

Исследование фотоядерных реакций на стабильных изотопах ^{nat}Se и ^{nat}Mo в области энергий 10–23 МэВ

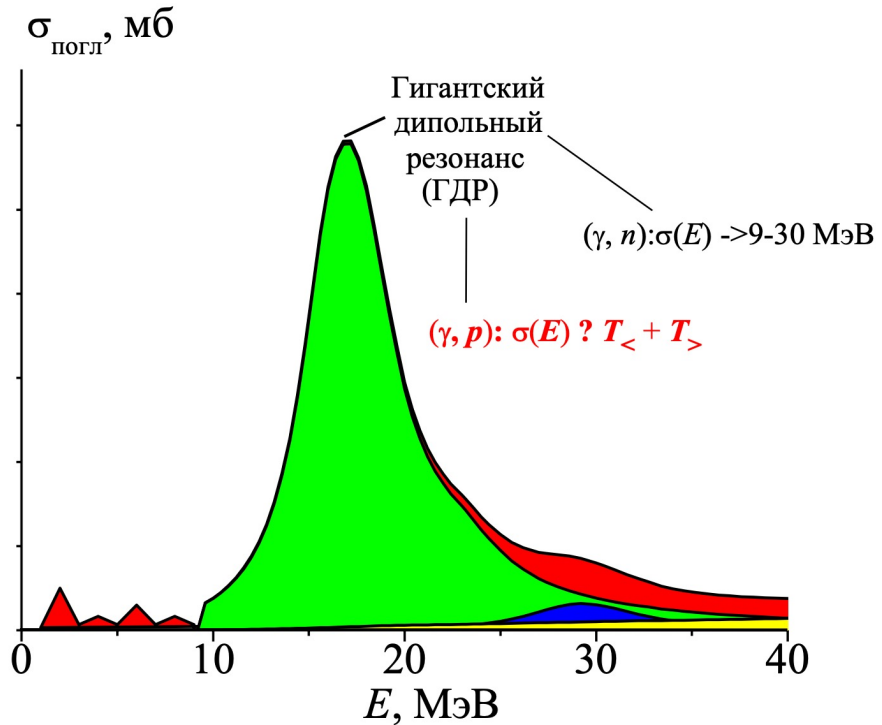
Фазилат Расулова

Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, ОИЯИ, Дубна



Гигантский дипольный резонанс атомных ядер

Сечение фотопоглощения фотонов атомными ядрами



$$\sigma_{GDR}(E_\gamma) = \sigma_{T<}(E_\gamma) + \sigma_{T>}(E_\gamma)$$

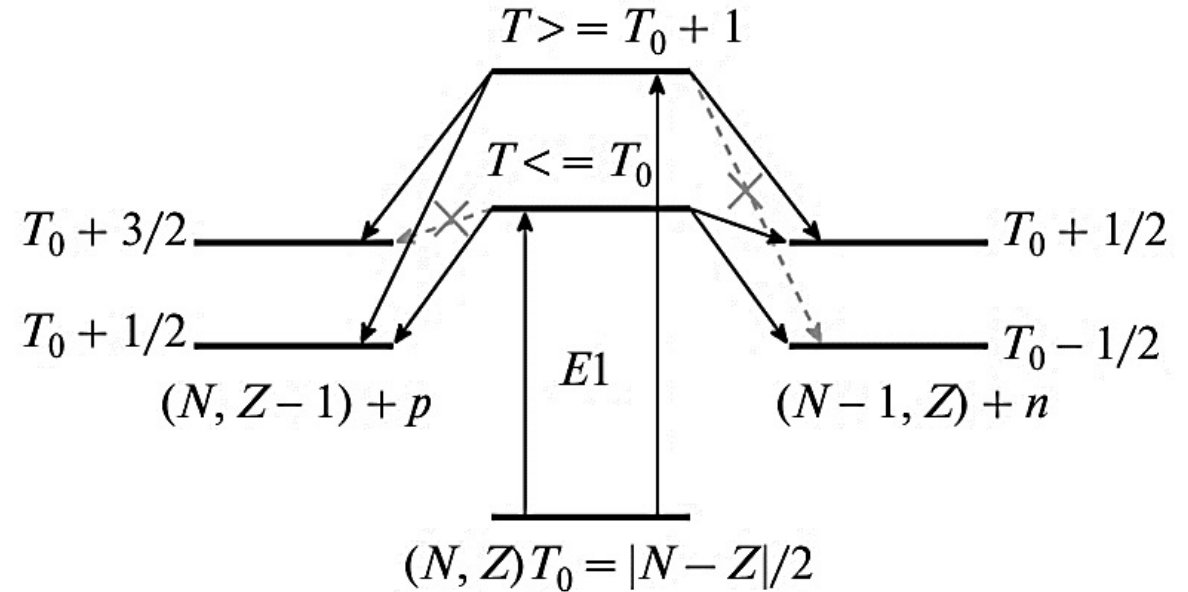


Схема возбуждения состояний $T_<$ и $T_>$ в ядре (N, Z) и их распад по нейтронному и протонному каналам

