звездного нуклеосинтеза. Для большинства обойдённых ядер отсутствуют экспериментальные сечения фотоядерных реакций, приводящих к их образованию и распаду. Современные оценки таких сечений базируются на расчётах по моделям статистического описания фотоядерных реакций, которые зачастую дают неточные результаты, т.к. в них не учитываются многие особенности ГДР. Эти исследования ведутся как на тормозных пучках электронных ускорителей в НИИЯФ МГУ, так и (в составе коллаборации) на пучках квазимоноэнергетических фотонов от обратного комптоновского рассеяния на установке NewSubaru (Япония)

2. Исследование фотоядерных реакций на немоноизотопных мишенях (Mo, Sn, Pd, Cd и др.) для изучения влияния изоспинового эффекта на расщепление гигантского дипольного резонанса. Сейчас работа проводится на ускорителе РТМ55 при одной энергии облучения 55 МэВ, запланирована модернизация ускорителя с возможностью облучения на разных орбитах с энергией от 15 до 55 МэВ. Прикладной аспект - изучение соотношения между (g,p) и (g,pn) реакции при энергии выше ГДР. Эти данные нужны для оценок при наработке медицинских изотопов.

3. Исследование многонуклонных фотоядерных реакций с вылетом до 7 нуклонов. Роль различных механизмов при формировании и распаде ГДР.

Активационные эксперименты. Программа исследований.

4. Исследование фотоделения ядер-актинилов (U, Th) активационной методикой в диапазоне энергий электронов ускорителя 15 – 55 МэВ. Данные позволяют делать оценки сечений реакции фотоделения в области ГДР – эти данные будут получены впервые. Данные о фотоделении и фотонейтронных реакциях необходимы для разработки систем транмутации ядерных отходов, создания пучков радиоактивных ядер, получения экзотических ядер (высокоспиновых изомеров, сильнонейтроноизбыточных ядер, сильнодеформированных ядер). Также эти данные используются при расчетах распространенности нейтроноизбыточных ядер, образующихся в результате взрыва сверхновых. Данные о соотношениях между модами фотоделения в зависимости от энергии облучения позволят сделать оценку функции затухания оболочечных эффектов.

5. Исследование образования высокоспиновых изомеров в реакции фотоделения ядер-актинилов (U, Th) активационной методикой в диапазоне энергий электронов ускорителя 15 – 55 МэВ. Данные нужны для определения среднего спина осколков в результате деления, а, следовательно, и типах коллективного движения нуклонов в момент разделения на осколки.

6. Изомерные отношения в фотоядерных реакциях.

Активационные эксперименты. Программа исследований.

7. Прикладные исследования. Исследование возможности наработки перспективных для ядерной медицины радионуклидов. Работа включает в себя несколько этапов:

- Экспериментально-теоретическое исследование возможности получения необходимых для ядерной медицины изотопов на ускорителях электронов с целью получения радиоизотопов без носителя и побочных нуклидов в необходимых для доклинических испытаний дозах (проводится в ОЭПВАЯ на ускорителе РТМ55);
- Разработка методик радиохимического выделения целевых нуклидов (работа проводится совместно с кафедрой радиохимии и Курчатовским институтом);
- Поиск подходящих наноносителей для медицинских радионуклидов для их адресной доставки к раковым опухолям (работа проводится совместно с ГЕОХИ РАН)
- Разработка методик рециклинга мишенного материала (работа проводится совместно с кафедрой радиохимии и Курчатовским институтом);

Фотопротонные реакции. Изоспиновое расщепление ГДР.

Mo 90 5,7 h	Mo 91 65 s 15,5 m	Mo 92 14,84	Mo 93 6,9 h 3,5 10 ³ a	Mo 94 9,25	Mo 95 15,92	Mo 96 16,68	Mo 97 9,55	Mo 98 24,13	Mo 99 66,0 h	Mo 100 9,63
Nb 89 66 m 2,9 h	Nb 90 18,8 s 14,6 h	Nb 91 60,9 d 680 a	Nb 92 10,15 d 3,6 10 ⁷ a	Nb 93 16,13 a 100	Nb 94 6,26 m 2 · 10 ⁴ a	Nb 95 86,6 h 34,97 d	Nb 96 23,4 h	Nb 97 53 s 74 m	Nb 98 51 m 2,9 s	Nb 99 2,6 m 15 s
Zr 88 83,4 d	Zr 89 4,16 m 78,4 h	Zr 90 51,45	Zr 91 11,22	Zr 92 17,15	Zr 93 1,5 · 10 ⁶ a	Zr 94 17,38	Zr 95 64,0 d	Zr 96 2,80 3,9 · 10 ¹⁹ a	Zr 97 16,8 h	Zr 98 30,7 s

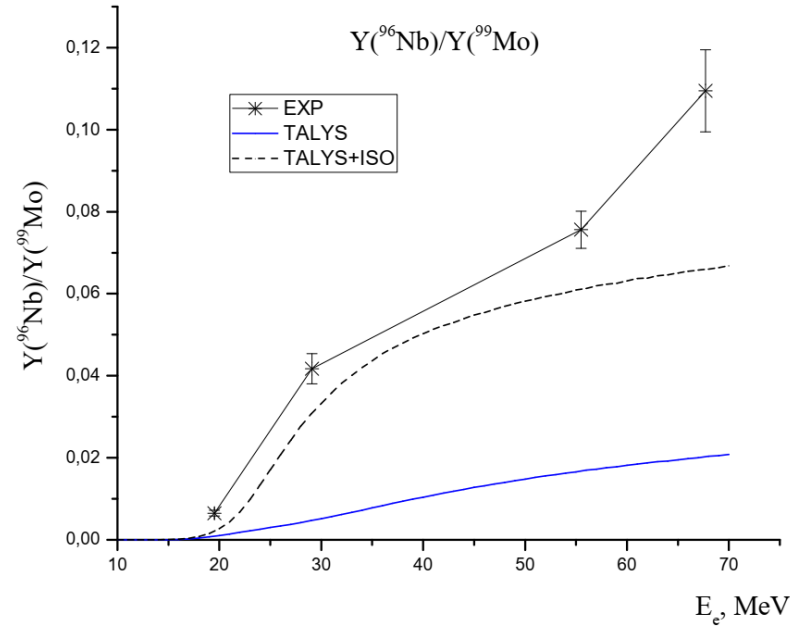
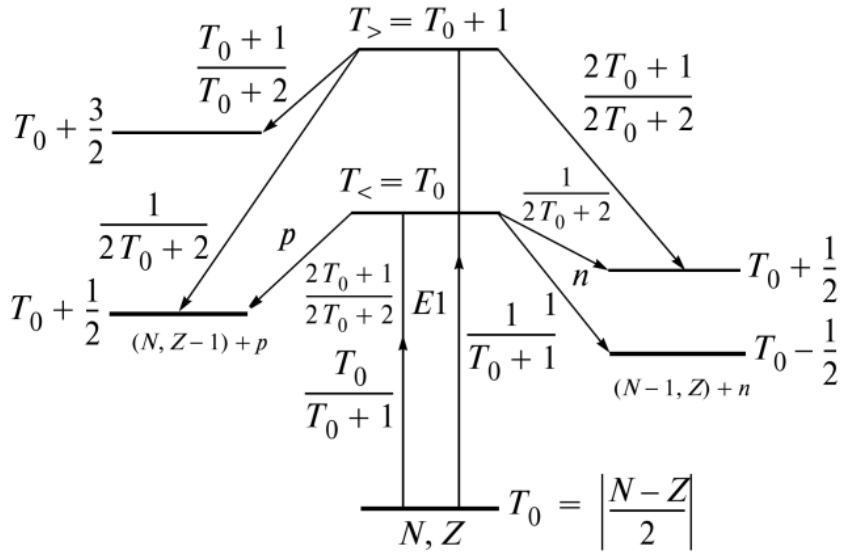
Experimental reaction yields

	55.6 MeV	19.7 MeV *	29.1 MeV **	67.7 MeV**
	Yield ($\times 10^6$), 1/e	Rel. Yield	Rel. Yield	Rel. Yield
⁹⁹ Mo	4.06 ± 0.12	100 ± 5	100 ± 6	100 ± 5
⁹⁷ Nb	0.561 ± 0.015	0.83 ± 0.13	7.02 ± 0.46	16.59 ± 0.91
⁹⁶ Nb	0.307 ± 0.016	0.65 ± 0.07	4.17 ± 0.37	10.95 ± 1.00
⁹⁵ Nb	0.647 ± 0.018	1.20 ± 0.07	6.49 ± 0.41	18.24 ± 1.25

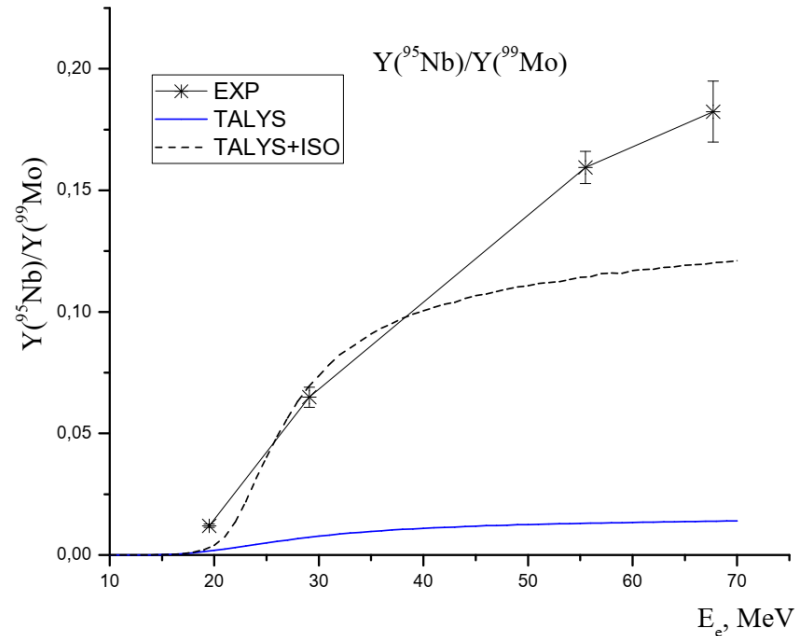
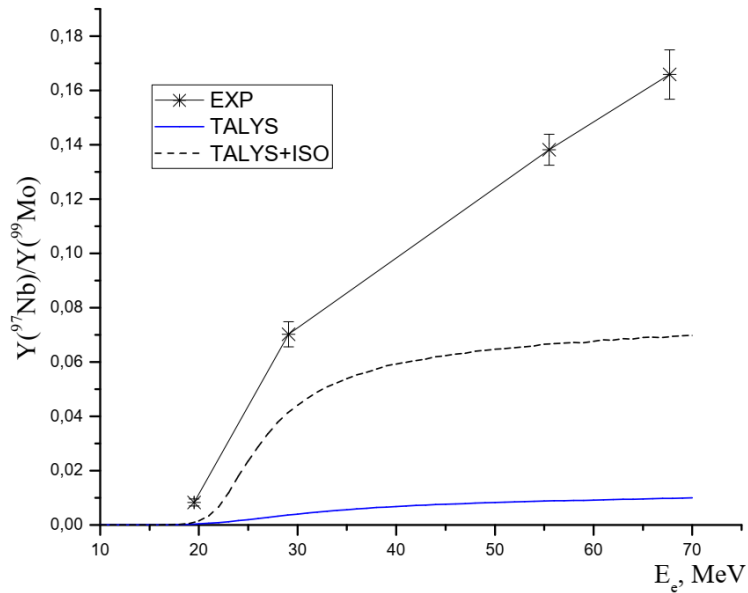
* Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M., Kuznetsov A.A., Orlin V.N., Yoon H.D.
Moscow Univ. Phys. Bull. 69, 37 (2014)

** Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M., Kuznetsov A.A., Orlin V.N., Yoon H.D. Phys.
Atom. Nucl. 77, 1362 (2014)

Фотопротонные реакции. Изоспиновое расщепление ГДР.



$^{98}\text{Mo}(\gamma, p)^{97}\text{Nb}$



Обойденные ядра.

Table 1

List of the species commonly classified as p-nuclides, with their solar system abundances relative to 10^6 Si atoms proposed by two compilations [13,15]

Nucleus	Anders and Grevesse [13]	Error (%)	Palme and Beer [15]	Error (%)
⁷⁴ Se	0.55	6.4	0.6	5
⁷⁸ Kr	0.153	18	0.19	—
⁸⁴ Sr	0.132	8.1	0.12	5
⁹² Mo	0.378	5.5	0.38	5
⁹⁴ Mo	0.236	5.5	0.23	5
⁹⁶ Ru	0.103	5.4	0.1	10
⁹⁸ Ru	0.035	5.4	0.03	10
¹⁰² Pd	0.0142	6.6	0.014	10
¹⁰⁶ Cd	0.0201	6.5	0.02	10
¹⁰⁸ Cd	0.0143	6.5	0.014	10
¹¹³ In	0.0079	6.4	0.008	10
¹¹² Sn	0.0372	9.4	0.036	10
¹¹⁴ Sn	0.0252	9.4	0.024	10
¹¹⁵ Sn	0.0129	9.4	0.013	10
¹²⁰ Te	0.0043	10	0.0045	10
¹²⁴ Xe	0.00571	20	0.005	—
¹²⁶ Xe	0.00509	20	0.004	—
¹³⁰ Ba	0.00476	6.3	0.005	5
¹³² Ba	0.00453	6.3	0.005	5
¹³⁸ La	0.000409	2	0.0004	5
¹³⁶ Ce	0.00216	1.7	0.002	5
¹³⁸ Ce	0.00284	1.7	0.003	5
¹⁴⁴ Sm	0.008	1.3	0.008	5
¹⁵² Gd	0.00066	1.4	0.001	5
¹⁵⁶ Dy	0.000221	1.4	0.0002	5
¹⁵⁸ Dy	0.000378	1.4	0.0004	5
¹⁶² Er	0.000351	1.3	0.0004	5
¹⁶⁴ Er	0.00404	1.3	0.0042	5
¹⁶⁸ Yb	0.000322	1.6	0.0003	5
¹⁷⁴ Hf	0.000249	1.9	0.0003	5
¹⁸⁰ Ta	2.48e-06	1.8	2.00e-06	10
¹⁸⁰ W	0.000173	5.1	0.0002	7
¹⁸⁴ Os	0.000122	6.3	0.0001	5
¹⁹⁰ Pt	0.00017	7.4	0.0001	10
¹⁹⁶ Hg	0.00048	12	0.001	20

Обойденные ядра.

