

Комптоновский источник гамма-излучения на основе
электронного ускорителя с энергией 500 МэВ:
уникальные параметры и перспективы для ядерной
физики

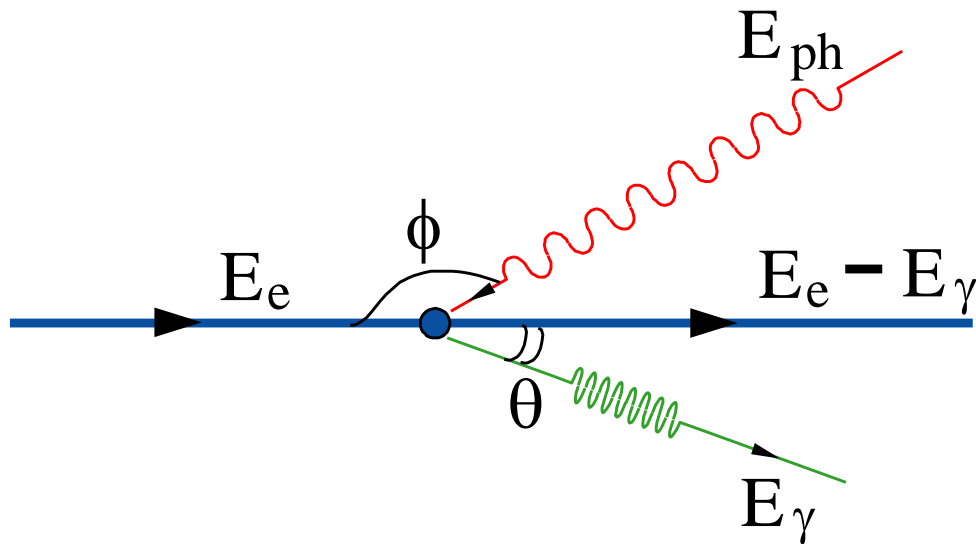
Кузнецов А.А.

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени
Д.В.Скобельцына*



Совещание по физике тяжелых ионов, Санкт-Петербург
05.07.2022

Энергия гамма-квантов



$$E_\gamma = \frac{2\gamma^2 E_{ph}}{1 + \gamma^2 \theta^2} (1 - \cos \phi), \quad \gamma \gg 1, \quad \theta \ll 1$$

Лобовое столкновение
 $\phi = 180^\circ, \theta = 0.$

$$E_e = 5 \text{ МэВ}$$

$$E_{ph} = 1 \text{ эВ}, E_\gamma = 383 \text{ эВ}$$

$$E_{ph} = 4 \text{ эВ}, E_\gamma = 1532 \text{ эВ}$$

$$E_e = 50 \text{ МэВ}$$

$$E_{ph} = 1 \text{ эВ}, E_\gamma = 38.3 \text{ кэВ}$$

$$E_{ph} = 4 \text{ эВ}, E_\gamma = 153.2 \text{ кэВ}$$

$$E_e = 500 \text{ МэВ}$$

$$E_{ph} = 1 \text{ эВ}, E_\gamma = 3.83 \text{ МэВ}$$

$$E_{ph} = 4 \text{ эВ}, E_\gamma = 15.3 \text{ МэВ}$$

$$E_e = 800 \text{ МэВ}$$

$$E_{ph} = 1 \text{ эВ}, E_\gamma = 9.80 \text{ МэВ}$$

$$E_{ph} = 4 \text{ эВ}, E_\gamma = 39.2 \text{ МэВ}$$

Степень монохроматичности рентгеновского (гамма) излучения

Наличие корреляции между энергией и углом вылета рентгеновского фотона позволяет осуществлять монохроматизацию излучения за счет эффекта коллимации.

$$\frac{\Delta E_\gamma}{E_\gamma} \approx \sqrt{(\gamma\theta)^4 + 4\left(\frac{\Delta E_e}{E_e}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_n}{\sigma}\right)^4 + \left(\frac{\Delta E_{ph}}{E_{ph}}\right)^2}$$

Для идеальных электронного и лазерного пучков ($\frac{\Delta E_e}{E_e}=0$, $\varepsilon_n=0$, $\frac{\Delta E_{ph}}{E_{ph}}=0$) для получения $\frac{\Delta E_\gamma}{E_\gamma}=0.005$ необходимо, чтобы $\gamma\theta \approx 0.071$, соответственно, угол коллимации: $E_e=500$ МэВ, $\theta = 72.5$ мкрад.

Диаметр отверстия коллиматора при расстоянии 10 м от точки взаимодействия должен составлять: $E_e=500$ МэВ, $d = 1.45$ мм.

Для того, чтобы параметры электронного и лазерного пучков и системы фокусировки пучков не вносили доминирующего вклада в ширину спектра рентгеновского (гамма) излучения необходимо выполнение условий:

$$\frac{\Delta E_e}{E_e} < \frac{1}{2} (\gamma\theta)^2 \approx 0.25\%; \quad \sigma > \frac{\varepsilon_n}{\gamma\theta} \approx 14 \text{ мкм (для } \varepsilon_n=1 \text{ мм мрад); } \quad \frac{\Delta E_{ph}}{E_{ph}} < (\gamma\theta)^2 = 0.5\%.$$



Оценка потоков гамма-квантов

Полное число гамма-квантов в единицу времени: $\frac{dN_{ph}}{dt} = \sigma_{Th} f_{rep} N_e N_{ph} G$

$$\sigma_{Th} = 6.65 \times 10^{-25} \text{ см}^2$$

$$f_{rep} = 1000 \text{ Гц},$$

$$N_e = 100 \text{ пКл/е} = 6.25 \times 10^8$$

$$N_{ph} = 100 \text{ мДж/е/1 эВ} = 6.25 \times 10^{17} \text{ – при работе на основной гармонике,}$$

$$G \approx \frac{1}{4\pi \times 15^2 \text{ МКМ}^2} = 3.5 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$$

$$\frac{dN_{ph}}{dt} \approx 6.65 \times 10^{-25} \times 10^3 \times 6.25 \times 10^8 \times 6.25 \times 10^{17} \times 3.5 \times 10^4 = 9.1 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$$

Для ширины энергетического спектра 0.5% число фотонов в единицу времени:

$$\text{На основной гармонике (до 3.8 МэВ при 500 МэВ)} \quad \frac{dN_{ph}}{dt} \approx 4.5 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$$

$$\text{На четвертой гармонике (до 15.3 МэВ при 500 МэВ)} \quad \frac{dN_{ph}}{dt} \approx 1.1 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$$



Особенности возможных экспериментов на пучке монохроматического гамма-излучения

Планируя ядерно-физические эксперименты на монохроматическом гамма-пучке комптоновского источника, необходимо принимать во внимание следующие особенности.

1. Возможность достижения высокой степени поляризации излучения.
2. Короткая длительность импульса излучения – для линейного ускорителя – несколько пикосекунд. Возможность реализации времяпролетной методики с высоким разрешением на короткой базе.
3. Малая угловая расходимость излучения, менее 100 мкрад, для ширины спектра 0.5%. На расстоянии 10 м диаметр пучка с такой монохроматичностью составит около 1.5 мм, что определяет размеры области взаимодействия с мишенью.
4. Количество гамма квантов в пределах полосы 0.5% при частоте 1000 Гц в единицу времени составит около 4.5×10^7 с⁻¹. При сечении реакции ~1мб, выход ~100 частиц/импульс.

Проведение исследований на пучке монохроматического гамма-излучения комптоновского источника требует разработки новых методик эксперимента.

Особое внимание следует уделять фону паразитного тормозного излучения, генерируемого электронами, теряемыми в процессе ускорения в линейном ускорителе.



