



**Семинар памяти профессора Б.С. Ишханова
«Фотоядерные исследования. Состояния и перспективы»**

ПОЛУЧЕНИЕ МЕДИЦИНСКИХ РАДИОИЗОТОПОВ НА УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ

П.Д. Ремизов

24.10.2024

План доклада:

- 1) Обзор ^{89}Zr , ^{177}Lu , $^{186, 188, 189}\text{Re}$
- 2) Требования к наработке медицинских радиоизотопов
- 3) О фотоядерных реакциях
- 4) Экспериментальная методика
- 5) Обработка результатов
- 6) Сечения реакций $(\gamma, 1pXn)$ и $(\gamma, 1\alpha Xn)$ в области ядер $Z = 40, 41, 42$
- 7) Анализ способов наработки ^{89}Zr на ускорителях электронов
- 8) Анализ способов наработки ^{177}Lu на ускорителях электронов
- 9) Анализ способов наработки $^{186, 188, 189}\text{Re}$ на ускорителях электронов

Обзор ^{89}Zr , ^{177}Lu , $^{186, 188, 189}\text{Re}$

- **^{89}Zr**

$T_{1/2} = 78,4$ ч, $E_{\beta^+} = 0,4$ МэВ (23 %), $E_{\gamma} = 0,4$ МэВ (23 %)

$^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$

- **^{177}Lu**

$T_{1/2} = 6,7$ сут, $E_{\beta^-} = 0,1$ МэВ, $E_{\gamma} = 0,21$ МэВ (11 %)

$^{176}\text{Lu}(n, \gamma)^{177}\text{Lu}$ *носитель*, $^{176}\text{Yb}(n, \gamma)^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$ *сложная радиохимия*

- **^{186}Re**

$T_{1/2} = 3,7$ сут, $E_{\beta^-} = 0,35$ МэВ, $E_{\gamma} = 0,14$ МэВ (9,5 %)

$^{185}\text{Re}(n, \gamma)^{186}\text{Re}$ *носитель*

- **^{188}Re**

$T_{1/2} = 17$ ч, $E_{\beta^-} = 0,76$ МэВ, $E_{\gamma} = 0,15$ МэВ (15 %)

$^{186}\text{W}(n, \gamma)^{187}\text{W}(n, \gamma)^{188}\text{W} \rightarrow ^{188}\text{Re}$ *двойной нейтронный захват*

- **^{189}Re**

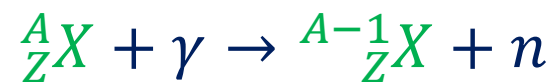
$T_{1/2} = 24,3$ ч, $E_{\beta^-} = 0,31$ МэВ, $E_{\gamma} = 0,22$ МэВ (10 %)

аналог ^{186}Re и ^{188}Re , можно получать фотоядерным способом

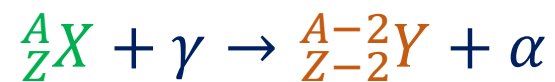
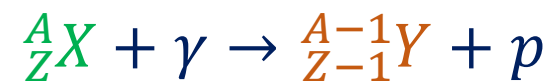
Требования к наработке медицинских радиоизотопов

- Радионуклидная чистота > 99,9 %: вклад активности других радиоизотопов < 0,1 %
- Отсутствие носителя: отсутствие стабильных ядер того же химического элемента
- Умеренная стоимость мишени: добыча некоторых материалов дорогостоящая, обогащение – всегда дорого
- Адекватные условия наработки: время облучения, масса мишени и т.д.

Реакции на ускорителях электронов:



Реакции (γ, n) хорошо изучены, но не позволяют достичь достаточной для медицины удельной активности



В фотоядерных реакциях с испусканием заряженных частиц образуются изотопы химических элементов, отличных от материала облучаемой мишени. Возможно химическое выделение

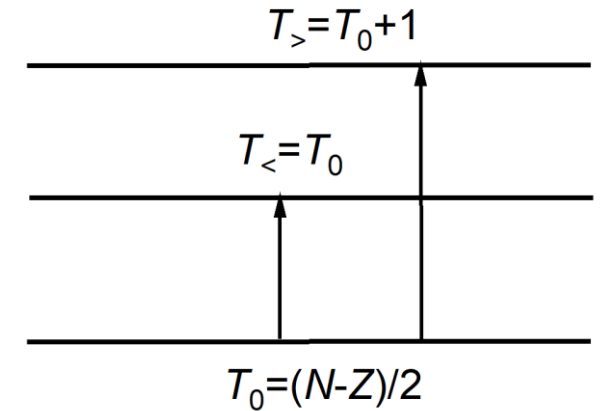
Изоспиновое расщепление ГДР

В основном состоянии изоспин ядра $T_0 = \frac{N-Z}{2}$

При поглощении фотона $E1$ возбуждаются 2 состояния ядра: $T_< = T_0$ и $T_> = T_0 + 1$

Расщепление по энергии: $\Delta E = E(T_>) - E(T_<) = \frac{60(T_0+1)}{A}$ МэВ

Вероятности возбуждения: $\frac{P(T_>)}{P(T_<)} = \frac{1}{T_0} \left(\frac{1-1,5T_0A^{-2/3}}{1+1,5A^{-2/3}} \right) *$



Традиционный статистический подход (**TALYS**) не учитывает изоспиновое расщепление.

Комбинированная модель фотонуклонных реакций (КМФР) учитывает изоспиновые эффекты путем модификации полной и экситонной плотностей состояний [1].

В работе [2] отмечено, что * можно отнести к связи средневзвешенных сечений $(\gamma, 1p)$ и $(\gamma, 1n)$ реакций.

Метод преобразования средневзвешенных сечений [3]:

Связь:

$$\langle \sigma_{(\gamma,1p)} \rangle = \langle \sigma_{(\gamma,1n)} \rangle Q \frac{P(T_>)}{P(T_<)}$$

Поправка на разницу порогов:

$$Q = \frac{\int_{E_{(\gamma,1p)}^{\text{мод}}}^{E^{\text{макс}}} d\varphi(E)}{\int_{E_{(\gamma,1n)}}^{E^{\text{макс}}} d\varphi(E)}$$

Модифицированный порог реакции $(\gamma, 1p)$:

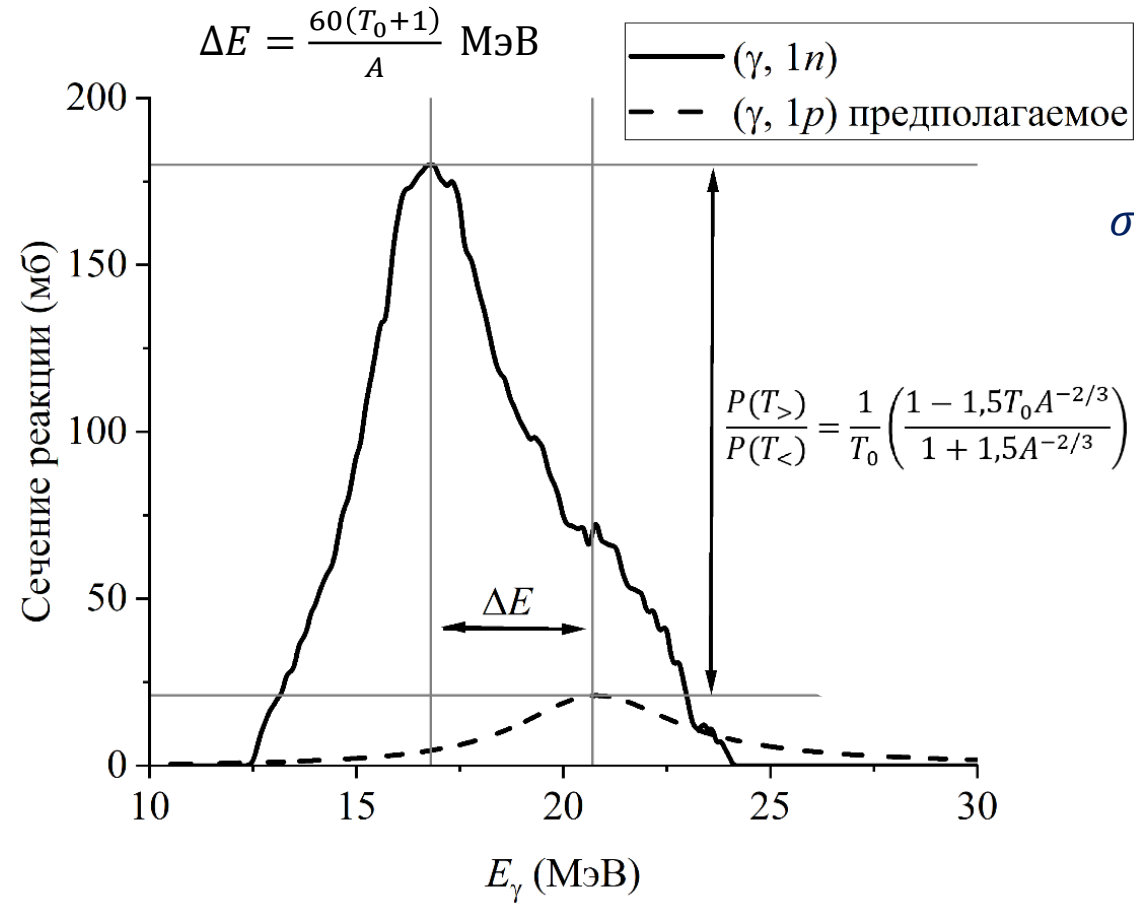
$$E_{(\gamma,1p)}^{\text{мод}} = E(\gamma, 1p) + \Delta E$$

