

Измерение фотонейтронных сечений на установке NewSUBARU

К. А. Стопани

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына

3 октября 2017 г.

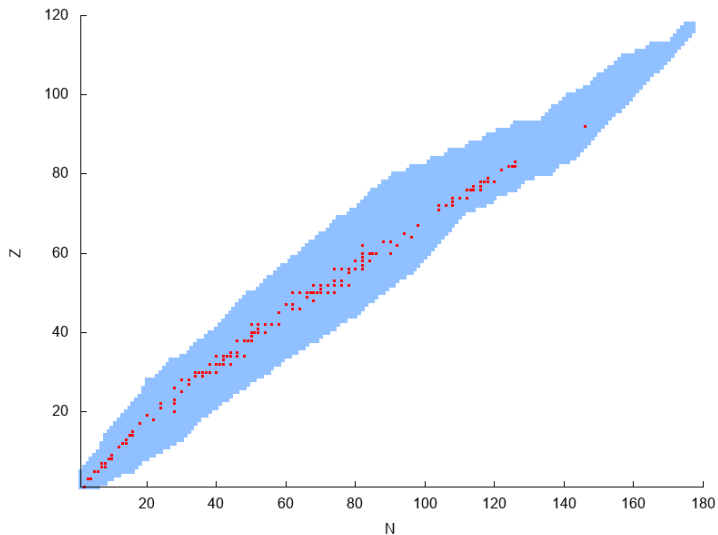
Введение

- ▶ Фотоядерные реакции в области энергий ГДР (от B_N до 35–45 МэВ)
- ▶ Поверхностное возбуждение → когерентное состояние → термализация → отделение частиц
- ▶ Фотоядерные данные востребованы и за пределами ядерной физики, практически в любых научных и прикладных разработках при энергиях выше ≈ 10 –15 МэВ.
- ▶ Астрофизика при $T > 1$ ГК: фотодиссоциация в (γ, n) , (γ, p) , (γ, α) и, возможно, других реакциях.
- ▶ Радиомедицина, планирование доз.
- ▶ Энергетика, ADS, ускоренная трансмутация отходов в пучках ускорителей.
- ▶ Неразрушающая инспекция и контроль.

Системный эффект доступности полных и достоверных фотоядерных данных.

Библиотечные сечения фотоядерных реакций в области ИВГДР

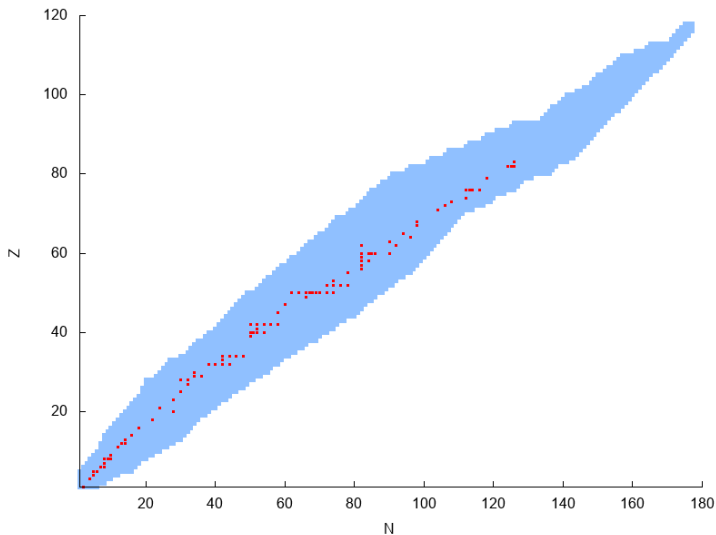
Реакция $(\gamma, 1n)$



(БД EXFOR, более 10 точек в области 14—20 МэВ)

Библиотечные сечения фотоядерных реакций в области ИВГДР

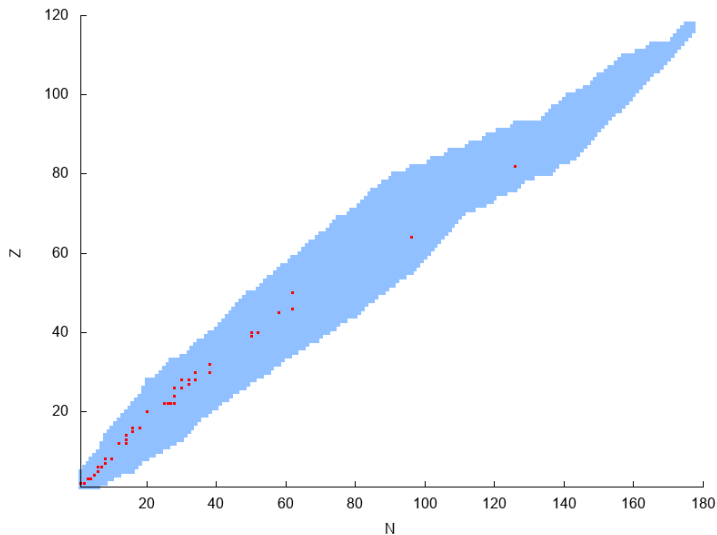
Реакция $(\gamma, 2n)$



(БД EXFOR, более 10 точек в области 14—20 МэВ)

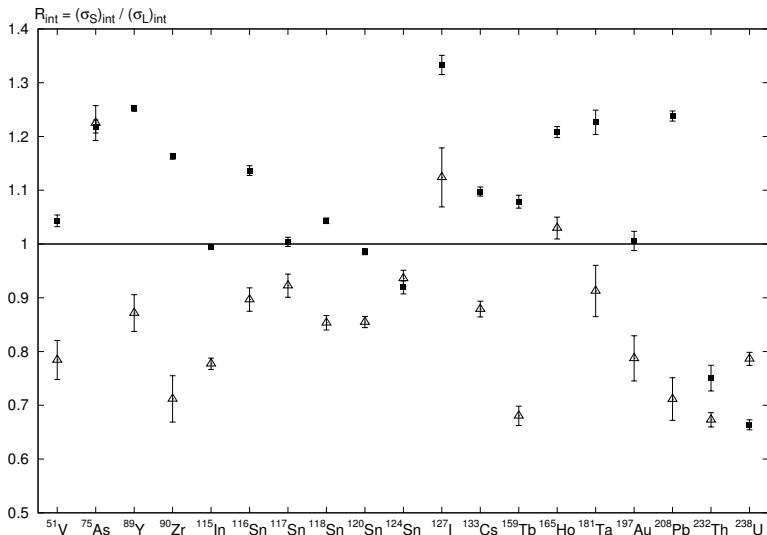
Библиотечные сечения фотоядерных реакций в области ИВГДР

Реакция $(\gamma, 1p)$



(БД EXFOR, более 10 точек в области шириной 8 МэВ)

Проблема систематических погрешностей библиотечных данных



Отношение интегральных сечений фотоядерных реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$, полученных в экспериментах независимых групп [EPJ A **50**, 114 (2014)].