Mo 90 5,7 h	Mo 91 65 a 15,5 m	Mo 92 14,84	Mo 93 6,9 h 3,5 · 10 ² a	Mo 94 9,25	Mo 95 15,92	Mo 96 16,68	Mo 97 9,55	Mo 98 24,13	Mo 99 66,0 h	Mo 100 9,63
Nb 89 66 m 2,9 h	Nb 90 18,8 a 14,6 h	Nb 91 60,9 d 680 a	Nb 92 10,15 d 3,6 · 10 ² a	Nb 93 15,13 a 100	Nb 94 6,26 m 2 · 10 ⁴ a	Nb 95 86,6 h 34,97 d	Nb 96 23,4 h	Nb 97 53 s 74 m	Nb 98 51 m 2,9 s	Nb 99 2,6 m 15 s
Zr 88 83,4 d	Zr 89 4,16 m 78,4 h	Zr 90 51,45	Zr 91 11,22	Zr 92 17,15	Zr 93 1,5 · 10 ⁶ a	Zr 94 17,38	Zr 95 64,0 d	Zr 96 2,80	Zr 97 16,8 h	Zr 98 30,7 s

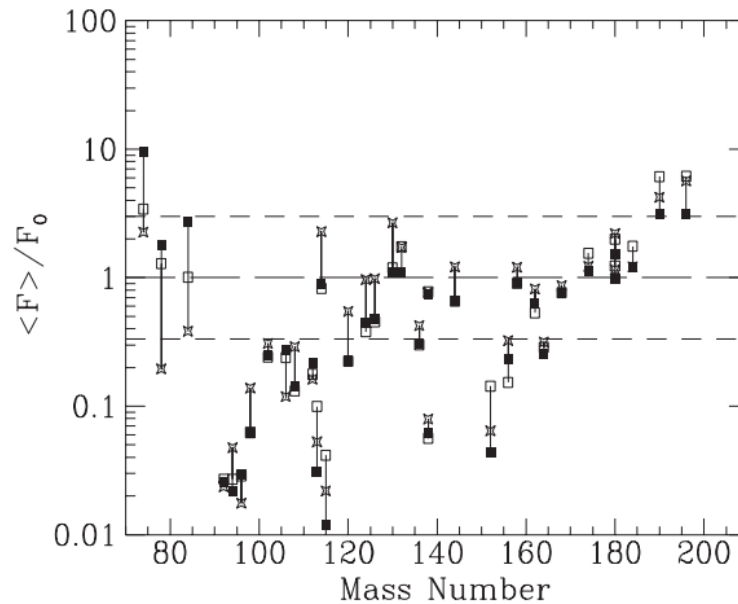
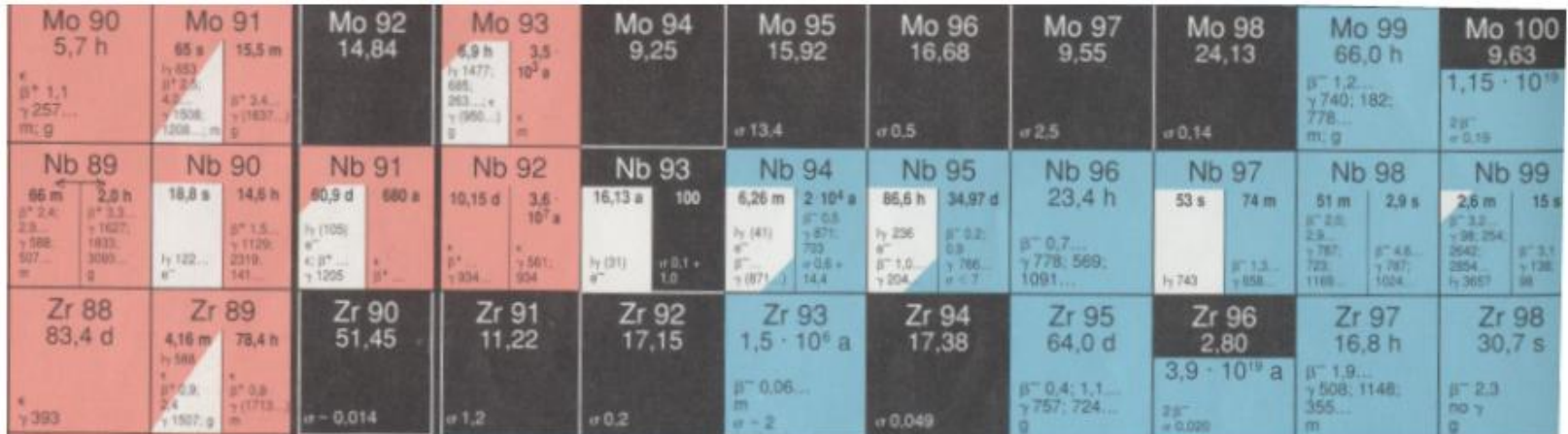


Fig. 32. Values of the normalized overproduction factor $\langle F_i \rangle(M)/F_0(M)$ calculated for three different $25 M_{\odot}$ explosion models: (a) the nominal case defined above (open squares), (b) same as (a), but with $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ rates divided by a factor of 2.5 (asterisks), and (c) same as (b), but with a final explosion kinetic energy increased by a factor of 1.5 (black squares) (from [24]).

Обойденные ядра.



Выходы фотоядерных реакций на естественной изотопной смеси молибдена, приводящих к образованию и распаду обойденного ядра ^{92}Mo

Изоотоп	$Y_{\text{эксп}}, e^{-1}$	$Y_{\text{talys}}^{\text{orig}}, e^{-1}$	$Y_{\text{talys}}^{\text{mod}}, e^{-1}$	$Y_{\text{КМФР}}, e^{-1}$
^{90}Mo	$(1.79 \pm 0.11) \cdot 10^{-7}$	$2.54 \cdot 10^{-7}$	$1.73 \cdot 10^{-7}$	$2.43 \cdot 10^{-7}$
$^{91\text{m}}\text{Mo}$	$(2.06 \pm 0.05) \cdot 10^{-6}$	$3.08 \cdot 10^{-6}$	$3.17 \cdot 10^{-6}$	
^{91}Mo	$(2.11 \pm 0.18) \cdot 10^{-6}$	$1.61 \cdot 10^{-6}$	$1.55 \cdot 10^{-6}$	
$^{91}\text{Mo}_{\text{tot}}$	$(4.17 \pm 0.19) \cdot 10^{-6}$	$4.72 \cdot 10^{-6}$	$4.72 \cdot 10^{-6}$	$5.89 \cdot 10^{-6}$
$^{90}\text{Nb}_{\text{tot}}$	$(2.62 \pm 0.12) \cdot 10^{-7}$	$3.19 \cdot 10^{-7}$	$2.74 \cdot 10^{-7}$	$2.72 \cdot 10^{-7}$
$^{91\text{m}}\text{Nb}$	$(1.20 \pm 0.02) \cdot 10^{-6}$	$4.64 \cdot 10^{-6}$	$5.56 \cdot 10^{-6}$	
^{91}Nb		$6.75 \cdot 10^{-7}$	$8.03 \cdot 10^{-7}$	-
$^{91}\text{Nb}_{\text{tot}}$		$5.32 \cdot 10^{-6}$	$6.36 \cdot 10^{-6}$	$4.41 \cdot 10^{-6}$

Фотоделение

Ядерные данные о взаимодействии гамма-квантов с тяжелыми ядрами необходимо для решения большого числа прикладных и фундаментальных задач.

- Сечения фотонейтронных реакций и реакции фотоделения используются при разработке нейтронных источников для подкритичных систем. Кроме этого при работе подкритичных систем образуется большое число гамма-квантов, которые взаимодействуют с делящимся материалом.

- Данные о фотоделении и фотонейтронных реакциях необходимы для разработки систем транмутации ядерных отходов, создания пучков радиоактивных ядер, получения экзотических ядер (высокоспиновых изомеров, сильнонейтроноизбыточных ядер, сильнодеформированных ядер).

Фотоделение

- Данные используются при расчетах распространенности нейтроноизбыточных ядер, образующихся в результате взрыва сверхновых.
- В последнее время активно проводятся исследования альтернативных способов наработки медицинских изотопов, традиционно получаемых на реакторах. В частности предлагается использование фотоядерных реакций и реакции фотоделения. Новые ядерные данные необходимы также для изучения структуры атомных ядер и проверки предположений о барьере деления.

Из-за недостатка ядерных данных во многих прикладных исследованиях используют результаты моделирования. Программы моделирования, например TALYS и Empire, в основе которых лежат те же известные ядерные данные, воспроизводят лишь основные закономерности процесса деления. Для уточнения параметров различных моделей необходимы новые ядерные данные.

В результате деления происходит глобальная перестройка всего ядра. 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, статистических и динамических аспектах деления ядра, распределении энергии между осколками, кинетической энергии и внутренней энергии возбуждения ядра.

— Угловое распределение осколков дает информацию о механизме возбуждения делящегося ядра

— Формирование осколков деления, девозбуждение осколков деления, вылет нейтронов и γ -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.

Фотоделение. Моды деления.

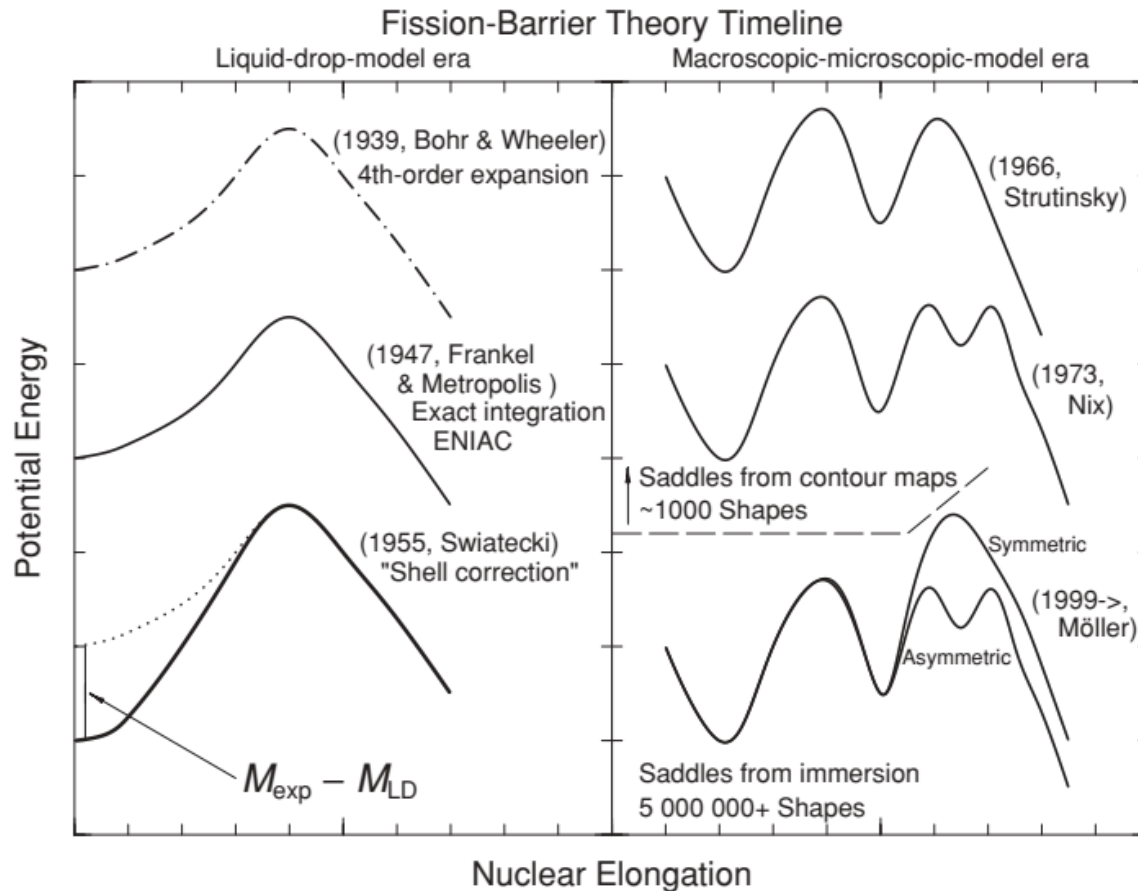
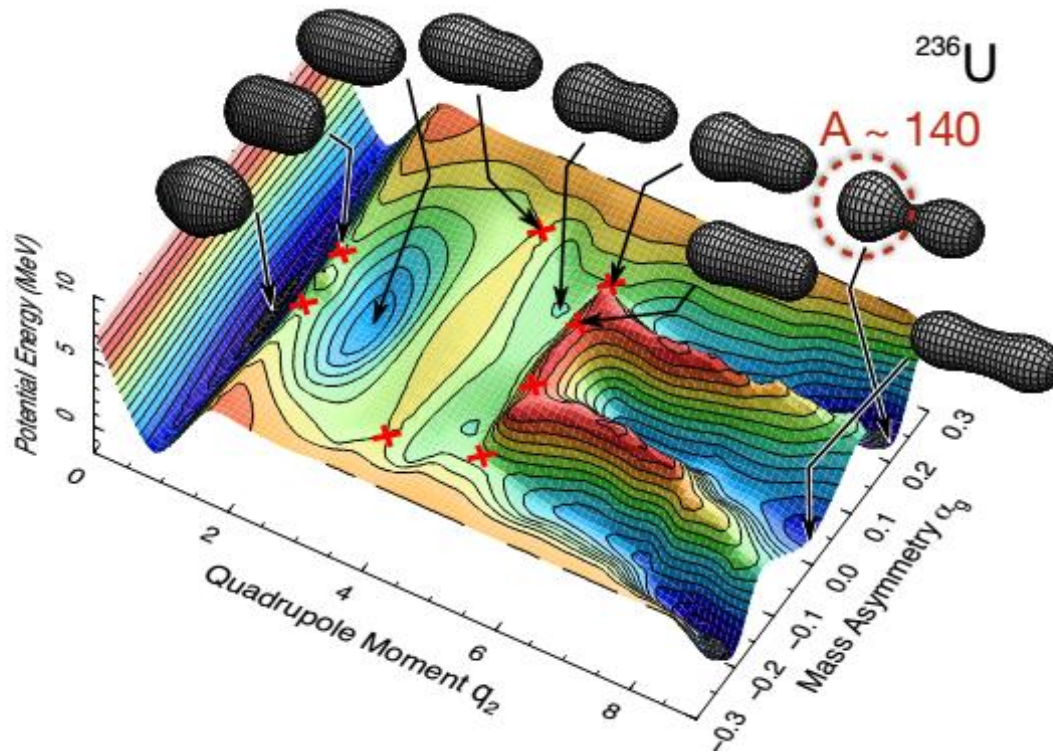


FIG. 1. Historical development of fission-barrier theory. For details, see the text.