[1] Ishkhanov B.S., Orlin V.N. Combined model of photonucleon reactions // Physics of Atomic Nuclei. 2011. Vol. 74, № 1. P. 19–39.

[2] Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M. Giant dipole resonance of atomic nuclei. Prediction, discovery, and research // Physics-Uspekhi. 2021. Vol. 64, № 2. P. 141–156.

[3] Zheltonozhsky V.A., Savrasov A.M. Investigation of (γ,p) -reactions on zirconium and molybdenum nuclei // The European Physical Journal A. 2022. Vol. 58, № 7. P. 118.

Метод преобразования интегральных сечений

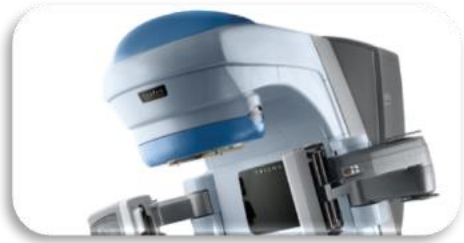


$$\sigma_{(\gamma, 1p)}(E_\gamma) = \left(\sigma_{(\gamma, 1n)}^M \frac{P(T_>)}{P(T_<)} \right) \frac{E_\gamma^2 \Gamma_{(\gamma, 1n)}^2}{\left(\left(E_{(\gamma, 1n)}^M + \Delta E \right)^2 - E_\gamma^2 \right)^2 + E_\gamma^2 \Gamma_{(\gamma, 1n)}^2}$$

E_γ	Энергия γ -излучения, МэВ
$\sigma_{(\gamma, 1n)}^M$	Амплитуда резонанса $(\gamma, 1n)$, мб
$E_{(\gamma, 1n)}^M$	Положение максимума резонанса $(\gamma, 1n)$, МэВ
$\Gamma_{(\gamma, 1n)}$	ПШПВ резонанса $(\gamma, 1n)$, МэВ

$$\sigma_{(\gamma, 1p)}(\text{общее}) = \sigma_{(\gamma, 1p)}(\text{стат.} \equiv T_<) + \sigma_{(\gamma, 1p)}(T_>)$$

Экспериментальная методика



20 МэВ: Линейный ускоритель электронов Varian Trilogy ФМБЦ им. Бурназяна (т. мишень – W)



40 МэВ: Линейный ускоритель электронов ЛИНАК-200 ОИЯИ (т. мишень – 3 мм Pb)

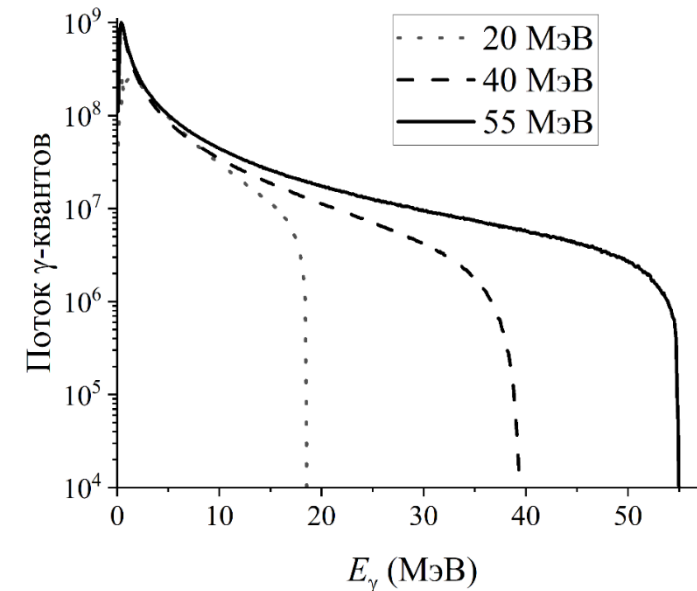
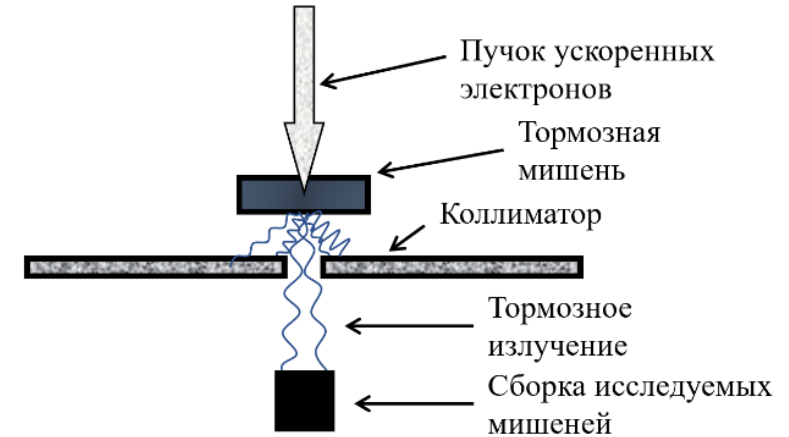


55 МэВ: Разрезной микротрон НИИЯФ МГУ (т. мишень – 2.1 мм W)

Мишени: Mo, Nb, Zr, Hf, Ta, Os, Ir

γ -спектры облученных мишеней измерялись на **полупроводниковых спектрометрах с детекторами из сверхчистого германия Canberra и Ortec** с разрешением 2 кэВ по линии 1332 кэВ ^{60}Co . Калибровка по эффективности проводилась с использованием стандартных эталонных источников ^{152}Eu , ^{226}Ra , ^{182}Ta , ^{137}Cs

Схема экспериментов



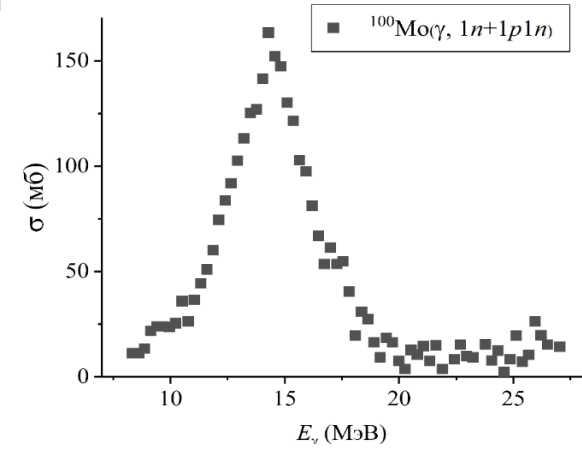
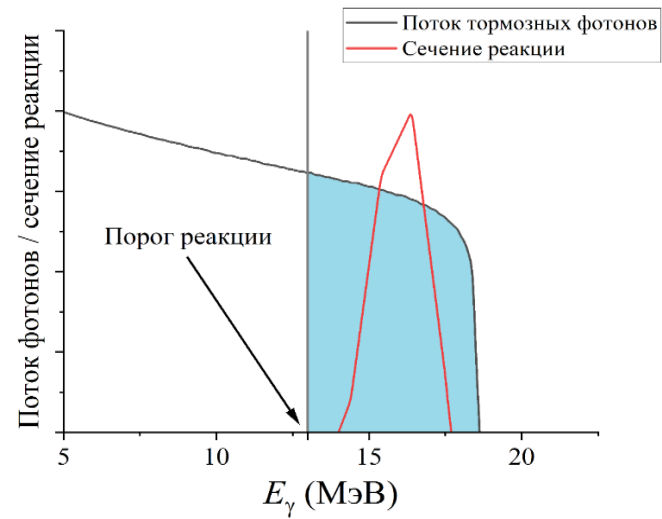
Спектры тормозного излучения ускорителей