Предыдущие измерения на ^{nat}Se :

(γ, n) в 9–24 МэВ:

Goryachev A.M. et. al., Vopr. Teor. Yad. Fiz. 8 (1982)

Kitatani F. et. al., Nucl. Sci. and Tech. 47 (2010)

Kitatani F. et. al., Nucl. Sci. and Tech. 48 (2011)

Kitatani F. et. al., Nucl. Sci. and Tech. 53 (2016)

Yates S. et. al., Physical Review C. 98 (2018)

$(\gamma, 2n)$, $(\gamma, n) + (\gamma, np)$ в 18–28 МэВ:

Carlos P. et. al., Nuclear Physics A. 258 (1976)

Предыдущие измерения на ^{nat}Mo :

(γ, n) в 10–24 МэВ:

Mutsuro N. et. al. Phys. Soc. Jap. 14 (1959)

Banu A. et. al. Physical Review C. 99 (2019)

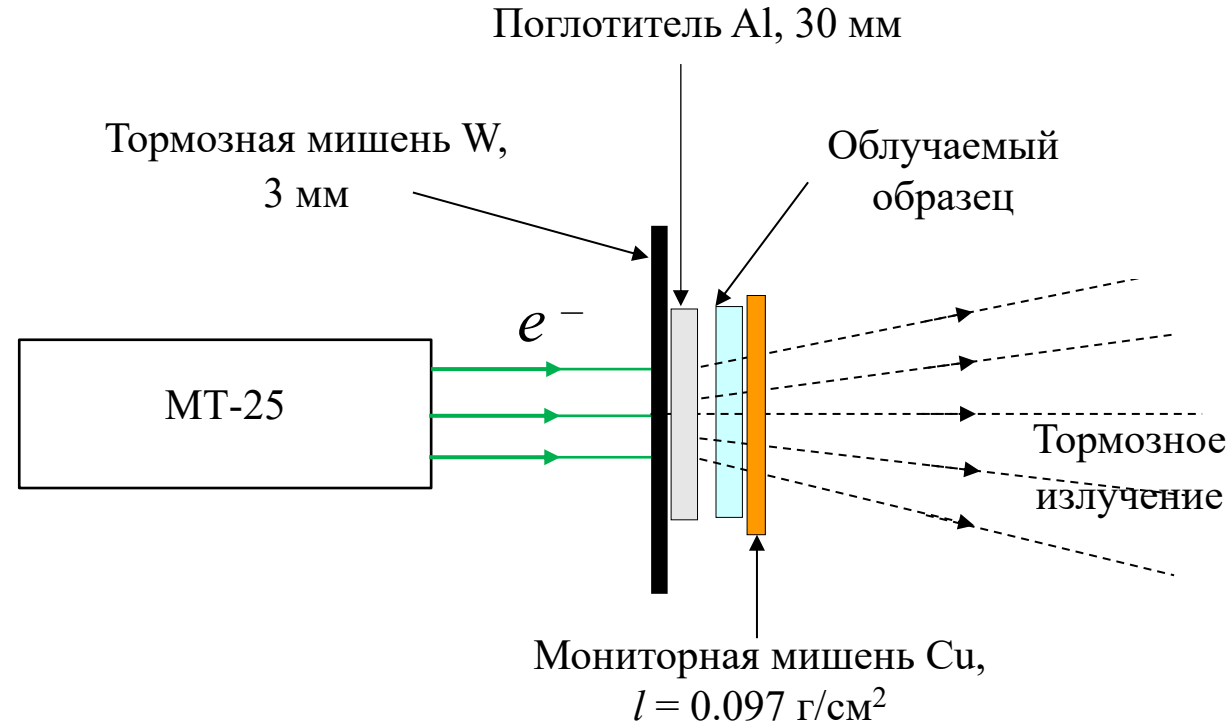
Utsunomiya H. et. al. Physical Review C. 88 (2013)

$(\gamma, 2n)$, $(\gamma, n) + (\gamma, np)$ в 12–29 МэВ:

Beil H. et. al., Nuclear Physics A. 227 (1974)

Ishkhanov B.S. et. al. Nucl. Phys. 702 (1970)

Схема проведения эксперимента на МТ-25 ЛЯР ОИЯИ



Реакция на мониторе – $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$

Экспериментальное значение выхода

Экспериментальное значение выхода вычисляется по формуле:

$$Y_{\text{эксн}} = \frac{S \cdot C_{\text{abs}}}{\varepsilon \cdot I_{\gamma}} \frac{t_{\text{real}}}{t_{\text{live}}} \frac{1}{N} \frac{1}{N_e} \frac{e^{\lambda \cdot t_{\text{cool}}}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{real}}}} \frac{\lambda \cdot t_{\text{irr}}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{irr}}}}, \quad (1)$$

где
 S — пик полного поглощения
 C_{abs} — коэффициент учитывающий самопоглощение в мишени
 ε — эффективность детектора
 I_{γ} — квантовый выход
 N — число атомов в активационной мишени
 N_e — число электронов падающих на тормозную мишень
 λ — постоянная распада
 t_{irr} и t_{cool} — время облучения и время охлаждения
 t_{live} и t_{real} — живое и реальное времени измерения спектров