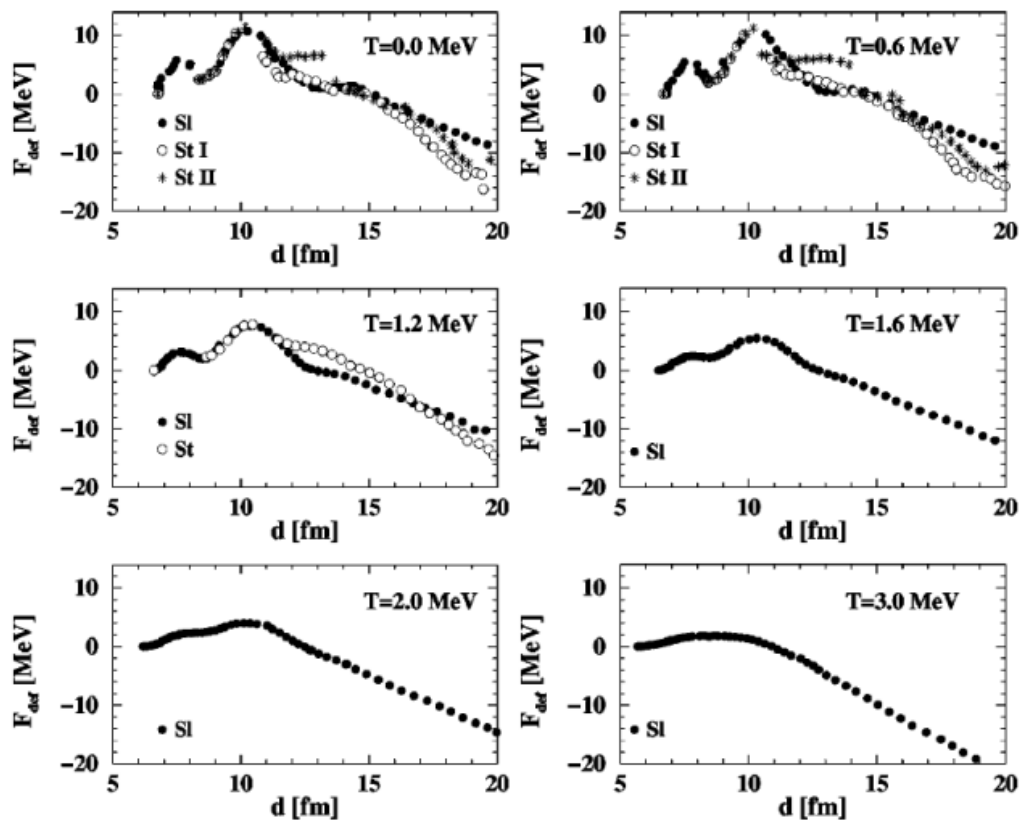
P. Möller, A. J. Sierk, T. Ichikawa, A. Iwamoto, R. Bengtsson, H. Uhrenholt, and S. Åberg. Heavy-element fission barriers. Phys. Rev. C 79, 064304. 2009

Фотоделение. Моды деления.

Schematic picture of 2D fission potential-energy surface for ^{236}U



Фотоделение. Моды деления.



Теоретически рассчитанные барьеры деления в зависимости от расстояния между центрами фрагментов для разных ядерных температур T делящегося ядра ^{238}U

Фотоделение. Моды деления.

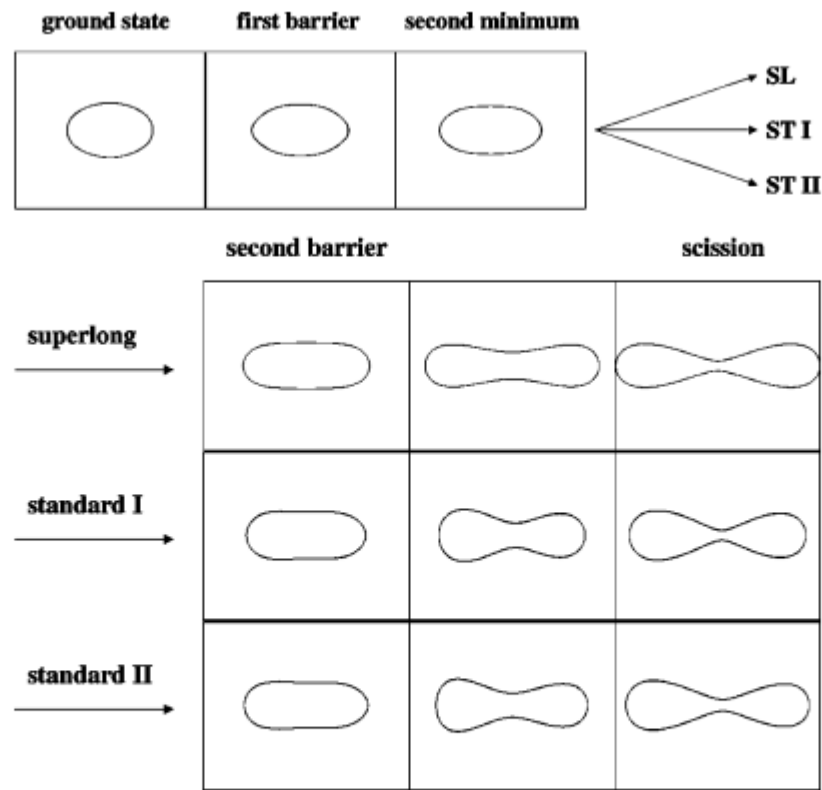
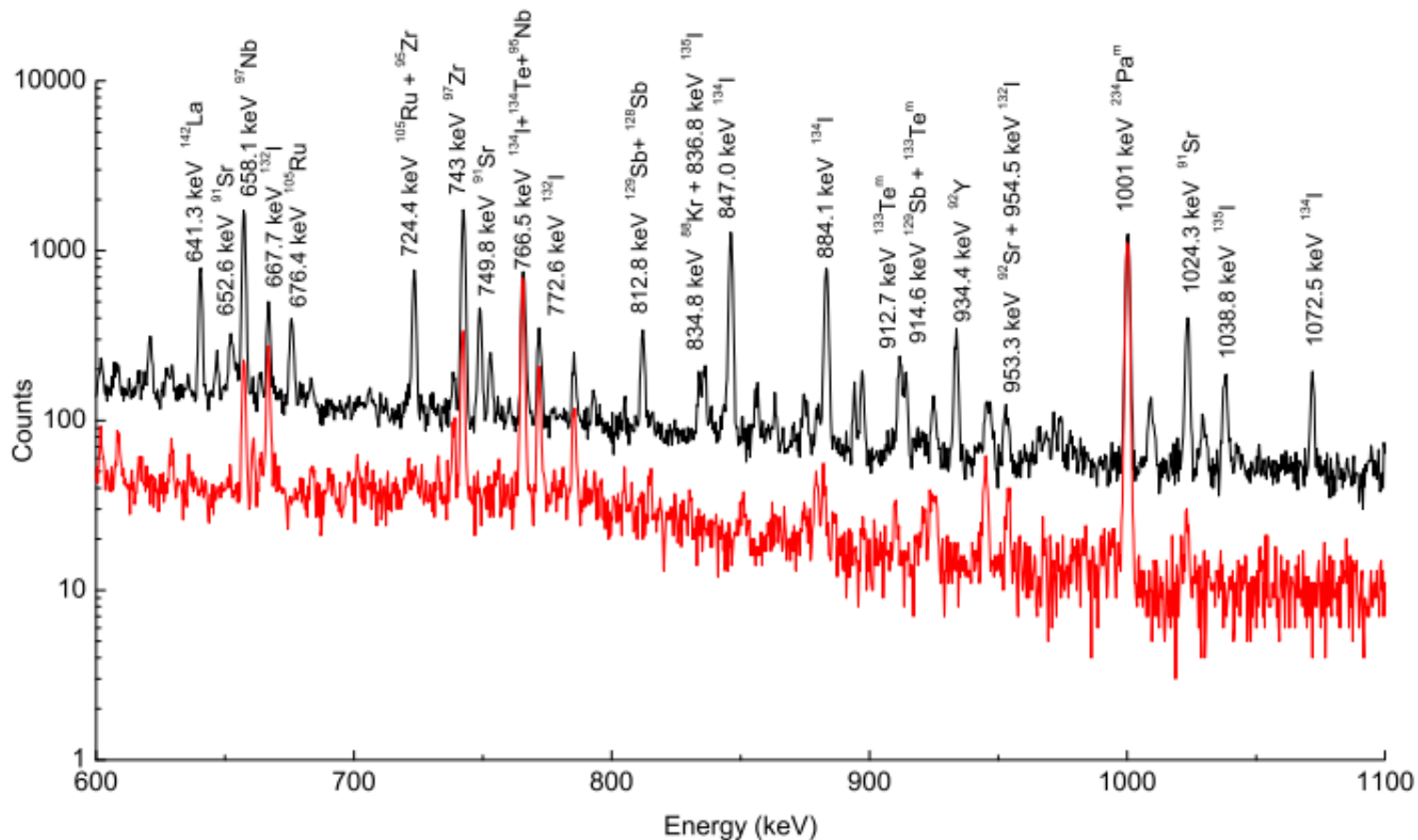


Рис. 31. Изменение формы ядра ^{238}U . Во втором потенциальном минимуме путь деления разделяется на три канала [106].

Обработка данных



$$Y = \alpha\eta \int_{E_{thr}}^{E_e} \phi(E_\gamma, E_e) \sigma(E_\gamma) dE_\gamma$$

$$S = k \int_{t_2-t_1}^{t_3-t_2} \lambda N(t) \frac{t_{live}}{t_{real}} dt$$

Методика обработки данных

В результате эксперимента измерялись выходы фотоядерных реакций. Выход фотоядерной реакции представляет собой свертку сечения фотоядерной реакции $\sigma(E_\gamma)$ с плотностью распределения числа тормозных фотонов с энергией E_γ на один электрон пучка ускорителя $\phi(E_\gamma, E_e)$:

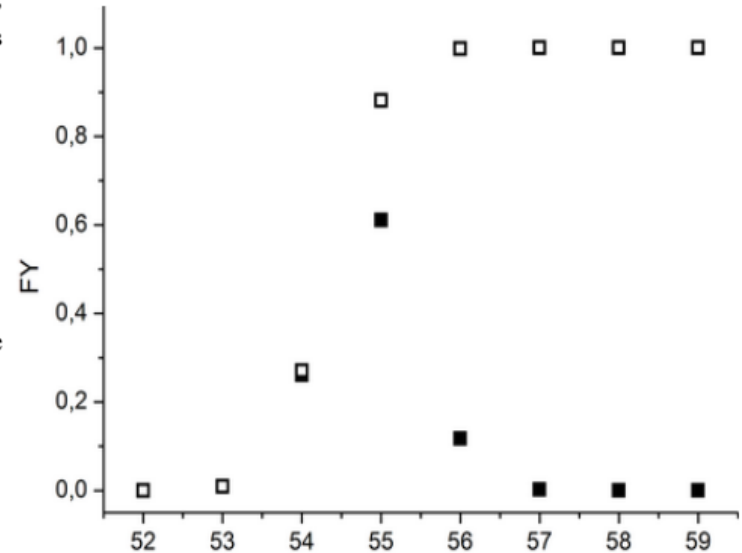
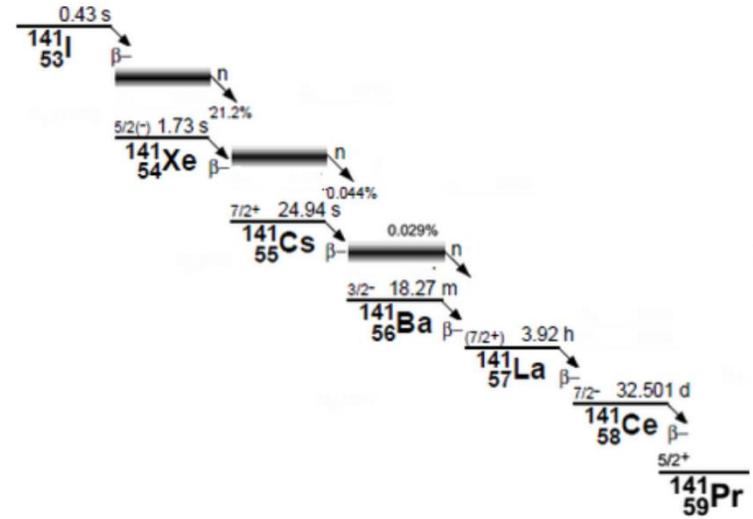
$$Y = \alpha \eta \int_{E_{thr}}^{E_e} \phi(E_\gamma, E_e) \sigma(E_\gamma) dE_\gamma, \quad (1)$$

где α - количество исследуемых ядер, отнесенное к 1 см² мишени, η - процентное содержание исследуемого изотопа в естественной смеси.

Исследуемый изотоп может образовываться непосредственно в результате фотоядерных реакций, а также в результате распада другого изотопа, полученного в результате фотоядерной реакции. Поэтому в расчетах выходов реакций необходимо учитывать оба канала образования ядра:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 + I(t) Y_1 \\ \frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1 + I(t) Y_2, \end{cases} \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 - постоянные распада, Y_1 и Y_2 - выходы образования в результате реакции ядра 1 и ядра 2 соответственно, $I(t)$ – ток ускорителя.