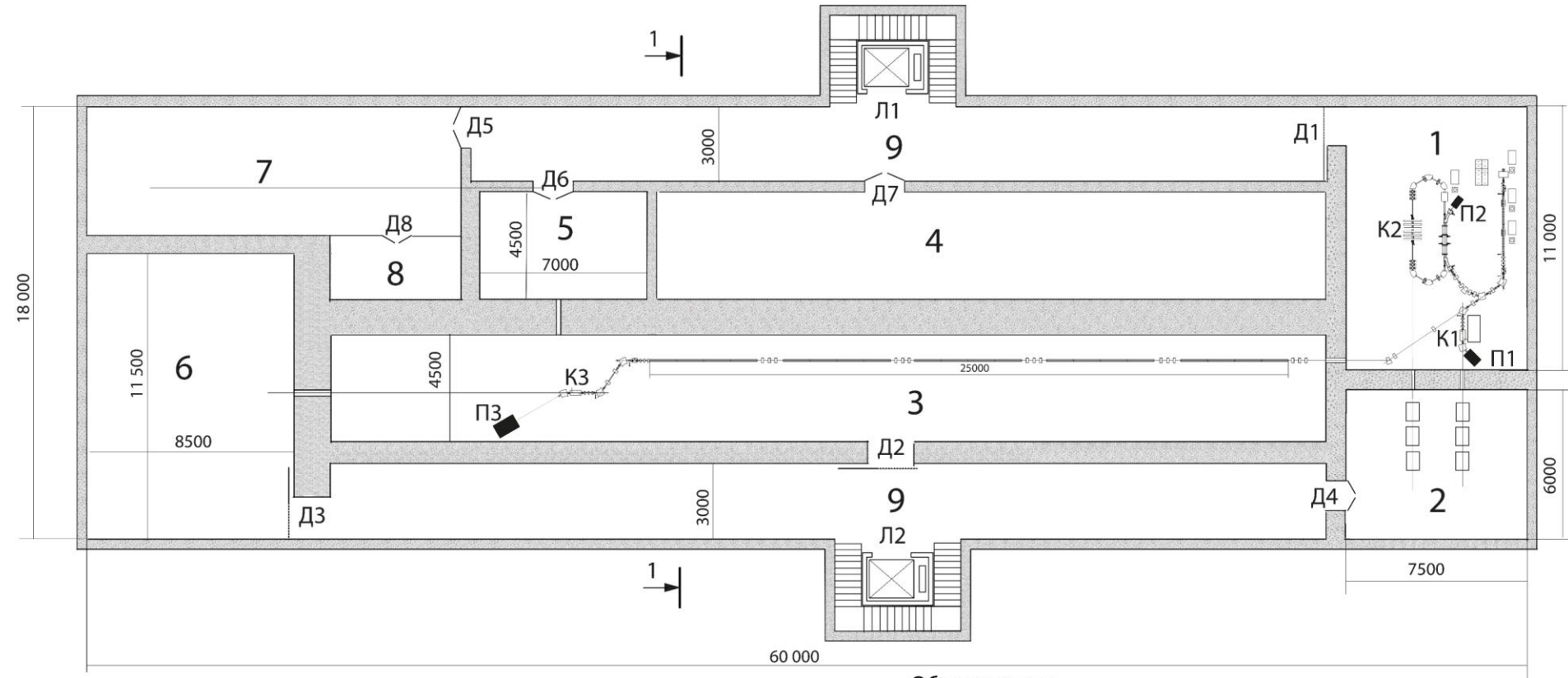
Источники монохроматических пучков гамма-квантов для ядерной физики.

	E_γ , MeV	ΔE_γ	I_γ , ph/sec
ELI-NP (VEGA)	0.2-19.5	0.5	$\sim 10^8$
NewSubaru	0-76	1.2	$\sim 10^5$
HI γ S	0-100	0.8-10	$\sim 10^7$
НЦФМ - НИИЯФ	0-15.3 (40?)	0.5	$\sim 10^7$

Методы увеличения среднего выхода фотонов

1. Работа линейного ускорителя в многосгустковом режиме
2. Рециркуляция сгустков в кольце.

План помещений ускорительных и экспериментальных установок на отметке «минус» 5 м



Назначение помещений

- | | |
|------------------------|----------------------------------|
| 1 - ускоритель 50 МэВ | 5 - лазер для 500 МэВ |
| 2 - рабочие станции | 6 - экспериментальный зал |
| 3 - ускоритель 500 МэВ | 7 - вспомогательное оборудование |
| 4 - клистроны | 8 - склад |
| | 9 - коридоры |

Обозначения:

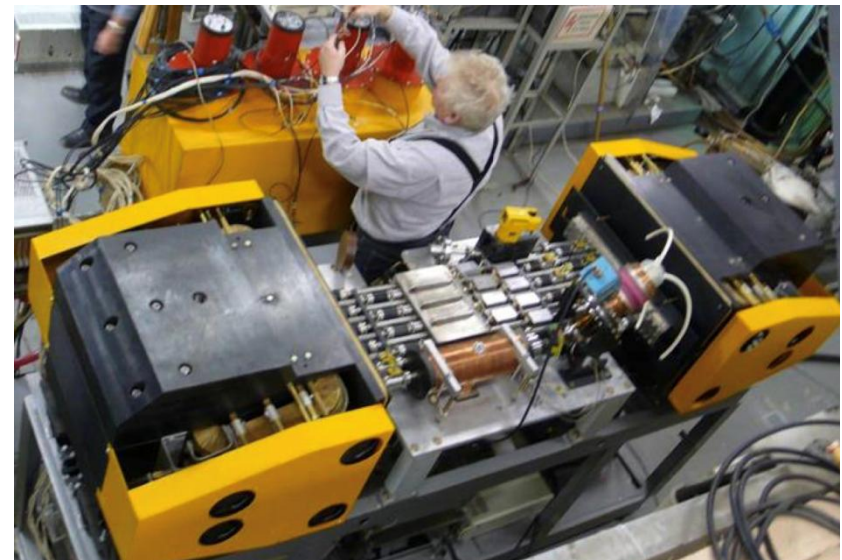
- Д1 - Д3- откатные двери радиационнозащищенные
 Д4 - распашные двери радиационнозащищенные
 Д5 - Д8 - распашные двери
 Л1, Л2 - грузовые лифты
 П1- П3 - поглотители пучка
 К1 - К3 - камеры взаимодействия

ЦКП УНО Ускорительный комплекс МГУ

<http://beam.sinp.msu.ru/>

В Университете существует целый ряд ускорителей для проведения экспериментальных работ, в которых задействованы пучки заряженных частиц в широком диапазоне энергий:

- от единиц эВ до 70 МэВ для электронных пучков;
- от единиц эВ до 500 кэВ для однозарядных ионов;
- до 30 МэВ для легких ионов;
- от 1 до 15 кэВ для кластерных ионов (единицы эВ в пересчете на один атом в кластере).



ЦКП УНО Ускорительный комплекс МГУ

<http://beam.sinp.msu.ru/>

С 2013 г. ускорители НИИЯФ МГУ используются на **стационарных инспекционно-досмотровых комплексах (ИДК)**



ИДК работают на **Крымском мосту** — со стороны **Керчи** и **Тамани** и на пункте пропуска с **Китаем** в **Забайкальске**

Ускоритель для
железнодорожного ИДК
СТ-2630Т «Скантроник Системс»



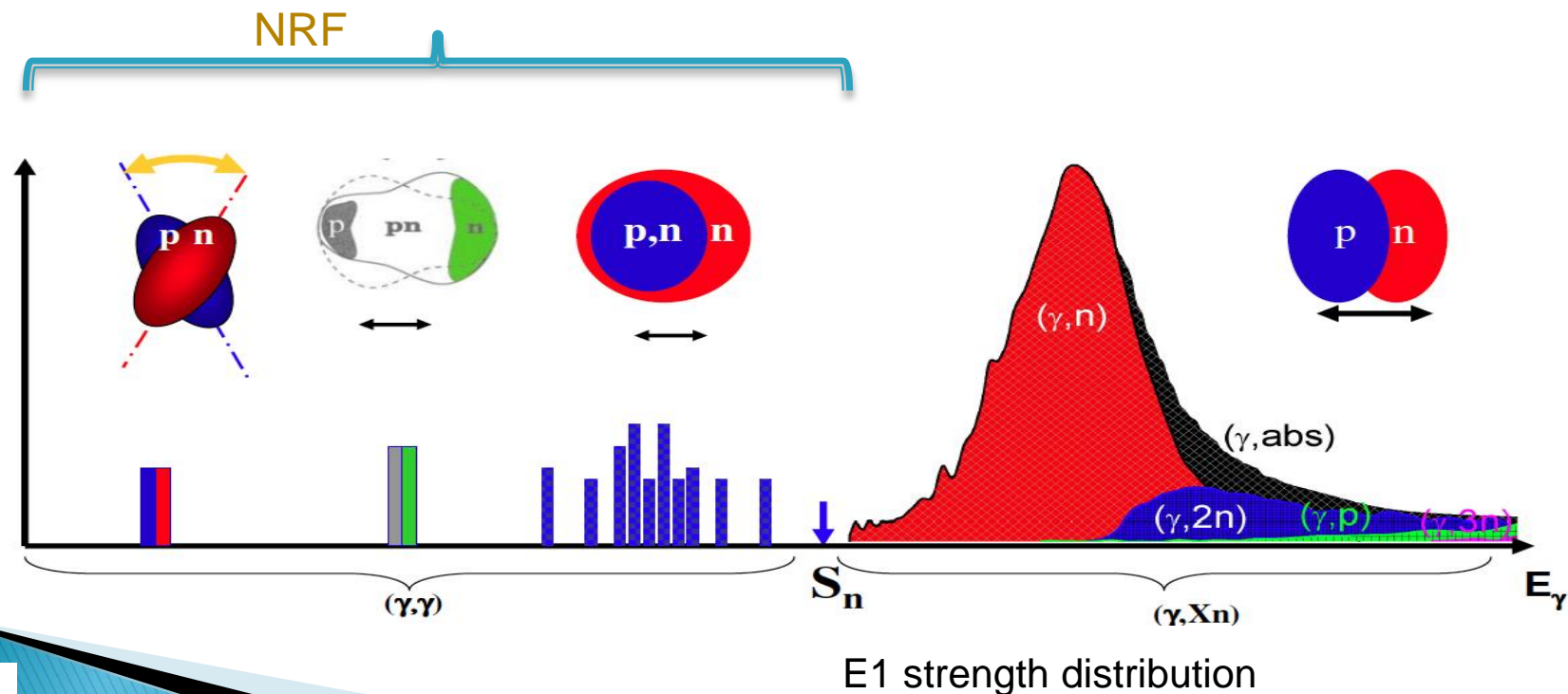
Поставлены заказчикам электронные ускорители:

- Радиография - 6
- Инспекционно-досмотровые комплексы (ИДК) - 10
- Мобильные ИДК-13
- Железнодорожные ИДК-3
- Стерилизация-1

Всего – 33 ускорителя

Возможные задачи

1. Астрофизика и нуклеосинтез. Обойденные ядра.
2. Изучение структуры гигантского дипольного резонанса.
3. Фотоделение.
4. Ядерная резонансная флуоресценция. Изучение гигантских резонансов иной природы, пигми- и M1 резонансов
5. Прикладные исследования. Исследование возможности наработки перспективных для ядерной медицины радионуклидов.