Программа исследований

- ▶ Координированная программа исследований "Обновление библиотеки фотоядерных данных и разработка стандартной базы данных по силовым функциям фотовозбуждения".
- ▶ 2016—2020 гг.
- ▶ МФЯР на ${}^9\text{Be}$, ${}^{89}\text{Y}$, ${}^{103}\text{Rh}$, ${}^{133}\text{Cs}$, ${}^{139}\text{La}$, ${}^{159}\text{Tb}$, ${}^{165}\text{Ho}$, ${}^{169}\text{Tm}$, ${}^{181}\text{Ta}$, ${}^{197}\text{Au}$, ${}^{209}\text{Bi}$.
 - ▶ Измерение фотонейтронных сечений на пучке квазимонохроматических фотонов
 - ▶ Измерение интегральных сечений МФЯР методом наведенной активности
 - ▶ Оценка

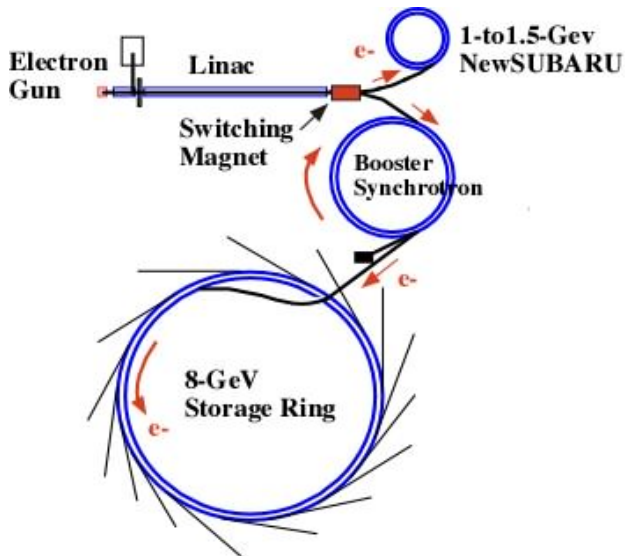
Методы измерения сечений фотоядерных реакций

- ▶ Источники фотонов
 - ▶ Тормозное излучение
 - ▶ Аннигиляция e^+
 - ▶ Обратное комптоновское рассеяние (Laser-Compton Scattering, LCS)
 - ▶ Метод меченых фотонов
- ▶ Регистрация реакций
 - ▶ Метод прямой регистрации продуктов реакций с помощью нейтронных детекторов и детекторов заряженных частиц
 - ▶ Метод наведенной активности
 - ▶ Метод поглощения

Источники фотонов на основе обратного комптоновского рассеяния

- ▶ Множество установок, но в основном в области энергий до 1 МэВ
- ▶ HIGS (США) 1—100 МэВ, $10^7 \div 10^{10}$ $\gamma/\text{с}$
- ▶ SLEGS (КНР) 2—20 МэВ, 300—550 МэВ, $10^5 \div 10^7$ $\gamma/\text{с}$, строительство
- ▶ MEGA-ray (США), 0,5—2,3 МэВ, 10^{12} $\gamma/\text{с}$
- ▶ ELI-NP (Румыния), 1—20 МэВ, 10^{13} $\gamma/\text{с}$, строительство
- ▶ РОКК-1М (Новосибирск, ИЯФ СО РАН), 100—1200 МэВ, $2 \cdot 10^6$ $\gamma/\text{с}$
- ▶ SAGA-LS (Япония), до 3,5 МэВ, 10^7 $\gamma/\text{с}$
- ▶ NewSUBARU (Япония), 1—42 МэВ, 10^6 $\gamma/\text{с}$

Накопительное кольцо NewSUBARU



NewSUBARU на схеме комплекса Spring8.

Накопительное кольцо NewSUBARU

- ▶ Для измерений используется накопительное кольцо NewSUBARU входит в состав ускорительного комплекса Spring8 (Япония)
- ▶ Номинальная энергия инжекции 1 ГэВ
- ▶ Энергия ускорения/замедления 0,5—1,5 ГэВ
- ▶ Максимальный ток электронного пучка 500 мА, среднее время жизни $\tau = 12$ ч (на практике $\tau = 3 \div 6$ ч)
- ▶ Тор-ур режим на энергии инжекции 974 МэВ
- ▶ Длина окружности 120 м, 11 выводов пучка — в основном прикладные источники синхротронного излучения

Накопительное кольцо NewSUBARU

Источник LCS фотонов

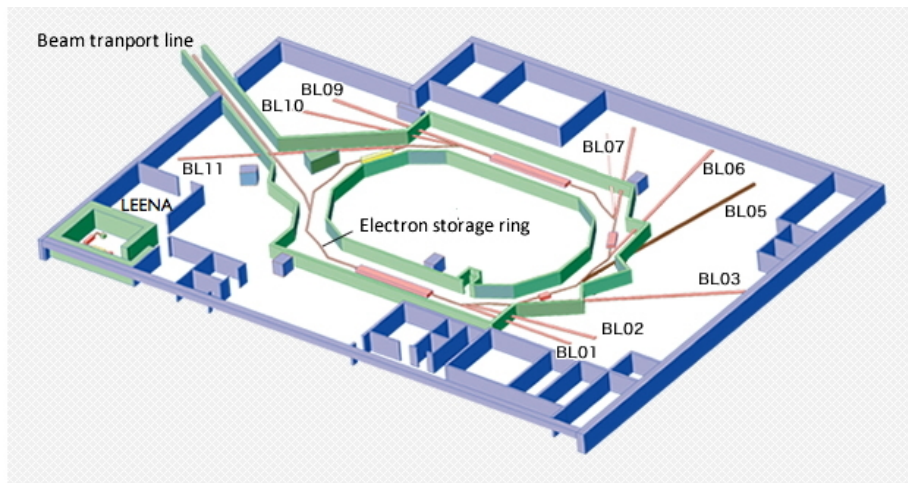
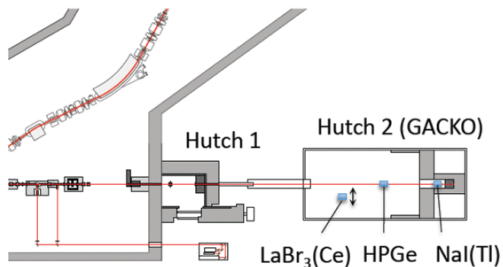
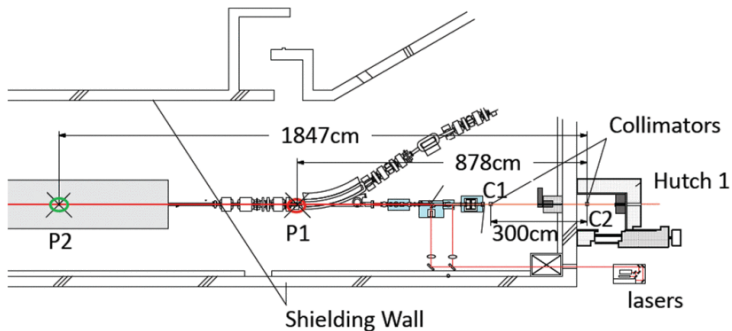