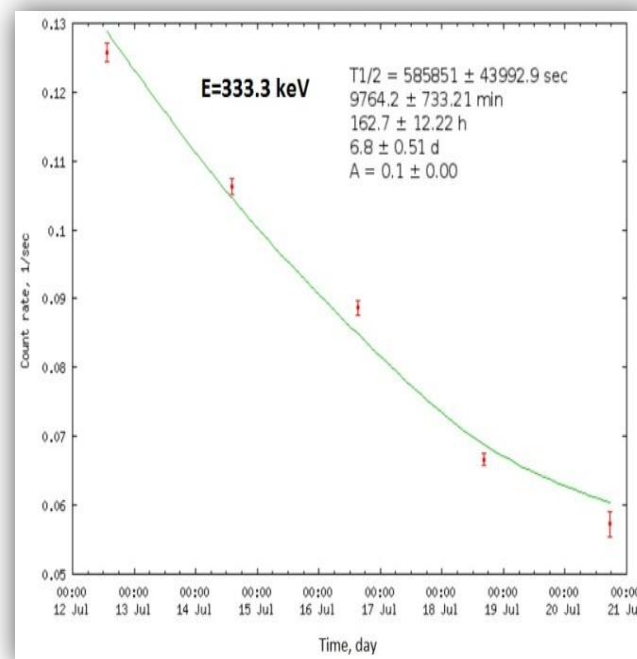
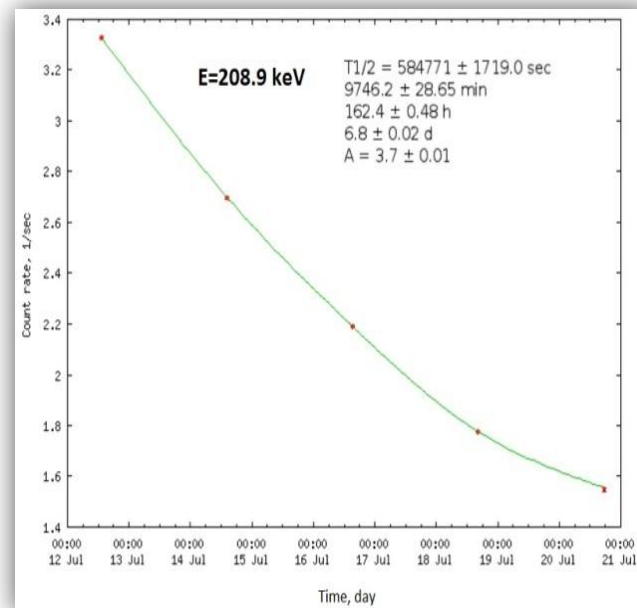
Выходы реакций рассчитывались на основе решения системы дифференциальных уравнений (2) с учетом квантового выхода гамма-квантов, эффективности детектора и колебания тока ускорителя во время облучения. Решение первого уравнения системы для выхода ядер, образующихся напрямую в результате фотоядерной реакции или после каскада γ -квантов:

$$Y = \frac{S}{Ck(e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_2-t_1)})}, \quad (3)$$

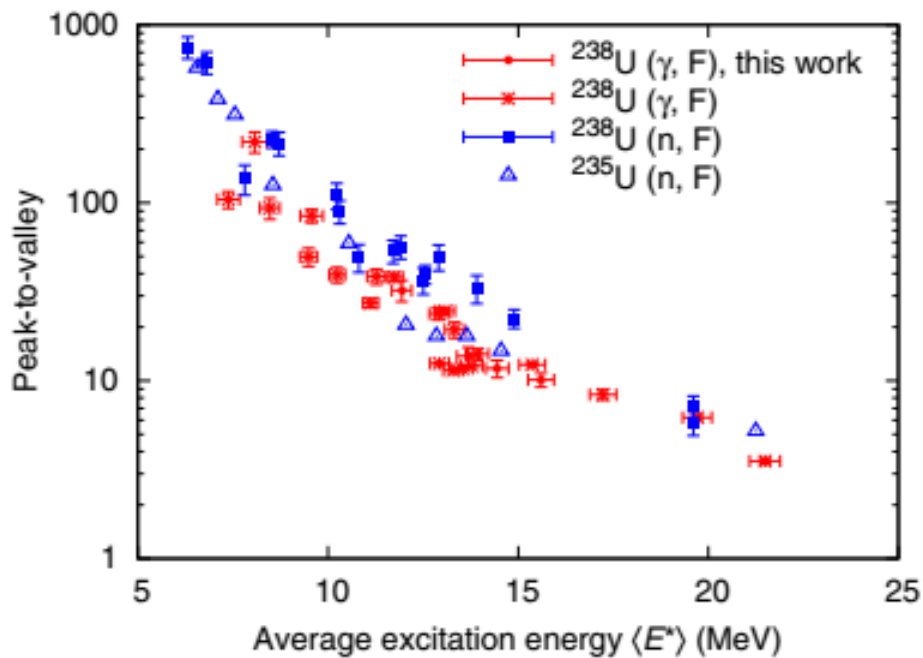
где S – площадь фотопика в спектрах остаточной активности, соответствующего γ -переходу при распаде конечного ядра за время измерения, t_1 – время облучения; t_2 – время начала измерения, t_3 – время окончания измерения; λ_1 – постоянная распада; k – коэффициент, равный

произведению эффективности детектора, коэффициента каскадного суммирования и квантового выхода γ -кванта при γ -переходах, C – коэффициент, учитывающий изменение тока ускорителя $I(t)$ во время

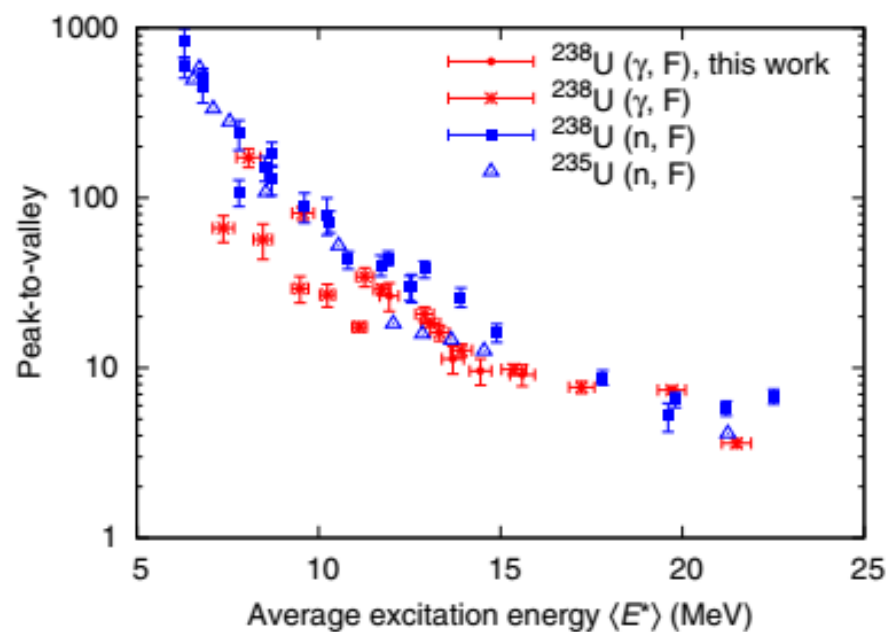
облучения $C = \int_0^{t_1} I(t) e^{-\lambda_1(t_3-t_1)} dt$.



Симметричное и несимметричное деление

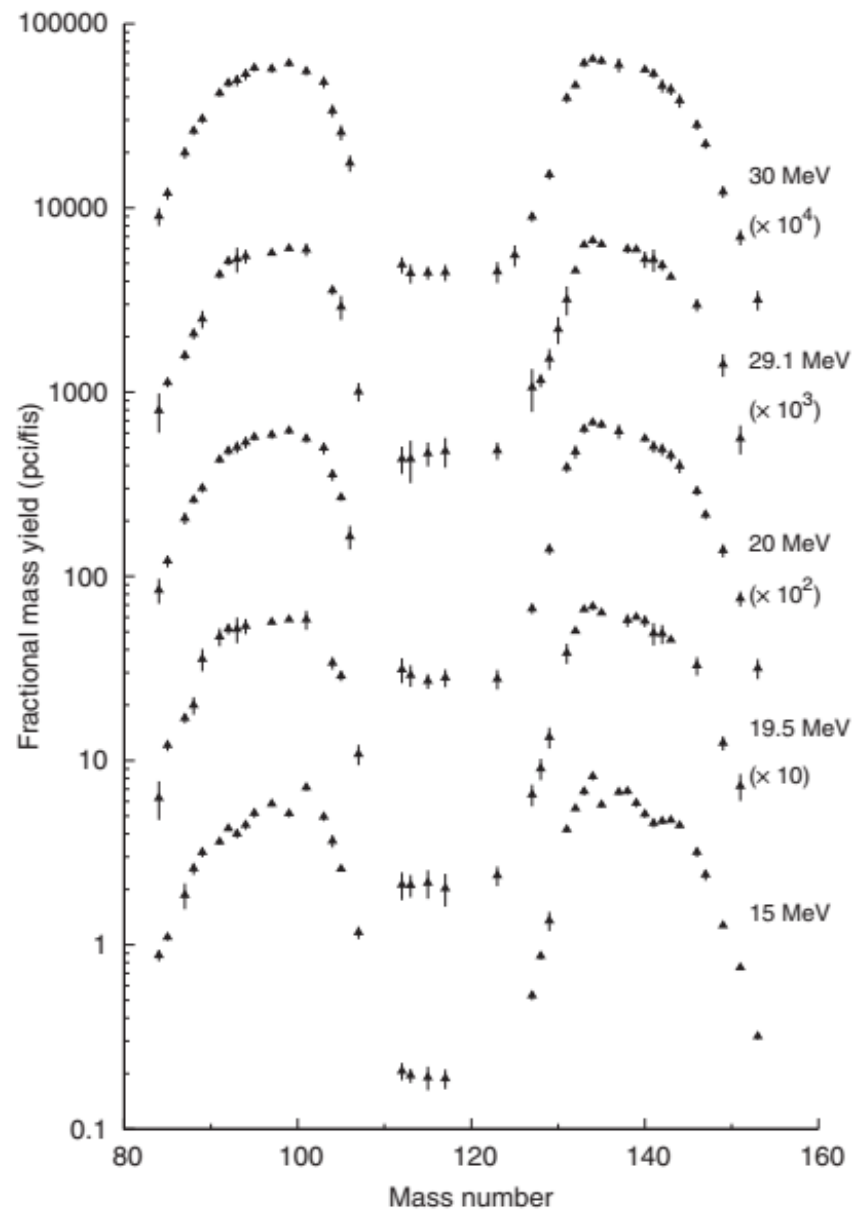


134/117



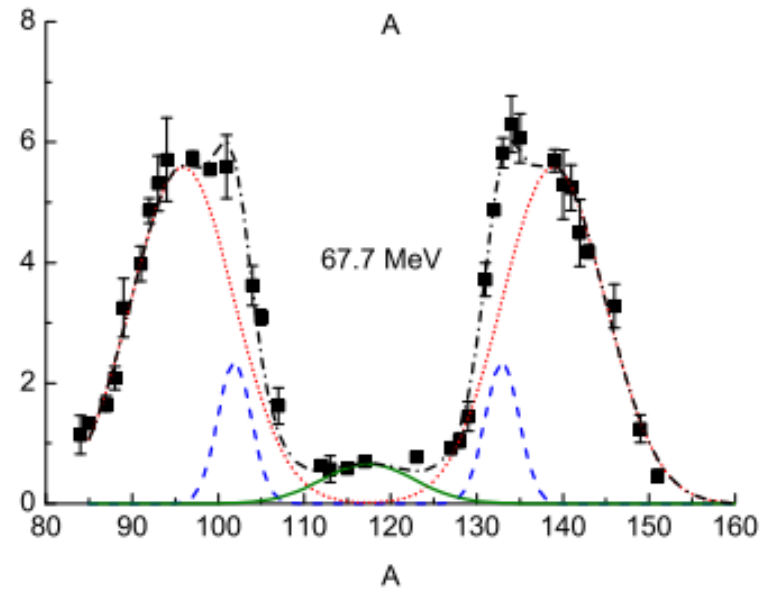
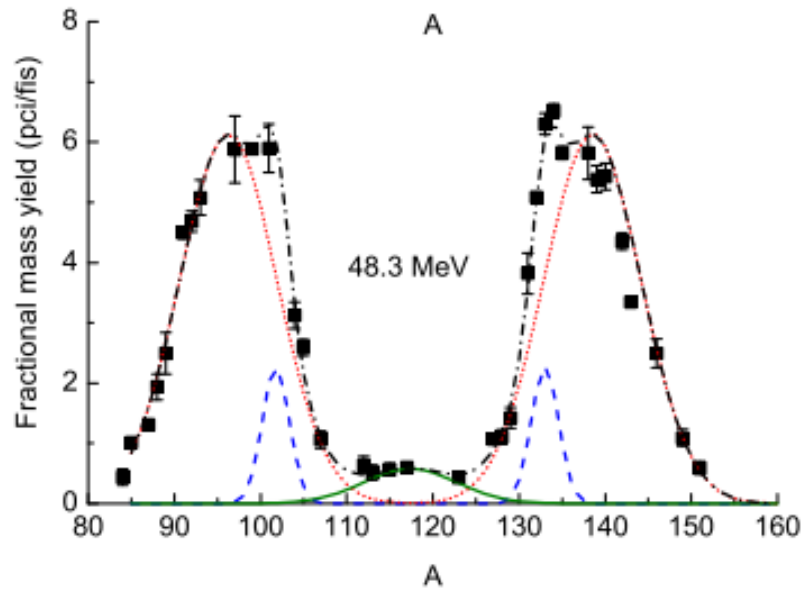
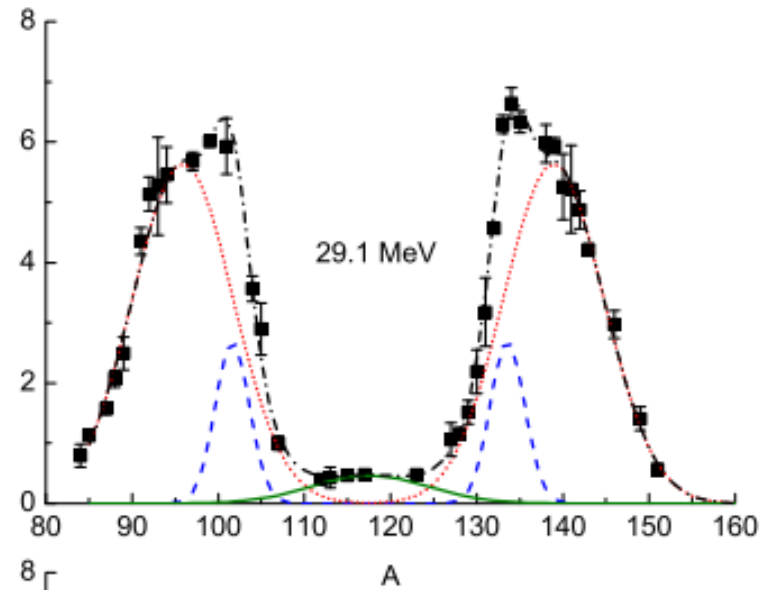
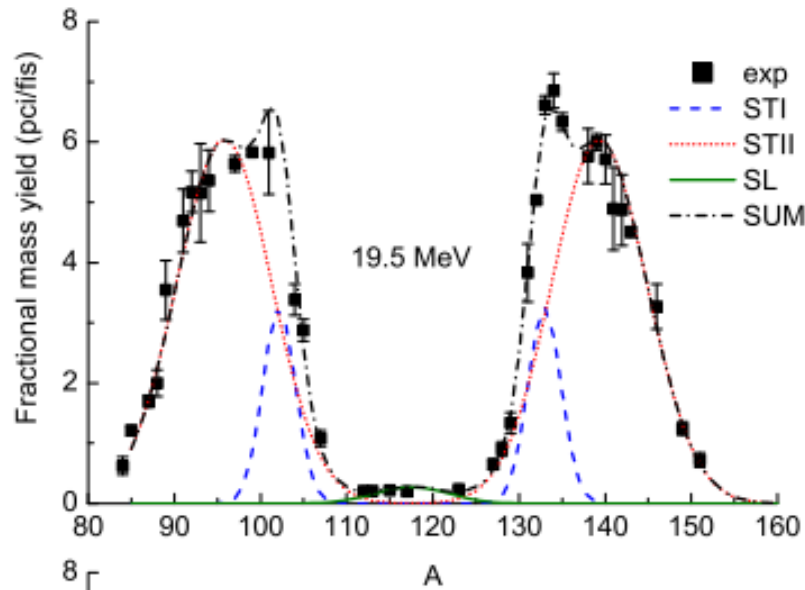
143/117