Методы

Активационный метод

Прямая регистрация нейтронов

Прямая регистрация заряженных частиц

Измерение спектров нейтронов и протонов

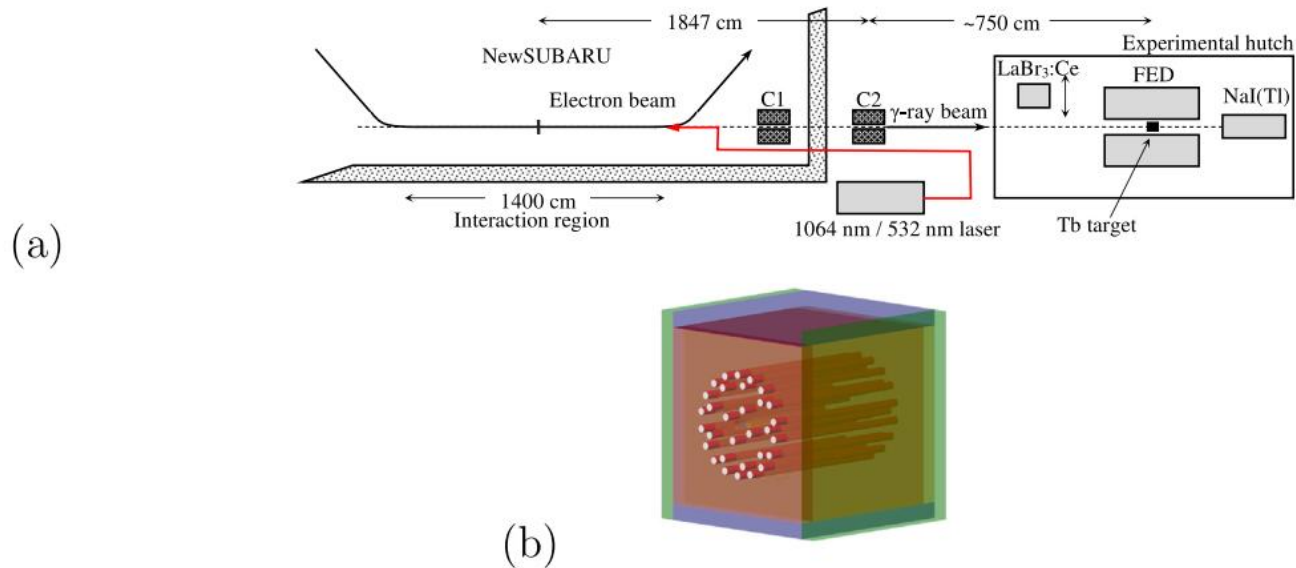
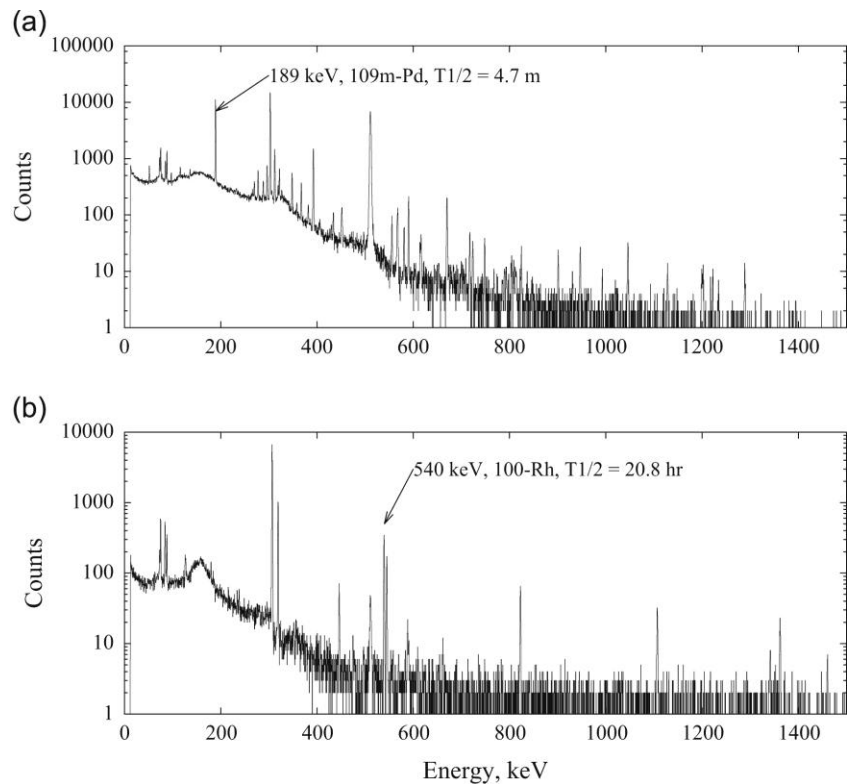
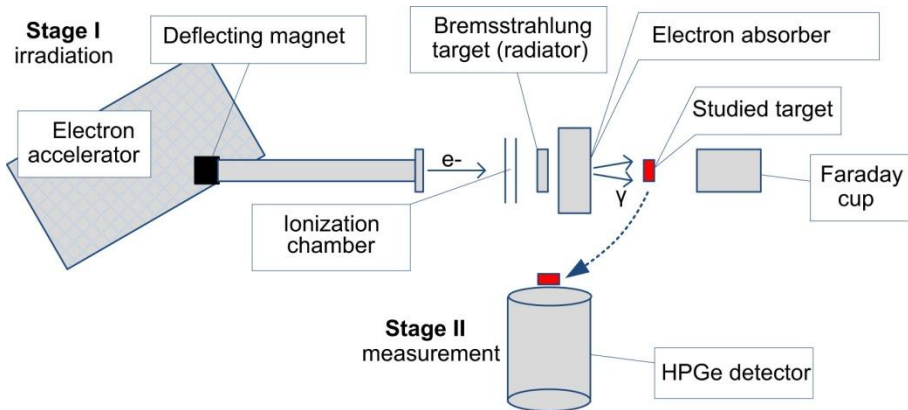


Fig. 1. (a) The γ -ray beam line of the NewSUBARU synchrotron radiation facility. A set of two collimators of 3 mm (C1) and 2 mm (C2) aperture was used for the (γ, xn) measurements. (b) Flat efficiency detector (FED) diagram showing the ³He counters layout in an inner ring with 4 counters and two outer rings with 9 and respectively 18 counters positioned inside polyethylene moderator.

Ioana Gheorghe, Hiroaki Utsunomiya, Konstantin Stopani, Dan Filipescu, Takashi Ari-izumi, Sergey Belyshev, Gongtao Fan, Mateusz Krzysiek, Longxiang Liu, Yiu-Wing Lui, Dmytro Symochko, Hongwei Wang, and Shuji Miyamoto. Updated neutron-multiplicity sorting method for producing photoneutron average energies and resolving multiple firing events. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1019:165867, 2021.

Методы

Активационный анализ

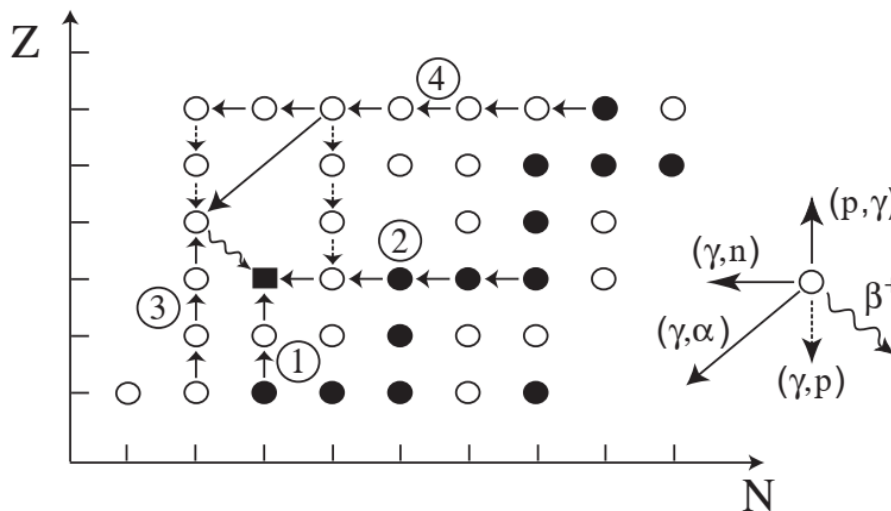


S. S. Belyshev, A. N. Ermakov, B. S. Ishkhanov, V. V. Khankin, A. S. Kurilik, A. A. Kuznetsov, V. I. Shvedunov, and K. A. Stopani. Studying photonuclear reactions using the activation technique. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and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

1. Астрофизика и нуклеосинтез. Обойденные ядра.