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_e}{N_e}\right)^2}$$

Расчетные значения выхода

Расчетное значение выхода вычисляется по формуле :

$$Y_{\text{теор}} = \sum_i \eta_i \int_{E_{i,\text{пор}}}^{E_{\gamma\text{max}}} \sigma_i(E) W(E, E_{\gamma\text{max}}) dE, \quad (2)$$

где индекс i соответствует номеру реакции, дающей вклад в образование исследуемого изотопа,

η_i — процентное содержание исследуемого изотопа в природной смеси изотопов селена,

$\sigma_i(E)$ — сечение соответствующей фотоядерной реакции, рассчитанное с помощью программного кода TALYS и КМФР,

$W(E, E_{\gamma\text{max}})$ — плотность распределения числа тормозных фотонов по энергии на один электрон пучка ускорителя

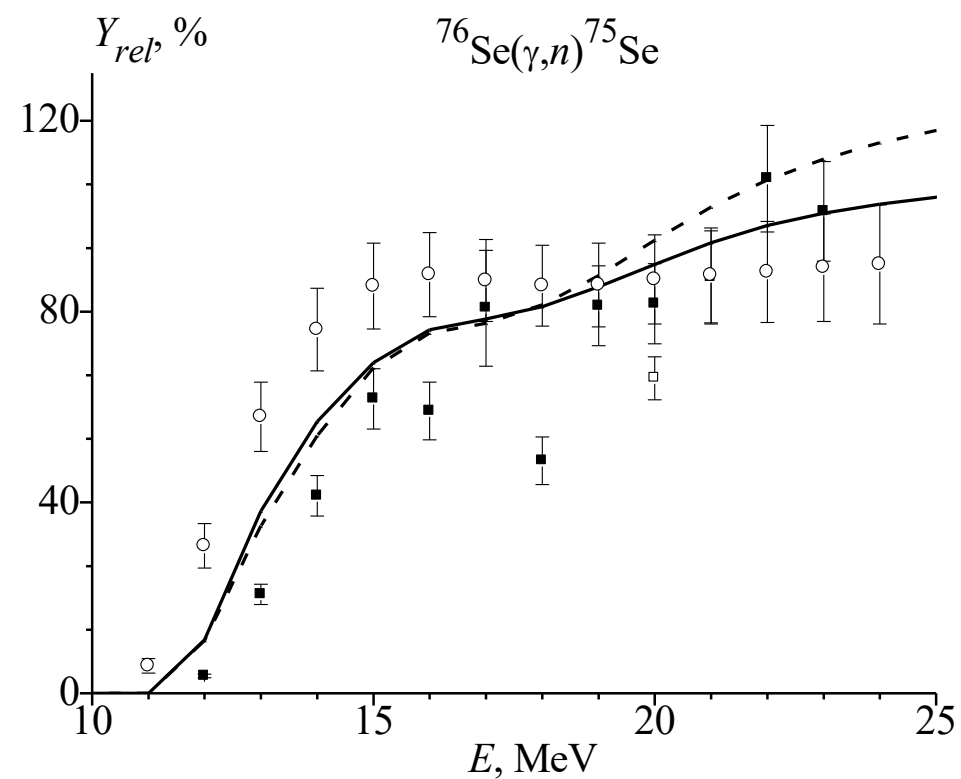
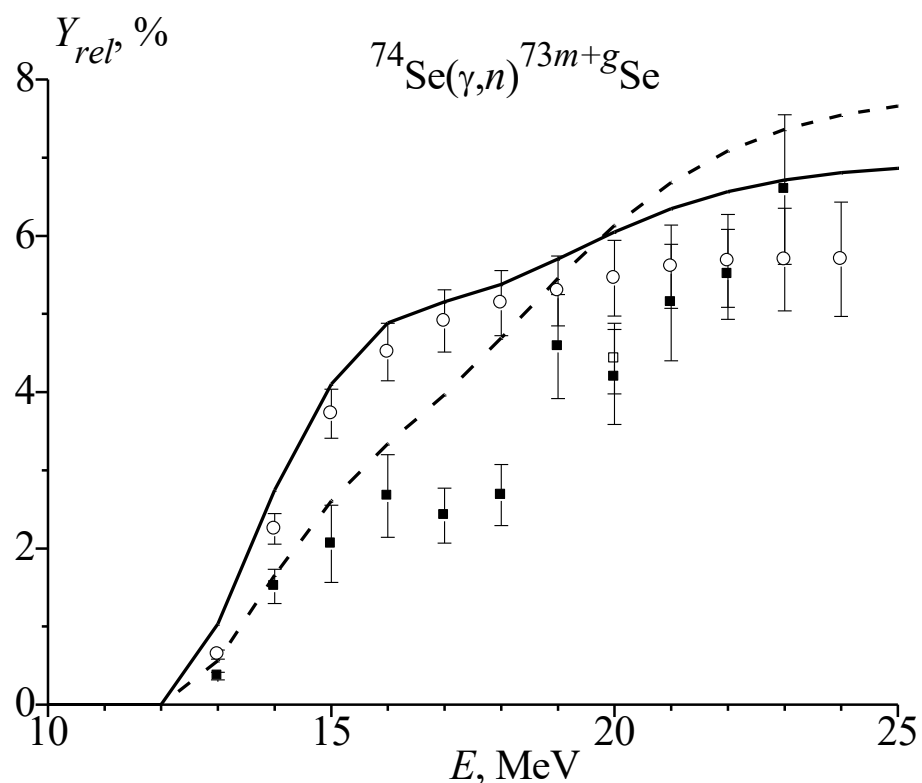
$$Y_{\text{отн},i} = \frac{\eta_i \int_{E_{\text{пор}}}^{E_{\gamma\text{max}}} \sigma_i(E) W(E, E_{\gamma\text{max}}) dE}{\eta \int_{E_{\text{пор}}}^{E_{\gamma\text{max}}} \sigma_{(\gamma,n)}(E) W(E, E_{\gamma\text{max}}) dE} \quad (3)$$