Аппроксимация массовых распределений

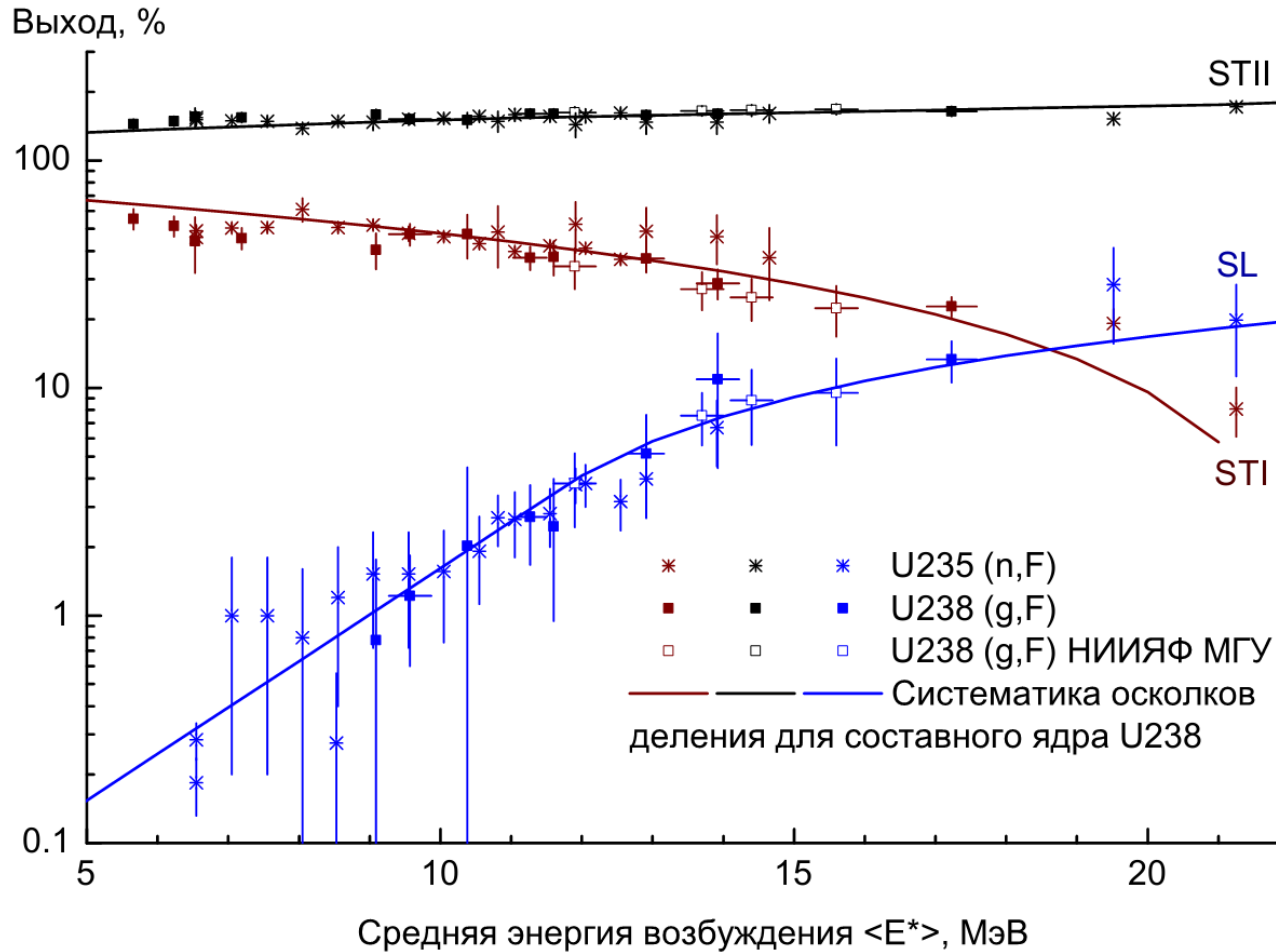


$$\begin{aligned}
 Y(A) &= Y_{SL}(A) + Y_{STI}(A) + Y_{STII}(A) \\
 &= K_{SL} \exp \left[-\frac{(A - A_{SL})^2}{2\sigma_{SL}^2} \right] \\
 &\quad + K_{STI} \exp \left[-\frac{(A - A_{SL} - D_{STI})^2}{2\sigma_{STI}^2} \right] \\
 &\quad + K_{STI} \exp \left[-\frac{(A - A_{SL} + D_{STI})^2}{2\sigma_{STI}^2} \right] \\
 &\quad + K_{STII} \exp \left[-\frac{(A - A_{SL} - D_{STII})^2}{2\sigma_{STII}^2} \right] \\
 &\quad + K_{STII} \exp \left[-\frac{(A - A_{SL} + D_{STII})^2}{2\sigma_{STII}^2} \right],
 \end{aligned}$$

Аппроксимация массовых распределений



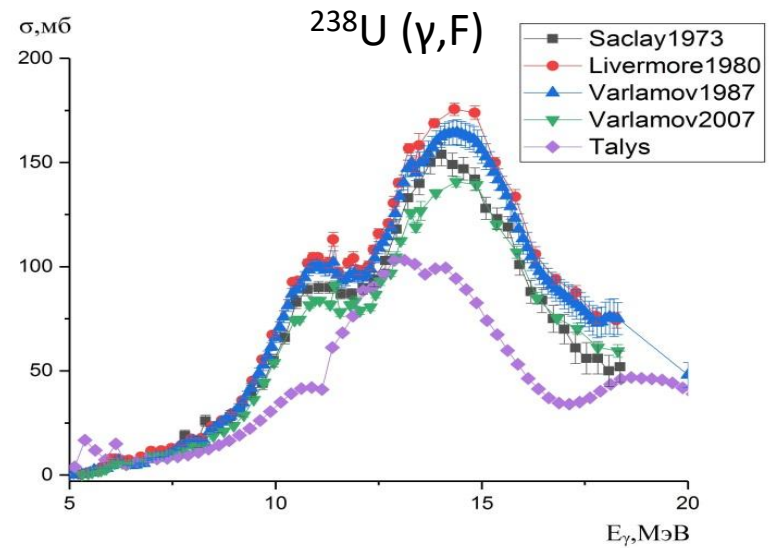
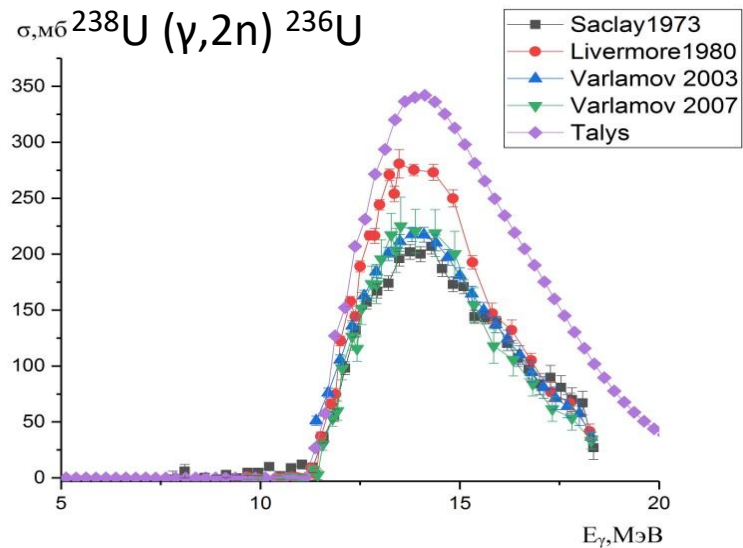
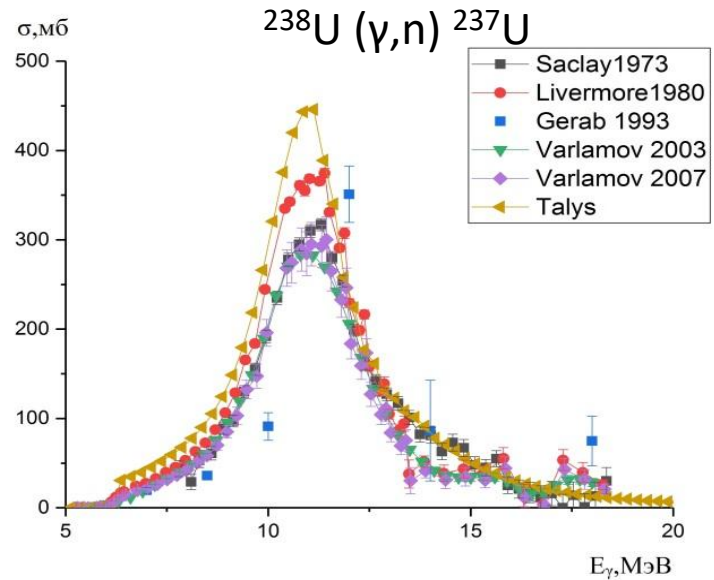
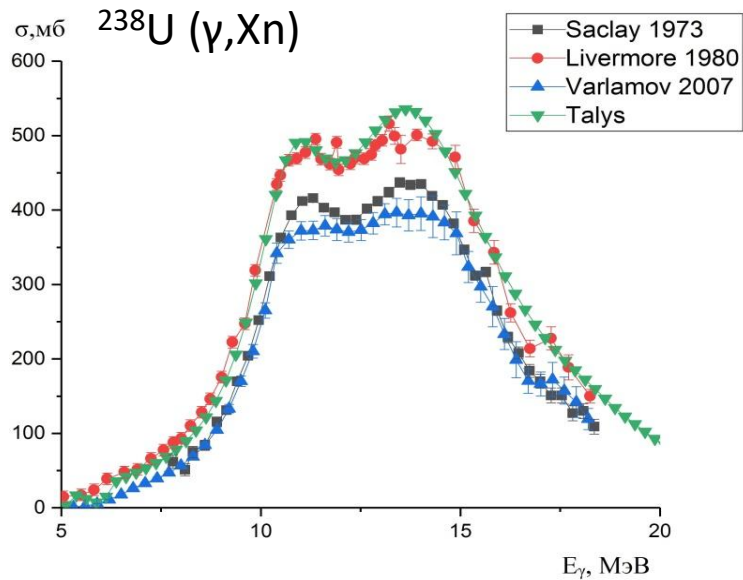
Фотоделение. Моды деления.



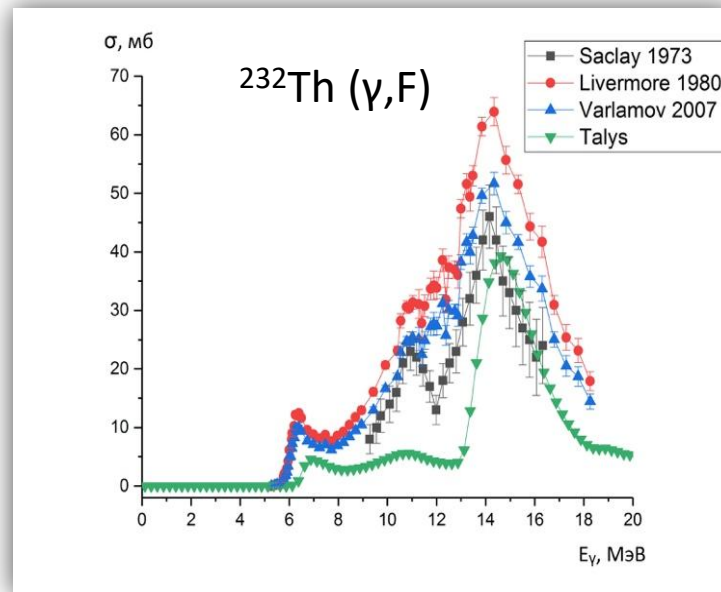
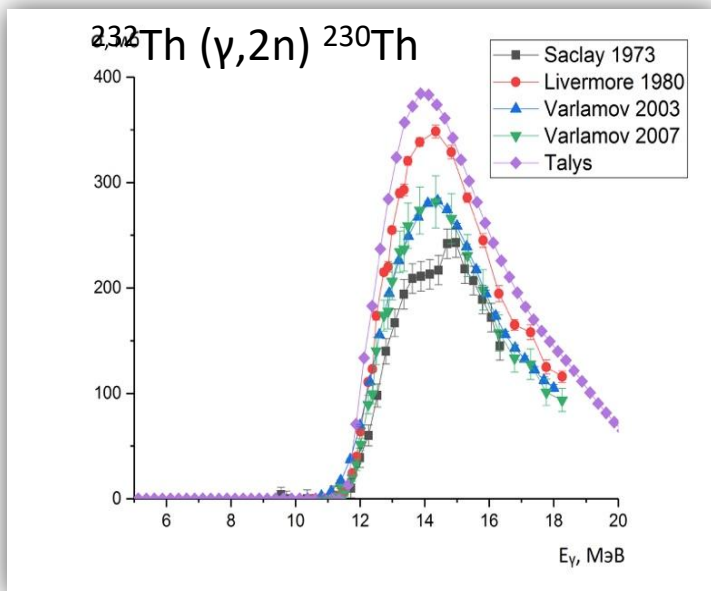
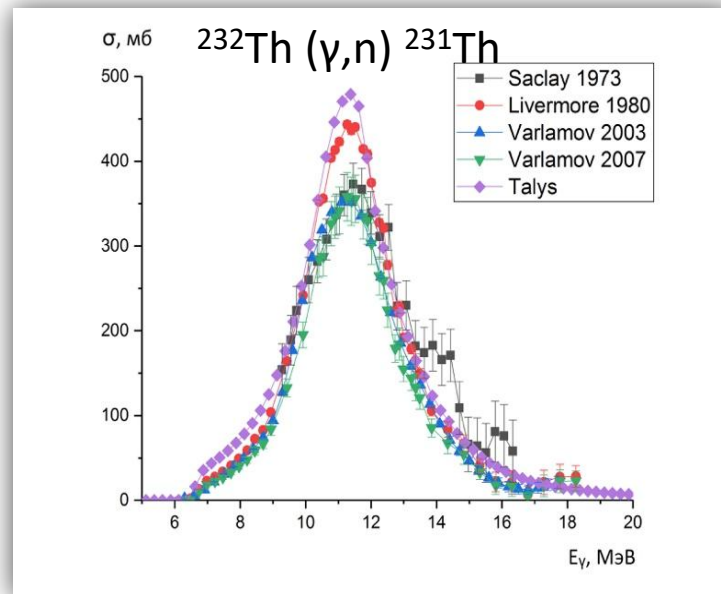
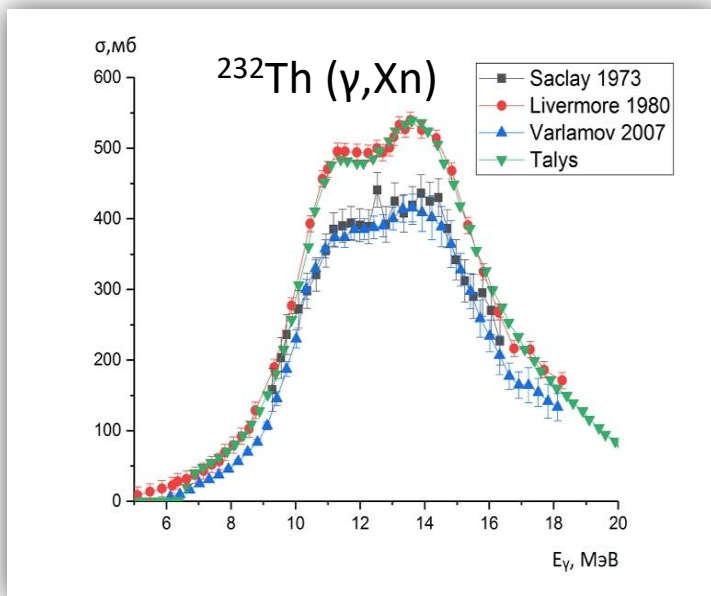
Зависимость вклада мод асимметричного STI, STII и симметричного SL деления в полный выход осколков для фотоделения ^{238}U и деления ^{235}U под действием нейтронов от средней энергии возбуждения делящегося ядра

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(3):034603, 2015.