Средневзвешенные сечения

Средневзвешенные сечения мониторинговых реакций $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{99}\text{Mo}$ и $^{181}\text{Ta}(\gamma, 1n)^{180}\text{Ta}$ [мб]:

$$\langle \sigma_{\text{мон}} \rangle = \frac{\sum \sigma_i \varphi_i(E_{\text{пор}}; E_{\text{гр}})}{\sum \varphi_i(E_{\text{пор}}; E_{\text{гр}})}$$

σ_i	Сечение реакции, мб
φ_i	Вес фотонов данной энергии в пучке
λ	Постоянная распада, 1/с
S	Площадь пика в спектре
I	Ток пучка электронов, мкА
m	Масса мишени, г
p	Доля изотопа-мишени в природной смеси
N_A	Число Авогадро
$t_{\text{обл}}$	Время облучения мишени, с
$t_{\text{охл}}$	Время охлаждения облученной мишени, с
$t_{\text{изм}}$	Время измерения спектра облученной мишени, с
θ	Отношение живого времени спектра к реальному
η	Квантовый выход γ -линии изотопа
ε	Эффективность регистрации γ -линии детектором
k	Коэффициент самопоглощения γ -линии мишенью



Интегральная плотность потока через мониторинговую мишень $[\frac{\gamma}{\text{см}^2\text{с}}]$:

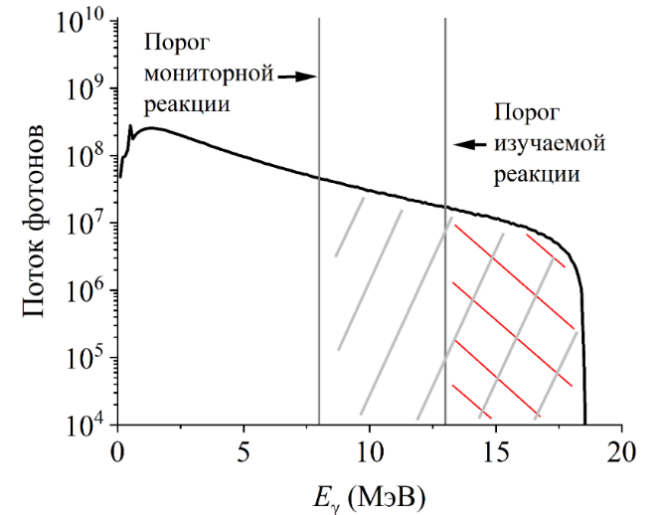
$$F_{\text{мон}} = \frac{\lambda S(N + Z)}{\langle \sigma_{\text{мон}} \rangle m p N_A (1 - e^{-\lambda t_{\text{акт}}}) e^{-\lambda t_{\text{охл}}} (1 - e^{-\lambda t_{\text{изм}}}) \theta \eta \varepsilon k}$$

Интегральная плотность потока для изучаемых реакций с учетом перенормировки на разницу порогов с мониторинговой реакцией:

$$F_{\text{эксп}} = F_{\text{мон}} \frac{\sum \varphi_j(E_{\text{пор}}^{\text{изуч}}; E_{\text{гр}})}{\sum \varphi_i(E_{\text{пор}}^{\text{мон}}; E_{\text{гр}})}$$

Экспериментальные средневзв. сечения [мб]:

$$\langle \sigma_{\text{эксп}} \rangle = \frac{\lambda S(N + Z)}{F_{\text{изуч}} m p N_A (1 - e^{-\lambda t_{\text{акт}}}) e^{-\lambda t_{\text{охл}}} (1 - e^{-\lambda t_{\text{изм}}}) \theta \eta \varepsilon k}$$



ВЫХОДЫ ИЗОТОПОВ

1) Активность радиоизотопов с $T_{1/2} \gg 1$ ч

$A = YmIt$, где Y – выход активности $\left[\frac{\text{Бк}}{\text{мкАч}\times\text{г}}\right]$, получаемый из эксперимента:

$$Y = \frac{\lambda S}{Im\theta\eta\epsilon kt_{\text{обл}} e^{-\lambda t_{\text{охл}}} (1 - e^{-\lambda t_{\text{изм}}})}$$

2) Активность радиоизотопов с $T_{1/2} \sim 1$ ч

$A = A_{\text{уд}}^{\text{нас}} mI(1 - e^{-\lambda t})$, где $A_{\text{уд}}^{\text{нас}}$ – удельная активность насыщения $\left[\frac{\text{Бк}}{\text{мкА}\times\text{г}}\right]$, получаемая из эксперимента:

$$A_{\text{уд}}^{\text{нас}} = \frac{\lambda S}{Im\theta\eta\epsilon k(1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda t_{\text{охл}}} (1 - e^{-\lambda t_{\text{изм}}})}$$

3) Количество ядер стабильных изотопов:

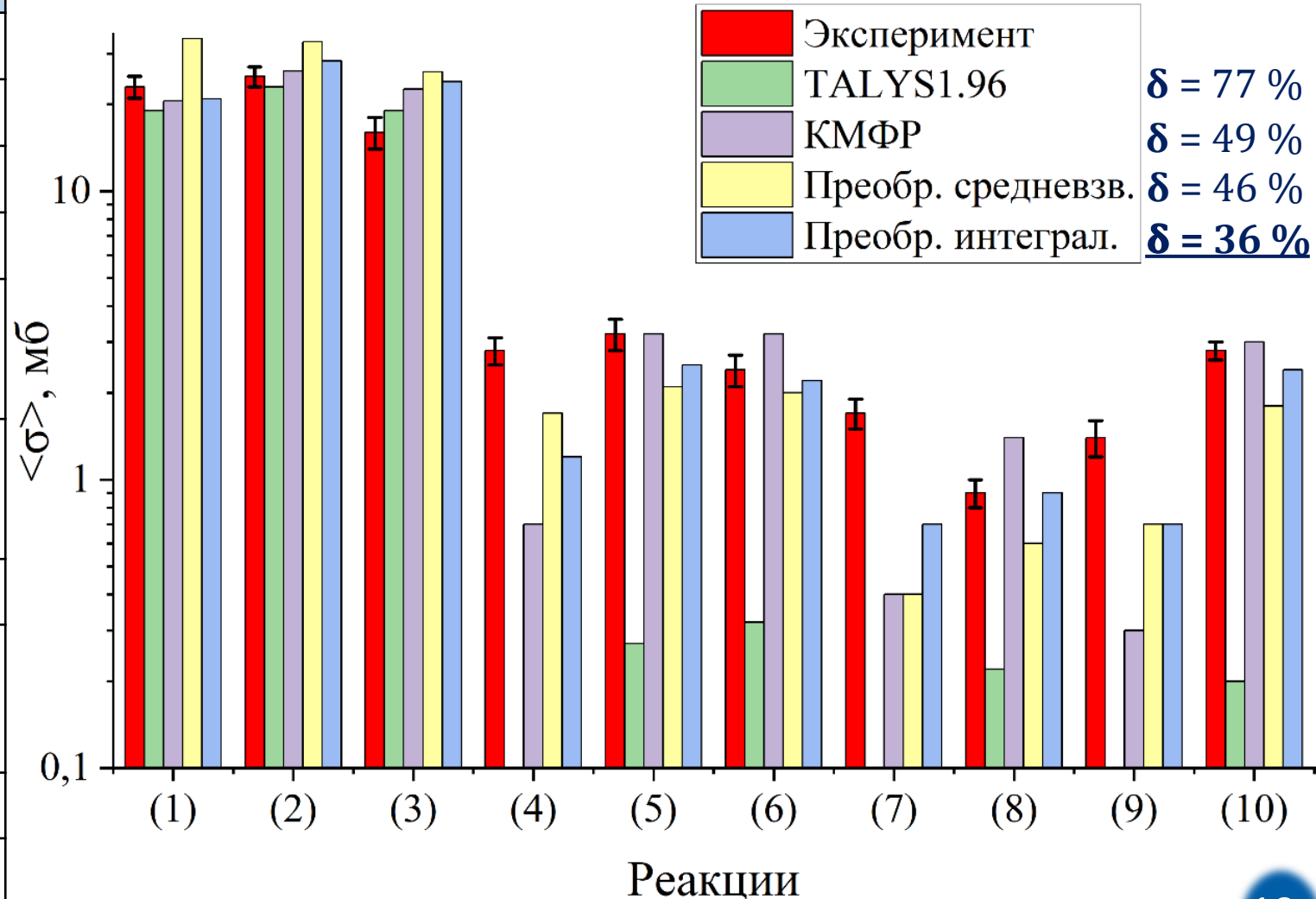
$N^{\text{стаб}} = \frac{\langle\sigma_{\text{теор}}\rangle p m F N_A}{(N + Z)} t$, где $\langle\sigma_{\text{теор}}\rangle$ – теоретическое средневзвешенное сечение:

$$\langle\sigma_{\text{теор}}\rangle = \frac{\sum \sigma_i \varphi_i(E_{\text{пор}}; E_{\text{гр}})}{\sum \varphi_i(E_{\text{пор}}; E_{\text{гр}})}$$

Экспериментальные результаты и их обсуждение

N	Реакция, энергия	Энергия, МэВ	$\langle \sigma_{\text{эксп}} \rangle$, мб
(1)	$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91m}\text{Nb}$	20	23 ± 2
(2)	$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91m}\text{Nb}$	40	25 ± 2
(3)	$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91m}\text{Nb}$	55	16 ± 2
(4)	$^{96}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{95}\text{Nb}$	20	2.8 ± 0.3
(5)	$^{96}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{95}\text{Nb} +$ $^{97}\text{Mo}(\gamma, 1p1n)^{95}\text{Nb}$	40	3.2 ± 0.4
(6)	$^{96}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{95}\text{Nb} +$ $^{97}\text{Mo}(\gamma, 1p1n)^{95}\text{Nb}$	55	2.4 ± 0.3
(7)	$^{97}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{96}\text{Nb}$	20	1.7 ± 0.2
(8)	$^{97}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{96}\text{Nb} +$ $^{98}\text{Mo}(\gamma, 1p1n)^{96}\text{Nb}$	55	0.9 ± 0.1
(9)	$^{98}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{97}\text{Nb}$	20	1.4 ± 0.2
(10)	$^{98}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{97}\text{Nb}$	55	2.8 ± 0.2

Реакции ($\gamma, 1p$)



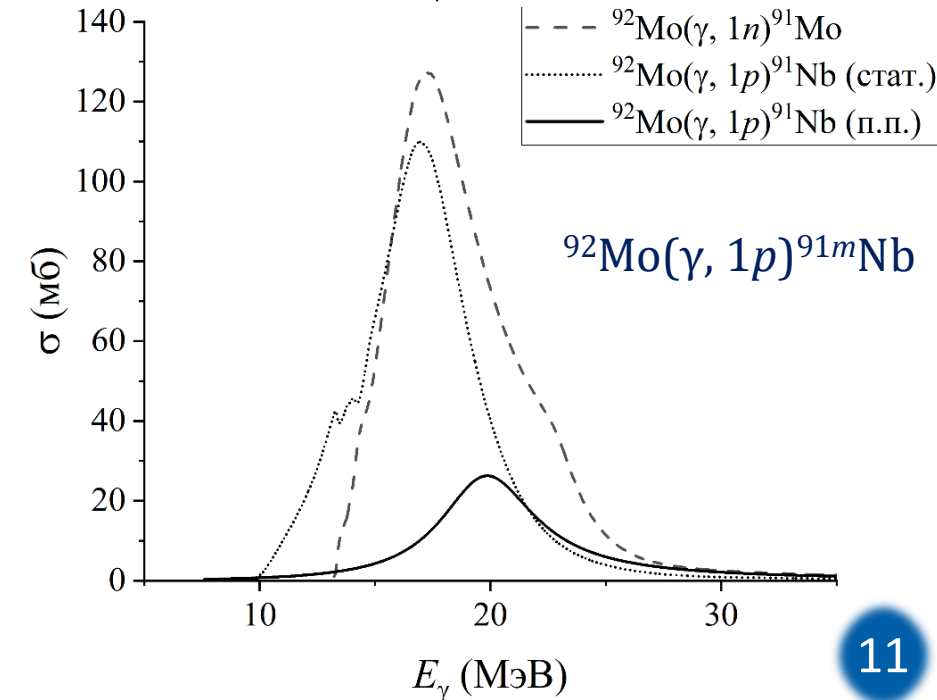
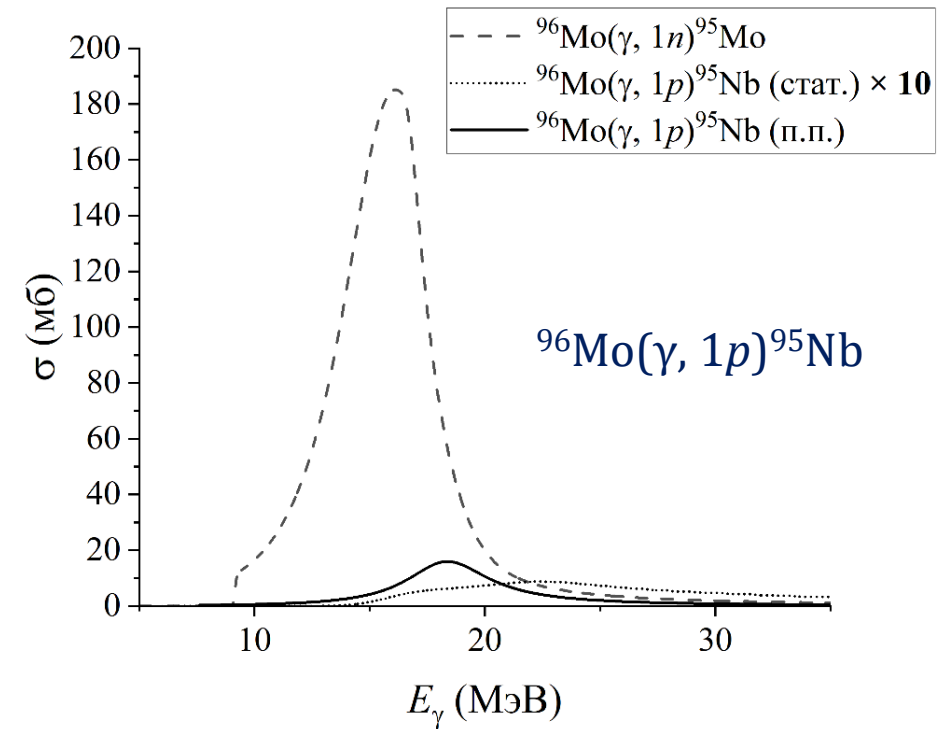
Реакции $(\gamma, 1p)$. Обсуждение

Ядра $^{96,97,98}\text{Mo}$:

- Сечения реакций $(\gamma, 1p)$ в области ГДР, рассчитанные согласно статистической модели, **значительно занижены** по сравнению с экспериментальными.
- **Интерпретация:** статистическая модель недооценивает выход неравновесных протонов из состояния $T_>$.