natSe: 8.82% · $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81m+g}\text{Se}$

natMo: 9.744% · $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$

Результаты экспериментов по облучению мишени ^{nat}Se

Относительные выходы фотопротонных реакций в области ГДР

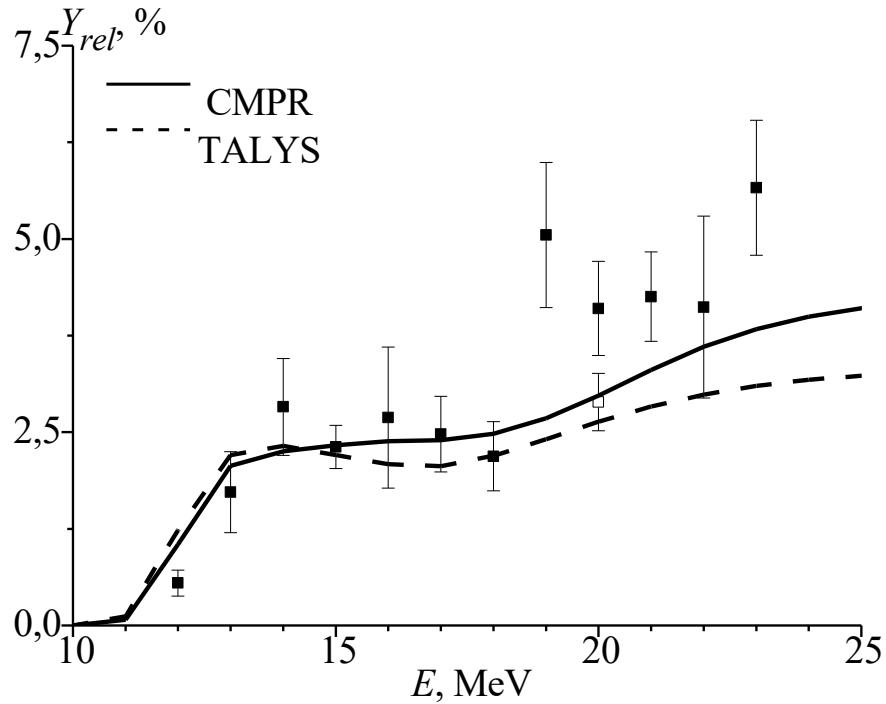


Goryachev A.M. et. al. VTYF. – 1982. – Vol. 8. – pp. 121-139.

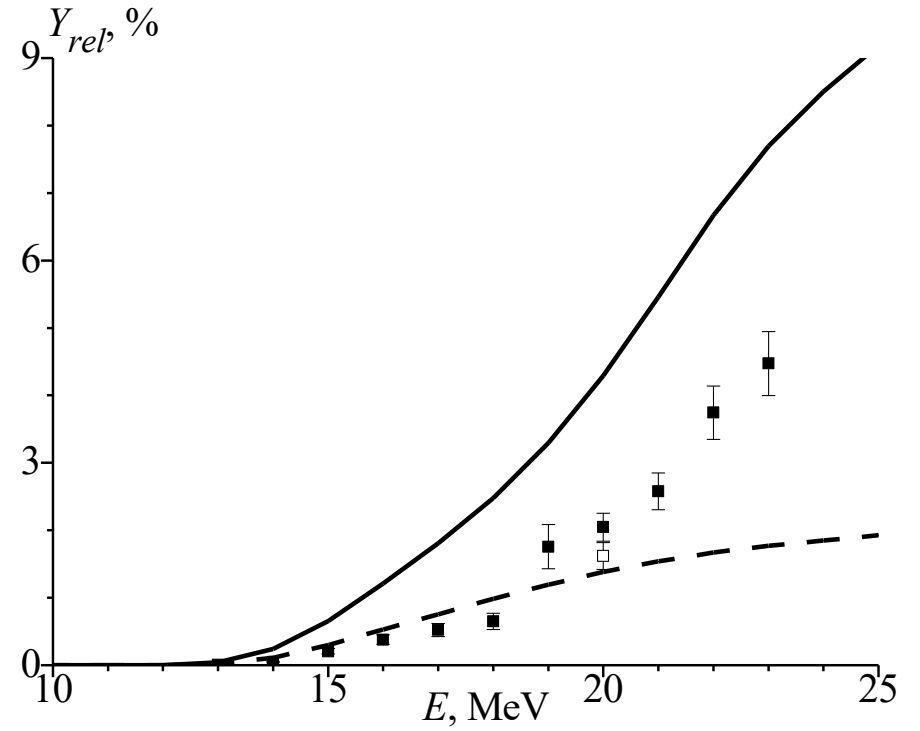
Rasulova F.A., et. al. Photonuclear reactions on stable isotopes of selenium at bremsstrahlung end-point energies of 10-23 MeV // Chinese Physics C, 48: 024002 (2024).