Сечения фотоядерных реакций на ^{238}U

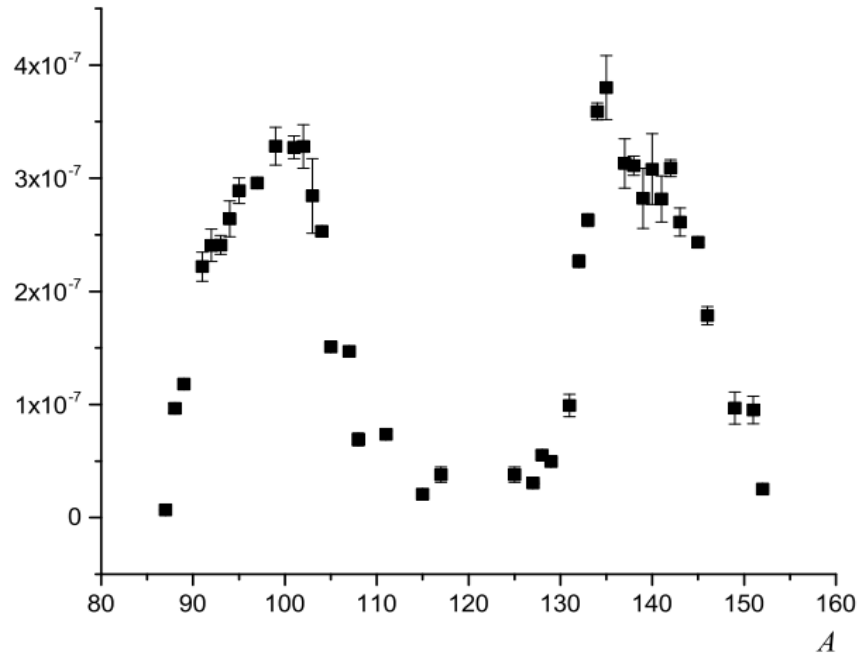


Сечения фотоядерных реакций на ^{232}Th



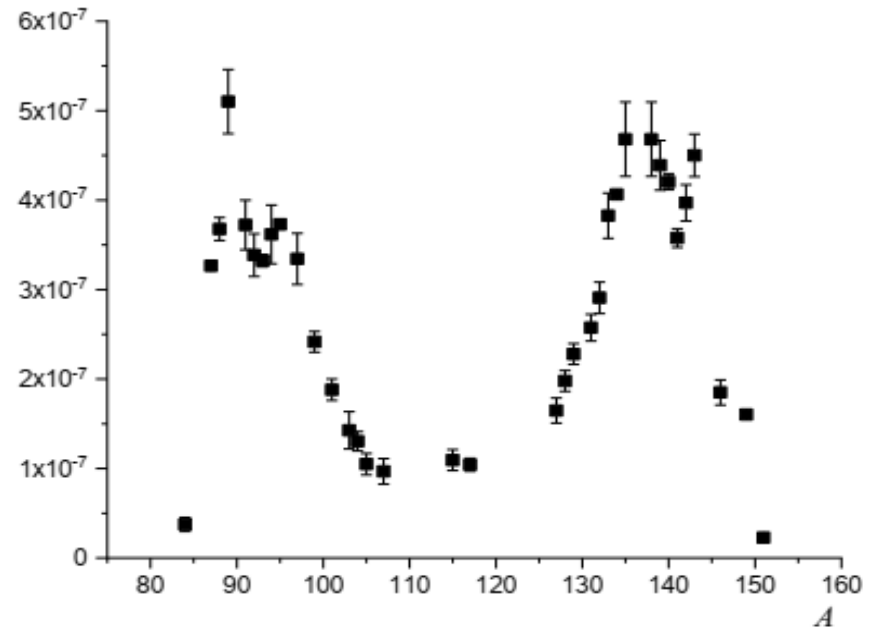
Массовые распределения

Выход, $1/e$

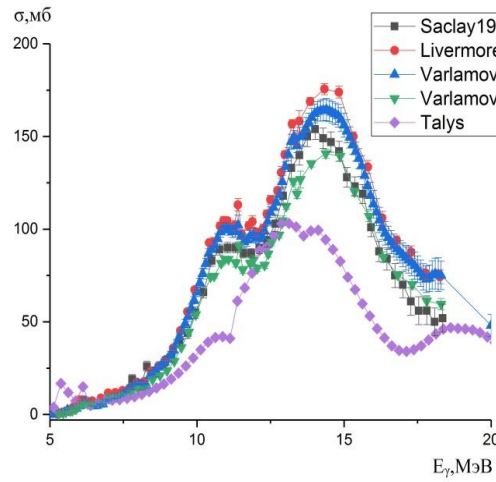
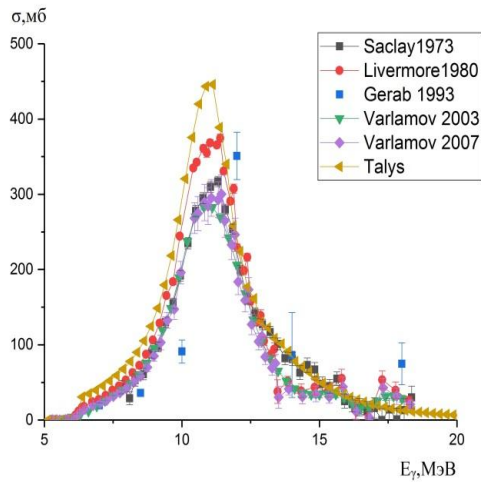


Массовое распределение фотоделения ^{238}U при энергии тормозного спектра 55 МэВ

Выход, $1/e$



Массовое распределение фотоделения ^{232}Th при энергии тормозного спектра 55 МэВ



1. Veyssiere A, Beil H, Bergere R et al (1973) A study of the photofission and photoneutron processes in the giant dipole resonance of ^{232}Th , ^{238}U and ^{237}Np . Nucl Phys A 199:45-64.

[https://doi.org/10.1016/0375-9474\(73\)90333-3](https://doi.org/10.1016/0375-9474(73)90333-3)

2. Caldwell J T, Dowdy E J, Berman B L, Alvarez R A, Meyer P (1980) Giant resonance for the actinide nuclei: Photoneutron and photofission cross sections for ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , and ^{232}Th . Phys Rev C 21:1215-1231.

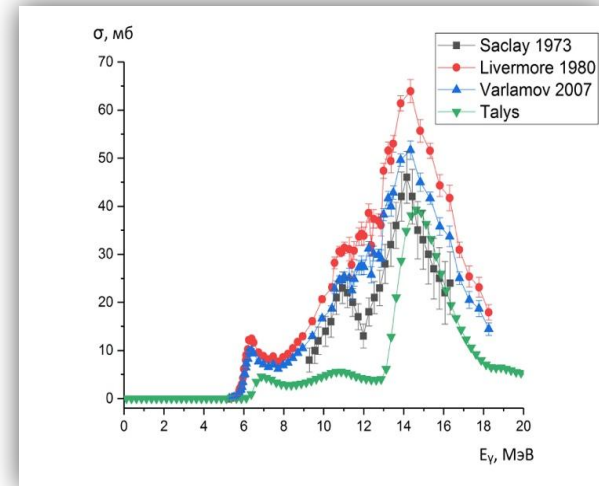
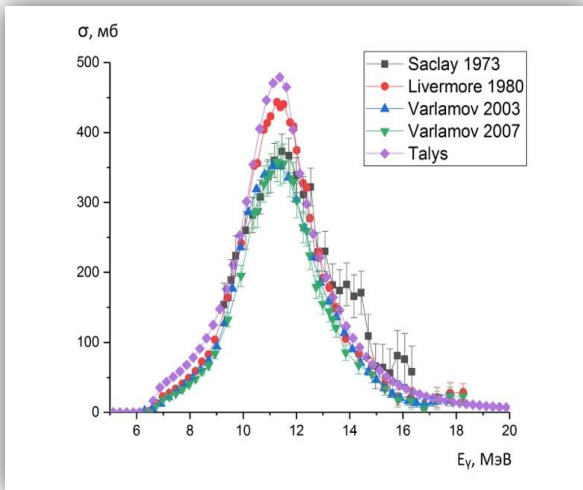
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.21.1215>

1.1215

3. Varlamov V V, Peskov N N, Rudenko D S, Stepanov M E (2003) Photoneutron reaction cross sections in experiments with beams of quasimonoenergetic annihilation photons. Vop. At.Nauki I Tekn. Ser. Yadernye Konstanty Issue.1-2:48

4. Varlamov V V, Peskov N N (2007) Evaluation of (γ, Xn) , (γ, Sn) , (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, and (γ, f) reactions cross sections for actinides nuclei ^{232}Th , ^{238}U , ^{237}Np , and ^{239}Pu : consistency between data obtained using quasimonoenergetic annihilation and bremsstrahlung photons. Moscow State Univ.Inst.Phys.Reports, No.2007-8/829

		[1]	[2]	[3]	TALYS
$Y(^{238}_{92}\text{U}(\gamma, 1n)) \cdot 10^{-6}, 1/e$	7.74 ± 0.37	6.83	8.40	6.74	9.98
$Y(^{238}_{92}\text{U}(\gamma, F)) \cdot 10^{-6}, 1/e$	5.63 ± 0.30	4.38	5.37	5.41	4.06
$\frac{Y(^{238}_{92}\text{U}(\gamma, F))}{Y(^{238}_{92}\text{U}(\gamma, 1n))}, \text{отн ед}$	0.727 ± 0.050	0.641	0.639	0.803	0.481



		[1]	[2]	[4]	TALYS
$Y(^{232}_{90}\text{Th}(\gamma, 1n)) \cdot 10^{-5}, 1/e$	5.20 ± 0.38	5.62	6.39	5.49	7.11
$Y(^{232}_{90}\text{Th}(\gamma, F)) \cdot 10^{-6}, 1/e$	8.85 ± 0.63	6.21	12.3	9.99	5.38
$\frac{Y(^{232}_{90}\text{Th}(\gamma, F))}{Y(^{232}_{90}\text{Th}(\gamma, 1n))}, \text{отн ед}$	0.170 ± 0.015	0.110	0.192	0.182	0.076

1. Veysiere A, Beil H, Bergere R et al (1973) A study of the photofission and photoneutron processes in the giant dipole resonance of ^{232}Th ^{238}U and ^{237}Np . Nucl Phys A 199:45-64. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(73\)90333-3](https://doi.org/10.1016/0375-9474(73)90333-3)

2. Caldwell J T, Dowdy E J, Berman B L, Alvarez R A, Meyer P (1980) Giant resonance for the actinide nuclei: Photoneutron and photofission cross sections for ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , and ^{232}Th . Phys Rev C 21:1215-1231. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.21.1215>

3. Varlamov V V, Peskov N N, Rudenko D S, Stepanov M E (2003) Photoneutron reaction cross sections in experiments with beams of quasimonoenergetic annihilation photons. Vop. At.Nauki I Tekn. Ser. Yadernye Konstanty Issue.1-2:48

4. Varlamov V V, Peskov N N (2007) Evaluation of (γ, Xn) , (γ, Sn) , (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, and (γ, f) reactions cross sections for actinides nuclei ^{232}Th , ^{238}U , ^{237}Np , and ^{239}Pu : consistency between data obtained using quasimonoenergetic annihilation and bremsstrahlung photons. Moscow State Univ.Inst.Phys.Reports, No.2007-8/829

Наработка медицинских изотопов.

К радионуклидам, применяемым в медицине, предъявляются следующие требования:

- Период полураспада в пределах от часов до нескольких суток
- Наличие подходящих для визуализации (низкоэнергетическая гамма или β^+) или терапии (β , α , Auger, CE) излучений
- Возможность обеспечить химическую связь с носителем.

Путь производства должен обеспечивать

- Активность на уровне ГБк
- Удельную активность, соизмеримую с теоретически достижимой (т. е. без носителя)
- Отсутствие долгоживущих (соизмеримых с $T_{1/2}$ целевого продукта или более) примесей.

В большинстве случаев медицинские радионуклиды получают по (p,n)-реакциям на циклотронах низкой энергии (<15 МэВ) или по (p,2n)-реакциям на циклотронах средней энергии (<30-35 МэВ). В отдельных случаях, если нет альтернатив, используют протоны более высокой энергии (~100 МэВ) или α -частицы.

Использование ускорителей электронов может стать альтернативой при производстве тех радионуклидов, которые находятся далеко от линии стабильности на N-Z диаграмме и не могут быть получены простыми путями. Перспективными могут быть (γ ,p), (γ ,pxn)-реакции, а также косвенные процессы, идущие через распад промежуточного продукта.

Наработка медицинских изотопов.