Pd93 1.3 с EP: (7/2+, 9/2+)	Pd94 9.0 с	Pd95 10 с	Pd96 122 с	Pd97 3.10 м	Pd98 17.7 м	Pd99 21.4 м	Pd100 3.63 дн	Pd101 8.47 ч	Pd102 1.02	Pd103 16.99 дн	Pd104 11.14	Pd105 22.33	Pd106 27.33	Pd107 6.86 л	Pd108 26.46	Pd109 13.7012 ч	Pd110 11.72
m		m												m		m	
Rh92 4.66 с (>= 6+)	Rh93 11.9 с	Rh94 70.6 с EP	Rh95 5.02 м	Rh96 9.90 м	Rh97 30.7 м	Rh98 8.72 м	Rh99 16.1 дн	Rh100 20.8 ч	Rh101 3.3 л	Rh102 207 дн	Rh103 100	Rh104 42.3 с	Rh105 35.36 ч	Rh106 30.07 с	Rh107 21.7 м	Rh108 16.8 с	Rh109 80 с
m		m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
Ru91 7.9 с	Ru92 3.65 м	Ru93 59.7 с	Ru94 51.8 м	Ru95 1.643 ч	Ru96 5.54	Ru97 2.9 дн	Ru98 1.87	Ru99 12.76	Ru100 12.60	Ru101 17.06	Ru102 31.55	Ru103 39.26 дн	Ru104 18.62	Ru105 4.44 ч	Ru106 371.8 дн	Ru107 3.75 м	Ru108 4.55 м
m		m	m									m					
Tc90 8.7 с	Tc91 3.14 м	Tc92 4.25 м	Tc93 2.75 ч	Tc94 293 м	Tc95 20.0 ч	Tc96 4.28 дн	Tc97 4.21Е6 л	Tc98 4.2Е6 л	Tc99 2.11Е6 л	Tc100 15.46 с	Tc101 14.22 м	Tc102 5.28 с	Tc103 54.2 с	Tc104 18.3 м	Tc105 7.6 м	Tc106 35.6 с	Tc107 21.2 с
m	m																
Mo89 2.11 м	Mo90 5.56 ч	Mo91 15.49 м	Mo92 14.84	Mo93 4.0Е3 л	Mo94 9.25	Mo95 15.92	Mo96 16.68	Mo97 9.55	Mo98 24.13	Mo99 85.94 ч	Mo100 9.63 7.3Е18 л ββ	Mo101 14.81 м	Mo102 11.3 м	Mo103 87.5 с	Mo104 60 с	Mo105 35.6 с	Mo106 8.73 с
m																	
Nb88 14.55 м	Nb89 2.03 ч	Nb90 14.60 ч	Nb91 6.8Е2 л	Nb92 3.47Е7 л	Nb93 100	Nb94 2.03Е4 л	Nb95 34.991 дн	Nb96 23.35 ч	Nb97 72.1 м	Nb98 2.86 с	Nb99 15.0 с	Nb100 1.5 с	Nb101 7.1 с	Nb102 1.3 с	Nb103 1.5 с	Nb104 4.9 с βn	Nb105 2.95 с βn
m																	
Zr87 1.68 ч	Zr88 83.4 дн	Zr89 78.41 ч	Zr90 51.45	Zr91 11.22	Zr92 17.15	Zr93 1.53Е6 л	Zr94 17.38	Zr95 64.032 дн	Zr96 2.80 2.0Е19 л 0+	Zr97 18.744 ч	Zr98 30.7 с	Zr99 2.1 с	Zr100 7.1 с	Zr101 2.3 с	Zr102 2.9 с	Zr103 1.3 с	Zr104 1.2 с
m																	

⁷⁴ Se	0.55
⁷⁸ Kr	0.153
⁸⁴ Sr	0.132
⁹² Mo	0.378
⁹⁴ Mo	0.236
⁹⁶ Ru	0.103
⁹⁸ Ru	0.035
¹⁰² Pd	0.0142
¹⁰⁶ Cd	0.0201
¹⁰⁸ Cd	0.0143
¹¹³ In	0.0079
¹¹² Sn	0.0372
¹¹⁴ Sn	0.0252
¹¹⁵ Sn	0.0129
¹²⁰ Te	0.0043
¹²⁴ Xe	0.00571
¹²⁶ Xe	0.00509
¹³⁰ Ba	0.00476
¹³² Ba	0.00453
¹³⁸ La	0.000409
¹³⁶ Ce	0.00216
¹³⁸ Ce	0.00284
¹⁴⁴ Sm	0.008
¹⁵² Gd	0.00066
¹⁵⁶ Dy	0.000221
¹⁵⁸ Dy	0.000378
¹⁶² Er	0.000351
¹⁶⁴ Er	0.00404
¹⁶⁸ Yb	0.000322
¹⁷⁴ Hf	0.000249
¹⁸⁰ Ta	2.48e-06
¹⁸⁰ W	0.000173
¹⁸⁴ Os	0.000122
¹⁹⁰ Pt	0.00017
¹⁹⁶ Hg	0.00048



1. Астрофизика и нуклеосинтез. Обойденные ядра.

$$\lambda_{(\gamma,j)}(T) = \int_0^{\infty} cn_{\gamma}(E, T)\sigma_{(\gamma,j)}(E) dE, \quad (1)$$

where c is the speed of light, and $\sigma_{(\gamma,i)}(E)$ the photodisintegration cross section at energy E .

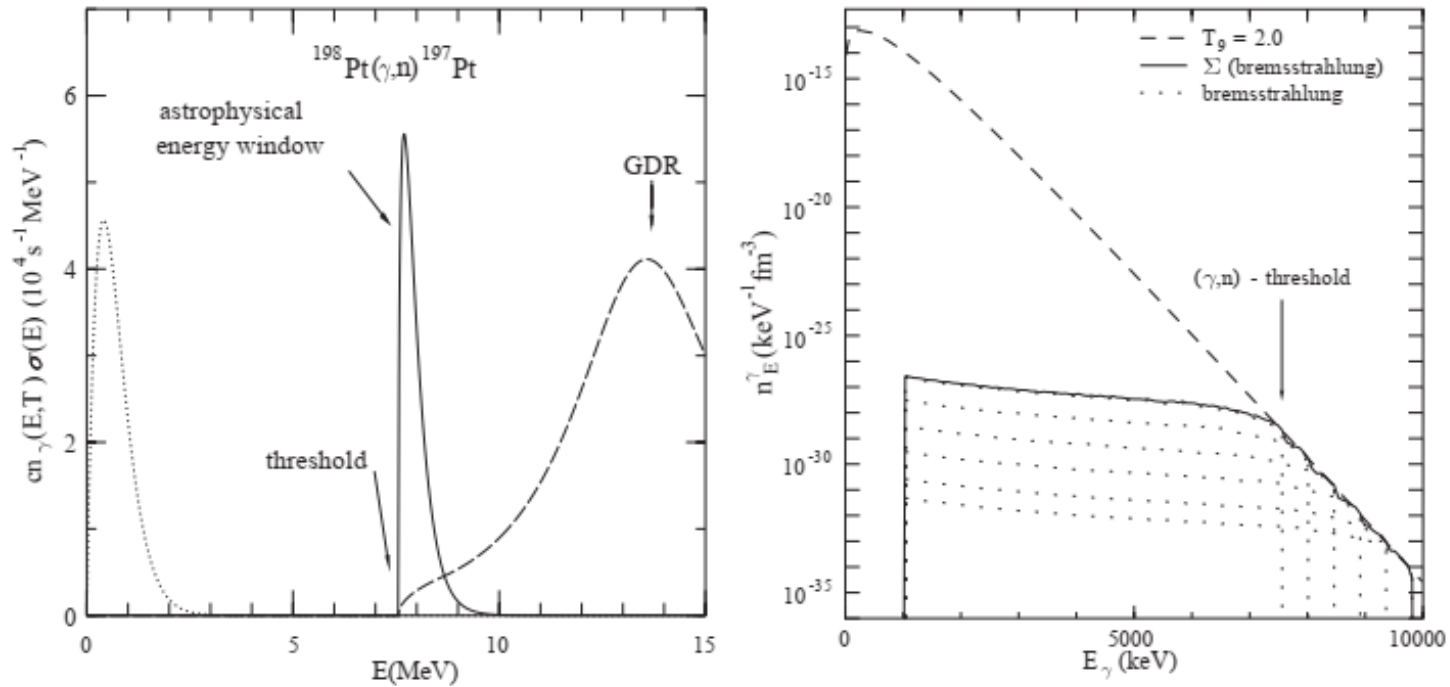


Fig. 11. Left panel: Graphical display of the integrand function of Eq. (1) for the $^{198}\text{Pt}(\gamma, n)^{197}\text{Pt}$ reaction. The Planck spectrum n_{γ} at a temperature $T = 2 \times 10^9$ K is shown, as well as the $\sigma_{(\gamma,n)}(E)$ cross section from energies slightly higher than the GDR down to threshold E_{thr} . Near this energy, the photoneutron cross section is assumed to be given by $\sigma_{(\gamma,n)}(E) = \sigma_0 \sqrt{(E - E_{\text{thr}})/E_{\text{thr}}}$, σ_0 being determined by the bremsstrahlung experiment. The energy window of astrophysical interest has typically a width of less than 1 MeV located around the effective energy $E_{\text{eff}} \approx E_{\text{thr}} + kT/2$, and is thus very close to threshold for conditions relevant to the p-process; Right panel: Approximation of the Planck spectrum at $T = 2.5 \times 10^9$ K in the approximate 5–10 MeV energy range by a superposition $\Phi = \sum_{i=1}^6 a_i(T = 2.5 \times 10^9) \Phi_{\text{brems}}(E_{0,i})$ of 6 bremsstrahlung spectra Φ_{brems} with different endpoint energies $E_{0,i}$ (from [31]).