Относительные выходы фотопротонных реакций в области ГДР

0.86% $^{74}\text{Se}(\gamma, p)^{73}\text{As}$



7.60% $^{77}\text{Se}(\gamma, p)^{76}\text{As}$

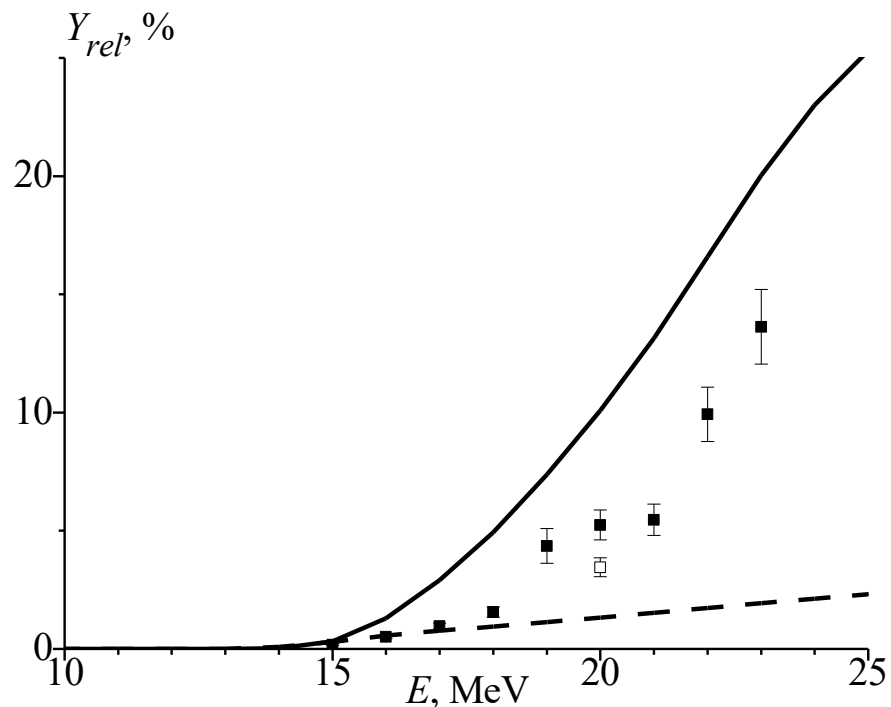


Rasulova F.A. et. al.. Multiparticle $^{nat}\text{Se}(\gamma, xnp)$ reactions induced with bremsstrahlung end-point energies of 20-80 MeV // NIM A, 1045: 168428 (2023).

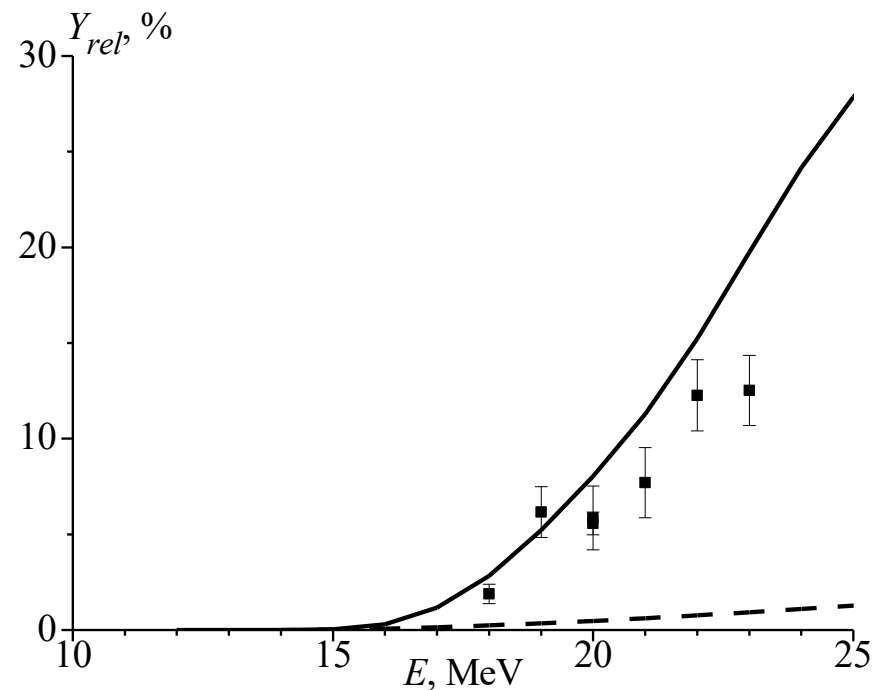
Rasulova F.A., et. al. Photonuclear reactions on stable isotopes of selenium at bremsstrahlung end-point energies of 10-23 MeV // Chinese Physics C, 48: 024002 (2024).