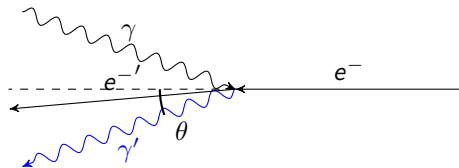
Схема выводов пучка синхротрона NewSUBARU. BL01 — точка вывода сгенерированного LCS излучения.

Источник LCS фотонов

Схема расположения лазерного оборудования и измерительной установки



Обратное комптоновское рассеяние



$$T'_\gamma = \frac{T_\gamma(1 + \beta)}{1 + \frac{T_\gamma}{T_e} - (\beta - \frac{T_\gamma}{T_e}) \cos \theta}$$

Для малых θ : $T'_\gamma \approx \frac{4\gamma^2 T_\gamma}{1 + (\gamma\theta)^2 + \frac{4\gamma^2 T_\gamma}{m_e c^2}} \rightarrow 4\gamma^2 T_\gamma$.

$$T_e = 974 \text{ МэВ}, \quad \theta = 0^\circ,$$

$$T_\gamma(1064 \text{ нм}) = 16,87 \text{ МэВ},$$

$$T_\gamma(532 \text{ нм}) = 33,16 \text{ МэВ}.$$

Спектр LCS фотонов

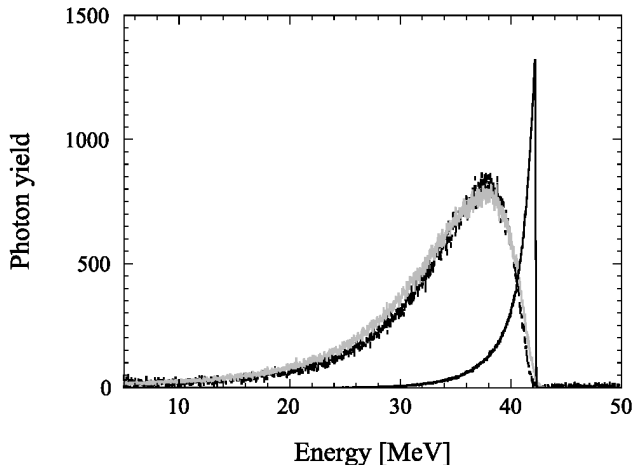
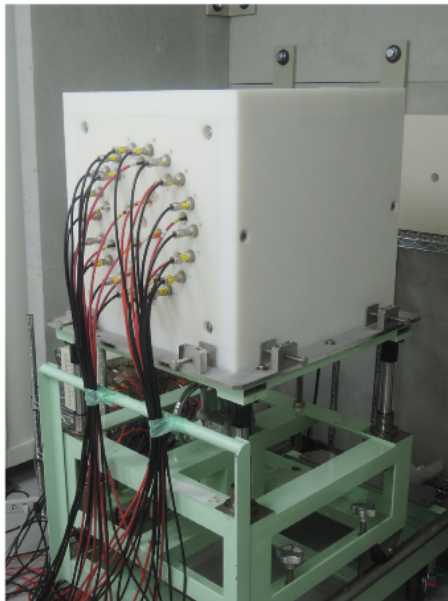


Fig. 6. Experimental response function of a $3.5'' \times 4.0''$ LaBr_3 (Ce) detector to a 42 MeV LCS γ -ray beam. A best fit to the experimental response function by the GEANT4 Monte Carlo simulation (gray line) and the resultant energy spectrum of the incident LCS γ -ray beam are also shown.

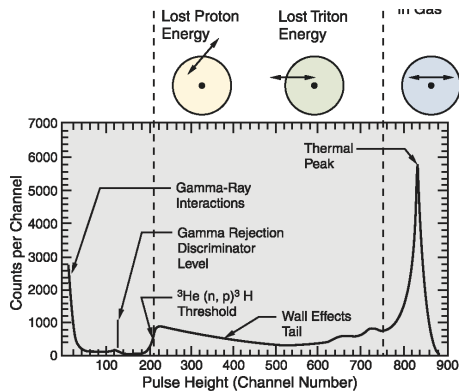
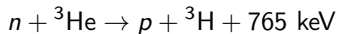
Сравнение спектра, измеренного $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ -сцинтиллятором, и моделирования на GEANT4, $\theta \approx 0,05$ мрад. Соответствующий исходный спектр налетающих γ -квантов получен путем моделирования.

Нейтронный детектор



Nucl. Instrum. and Meth. A **871**, 135 (2017).

Принцип действия: замедлитель + пропорциональные счетчики, сгруппированные в 3 кольца.



(CANBERRA datasheet)

Нейтронный детектор

Эффективность регистрации нейтронов

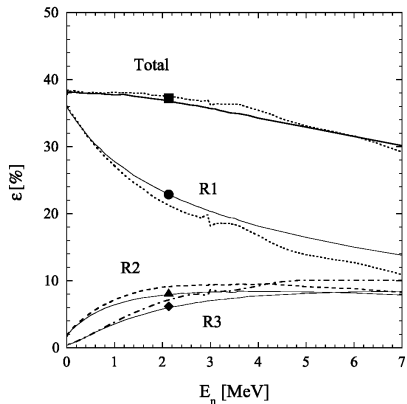
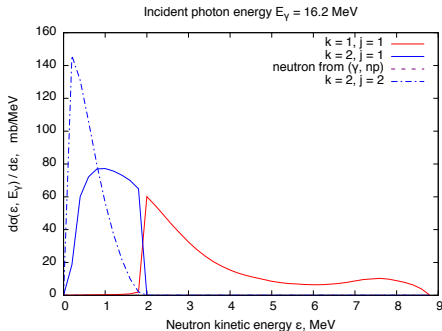


Fig. 3. The total detection efficiency and efficiencies of the individual rings of the flat-response neutron detector. Results of the calibration with a ^{252}Cf source are shown by the filled symbols. Results of the MCNP Monte Carlo simulations for monochromatic neutrons are shown by the broken lines, while those for the neutron-evaporation spectra by the solid lines.