1. Астрофизика и нуклеосинтез. Обойденные ядра.

Mo 90 5,7 h β^+ 1,1 γ 257... m, g	Mo 91 15,5 m β^+ 2,5 γ 653 1208... g	Mo 92 14,84	Mo 93 5,9 h 3,5 10^3 a β^+ 1477; 685; 263... γ (900...) g	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 β^+ 1,2... γ 740; 182; 778... m, g	Mo 100 9,63 $1,15 \cdot 10^{10}$ $2\beta^+$ α 0,15	
Nb 89 66 m β^+ 2,4 2,9 γ 586 507... g	Nb 90 18,8 s β^+ 3,3 γ 1627; 1833; 3009... g	Nb 91 14,6 h β^+ 1,5 γ 1129; 2319; 141... g	Nb 92 60,9 d 660 a β^+ 1,05 α 1205 β^+ ...	Nb 93 10,15 d 3,5 10^7 a β^+ 561; 934... g	Nb 94 16,13 a 100 β^+ (31) α 0,1 + 1,0	Nb 95 6,26 m $2 \cdot 10^4$ a β^+ 0,5 α 7 γ (41) 730 14,4 β^+ 1,0 γ (871...)	Nb 96 86,6 h 34,97 d β^+ 2,6 α 0,9 γ 204 β^+ 0,2; 0,9 γ 766... α < 7	Nb 97 23,4 h β^+ 0,7... γ 778; 569; 1091... g	Nb 98 53 s 74 m β^+ 1,3... γ 858... g	Nb 99 51 m 2,9 s β^+ 3,0; 2,9 γ 787; 723; 1169... g	Nb 100 2,6 m 15 s β^+ 3,1 2542; 2554; γ 3657 98
Zr 88 83,4 d β^+ 3,93 γ 393	Zr 89 4,16 m 76,4 h β^+ 0,9; 2,4 γ 1507; g	Zr 90 51,45 α - 0,014	Zr 91 11,22 α 1,2	Zr 92 17,15 α 0,2	Zr 93 $1,5 \cdot 10^6$ a β^+ 0,06... m α - 2	Zr 94 17,38 α 0,049	Zr 95 64,0 d β^+ 0,4; 1,1... γ 757; 724... g	Zr 96 2,80 $3,9 \cdot 10^{19}$ a $2\beta^+$ α 0,026	Zr 97 16,8 h β^+ 1,9... γ 508; 1148; 355... m	Zr 98 30,7 s β^+ 2,3 no γ g	

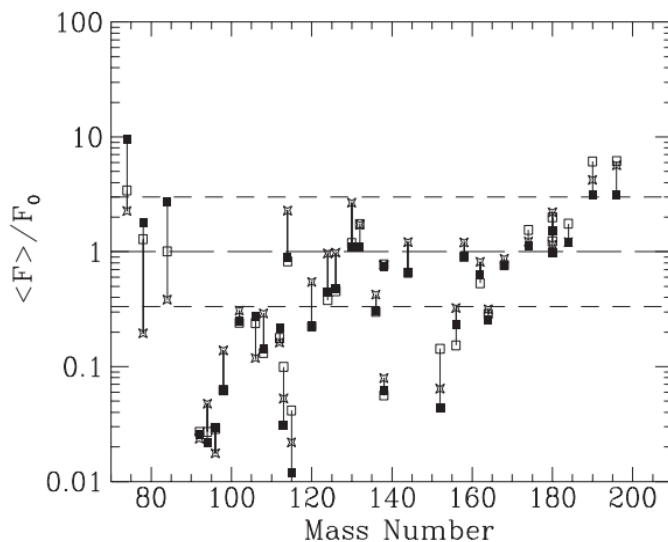


Fig. 32. Values of the normalized overproduction factor $\langle F_i \rangle(M)/F_0(M)$ calculated for three different $25 M_{\odot}$ explosion models: (a) the nominal case defined above (open squares), (b) same as (a), but with $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ rates divided by a factor of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

1. Астрофизика и нуклеосинтез. Обойденные ядра.

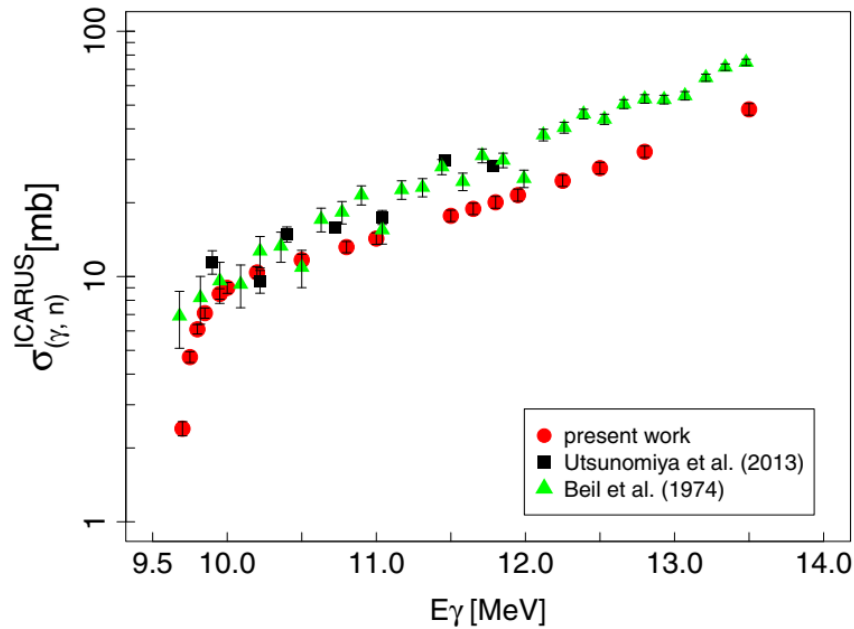


FIG. 5. ICARUS excitation function for $^{94}\text{Mo}(\gamma, n)$ of this work compared with the previous measurements [18,43].