Ядро ^{92}Mo :

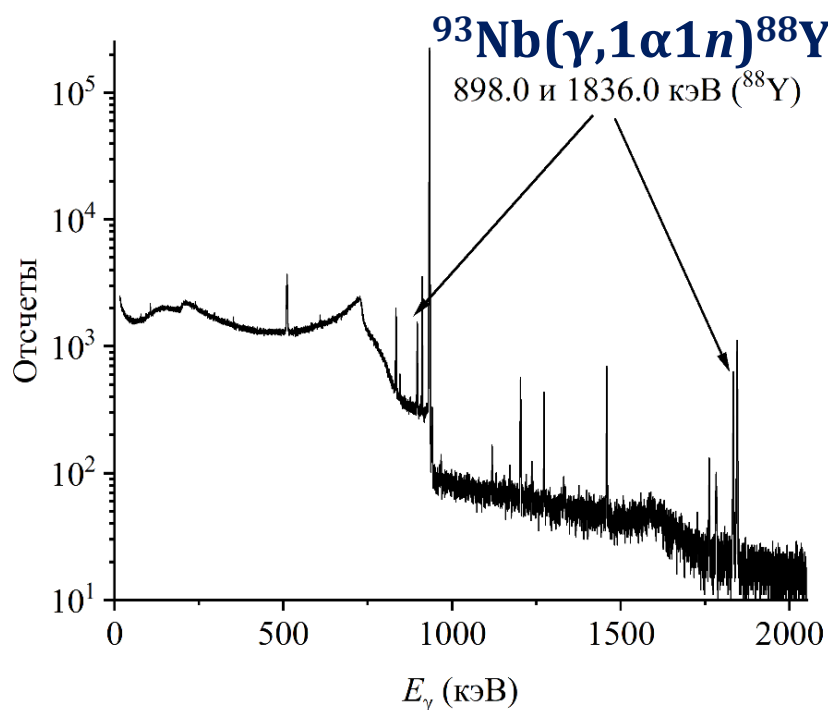
- Среди стабильных изотопов молибдена оно обладает наименьшим N . Энергия отделения нейтрона ~ 13 МэВ, а энергия отделения протона **7.5 МэВ**.
- Выход протонов «аномально» высок, но достаточно **точно описывается статистической моделью** распада возбужденного ядра.
- Изоспиновое расщепление ГДР, вероятно, имеет место. Но в данном случае абсолютный **выход неравновесных фотопротонов** из состояния $T_>$ мал по сравнению с выходом испарительных фотопротонов.



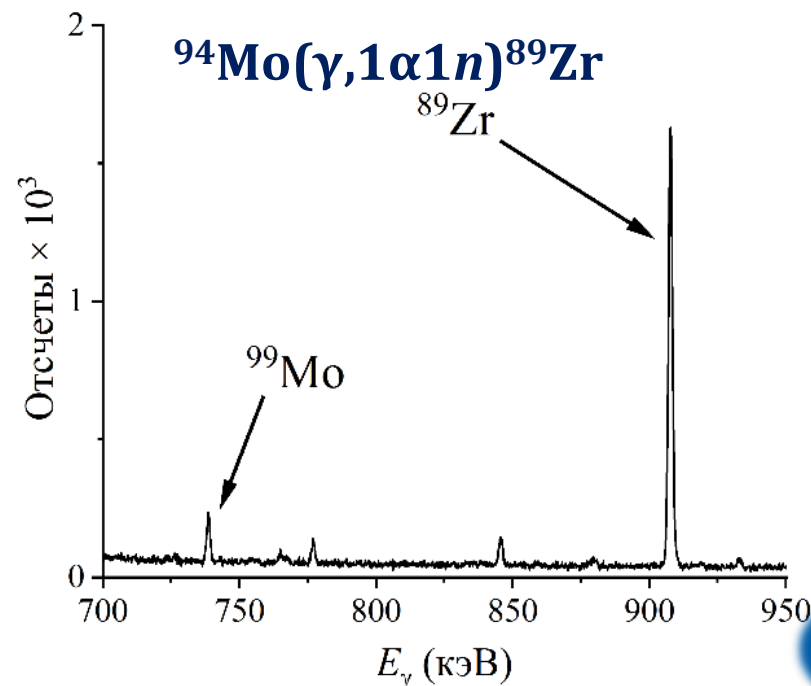
Реакции $(\gamma, 1\alpha Xn)$ при энергии 20 МэВ

Реакция	$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha)$ ^{88}Zr	$^{94}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)$ ^{89}Zr	$^{100}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)$ ^{95}Zr	$^{93}\text{Nb}(\gamma, 1\alpha 1n)$ ^{88}Y	$^{90}\text{Zr}(\gamma, 1\alpha 1n)$ ^{85}Sr	$^{91}\text{Zr}(\gamma, 1\alpha)$ $^{87\text{m}}\text{Sr}$	$^{96}\text{Zr}(\gamma, 1\alpha)$ ^{92}Sr	$^{96}\text{Zr}(\gamma, 1\alpha 1n)$ ^{91}Sr
$E_{\text{пор}} + B_{\text{кул}}$ МэВ	~ 23	~ 32	~ 28	~ 30	~ 35	~ 22	~ 21	~ 30
$\langle \sigma_{\text{эксп}} \rangle$, мб (стат.)	0.09 ±0.01 (0.05)	1.01 ±0.07 (0)	0.05 ±0.01 (0)	1.01 ±0.07 (0)	0.03 ±0.01 (0)	0.007 ±0.001 (0.001)	0.006 ±0.001 (0.001)	0.015 ±0.005 (0)

Спектр γ -излучения облученной мишени $^{\text{nat}}\text{Nb}$:

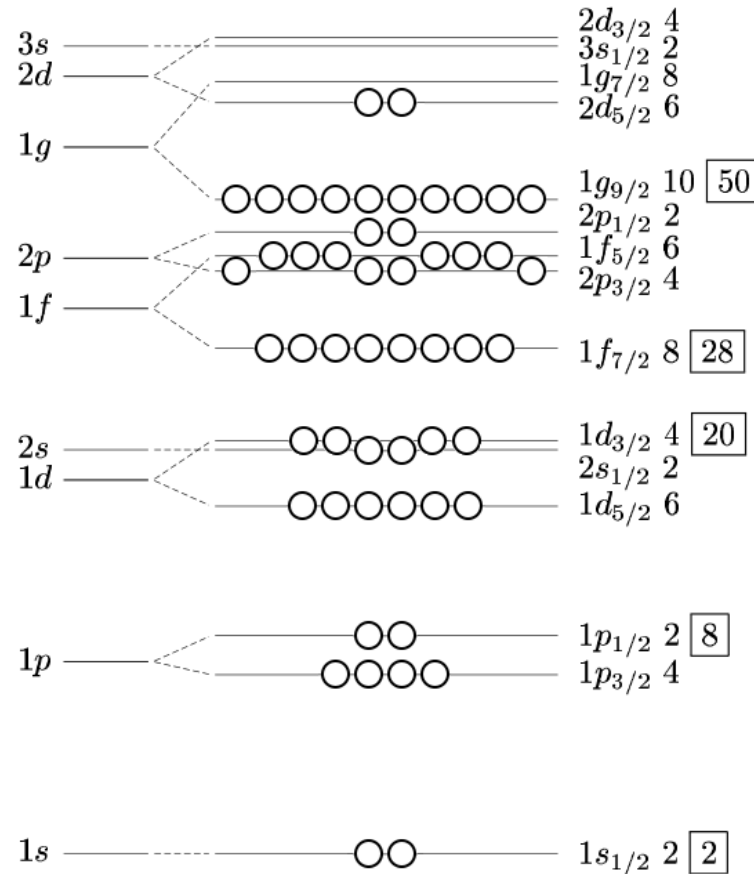


Спектр γ -излучения облученной мишени ^{94}Mo (обогащ. 98 %)