Нуклид	T1/2	Тип распада	Применение	Путь получения	Содержание изотопа-мишени
^{47}Sc	3.35 d	β^-	Терапия	$^{48}\text{Ti}(\gamma, p)^{47}\text{Sc}$	73.7
^{67}Cu	2.58 d	β^-	Терапия	$^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$	18.8
$^{69\text{m}}\text{Zn}$	13.76 h	IT	Диагностика/ Терапия	$^{71}\text{Ga}(\gamma, np)^{69\text{m}}\text{Zn}$	39.9
^{72}As	1.08 d	β^+	Диагностика	$^{74}\text{Se}(\gamma, 2n)^{72}\text{Se} \rightarrow ^{72}\text{As}$	0.89
^{73}Ga	4.86 h	β^-	Терапия	$^{74}\text{Ge}(\gamma, p)^{73}\text{Ga}$	35.9
$^{80\text{m}}\text{Br}$	4.42 h	IT	Терапия	$^{82}\text{Kr}(\gamma, np)^{80\text{m}}\text{Br}$	11.6
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 h	IT	Диагностика	$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$	9.66
^{119}Sb	1.59 d	EC	Терапия	$^{120}\text{Te}(\gamma, p)^{119}\text{Sb}$ $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te} \rightarrow ^{119}\text{Sb}$	0.096
^{161}Ho	2.48 h	EC	Терапия	$^{162}\text{Er}(\gamma, p)^{161}\text{Ho}$ $^{162}\text{Er}(\gamma, n)^{161}\text{Er} \rightarrow ^{161}\text{Ho}$	0.14
^{161}Tb	6.88 d	β^-	Терапия	$^{162}\text{Dy}(\gamma, p)^{161}\text{Tb}$	25.5
^{167}Tm	9.25 d	EC	Терапия	$^{168}\text{Yb}(\gamma, p)^{167}\text{Tm}$ $^{168}\text{Yb}(\gamma, n)^{167}\text{Yb} \rightarrow ^{167}\text{Tm}$	0.13
^{177}Lu	6.73 d	β^-	Терапия	$^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$	27.3
^{186}Re	3.72 d	β^-	Терапия	$^{187}\text{Os}(\gamma, p)^{186}\text{Re}$	1.6
$^{195\text{m}}\text{Pt}$	4.02 d	IT	Терапия	$^{197}\text{Au}(\gamma, np)^{195\text{m}}\text{Pt}$	100
^{198}Au	2.70 d	β^-	Терапия	$^{199}\text{Hg}(\gamma, p)^{198}\text{Au}$	16.87

Наработка медицинских изотопов. ^{67}Cu .

Ядерные свойства ^{67}Cu оптимальны для ядерной медицины. Низкая средняя энергия β - частиц (141 keV) позволяет использовать ^{67}Cu для радиоиммунотерапии опухолей небольшого размера (средний пробег в тканях β -частиц $^{67}\text{Cu} \approx 0.2$ мм). Мягкое γ -излучение (184.6 keV, 48.7%) позволяет визуализировать распределение радионуклида в организме и рассчитать получаемую пациентом дозу. Период полураспада 2.58 сут. и отсутствие жесткого гамма-излучения позволяют уменьшить нежелательную дозовую нагрузку на пациента и персонал. Однако применение ^{67}Cu в медицине лимитируется трудностями, связанными с его производством. Современные производственные мощности намного меньше потенциальной потребности, которая оценена в 12 000 Ci/year.

Reaction	Incident particles energy	Target [enrichment (%)]	Yield MBq/($\mu\text{A h}$)	Impurities (%)
$^{68}\text{Zn}(p,2p)^{67}\text{Cu}$	92–128 70→35	^{68}Zn (99.7%)	1.08 ^a 24.25	^{64}Cu (1600) –
$^{64}\text{Ni}(\alpha,p)^{67}\text{Cu}$	24→0 40→0 44→0 36→0	^{64}Ni ^{64}Ni ^{64}Ni ^{64}Ni	0.544 1.098 0.926 0.527	– – – –
$^{70}\text{Zn}(p,\alpha)^{67}\text{Cu}$	30→8 18→8	^{70}Zn ^{70}Zn	4.9 2.4	– –
$^{70}\text{Zn}(d,x)^{67}\text{Cu}$	20→10	^{70}Zn (95%)	4.2	–
$^{67}\text{Zn}(n,p)^{67}\text{Cu}$	Fission	$^{\text{nat}}\text{ZnO}$	1.6 GBq ^b	–

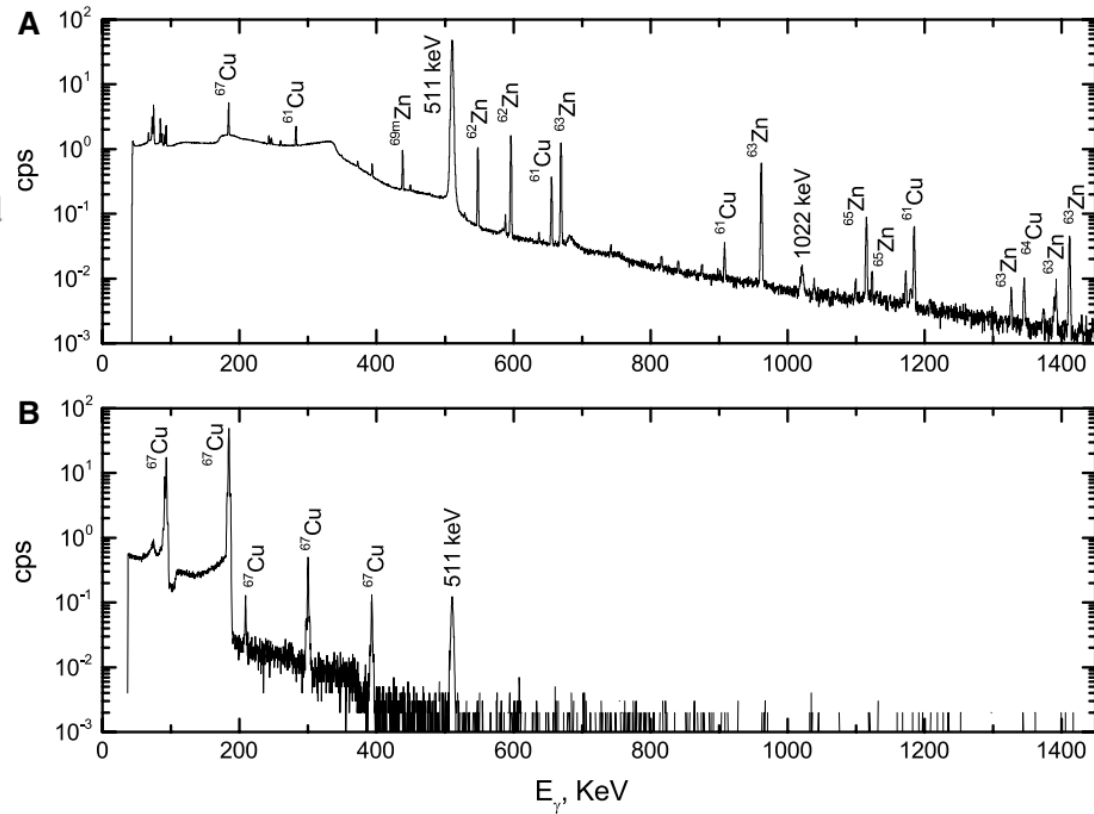
^a Average experimental yield in 24 h irradiations

^b Calculated for the irradiation of 10 g target for 60 h with a neutron flux of 10^{15} n/(cm² s)

^{66}Zn 27.73%	^{67}Zn 4.04%	^{68}Zn 18.45%	^{69}Zn 56.4 m	^{70}Zn 0.61%
	n,p	p,2p; γ ,p d,2pn; α , α p		p, α
^{65}Cu 30.85%	^{66}Cu 5.12 m	^{67}Cu 61.8 h	^{68}Cu 30.9 s	^{69}Cu 2.85 m
^{64}Ni 0.93%	^{65}Ni 2.51 h	^{66}Ni 54.6 h	^{67}Ni 21 s	^{68}Ni 29 s

Наработка медицинских изотопов. ^{67}Cu .

Fig. 3 Spectra of the induced activity of an irradiated zinc target, measured for 4 h **a** immediately after the end of irradiation and **b** after radiochemical separation of ^{67}Cu



^{66}Zn 27.73%	^{67}Zn 4.04%	^{68}Zn 18.45%	^{69}Zn 56.4 m	^{70}Zn 0.61%
	n,p	p,2p; γ -p d,2pn; α , α p		p, α
^{65}Cu 30.85%	^{66}Cu 5.12 m	^{67}Cu 61.8 h	^{68}Cu 30.9 s	^{69}Cu 2.85 m
α ,p				
^{64}Ni 0.93%	^{65}Ni 2.51 h	^{66}Ni 54.6 h	^{67}Ni 21 s	^{68}Ni 29 s

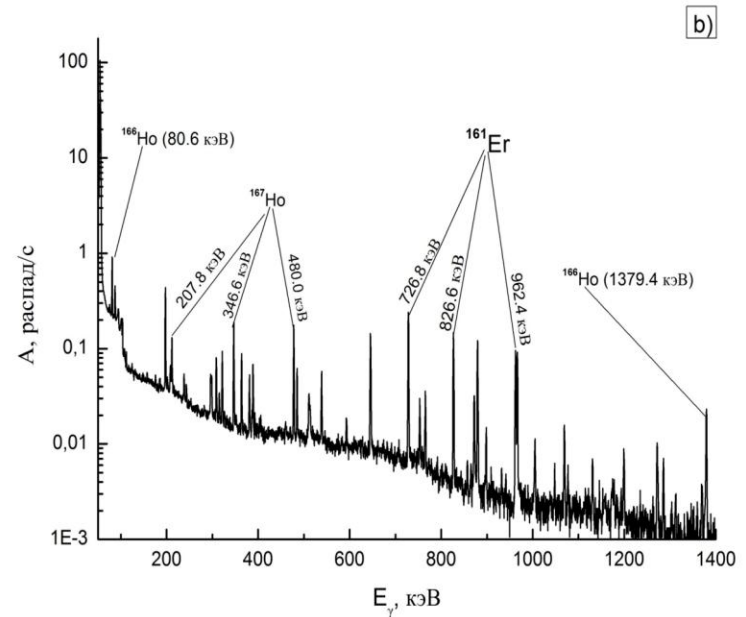
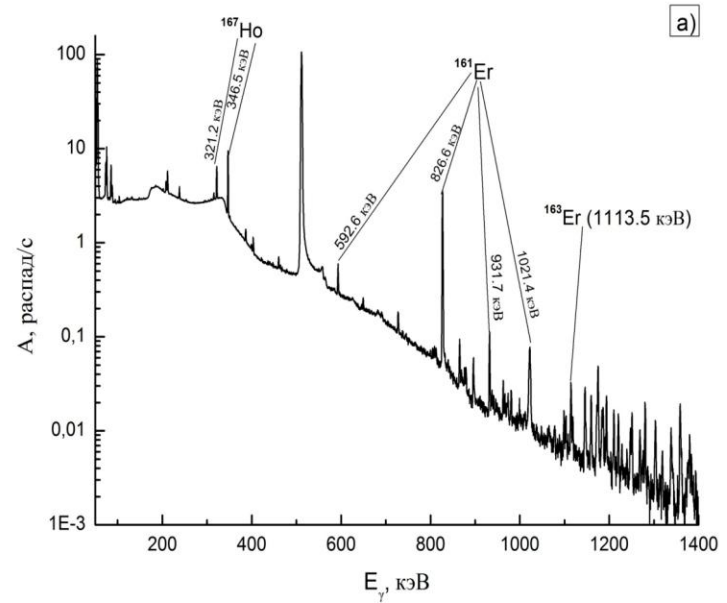
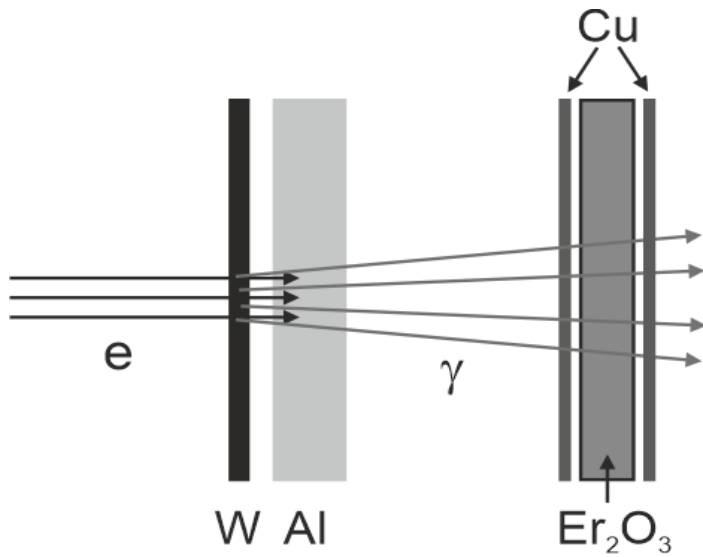
Radionuclide	$T_{1/2}$	Main channel of formation	Yields at EOB, Bq/ ($\mu\text{A h g/cm}^2$)
$^{69\text{m}}\text{Zn}$	13.76 h	$^{70}\text{Zn}(\gamma,n)$	$(6.36 \pm 0.34) \times 10^4$
^{65}Zn	244.3 d	$^{66}\text{Zn}(\gamma,n)$	$(3.51 \pm 0.09) \times 10^4$
^{67}Cu	61.83 h	$^{68}\text{Zn}(\gamma,p)$	$(2.34 \pm 0.07) \times 10^5$
^{64}Cu	12.7 h	$^{66}\text{Zn}(\gamma,np)$	$(7.83 \pm 0.24) \times 10^5$

Наработка медицинских изотопов. ^{166}Ho .

^{160}Er 28.58 h	^{161}Er 3.21 h	^{162}Er 0.14%	^{163}Er 75 m	^{164}Er 1.61%	^{165}Er 10.36 h	^{166}Er 33.6%	^{167}Er 22.95%	^{168}Er 26.8%	^{169}Er 9.4 d	^{170}Er 14.9%
^{159}Ho 33.05 m	^{160}Ho 25.6 m 5.02 h	^{161}Ho 2.48 h	^{162}Ho 15.0 m	^{163}Ho 4570 y	^{164}Ho 29 m	^{165}Ho 100%	^{166}Ho 26.83 h	^{167}Ho 3.1 h	^{168}Ho 2.99 m	^{169}Ho 4.7 m
^{158}Dy 0.10%	^{159}Dy 144.4 d	^{160}Dy 2.34%	^{161}Dy 18.9%	^{162}Dy 25.5%	^{163}Dy 24.9%	^{164}Dy 28.2%	^{165}Dy 2.334 h	^{166}Dy 81.6 h	^{167}Dy 6.2 m	^{168}Dy 8.7 m

- Определить возможную нарабатываемую активность целевого нуклида.
- Определить возможную нарабатываемую активность побочных продуктов.
- Подобрать параметры мишени и режим облучения так, чтобы нарабатывалось как можно меньше побочных продуктов (изотопов того же химического элемента, что и целевой нуклид).
- Основным требованием при наработке медицинских изотопов является получение целевого нуклида без носителя, т.е. без большого количества стабильных изотопов того же химического элемента, что и целевой нуклид. Поэтому из всех возможных фотоядерных реакций используются либо фотопротонные реакции (γ, p) либо фотонейтронные с последующим β -распадом на целевой нуклид.
- Также необходимо выполнить сравнение с альтернативными путями наработки.