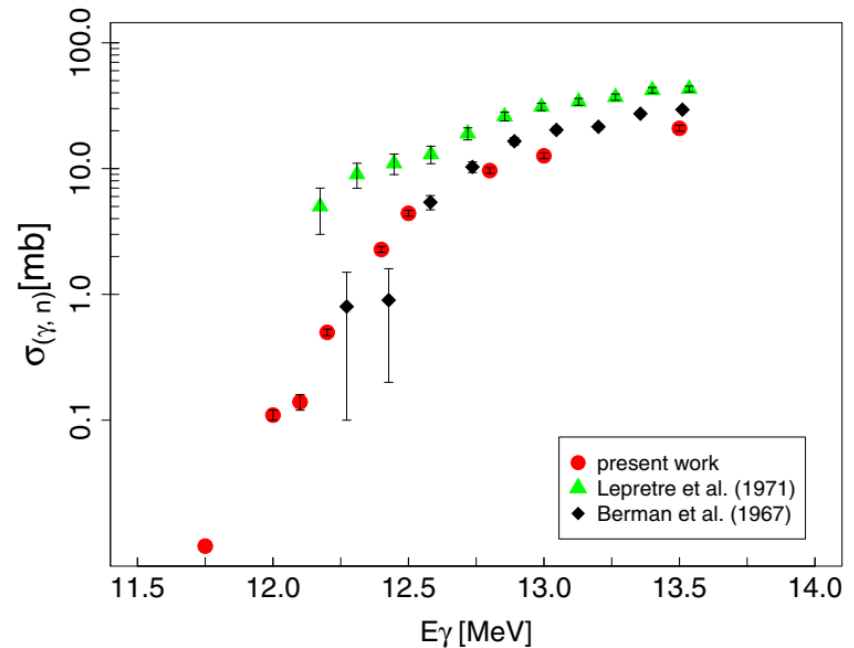
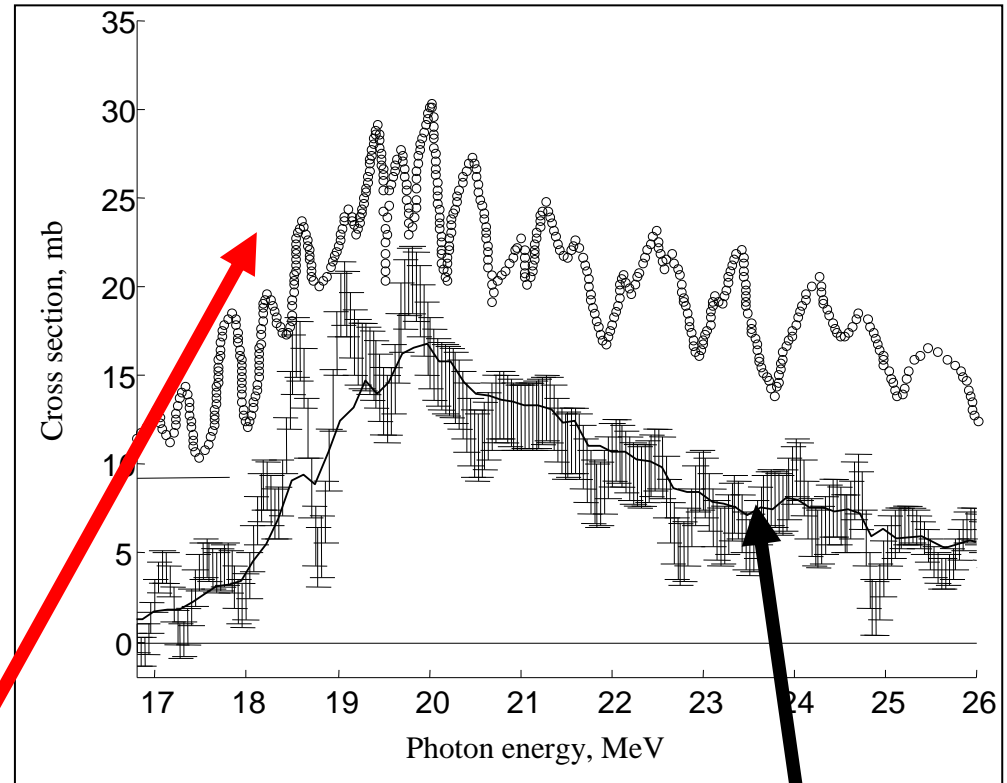
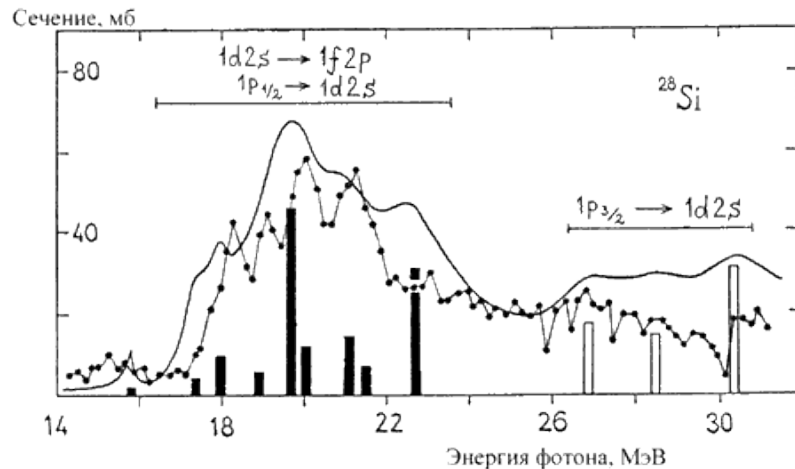


FIG. 6. Excitation function for $^{90}\text{Zr}(\gamma, n)$ of this work compared with the previous measurements [44,45].

A. Banu, E. G. Meekins, J. A. Silano, H. J. Karwowski, and S. Goriely. Photoneutron reaction cross section measurements on ^{94}Mo and ^{90}Zr relevant to the p-process nucleosynthesis. Phys. Rev. C 99, 025802 – Published 11 February 2019

2. Изучение структуры гигантского дипольного резонанса.

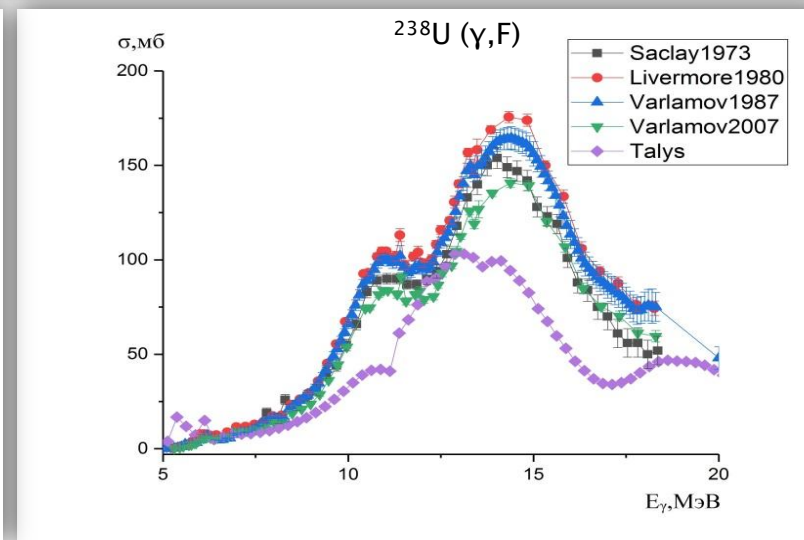
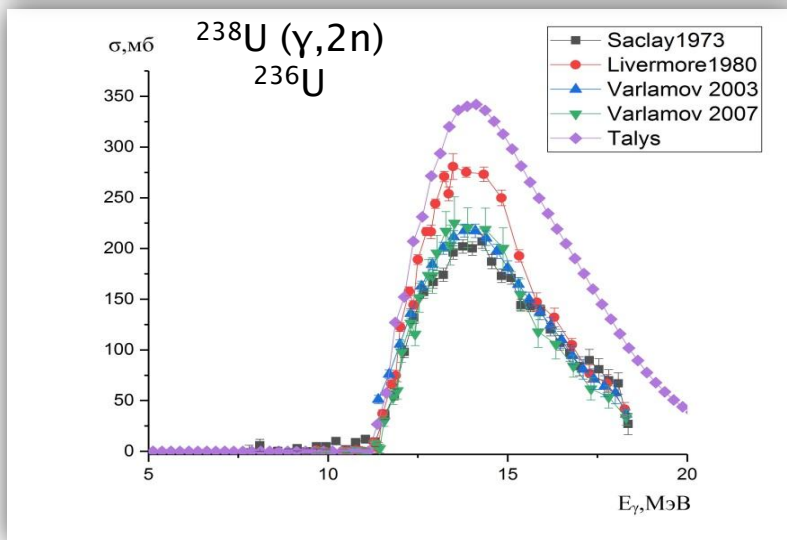
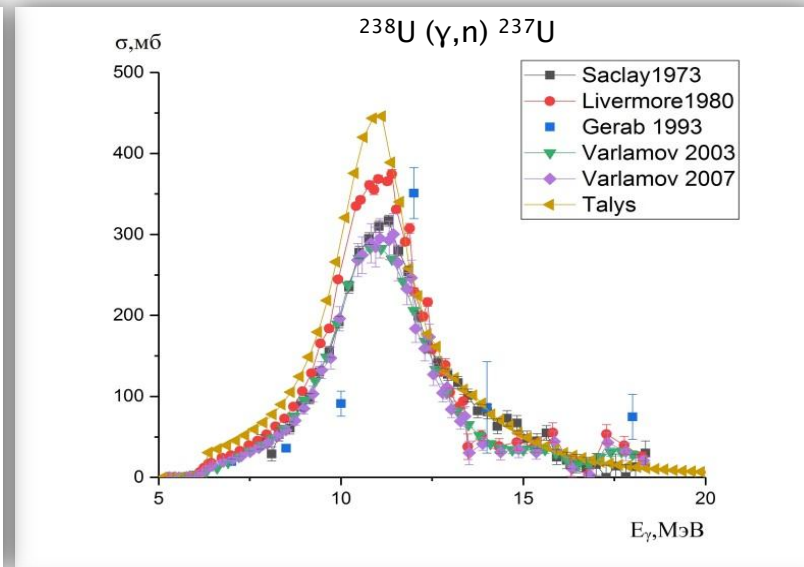
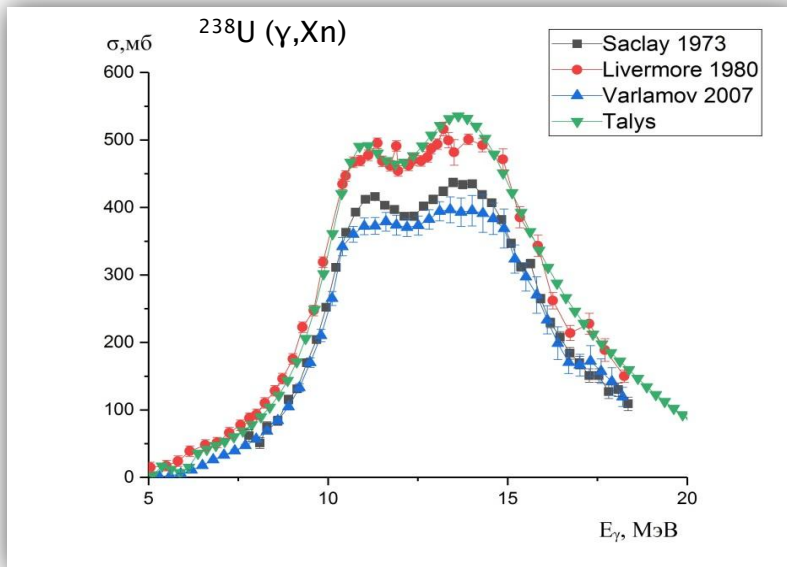
Деформационное расщепление ГДР
Конфигурационное расщепление ГДР
Изоспиновое расщепление ГДР



Результат эксперимента на пучке
тормозного γ -излучения

Восстановление сечения
реакции
из результата КМА-
эксперимента

3. Фотоделение.