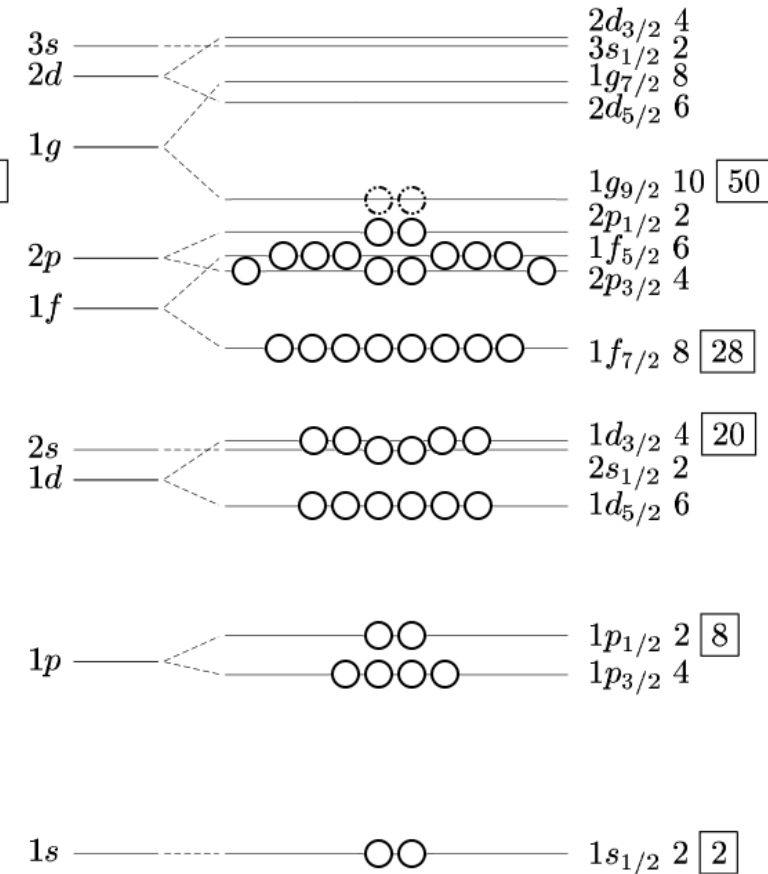


Реакции $(\gamma, 1\alpha Xn)$ в области ГДР. Обсуждение

- Реакции происходят в области ГДР, несмотря на существование кулоновского барьера
- Сечения реакций $(\gamma, 1\alpha 1n)$ на ядрах ^{94}Mo и ^{93}Nb на 1 – 2 порядка выше, чем на других исследованных ядрах (см. нейтронную структуру)
- Сечения реакций $(\gamma, 1\alpha Xn)$ на ядрах молибдена ($Z = 42$) выше, чем на ядрах циркония ($Z = 40$) (см. протонную структуру)



Нейтронная оболочка ядер ^{94}Mo и ^{93}Nb ($N = 52$)



Протонная оболочка ядер молибдена ($Z = 42$)

Реакции $(\gamma, 1\alpha Xn)$ при энергиях 40 и 55 МэВ

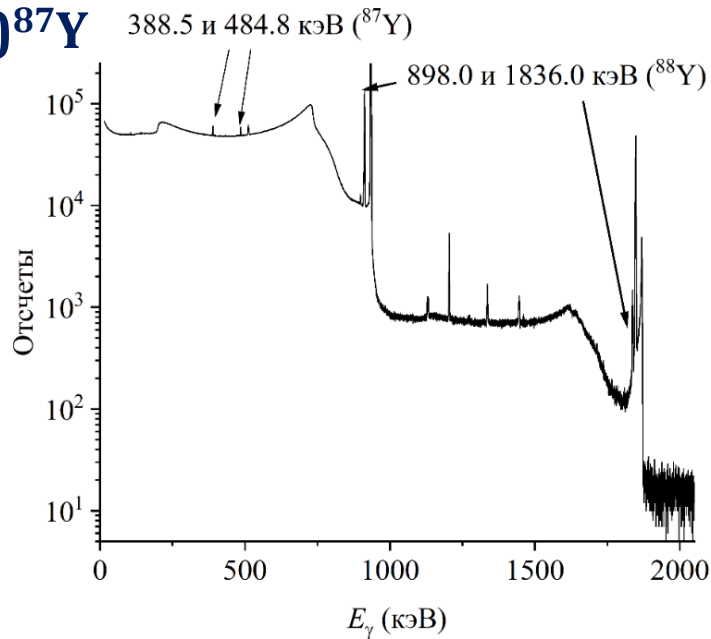
40 МэВ:

Реакция	$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha)^{88}\text{Zr}$	$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)^{87}\text{Zr}$	$^{94}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)^{89}\text{Zr} +$ $^{95}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 2n)^{89}\text{Zr}$	$^{100}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)^{95}\text{Zr}$	$^{93}\text{Nb}(\gamma, 1\alpha 1n)^{88}\text{Y}$	$^{93}\text{Nb}(\gamma, 1\alpha 2n)^{87}\text{Y}$
$\langle \sigma_{\text{эксп}} \rangle$, мб (стат.)	0.21 ± 0.02 (0.17)	0.14 ± 0.03 (0.03)	0.27 ± 0.02 (0.04)	0.022 ± 0.003 (0.006)	0.24 ± 0.02 (0.05)	0.18 ± 0.02 (0.005)

55 МэВ:

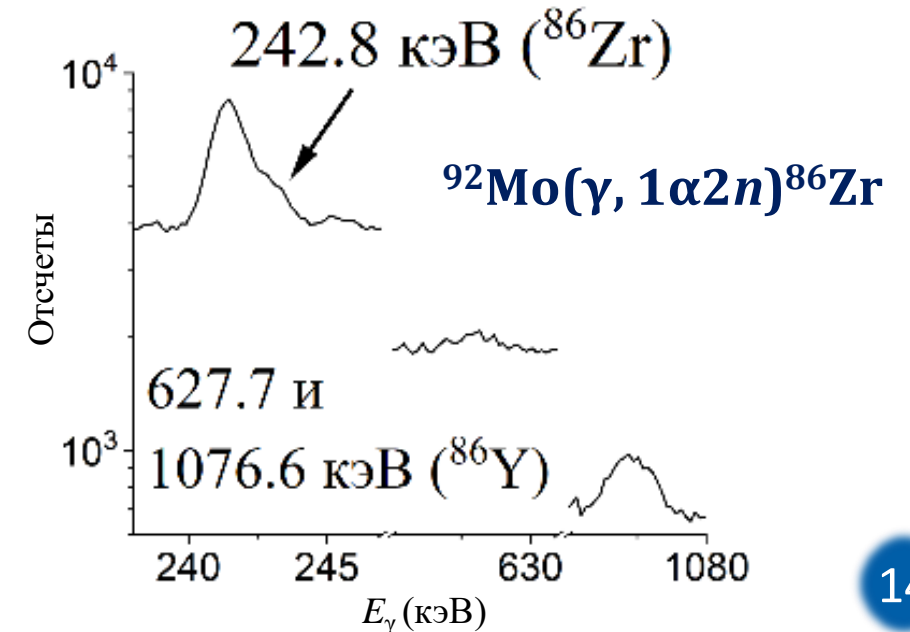
Реакция	$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha)^{88}\text{Zr}$	$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)^{87}\text{Zr}$	$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 2n)^{86}\text{Zr}$	$^{94}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)^{89}\text{Zr} +$ $^{95}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 2n)^{89}\text{Zr}$
$\langle \sigma_{\text{эксп}} \rangle$, мб (стат.)	0.21 ± 0.02 (0.17)	0.25 ± 0.05 (0.05)	0.05 ± 0.01 (0.03)	0.19 ± 0.04 (0.08)

$^{93}\text{Nb}(\gamma, 1\alpha 2n)^{87}\text{Y}$



Спектр γ -излучения облученной мишени $^{\text{nat}}\text{Nb}$ (40 МэВ):

Спектр γ -излучения облученной мишени $^{\text{nat}}\text{Mo}$ (55 МэВ):



Ядро ^{92}Mo . Обсуждение

Реакции ($\gamma, 1pXn$)

Реакция	E_e	$\langle\sigma_{\text{эксп}}\rangle$, мб	$\langle\sigma_{\text{стат}}\rangle$, мб
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91m}\text{Nb}$	20 МэВ	23±2	19
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91m}\text{Nb}$	40 МэВ	25±2	23
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91m}\text{Nb}$	55 МэВ	16±2	19
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p1n)^{90}\text{Nb}$	55 МэВ	3.5±0.6	5.9
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p2n)^{89g}\text{Nb}$ + $^{92}\text{Mo}(\gamma, 3n)^{89}\text{Mo} \rightarrow$ ^{89g}Nb	55 МэВ	2.4±0.2	1.9
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p2n)^{89m}\text{Nb}$	55 МэВ	1.0±0.1	0.7

Реакции ($\gamma, 1\alpha Xn$)