Относительные выходы фотопротонных реакций в области ГДР

23.69% · $^{78}\text{Se}(\gamma, p)^{77}\text{As}$



49.80% · $^{80}\text{Se}(\gamma, p)^{79}\text{As}$

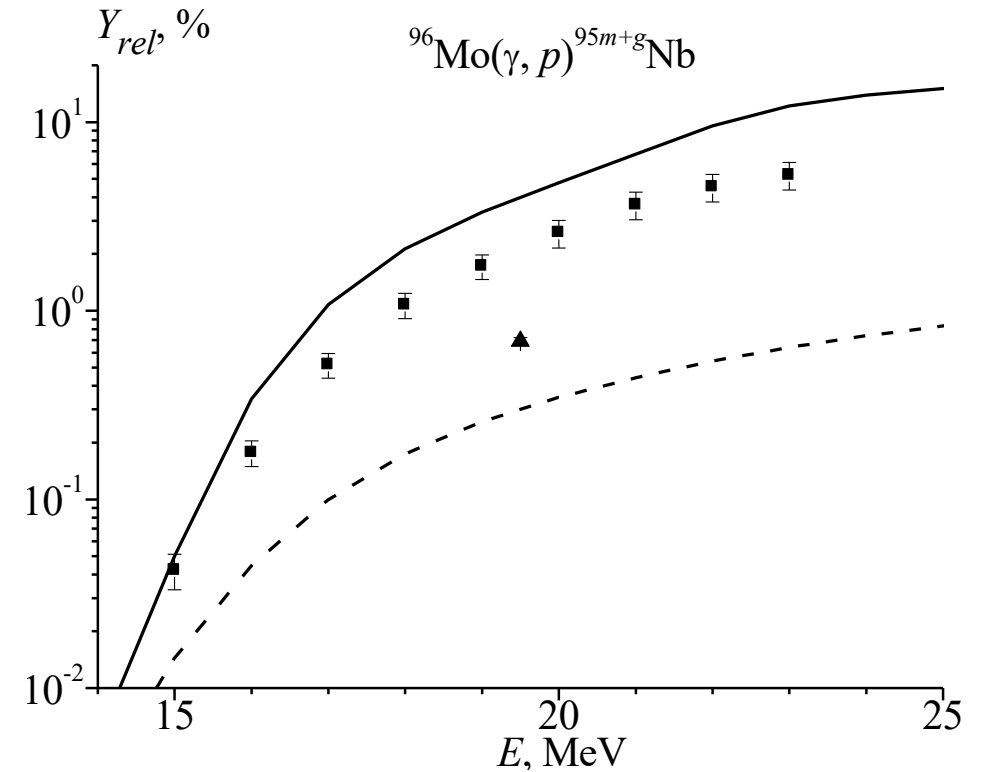
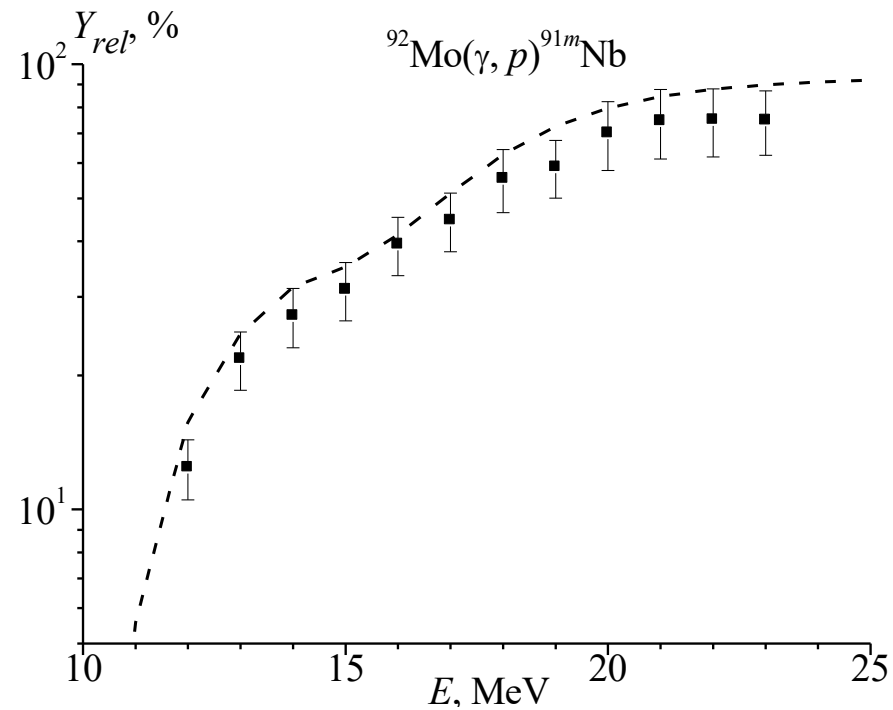


Rasulova F.A. et. al. Multiparticle $^{nat}\text{Se}(\gamma, xnp)$ reactions induced with bremsstrahlung end-point energies of 20-80 MeV // NIM A, 1045: 168428 (2023).