3. Фотоделение.

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.
- Исследования фотоделения позволяют селективно изучать экстремально деформированные ядерные состояния и продвинуться по пути понимания природы нескольких максимумов (барьеров деления) в ядерном потенциале.



Прикладные задачи. Медицинские изотопы.

- В настоящее время основу ядерной медицины составляет ограниченный круг радионуклидов. Наиболее активно применяемые нуклиды зачастую не являются оптимальными по своим ядерно-физическим характеристикам и химическим свойствам. Разработка радиофармпрепаратов основывается на доступных радионуклидах, она зависит от наличия простых способов их наработки.

- Современные производственные мощности намного меньше потенциальной потребности в радионуклиде.

Годовая потребность ^{67}Cu (радиоиммунотерапия опухолей) составляет 12000 Ci.

- Закрытие исследовательских и промышленных реакторов, на которых традиционно нарабатывались изотопы.

90% $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (однофотонная эмиссионная компьютерная томография) нарабатывается на 5-ти реакторах, 3 из них или уже закрыты или планируется закрытие.

- Оценка перспективности наработки медицинских радионуклидов в результате фотоядерных реакций ограничена отсутствием экспериментальных ядерных данных.

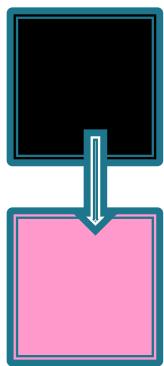


Прикладные задачи. Медицинские изотопы.

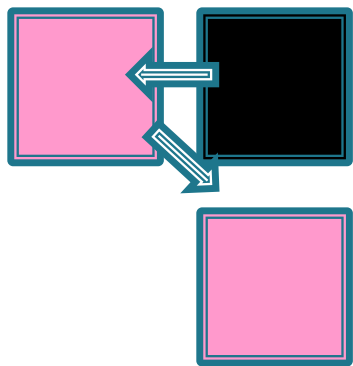
- Экспериментальные и теоретические исследования фотоядерных реакций, получение сечений и выходов всех реакций с образованием целевых и побочных нуклидов.
- Создание и отработка новых радиохимических методик отделения полученных радионуклидов без носителя от макроколичеств материала мишени.
- Исследования оптимальных носителей для адресной доставки этих изотопов
Развитие методов адресной доставки радиоизотопов к пораженным органам.
- Изучение биораспределения в организме лабораторных животных.
- Перемасштабирование на наработку больших доз.
- Рециклинг мишеней.



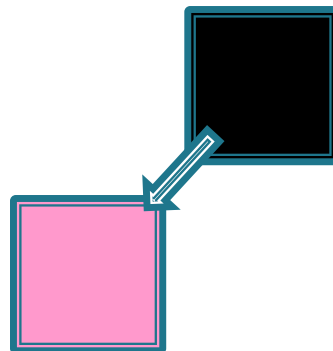
Пути получения медицинских изотопов на ускорителях электронов в фотоядерных реакциях



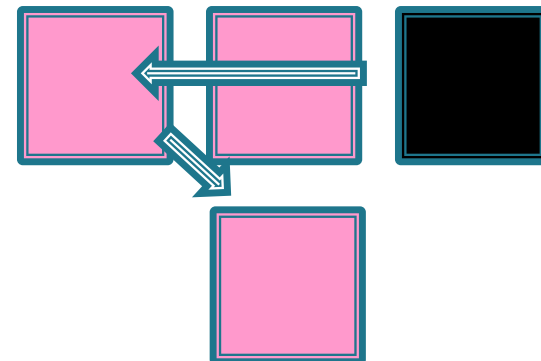
(γ, p)



$(\gamma, n)\beta^+$



(γ, pn)



$(\gamma, 2n)\beta^+$

Tc92 4.25 м (8)+	Tc93 2.75 ч 9/2+	Tc94 293 м 7+	Tc95 20.0 ч 9/2+	Tc96 4.28 дн 7+	Tc97 4.21E6 л 9/2+	Tc98 4.2E6 л (6)+	Tc99 2.111E5 л 9/2+	Tc100 15.46 с 1+	Tc101 14.22 м 9/2+	Tc102 5.28 с 1+
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
Mo91 15.49 м 9/2+	Mo92 14.84 0+	Mo93 4.0E3 л 5/2+	Mo94 9.25 0+	Mo95 15.92 5/2+	Mo96 16.68 0+	Mo97 9.55 5/2+	Mo98 24.13 0+	Mo99 65.94 ч 1/2+	Mo100 9.63 7.3E18 л ββ 0+	Mo101 14.61 м 1/2+
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
Nb90 14.60 ч 8+	Nb91 6.8E2 л 9/2+	Nb92 3.47E7 л (7)+	Nb93 100 9/2+	Nb94 2.03E4 л 6+	Nb95 34.991 дн 9/2+	Nb96 23.35 ч 6+	Nb97 72.1 м 9/2+	Nb98 2.86 с 1+	Nb99 15.0 с 9/2+	Nb100 1.5 с 1+
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>

^{67}Cu

^{66}Zn 27.73%	^{67}Zn 4.04%	^{68}Zn 18.45% p,2p; γ ,p d,2pn; α , α ,p	^{69}Zn 56.4 m	^{70}Zn 0.61%
^{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

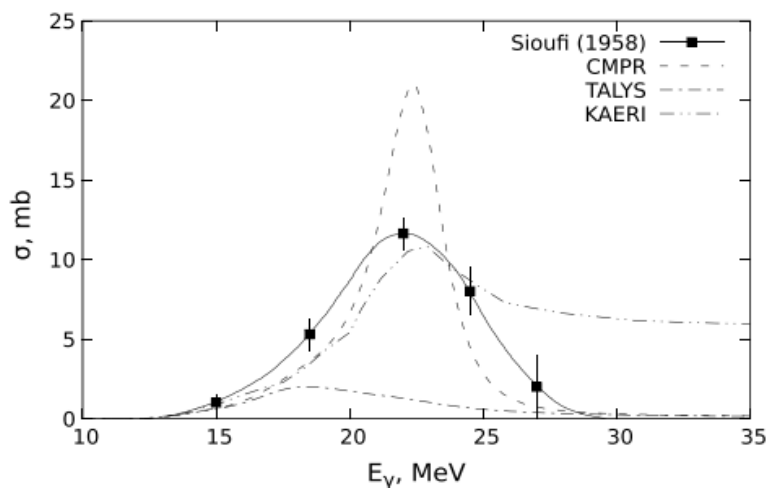


Fig. 4 Cross sections of the photonuclear reaction $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$ measured in the work of von Sioufi [25] and theoretically calculated using different models

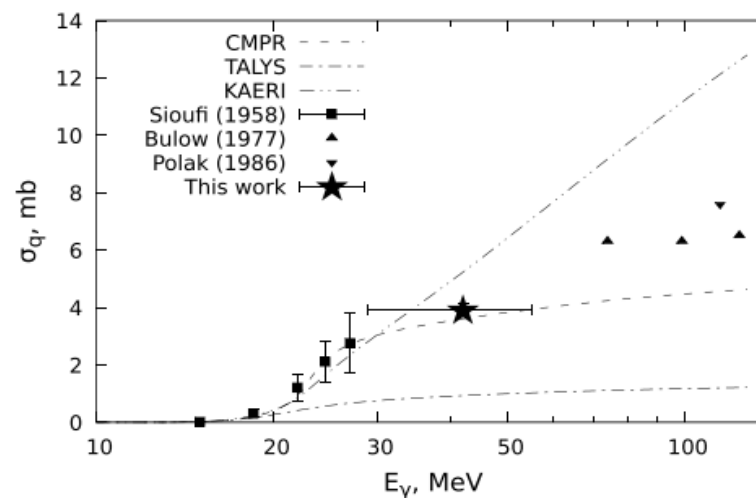


Fig. 5 Comparison of the experimental yields of the $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$ photonuclear reaction obtained using bremsstrahlung beams and calculated on the basis of known cross sections

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

^{177}Lu

Новые способы получения, выделения и целевой доставки изотопов ^{177}Lu , ^{55}Co , ^{105}Rh с использованием наноматериалов различной природы. РНФ. 21-13-00449