Реакция	E_e	$\langle\sigma_{\text{эксп}}\rangle$, мб	$\langle\sigma_{\text{стат}}\rangle$, мб
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha)^{88}\text{Zr}$	20 МэВ	0.09±0.01	0.05
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha)^{88}\text{Zr}$	40 МэВ	0.21±0.02	0.17
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha)^{88}\text{Zr}$	55 МэВ	0.21±0.02	0.17
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)^{87}\text{Zr}$	40 МэВ	0.14±0.03	0.03
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)^{87}\text{Zr}$	55 МэВ	0.25±0.05	0.05
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 2n)^{86}\text{Zr}$	55 МэВ	0.05±0.01	0.03

Анализ способов наработки ^{89}Zr на ускорителях электронов

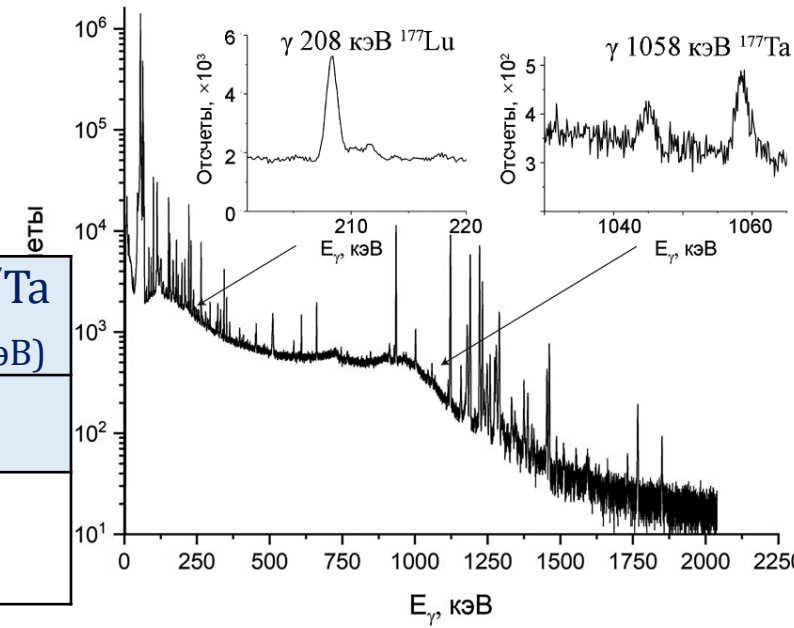
Реакция	Мишень	E_e	$Y \left(\frac{\text{кБк}}{\text{мкАч}\times\text{г}} \right) / A_{\text{уд}}^{\text{нас}} \left(\frac{\text{кБк}}{\text{мкА}\times\text{г}} \right)$	Время для достижения 37 МБк* ^{89}Zr ($m = 5 \text{ г}, I = 0.4 \text{ мА}$)	Изотопная чистота ^{89}Zr **	Радио-нуклидная чистота ^{89}Zr **	Примеси
$^{94}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)^{89}\text{Zr}$	$^{\text{nat}}\text{Mo}$	20 МэВ	0.73 ± 0.04	~ 25 ч	< 20 %	~ 94 %	$^{88}\text{Zr}, ^{90}\text{Zr}, ^{91}\text{Zr}, \dots$
$^{94}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)^{89}\text{Zr}$	99% ^{94}Mo	20 МэВ	8.1 ± 0.5	~ 2.3 ч	< 60 %	99.9 %	^{90}Zr
$^{94}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)^{89}\text{Zr} + ^{95}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 2n)^{89}\text{Zr}$	$^{\text{nat}}\text{Mo}$	55 МэВ	70 ± 4	~ 15 мин	< 10 %	~ 90 %	$^{88}\text{Zr}, ^{90}\text{Zr}, ^{91}\text{Zr}, \dots$
$^{94}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 1n)^{89}\text{Zr} + ^{95}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha 2n)^{89}\text{Zr}$	36% ^{94}Mo , 63% ^{95}Mo	55 МэВ	280 ± 15	~ 4 мин	< 33 %	99 %	$^{90}\text{Zr}, ^{91}\text{Zr}, ^{88}\text{Zr}$
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p 2n)^{89m}\text{Nb} + ^{92}\text{Mo}(\gamma, X)^{89g}\text{Nb} \rightarrow ^{89}\text{Zr}$	$^{\text{nat}}\text{Mo}$	55 МэВ	$(8.5 \pm 0.5) \times 10^3$ $(18.0 \pm 0.9) \times 10^3$	~ 30 мин облучение + 30 мин охлаждение	~ 90 %	99.9 %	^{90}Zr



* 37 МБк – минимальная диагностическая активность ^{89}Zr
 ** после химического выделения

Анализ способов наработки ^{177}Lu на ускорителях электронов

Реакция	$^{178}\text{Hf}(\gamma, 1p)^{177}\text{Lu}$	$^{181}\text{Ta}(\gamma, 1\alpha)^{177}\text{Lu}$	$^{181}\text{Ta}(\gamma, 1\alpha)^{177}\text{Lu}$	$^{181}\text{Ta}(\gamma, 4n)^{177}\text{Lu}$ (вклад в γ 208 кэВ)
E_e	55 МэВ	37 МэВ	55 МэВ	55 МэВ
$\langle \sigma_{\text{ЭКСП}} \rangle$, МКБ (теор.)	800±40 (50+710: $T_{<}+T_{>}$)	13.8±1.4 (0.001)	3.4±0.14 (0.007)	6.5±0.6 (8.9)



$$Y(^{177}\text{Lu}) = 200 \frac{\text{кБк}}{\text{мкАч} \times \text{г}}$$

При $m(^{178}\text{Hf}) = 100 \text{ г}$, $I = 0.1 \text{ мА}$, $t = 1 \text{ ч}$:

$$A(^{177}\text{Lu}) = 2 \text{ ГБк}$$

$A(^{177}\text{Lu})$ в медицине от 3,6 ГБк

Изомерное отношение $^{177m/g}\text{Lu}$ равно 0.0055 ± 0.0011

Оценено, что одновременно с ^{177}Lu образуется не более 0.3 % ^{175}Lu и не более 1% ^{176}Lu

^{176}Ta 8.08 h $\epsilon+\beta+=100\%$	^{177}Ta 56.56 h $\epsilon+\beta+=100\%$	^{178}Ta 2.41 h $\epsilon+\beta+=100\%$	^{179}Ta 1.815 y $\epsilon=100\%$	^{180}Ta 8.154 h 0.01201% $\epsilon=85\%$ $\beta^-=15\%$	^{181}Ta STABLE 99.98799%
^{175}Hf 70.67 d $\epsilon=100\%$	^{176}Hf STABLE 5.26%	^{177}Hf STABLE 18.6%	^{178}Hf STABLE 27.28%	^{179}Hf STABLE 13.62%	^{180}Hf STABLE 35.08%
^{174}Lu 3.31 y $\epsilon+\beta+=100\%$	^{175}Lu STABLE 97.401%	^{176}Lu 3.71e+10 y 2.599% $\beta^-=100\%$	^{177}Lu 6.65 d $\beta^-=100\%$	^{178}Lu 28.4 min $\beta^-=100\%$	^{179}Lu 4.59 h $\beta^-=100\%$