Новый метод разделения каналов реакций с различной множественностью вместо метода кольцевых отношений.

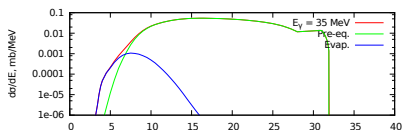
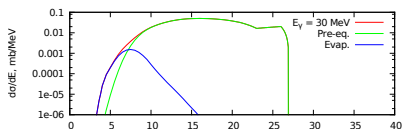
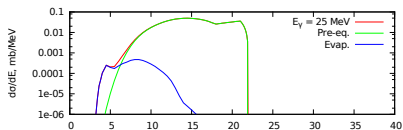
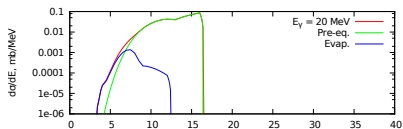
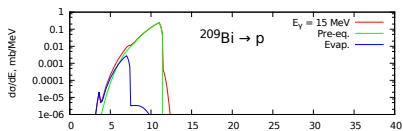
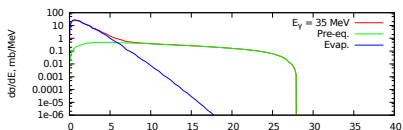
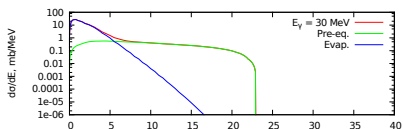
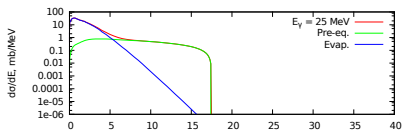
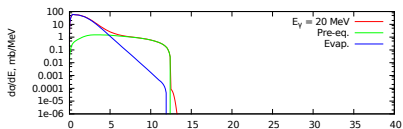
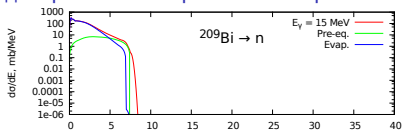


В предположении, что
а) эффективность ϵ не зависит от энергии нейтрона,
б) 1 импульс LCS фотонов вызывает не более одной реакции в мишени, число реакций (γ, xn) связано с числом совпадений N_j :

$$N_j = \sum_{x=j}^n C_j^x \epsilon^j (1 - \epsilon)^{x-j} R_x.$$

Нейтронный детектор

Моделирование нейтронных спектров в TALYS



Измерение фотонейтронных сечений

Обозначения

- ▶ Фотонейтронные сечения (вылет любого числа p подразумевается)

$$\sigma(\gamma, xn) \equiv \sigma(\gamma, xn) + \sigma(\gamma, xn1p) + \sigma(\gamma, xn2p) + \dots$$

- ▶ Сечение выхода нейтронов

$$\sigma(\gamma, Sn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots$$

- ▶ Сечение фотопоглощения

$$\sigma(\gamma, \text{abs}) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, 3n) + \dots$$

Геометрия эксперимента

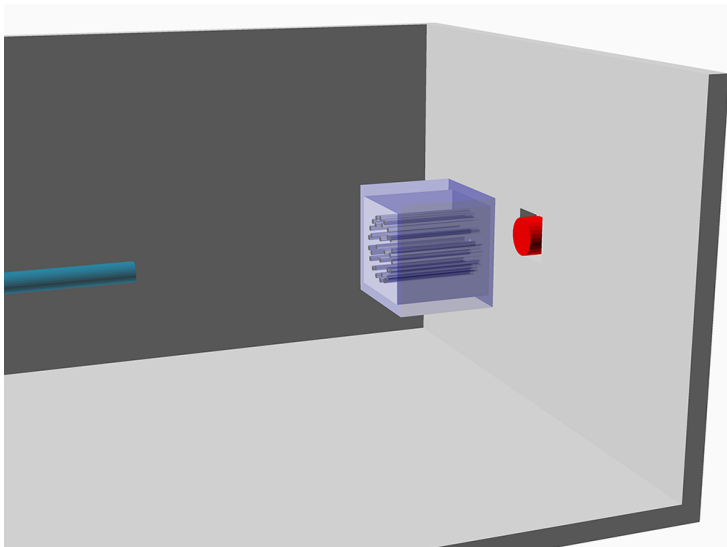
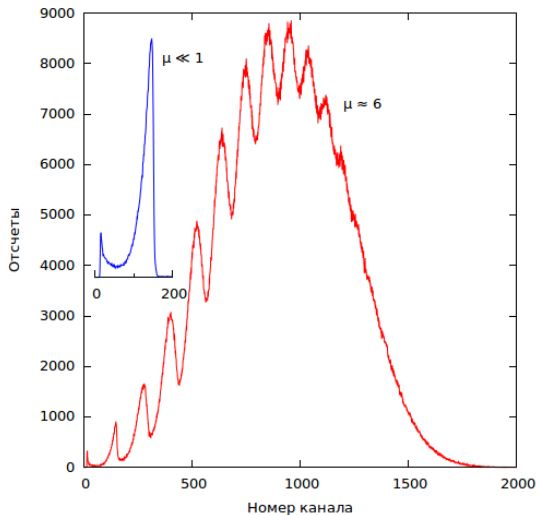


Схема расположения облучаемой мишени и детекторов в эксперименте по измерению сечений фотонейтронных реакций на пучке LCS-фотонов.