Rasulova F.A., et. al. Photonuclear reactions on stable isotopes of selenium at bremsstrahlung end-point energies of 10-23 MeV // Chinese Physics C, 48: 024002 (2024).

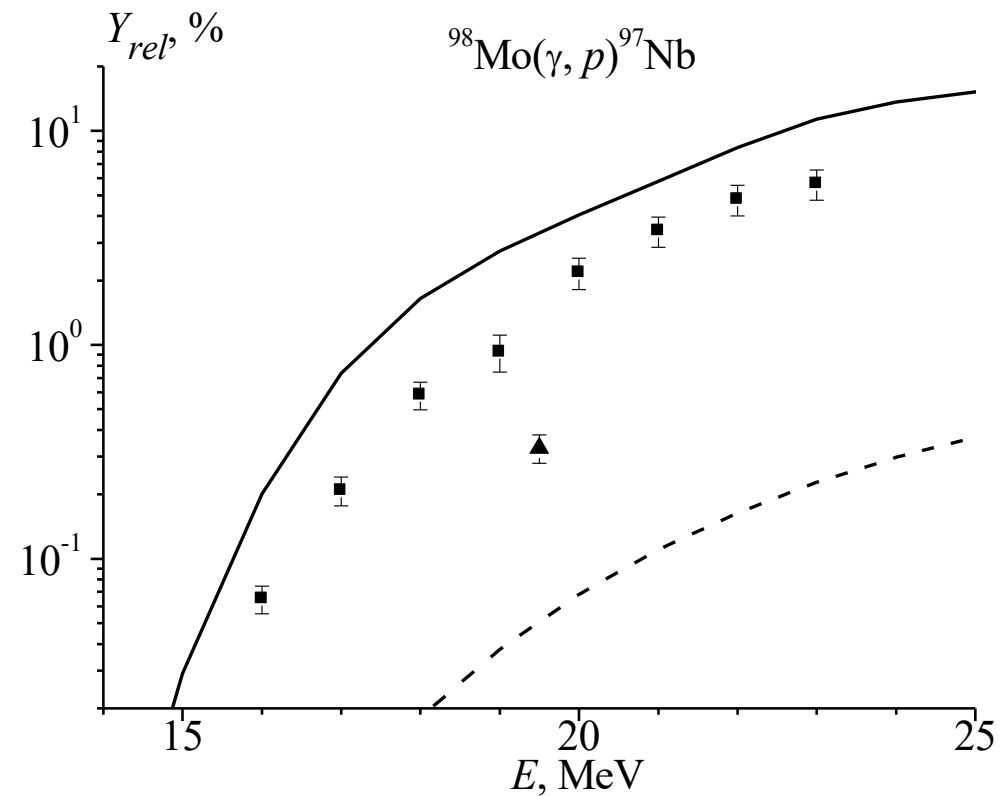
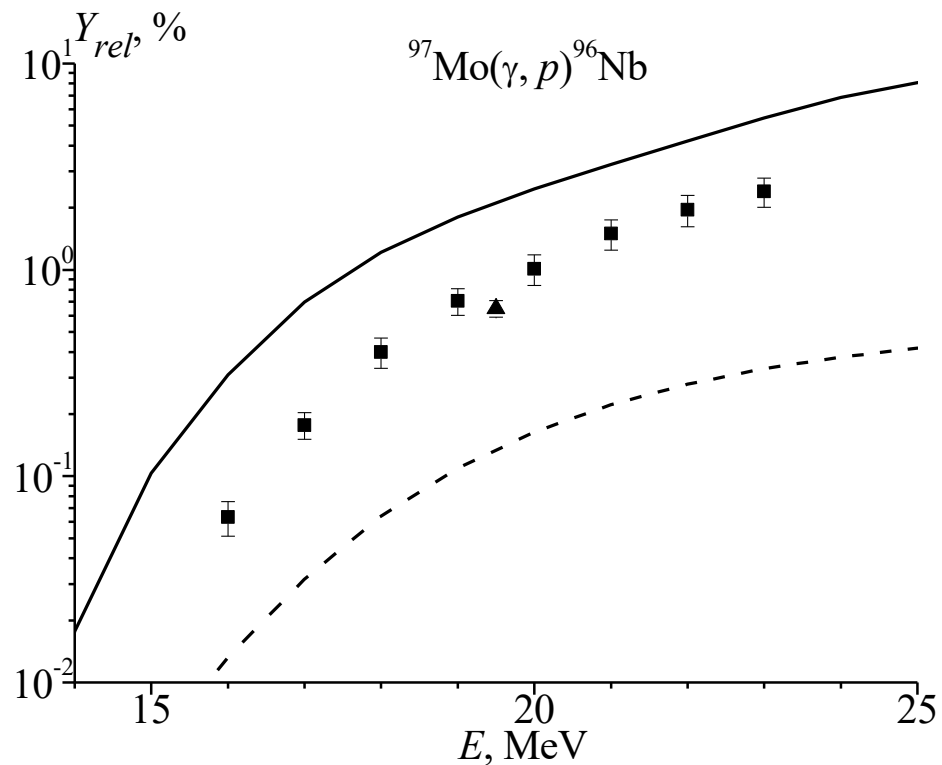
**Основные результаты
экспериментов по облучению
мишени ^{nat}Mo**