Hf173 23.6 ч 1/2- m	Hf174 0.16 2.0E15 л 0+	Hf175 70 дн 52(-) m	Hf176 5.26 0+	Hf177 18.60 7/2- m	Hf178 27.28 0+	Hf179 13.62 9/2+ m	Hf180 35.08 0+	Hf181 42.39 дн 1/2- m
Lu172 6.70 дн 4- m	Lu173 1.37 л 7/2+ m	Lu174 3.31 л (1)- m	Lu175 97.41 7/2+ m	Lu176 2.59 3.76E10 л 7- m	Lu177 6.647 дн 7/2+ m	Lu178 28.4 м 1(+) m	Lu179 4.59 ч 7/2(+) m	Lu180 5.7 м 5+ m
Yb171 14.28 1/2- m	Yb172 21.83 0+ m	Yb173 16.13 5/2- m	Yb174 31.83 0+ m	Yb175 4.185 дн (7/2-) m	Yb176 12.76 0+ m	Yb177 1.911 ч (9/2+) m	Yb178 74 м 0+ m	Yb179 8.0 м (1/2-) m

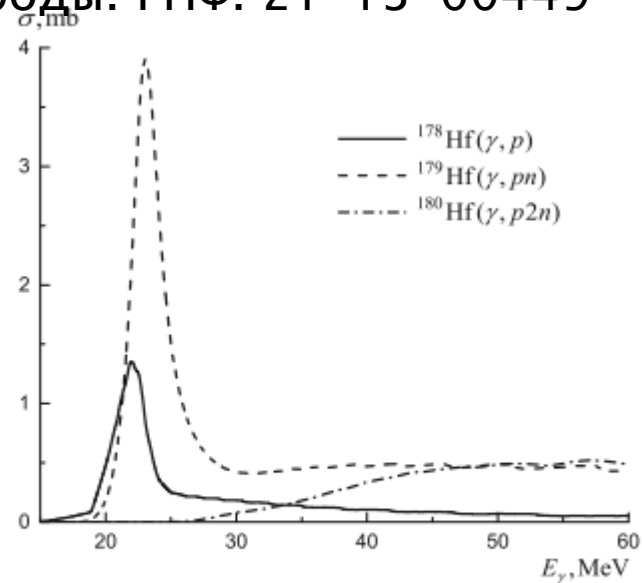
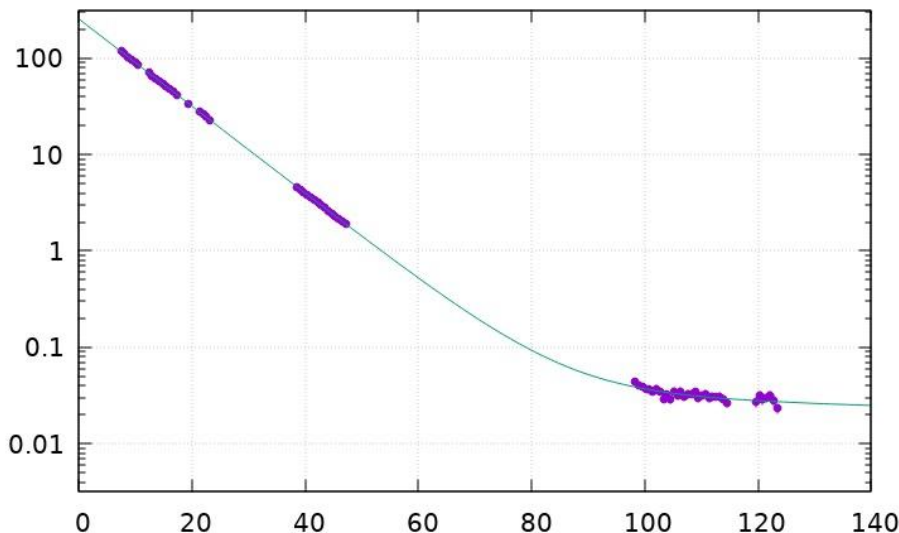


Fig. 1 Theoretical cross-sections of photonuclear reactions on $^{nat}\text{HfO}_2$ leading to ^{177}Lu formation calculated by TALYS and CMPR combination



Скорость счёта линии 209 кэВ, которая есть и в спектре ^{177}Lu и в спектре ^{177m}Lu , от времени после облучения (в сутках). Точки – эксперимент, линия – фит.

Оценка
35МэВ
100мкА
10 дней
ЗГБК ^{177}Lu
IR $3,45 \pm 0,05 \cdot 10^{(-5)}$

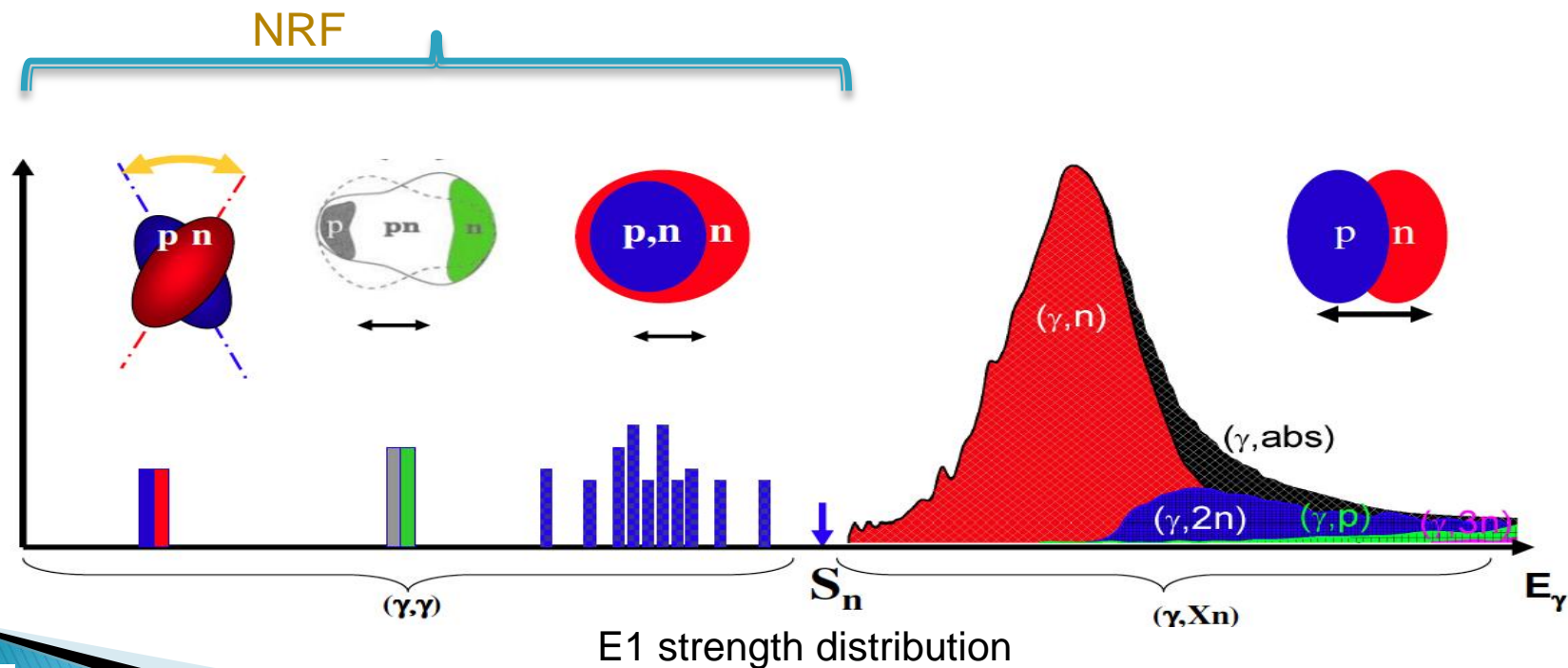
Andrey G. Kazakov, Sergey S. Belyshev, Taisya Yu Ekatoeva, Vadim V. Khankin, Alexander A. Kuznetsov, and Ramiz A. Aliev. Production of ^{177}Lu by hafnium irradiation using 55-mev bremsstrahlung photons. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 317(3):1469-1476, 2018.



Целевой изотоп	Терапевтическая доза	Реакция/ мишень	Энергия электронов	Нарабатываемая доза в сутки при токе 0.1 мА
^{99}Mo	Сотни МБк	$^{100}\text{Mo}(g,n) ^{99}\text{Mo}/$ ^{100}Mo , металл, 10 г	35МэВ	238 ГБк
			20МэВ	85 ГБк
^{67}Cu	(1,59-5,03) ГБк	$^{68}\text{Zn}(g,p) ^{67}\text{Cu} /$ ^{68}Zn , металл, 10 г	35МэВ	15 ГБк
			20МэВ	1.1 ГБк
^{47}Sc	(5,5-7,4)ГБк	$^{48}\text{Ti}(g,p) ^{47}\text{Sc} /$ ^{48}Ti , металл, 10 г	35МэВ	23 ГБк
			20МэВ	1.71 ГБк

Возможные задачи

1. Астрофизика и нуклеосинтез. Обойденные ядра.
2. Изучение структуры гигантского дипольного резонанса.
3. Фотоделение.
4. Ядерная резонансная флуоресценция. Изучение гигантских резонансов иной природы, пигми- и M1 резонансов
5. Прикладные исследования. Исследование возможности наработки перспективных для ядерной медицины радионуклидов.



Спасибо за внимание!