Метод определения интенсивности пучка фотонов



Длительность лазерного импульса $\tau_l = 25 \div 60$ нс, частота повторения $f_l = 0,5 \div 20$ кГц, а периодичность e^- импульсов ускорителя NewSUBARU $\tau_e = 2$ нс. Число фотонов, попадающих на мишень в течение времени одного импульса лазера подчиняется распределению Пуассона:

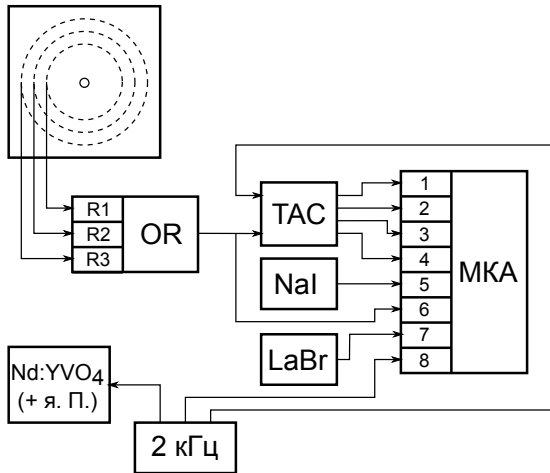
$$n \sim P(\mu).$$

Среднее число фотонов в импульсе:

$$\langle n \rangle = \frac{\langle E_{MP} \rangle}{\langle E_{SP} \rangle \epsilon_{NaI} (1 - \epsilon_{мишень})}.$$

Измерение сечений $^{209}\text{Bi}(\gamma, 1 \div 4n)$

Схема подключения измерительных приборов



- ▶ $\lambda = 1064$ нм,
 $E_e = 660\text{--}902$ МэВ,
 $E_\gamma = 7,7\text{--}14,3$ МэВ
- ▶ SHG $\lambda = 532$ нм,
 $E_e = 640\text{--}982$ МэВ,
 $E_\gamma = 14,5\text{--}40,12$ МэВ
- ▶ Время замедления нейтронов $\tau \approx 100$ мкс, минимальная частота импульсов лазера $f = 16$ кГц уменьшена с помощью ячейки Поккельса до 2 кГц.
 $\tau_{\text{laser}} = 480$ мкс.
- ▶ Мишень ^{209}Bi , $h = 4$ мм.

Измерение сечений $^{209}\text{Bi}(\gamma, 1 \div 4n)$

Структура интенсивности пучка фотонов

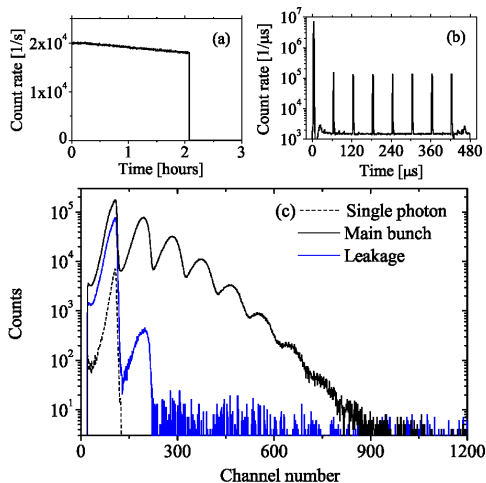
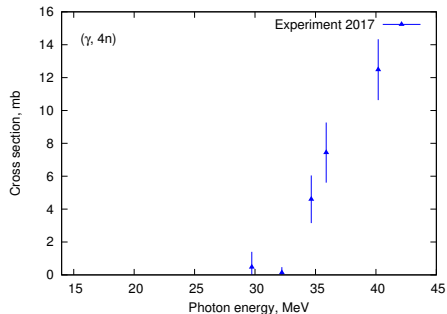
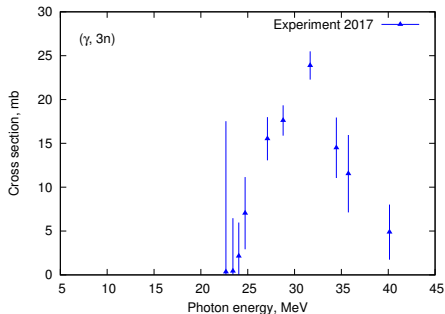
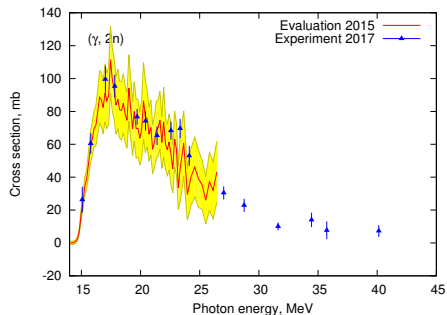
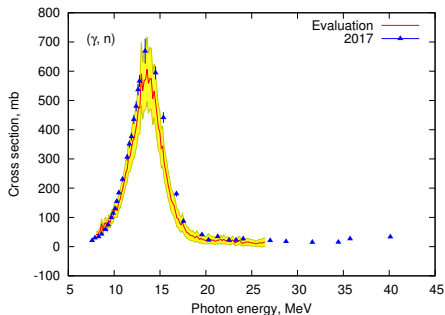


FIG. 4. (Color online) Time and energy spectra of incident 23.9 MeV LCS γ -ray beam recorded with the NaI(Tl) detector. (a) Time variation of the γ -ray count rate. (b) Time structure of the γ -ray beam relative to the preceding main γ -ray bunch. (c) Multiphoton energy spectra generated by main-bunch (solid black) and leakage (solid blue) contributions and single photon spectrum (dashed).

Измерение сечений $^{209}\text{Bi}(\gamma, 1 \div 4n)$

Полученные результаты (сечения после деконволюции) и сравнение с оценкой



*) Эксп. — [I. Gheorge et al., PRC, пр. к печ. 2017 г.], оценка — [EPJ A 51, 67 (2015)].

Измерение сечений $^{209}\text{Bi}(\gamma, 1 \div 4n)$

Сравнение с активационным экспериментом

Table 2. Comparison of the experimental yields of photonuclear reactions on ^{209}Bi with model calculations.

Reaction	$10^{10} \times \text{Yield, C}^{-1}$		
	Experiment	CMPNR	TALYS
(γ, p)		$2.58 \cdot 10^3$	66.3
$(\gamma, 2n)$	$2.3(2) \cdot 10^4$	$2.53 \cdot 10^4$	$3.01 \cdot 10^4$
$(\gamma, 3n)$	$3.1(3) \cdot 10^3$	$2.95 \cdot 10^3$	$3.11 \cdot 10^3$
$(\gamma, 4n)$	$1.02(8) \cdot 10^3$	$0.881 \cdot 10^3$	$1.10 \cdot 10^3$
$(\gamma, 4n1p)_m$	4.9(4)	0.290 ^(a)	0.328
$(\gamma, 5n)$	$2.0(2) \cdot 10^2$	$0.750 \cdot 10^2$	$2.29 \cdot 10^2$
$(\gamma, 5n1p)$	73(7)	0.421	0.0148
$(\gamma, 6n)$	7.8(7)	0.399	6.29

$2,9(6) \cdot 10^4$ (включая 2n1p, ...)
 $3,6(7) \cdot 10^3$ ("—" 3n1p, ...)
 $1,1(2) \cdot 10^3$ ("—" 4n1p, ...)