Наработка медицинских изотопов. ^{166}Ho .



Spectra of residual activity of the irradiated erbium oxide target 1 hour (a) and 1 day (b) after the end of the irradiation.

Наработка медицинских изотопов. ^{166}Ho .

Radionuclide	Reaction	E_{thr} , MeV	Y , 1/e experimental	Y , 1/e theoretical	$\sigma_{q \text{ exp}}^{\text{prod}}, \text{mb}$	$\sigma_{q \text{ theor}}^{\text{prod}}, \text{mb}$
^{161}Er	$^{\text{nat}}\text{Er}(\gamma, \text{xn})$		$(4.62 \pm 0.38) \cdot 10^{-8}$	$8.18 \cdot 10^{-8}$	0.22 ± 0.02	0.52
	$^{162}\text{Er}(\gamma, \text{n})$	9.21		$5.14 \cdot 10^{-8}$		0.237
	$^{164}\text{Er}(\gamma, 3\text{n})$	25.35		$1.14 \cdot 10^{-8}$		0.071
	$^{166}\text{Er}(\gamma, 5\text{n})$	40.48		$1.90 \cdot 10^{-8}$		0.211
^{163}Er	$^{\text{nat}}\text{Er}(\gamma, \text{xn})$		$(9.42 \pm 2.77) \cdot 10^{-7}$	$9.94 \cdot 10^{-7}$	4.43 ± 1.31	5.34
	$^{164}\text{Er}(\gamma, \text{n})$	8.85		$6.00 \cdot 10^{-7}$		2.75
	$^{166}\text{Er}(\gamma, 3\text{n})$	23.97		$2.95 \cdot 10^{-7}$		1.78
	$^{167}\text{Er}(\gamma, 4\text{n})$	30.41		$7.53 \cdot 10^{-8}$		0.56
	$^{168}\text{Er}(\gamma, 5\text{n})$	38.18		$2.45 \cdot 10^{-8}$		0.25
^{169}Er	$^{170}\text{Er}(\gamma, \text{n})$	7.26	$(3.89 \pm 0.90) \cdot 10^{-6}$	$4.42 \cdot 10^{-6}$	18.99 ± 4.41	19.8
$^{162\text{m}}\text{Ho}$	$^{\text{nat}}\text{Er}(\gamma, \text{pxn})$		$(8.71 \pm 2.26) \cdot 10^{-10}$		$(4.08 \pm 1.06) \cdot 10^{-3}$	
	$^{164}\text{Er}(\gamma, \text{pn})$	29.55				
	$^{166}\text{Er}(\gamma, \text{p}3\text{n})$	44.73				
	$^{167}\text{Er}(\gamma, \text{p}4\text{n})$	51.27				
^{166}Ho	$^{\text{nat}}\text{Er}(\gamma, \text{x})$		$(6.05 \pm 0.37) \cdot 10^{-8}$	$5.23 \cdot 10^{-8}$	0.29 ± 0.02	0.29
	$^{167}\text{Er}(\gamma, \text{p})$	21.74		$2.09 \cdot 10^{-8}$		0.109
	$^{168}\text{Er}(\gamma, \text{pn})$	29.46		$3.06 \cdot 10^{-8}$		0.175
	$^{170}\text{Er}(\gamma, \text{p}3\text{n})$	42.85		$8.38 \cdot 10^{-10}$		0.0083
^{167}Ho	$^{\text{nat}}\text{Er}(\gamma, \text{x})$		$(5.61 \pm 1.50) \cdot 10^{-8}$	$3.83 \cdot 10^{-8}$	0.27 ± 0.07	0.21
	$^{168}\text{Er}(\gamma, \text{p})$	22.18		$3.55 \cdot 10^{-8}$		0.184
	$^{170}\text{Er}(\gamma, \text{p}2\text{n})$	35.38		$2.76 \cdot 10^{-9}$		0.022

Наработка медицинских изотопов. ^{166}Ho .

Radionuclide	Reaction	$\sigma_{q \text{ theor}}^{\text{prod}}, \text{ mb}$	$\sigma_{q \text{ theor}}^{\text{prod}} (T_{<}), \text{ mb}$	$\sigma_{q \text{ theor}}^{\text{prod}} (T_{>}), \text{ mb}$
^{166}Ho	$^{\text{nat}}\text{Er}(\gamma, x)$	0.29	0.106	0.186
	$^{167}\text{Er}(\gamma, 1p)$	0.109	0.038	0.071
	$^{168}\text{Er}(\gamma, 1p1n)$	0.175	0.060	0.115
	$^{170}\text{Er}(\gamma, 1p3n)$	0.0083	0.0077	0.0006
^{167}Ho	$^{\text{nat}}\text{Er}(\gamma, x)$	0.21	0.055	0.151
	$^{168}\text{Er}(\gamma, 1p)$	0.184	0.036	0.148
	$^{170}\text{Er}(\gamma, p2n)$	0.022	0.019	0.003

Radionuclide	Y, 1/e	Y, MBq/($\mu\text{A} \cdot \text{h}$)	A (24h, 0.1mA), GBq	A (24h, 1mA), GBq
^{167}Er	$5.77 \cdot 10^{-6}$	0.311	0.65	6.5
^{168}Er	$7.93 \cdot 10^{-6}$	0.428	0.89	8.9
$^{\text{nat}}\text{Er}$	$3.45 \cdot 10^{-6}$	0.186	0.39	3.9

Наработка медицинских изотопов.

Нуклид	T1/2	Тип распада	Применение	Путь получения	Содержание изотопа-мишени
^{47}Sc	3.35 d	β^-	Терапия	$^{48}\text{Ti}(\gamma, p)^{47}\text{Sc}$	73.7
^{67}Cu	2.58 d	β^-	Терапия	$^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$	18.8
$^{69\text{m}}\text{Zn}$	13.76 h	IT	Диагностика/ Терапия	$^{71}\text{Ga}(\gamma, np)^{69\text{m}}\text{Zn}$	39.9
^{72}As	1.08 d	β^+	Диагностика	$^{74}\text{Se}(\gamma, 2n)^{72}\text{Se} \rightarrow ^{72}\text{As}$	0.89
^{73}Ga	4.86 h	β^-	Терапия	$^{74}\text{Ge}(\gamma, p)^{73}\text{Ga}$	35.9
$^{80\text{m}}\text{Br}$	4.42 h	IT	Терапия	$^{82}\text{Kr}(\gamma, np)^{80\text{m}}\text{Br}$	11.6
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 h	IT	Диагностика	$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$	9.66
^{119}Sb	1.59 d	EC	Терапия	$^{120}\text{Te}(\gamma, p)^{119}\text{Sb}$ $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te} \rightarrow ^{119}\text{Sb}$	0.096
^{161}Ho	2.48 h	EC	Терапия	$^{162}\text{Er}(\gamma, p)^{161}\text{Ho}$ $^{162}\text{Er}(\gamma, n)^{161}\text{Er} \rightarrow ^{161}\text{Ho}$	0.14
^{161}Tb	6.88 d	β^-	Терапия	$^{162}\text{Dy}(\gamma, p)^{161}\text{Tb}$	25.5
^{167}Tm	9.25 d	EC	Терапия	$^{168}\text{Yb}(\gamma, p)^{167}\text{Tm}$ $^{168}\text{Yb}(\gamma, n)^{167}\text{Yb} \rightarrow ^{167}\text{Tm}$	0.13
^{177}Lu	6.73 d	β^-	Терапия	$^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$	27.3
^{186}Re	3.72 d	β^-	Терапия	$^{187}\text{Os}(\gamma, p)^{186}\text{Re}$	1.6
$^{195\text{m}}\text{Pt}$	4.02 d	IT	Терапия	$^{197}\text{Au}(\gamma, np)^{195\text{m}}\text{Pt}$	100
^{198}Au	2.70 d	β^-	Терапия	$^{199}\text{Hg}(\gamma, p)^{198}\text{Au}$	16.87

Наработка медицинских изотопов.

R. A. Aliev, S. S. Belyshev, E. B. Furkina, V. V. Khankin, A. A. Kuznetsov, L. Z. Dzhilavyan, A. B. Priselkova, and B. S. Ishkhanov. Photonuclear production of medically relevant radionuclide ^{47}Sc . *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 326:1099–1106, 2020.

R. A. Aliev, S. S. Belyshev, A. A. Kuznetsov, L.Z. Dzhilavyan, V.V. Khankin, G. Yu Aleshin, A. G. Kazakov, A. B. Priselkova, S. N. Kalmykov, and B. S. Ishkhanov. Photonuclear production and radiochemical separation of medically relevant radionuclides: ^{67}Cu . *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 321(1):125–132, 2019.

A.G. Kazakov, S. S. Belyshev, T. Yu. Ekatoeva, V.V. Khankin, A. A. Kuznetsov, and R. A. Aliev. Production of ^{177}Lu by hafnium irradiation using 55-mev bremsstrahlung photons. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 317(3):1469–1476, 2018.

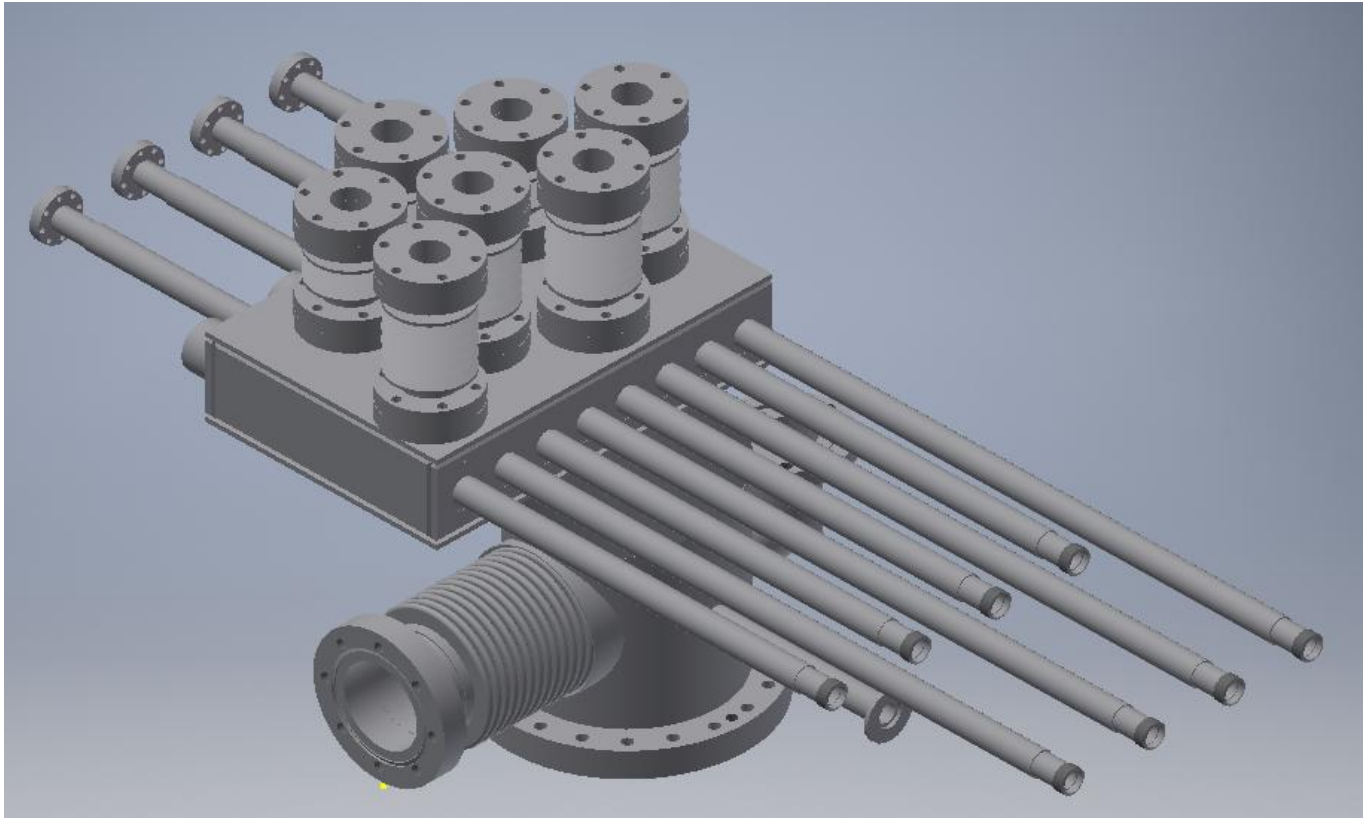
M. A. Orlova, T. P. Trofimova, A. P. Orlov, I. A. Ivanov, A. V. Severin, G. Yu Aleshin, S. S. Belyshev, A. N. Vasiliev, and S. N. Kalmykov. Complex $^{69}\text{Zn}(\text{lig})_2$ (lig is n-(5,6-dihydro-4h-1,3-thiazin-2-yl)benzamide) as a potential radiopharmaceutical. *Russian Chemical Bulletin*, 67(4):774–778, 2018.

M. A. Orlova, T. P. Trofimova, G. Yu Aleshin, S. S. Belyshev, and A. P. Orlov. The distribution of complexes $^{69}\text{Zn}(\text{I})_2$, $^{69}\text{Zn}(\text{II})_2$, and $^{69}\text{Zn}(\text{II})_2\text{sal}$ (I is n-(5,6-dihydro-4h-1,3-thiazin-2-yl)benzamide, II is 2-aminopyrimidine, sal is a salicylate ion) in vivo in mice. *Russian Chemical Bulletin*, 67(8):1542–1543, 2018.

R. A. Aliev, G. Yu Aleshin, S. S. Belyshev, B. S. Ishkhanov, A. B. Priselkova, V. V. Khankin, V. Yu Pozsarskaya, M. A. Orlova, and S. N. Kalmykov. Photonuclear production of carrier-free radionuclides: zinc- ^{69}m . *Russian Chemical Bulletin*, 66:369–373, 2017.

S. S. Belyshev, L. Z. Dzhilavyan, A. N. Ermakov, B. S. Ishkhanov, V. V. Khankin, A. S. Kurilik, A. A. Kuznetsov, V. I. Shvedunov, and K. A. Stopani. ^{18}F production in the $^{19}\text{F}(\gamma, n)$ reaction. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 77(4):480–482, 2013.

Перспективы развития экспериментов. Создание новой вакуумной камеры ускорителя РТМ55



Новая сборка позволит спускать облучаемые образцы в ускорительную камеру без нарушения вакуума. Таким образом, можно будет проводить облучение на орбитах микротрона с энергиям 15-55 МэВ, в действующей версии вывод пучка есть только с последней орбиты с энергией 55.6 МэВ.

Спасибо за внимание!