Относительные выходы фотопротонных реакций в области ГДР



* B.S. Ishkhanov et.al. Photonuclear Reactions on Molybdenum Isotopes, Physics of Atomic Nuclei, 77, 1362 (2014).

Относительные выходы фотопротонных реакций в области ГДР



* Rasulova F.A., et. al. Photonuclear reactions on stable isotopes of molybdenum at bremsstrahlung end-point energies of 10-23 MeV // Physical Review C (Submitted).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Учет изоспинового расщепления в КМФР позволяет описать экспериментальные данные о реакциях с вылетом протонов в диапазоне энергий от 10 до 23 МэВ.
- Впервые определены относительные выходы для фотопротонных реакций при облучении мишени ^{nat}Se и ^{nat}Mo в поле тормозного излучения в области энергий фотонов 10–23 МэВ.
- Активационным методом на пучке тормозных гамма-квантов можно успешно проводить исследования фотоядерных реакций на мишенях сложного изотопного состава.

ПЛАНЫ (в стадии рассмотрения)

Мишень	Целевой радионуклид, ($T_{1/2}$, дн)	Область медицинского применения
^{48}Ti	^{47}Sc (3.35)	РЕТ и СПЕСТ визуализация
$^{104,106}\text{Pd}$	^{103}Pd (16.99), ^{105}Rh (1.47)	Имплантанты для брахитерапии, радиотерапевтический агент
^{112}Cd	^{111}Ag (7.45)	неинвазивная визуализация для лечения рака
$^{112,114,118}\text{Sn}$	^{111}In (2.8), ^{113m}In (4.14), ^{117m}Sn (14)	лечение болезненных метастазов при раке костей
^{132}Ba	^{131}Ba (11.5), ^{131}Cs (9.69)	Имплантанты для брахитерапии
$^{150,154}\text{Sm}$	^{149}Pm (2.21), ^{153}Sm (1.93)	маркировка биомолекулы для терапии рака
^{156}Dy	^{155}Dy (0.41), ^{155}Tb (5.32)	РЕТ и СПЕСТ визуализация
^{167}Er	^{166}Ho (1.12)	радиоэмболизация
^{176}Yb	^{175}Yb (4.18)	терапевтические радиофармпрепараты
^{178}Hf	^{177}Lu (6.64)	терапия метастазов в кости
^{187}Re	^{186}Re (3.72)	мечение частиц для облегчения болей в костях
$^{186,189}\text{Os}$	^{186}Re (3.72), ^{188}Re (0.71)	мечение частиц для облегчения болей в костях
$^{192,194,196}\text{Pt}$	^{191}Pt (2.83), ^{193m}Pt (4.33), ^{195m}Pt (4.01)	фармакокинетические исследования и визуализация опухолей

Выбор мишеней для дальнейших исследований

Элемент	Изотопный состав природной смеси	Экспериментальные данные по ФР	
		Лит. Данные	Ожидаемые данные
${}_{21}\text{Ti}$	46-50	$(\gamma, n), (\gamma, n) + (\gamma, 2n)$	
${}_{46}\text{Pd}$	102+104+105+106+108+110	(γ, n)	
${}_{48}\text{Cd}$	106+108+110-112+114+116	(γ, n)	
${}_{50}\text{Sn}$	112+114-120+122+124	$(\gamma, n), (\gamma, n) + (\gamma, np)$	
${}_{56}\text{Ba}$	130+132+134-138	$(\gamma, n), (\gamma, n) + (\gamma, np)$	
${}_{62}\text{Sm}$	144+147-150+152+154	$(\gamma, n), (\gamma, n) + (\gamma, np)$	
${}_{66}\text{Dy}$	156+158+160-164		(γ, p)
${}_{68}\text{Er}$	162+164+166-168+170		
${}_{70}\text{Yb}$	168+170-174+176	(γ, n)	
${}_{72}\text{Hf}$	174+176-180	(γ, n)	
${}_{75}\text{Re}$	185+187	(γ, n)	
${}_{76}\text{Os}$	184+186-190+192	$(\gamma, n), (\gamma, n) + (\gamma, np) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n)$	
${}_{78}\text{Pt}$	190+192+194-196+198	$(\gamma, n), (\gamma, n) + (\gamma, np)$	



Спасибо за
внимание!