*) $|^{208}\text{Pb}\rangle \cdot |1h_{9/2}\rangle_{\pi}$

Одновременное протекание нескольких реакций за время импульса

Использование толстых мишеней на высоких интенсивностях пучка. Пример ^{197}Au .

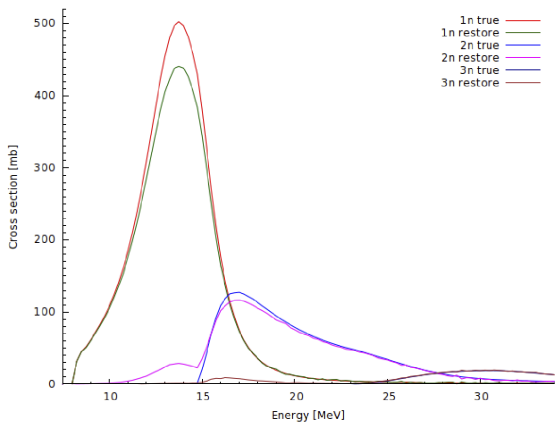
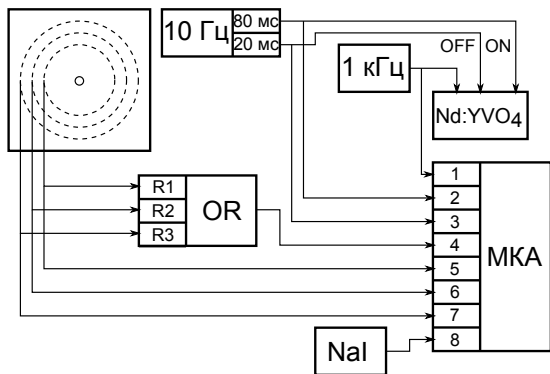


Figure 1: Cross sections of the $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ reactions on ^{197}Au (see legend). “True” curves denote TALYS-calculated cross sections used as parameters of simulation, “restore” denotes cross sections reconstructed from the simulated data with the assumption that multiple reactions do not occur.

Измерение фотонейтронных сечений на ^{89}Y , ^{169}Tm , ^{197}Au

Схема подключения измерительных приборов

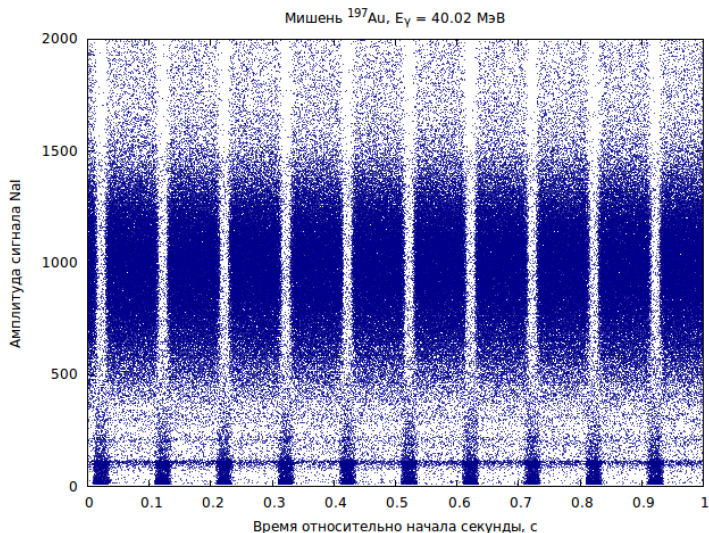


Отличия от эксперимента на ^{209}Bi :

- ▶ Только вторая гармоника лазера $\lambda = 532$ нм
- ▶ Непрерывное измерение фона с помощью генератора BEAM ON/OFF

Измерение фотонейтронных сечений на ^{89}Y , ^{169}Tm , ^{197}Au

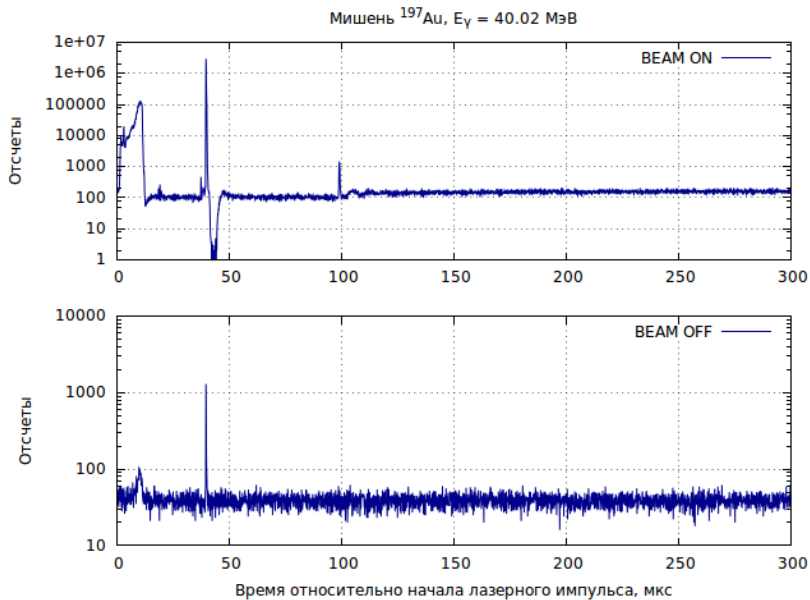
Непрерывное измерение фона в процессе набора данных



BEAM ON — 80 мс, BEAM OFF — 20 мс.