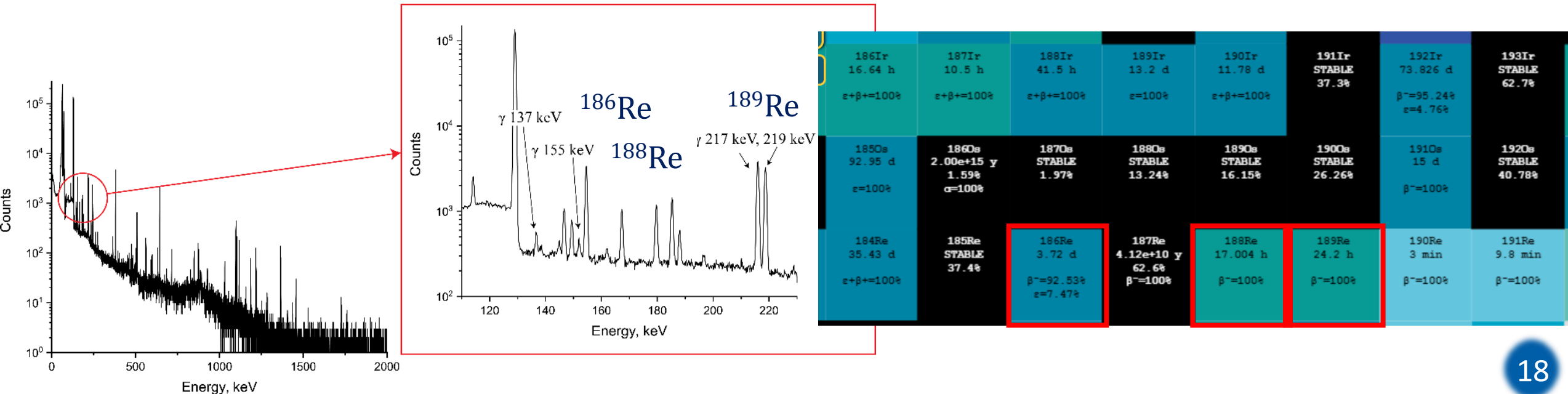
Анализ способов наработки $^{186,188,189}\text{Re}$ на ускорителях электронов (55 МэВ)

Реакции	Продукт	$\langle \sigma_{\text{эксп}} \rangle$, мб	$\langle \sigma_{\text{TALYS}} \rangle$, мб	$\langle \sigma_{\text{изосп.}} \rangle$, мб
$^{187}\text{Os}(\gamma, 1p) + ^{188}\text{Os}(\gamma, 1p1n) + ^{189}\text{Os}(\gamma, 1p2n) + ^{190}\text{Os}(\gamma, 1p3n)$ вклад $(\gamma, 1p) < 5\%$	^{186}Re	0.082 ± 0.008	0.064	–
$^{189}\text{Os}(\gamma, 1p) + ^{190}\text{Os}(\gamma, 1p1n) + ^{192}\text{Os}(\gamma, 1p3n)$ вклад $(\gamma, 1p) \sim 25\%$	^{188}Re	0.24 ± 0.02	0.16	–
$^{190}\text{Os}(\gamma, 1p) + ^{192}\text{Os}(\gamma, 1p2n)$ вклад $(\gamma, 1p) \sim 80\%$	^{189}Re	0.88 ± 0.09	0.13	0.65

$m(\text{Os}) = 10$ г, $I = 0.1$ мА,

$A(^{186}\text{Re}$ или $^{188}\text{Re}) = 3$ ГБк,

$t = 7$ или 2 ч



Работа поддержана грантами:

- **РФФИ № 20-32-90124** «Получение циркония-89 с помощью ускорителей электронов»
- **РНФ № 22-22-20119** «Исследование возможности получения медицинского изотопа лютеция-177 с помощью ускорителей электронов»
- **РНФ № 24-25-00249** «Исследование фотоядерных реакций с вылетом заряженных частиц на осмии и иридии»

По направлению опубликовано 20+ статей (с учетом переводных)



Спасибо за внимание

Реакция $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p2n)^{89}\text{Nb} \rightarrow ^{89}\text{Zr}$

Активность ^{89}Zr , образующегося из ^{89}Nb :

$$A_{89\text{Zr}} = \sum_{i=1;2} A_{\text{уд}}^{\text{нас}}(i) mI (1 - e^{-\lambda_i t_{\text{обл}}}) \frac{\lambda_{89\text{Zr}}}{\lambda_{89\text{Zr}} - \lambda_i} (e^{-\lambda_i t_{\text{охл}}} - e^{-\lambda_{89\text{Zr}} t_{\text{охл}}})$$

, где $A_{\text{уд}}^{\text{нас}}(i) = \begin{matrix} (8.5 \pm 0.5) \times 10^3 \frac{\text{кБк}}{\text{мкА} \times \text{г}} & (^{89m}\text{Nb}) \\ (18.0 \pm 0.9) \times 10^3 \frac{\text{кБк}}{\text{мкА} \times \text{г}} & (^{89g}\text{Nb}) \end{matrix}$

Количество ^{90}Zr , образующегося из ^{90}Nb :

$$N_{90\text{Zr}} = \frac{Y_{90\text{Nb}} mI t_{\text{обл}}}{\lambda_{90\text{Nb}}} (1 - e^{-\lambda_{90\text{Nb}} t_{\text{охл}}}) \quad , \text{ где } Y_{90\text{Nb}} = (3.0 \pm 0.2) \times 10^6 \frac{\text{кБк}}{\text{мкА} \times \text{г}}$$

Основные преимущества предлагаемого метода:

- сравнительная простота ускорителей электронов \longrightarrow доступность и снижение стоимости наработки
- t может быть порядка 10^{1-2} г и более \longrightarrow масштабирование производства
- использование необогащенной мишени \longrightarrow нет необходимости в сложной процедуре обогащения

Апробация результатов

1. **Remizov P.D.**, Zheltonozhskaya M.V., Chernyaev A.P., et. al. Measurements of the flux-weighted yields for (γ , α Xn) reactions on molybdenum and niobium // European Physical Journal A. 2023. Vol. 59, no. 141. (**Q1**, SJR 0.97)
2. Zheltonozhskaya M.V., **Remizov P.D.**, Chernyaev A.P. Study of Photonuclear Reactions with the Alpha Particles' Emission on Zirconium, Niobium, and Molybdenum // Applied Radiation and Isotopes. 2023. Vol. 199, no. 110871. (**Q3**, SJR 0.42)
3. **Ремизов П.Д.**, Желтоножская М.В., Черняев А.П. и др. Фотопротонные реакции на молибдене // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2023. Т. 87, №8. С. 1092–1098.
Remizov P.D., Zheltonozhskaya M.V., Chernyaev A.P. et al. Photoproton reactions on molybdenum // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023. Vol. 87, no.8. P. 1112–1117. (**Q3**, SJR 0.21)
4. Желтоножский В. А., Желтоножская М. В., **Ремизов П. Д.** и др. Исследование реакций с вылетом протонов на ^{179}Hf , ^{180}Hf // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2022. Т. 86, № 9. С. 1305–1309. V. A. Zheltonozhskiy, M. V. Zheltonozhskaya, P. D. Remizov et al. Study of reactions with the emission of protons on ^{179}Hf , ^{180}Hf // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. Vol. 86, no. 9. P. 1309–1314. (**Q3**, SJR 0.21)
5. **Ремизов П. Д.**, Желтоножская М. В., Черняев А. П. и др. (γ , pxn)-реакции на естественном молибдене // Ядерная физика. 2023. Т. 86, № 1. С. 99–103.
P. D. Remizov, M. V. Zheltonozhskaya, A. P. Chernyaev et al. (γ , pxn) reactions on natural molybdenum // Physics of Atomic Nuclei. 2022. Vol. 85, no. 6. P. 818–822. (**Q3**, SJR 0.24)
6. **Ремизов П. Д.** Современные медицинские радионуклиды для иммуно-ПЭТ // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67, № 3. С. 67–74.
Remizov P. D. Novel Immuno-PET Medical Radionuclides // Medical Radiology and Radiation Safety. 2022. Vol. 67, No. 3. P. 67–74. (**Q4**, SJR 0.16)

Основные результаты и положения диссертации докладывались автором и обсуждались на **16** международных и всероссийских научных конференциях.

Работа поддержана грантом РФФИ №20-32-90124

88Mo	89Mo	90Mo	91Mo	92Mo	93Mo	94Mo	95Mo	96Mo	97Mo	98Mo	99Mo	100Mo
87Nb	88Nb	89Nb	90Nb	91Nb	92Nb	93Nb	94Nb	95Nb	96Nb	97Nb	98Nb	99Nb
86Zr	87Zr	88Zr	89Zr	90Zr	91Zr	92Zr	93Zr	94Zr	95Zr	96Zr	97Zr	98Zr
85Y	86Y	87Y	88Y	89Y	90Y	91Y	92Y	93Y	94Y	95Y	96Y	97Y
84Sr	85Sr	86Sr	87Sr	88Sr	89Sr	90Sr	91Sr	92Sr	93Sr	94Sr	95Sr	96Sr