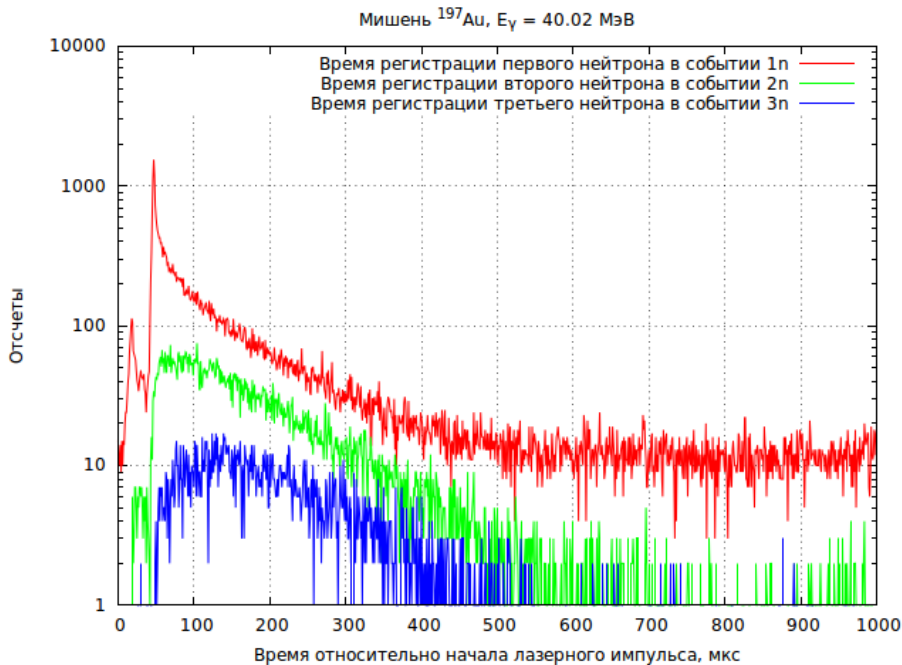
Измерение фотонейтронных сечений на ^{89}Y , ^{169}Tm , ^{197}Au

Распределение времени регистрации фотонного импульса



Измерение фотонейтронных сечений на ^{89}Y , ^{169}Tm , ^{197}Au

Распределение времени регистрации нейтронов



Модель времени регистрации нейтронов

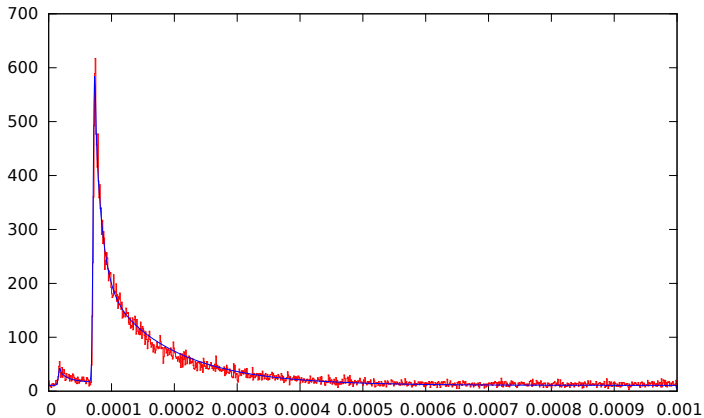
$f(t|i, j; \mu_1, \dots, \mu_N)dt$ — вероятность того, что за время между двумя LCS-импульсами регистрируется ровно j нейтронов и i -ый зарегистрированный нейтрон регистрируется в промежутке $\tau \in [t; t + dt)$.
Параметры μ_k — среднее число реакций k -го типа.

1. Рассматриваются все возможные комбинации зарегистрированных/пропущенных нейтронов от реакций (γ, xn) и от фона.
2. Источник фоновых нейтронов — реакции (γ, xn) вне мишени, и/или на фоновых нейтронах. Они рассматриваются так же, как и реакции на мишени с помощью набора параметров μ_{bkgk} (μ_{bkg1} включает в себя также и остальные источники фона).
3. Нейтроны от реакций на мишени отличаются от фоновых нейтронов временем рождения: нейтроны (γ, xn) рождаются во время лазерного импульса, фоновые нейтроны рождаются непрерывно.
4. Входные данные модели:
 - 4.1 эффективность регистрации нейтрона $\epsilon(E_n) = \epsilon = const$;
 - 4.2 функция отклика детектора на нейтроны, рожденные в реакции на мишени, $f_1(t)$;
 - 4.3 аналогичная функция отклика на фоновые нейтроны, $f_{bkg}(t)$.

Модель времени регистрации нейтронов

Пример. $E_\gamma = 26,48$ МэВ, мишень ^{89}Y .

► $f_1(t)$

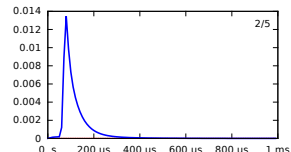
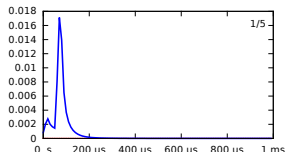
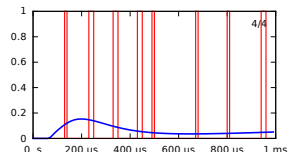
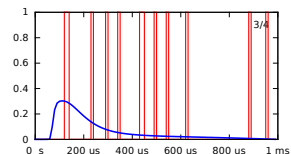
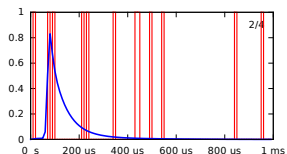
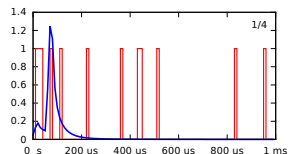
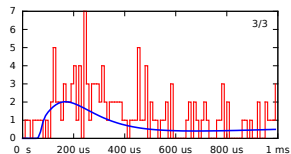
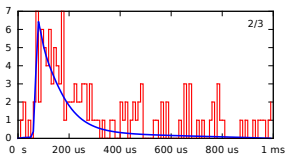
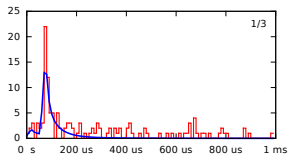
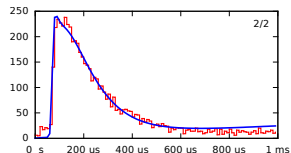
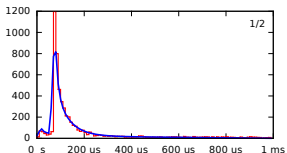
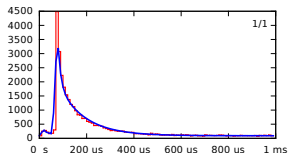


► $\Phi_{\text{ОН}}$

$$f_{\text{bkg}}(t) = \text{const}$$

Модель времени регистрации нейтронов

Пример. $E_\gamma = 26,48$ МэВ, мишень ^{89}Y . Результат аппроксимации.



Модель времени регистрации нейтронов

Пример. $E_\gamma = 26,48$ МэВ, мишень ^{89}Y . Результат аппроксимации.

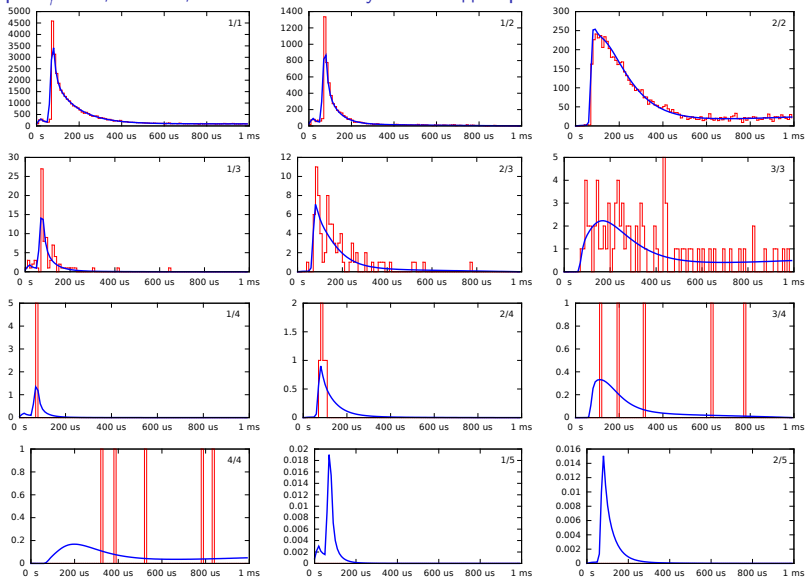
```
#Результат аппроксимации
#ngxn1 = 0.0120882 +/- 0.000257837
#ngxn2 = 0.0118943 +/- 0.000137776
#nbgk1 = 0.0049274 +/- 0.000160936
#nbgk2 = 0.00307219 +/- 8.03782e-05
```

Как проверить достоверность полученных μ_k ?

Подставим найденные значения параметров в модель Монте-Карло, получим синтетические гистограммы и повторим аппроксимацию.

Модель времени регистрации нейтронов

Пример. $E_\gamma = 26,48$ МэВ, мишень ^{89}Y . Результат моделирования.



#ngxn1 = 0.0129760 +/- 0.000265367 #nbkg1 = 0.00482452 +/- 0.000159107
#ngxn2 = 0.0123997 +/- 0.000140337 #nbkg2 = 0.00288428 +/- 7.87735e-05

Модель времени регистрации нейтронов

Пример. $E_\gamma = 26,48$ МэВ, мишень ^{89}Y . Результат моделирования. Многократное протекание реакций.

Моделирование позволяет оценить число событий рождения нейтронов в нескольких источниках.

```
1n 37878 (213 multiple)
2n 5928 (112 multiple)
3n 82 (28 multiple)
4n 5 (0 multiple)
```

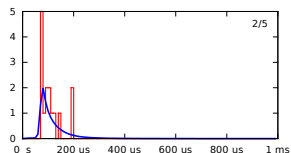
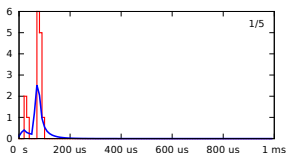
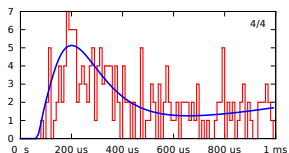
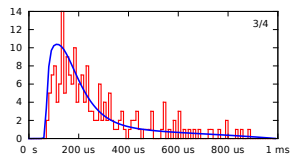
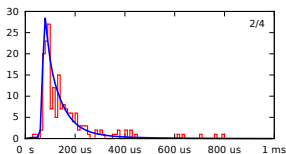
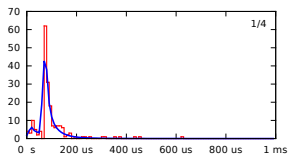
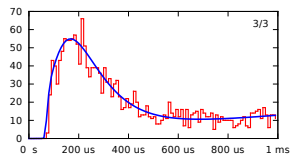
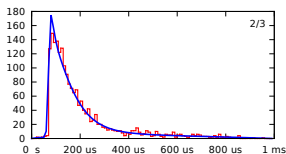
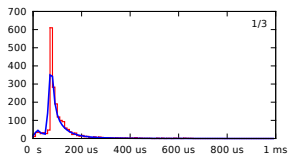
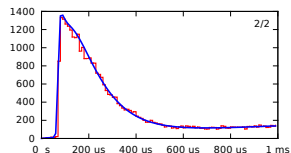
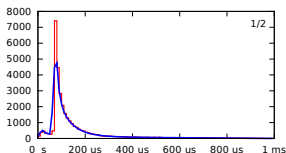
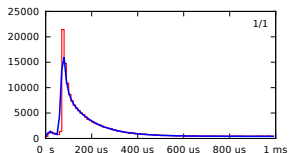
=> В данном случае число событий с двумя или более реакциями или с двумя или более фоновыми нейтронами не превышает 2%.

Увеличим интенсивность реакций в 5 раз и повторим моделирование:

```
1n 177421 (4807 multiple)      #ngxn1/5 = 0.01291372 +/- 0.000136495
2n 32907 (2931 multiple)      #ngxn2/5 = 0.0124 +/- 6.81476e-05
3n 1972 (646 multiple)        #nbkg1/5 = 0.00467018 +/- 8.0248e-05
4n 189 (59 multiple)          #nbkg2/5 = 0.00305648 +/- 3.92152e-05
```

Модель времени регистрации нейтронов

Пример. $E_\gamma = 26,48$ МэВ, мишень ^{89}Y . Результат моделирования условий высокой интенсивности реакций.



Измерение фотонейтронных сечений на ^{59}Co , ^{165}Ho , ^{181}Ta

Последние эксперименты и перспективы

- ▶ Схема подключения из предыдущего эксперимента.
- ▶ Набор данных на толстой мишени из ^{59}Co (20 мм) и с максимальной интенсивностью LCS пучка для проверки метода определения множественности.
- ▶ Планы по уменьшению шага энергетической сетки измеренных сечений до 50–100 кэВ путем программирования смены энергии электронного пучка.

Заключение

- ▶ Коллаборацией из РФ, Японии, Румынии, ФРГ, КНР проводится масштабная программа экспериментальных измерений парциальных фотонейтронных сечений с вылетом до 5 нейтронов, — впервые, начиная с 1990-х гг.
- ▶ Новый метод разделения каналов реакций различной множественности на основе анализа распределения времени регистрации нейтронов.
- ▶ Завершен набор экспериментальных данных на ядрах ^{209}Bi , ^{89}Y , ^{169}Tm , ^{197}Au . В процессе — ^{59}Co , ^{165}Ho , ^{181}Ta . Сечения (γ , 1–4n) на ^{209}Bi опубликованы.

Благодарю за внимание!