

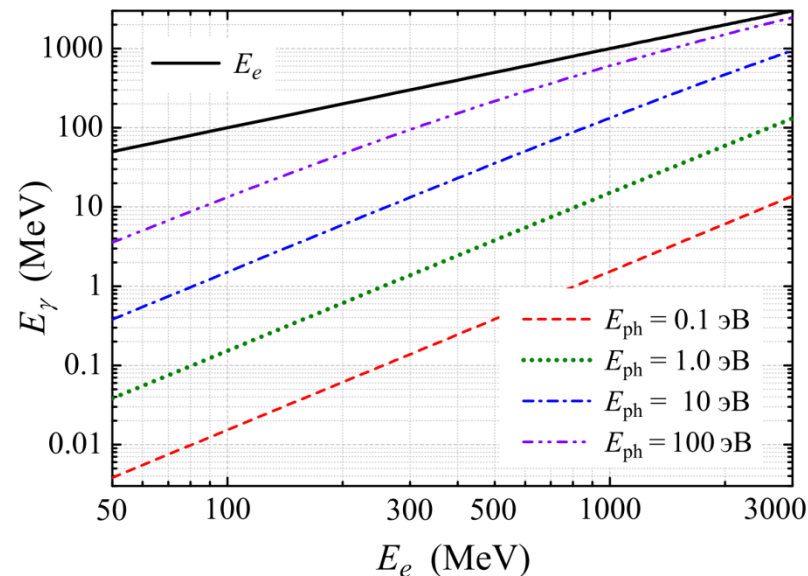
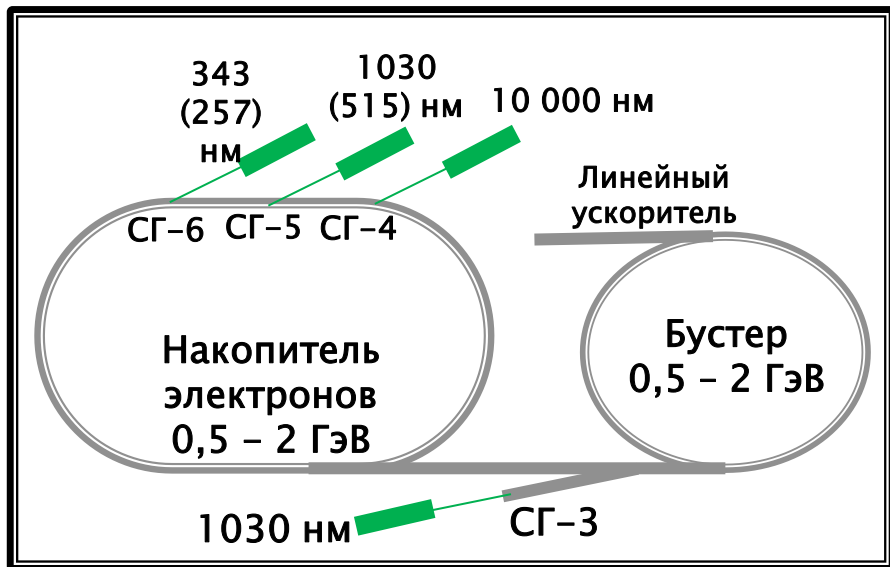
Первоочередные эксперименты по ядерной физике на большом кольце ИКИ НЦФМ

А.А. Кузнецов, А.С. Чепурнов, А.А. Шемухин

*Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ;
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет;*

Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий» Секции ядерной физики
Отделения физических наук Российской академии наук
10 – 13 марта 2026

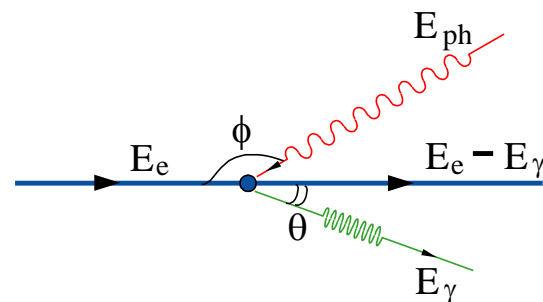




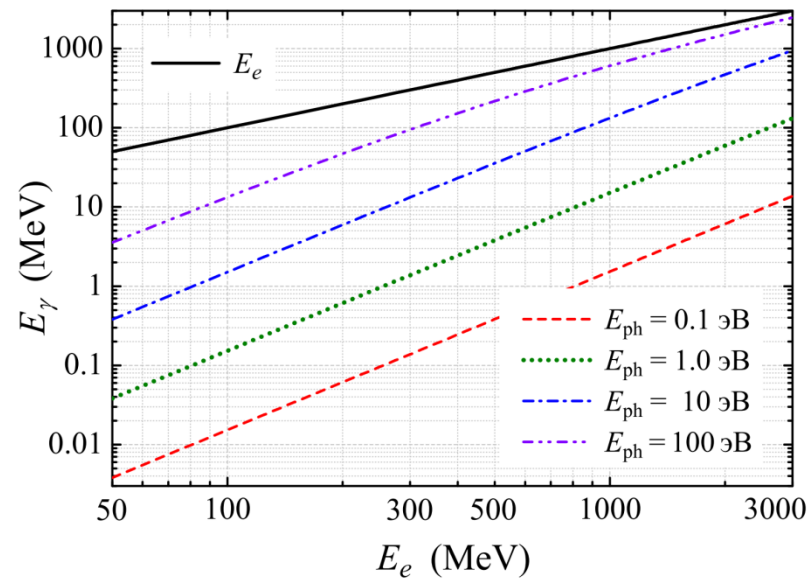
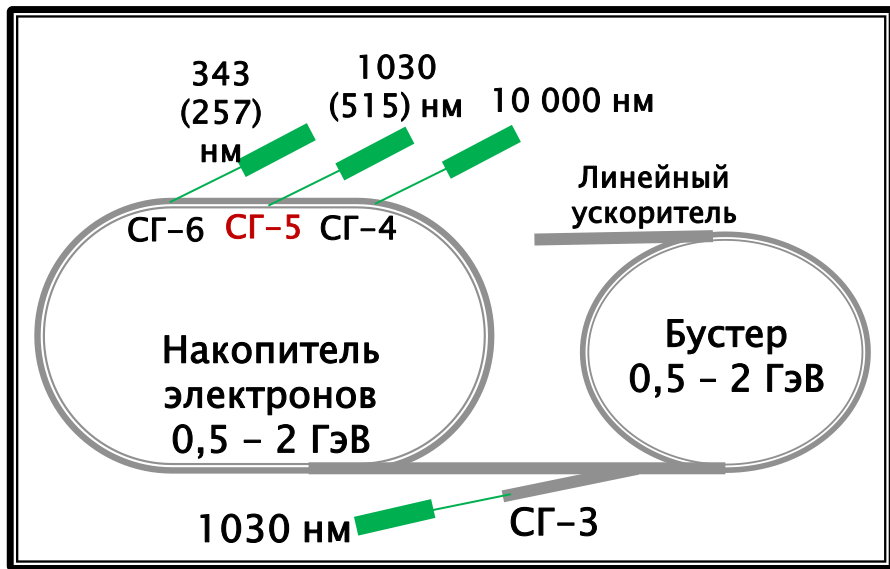
Характеристика

СГ5

Диапазон энергии электронов, МэВ	500 - 2000
Максимальная частота сгустков, Гц	10^7
Длина волны лазерного излучения, нм	1030 (515)
Энергия импульса лазера, мДж	0,1
Длительность импульса, пс	300
Диапазон энергии квантов, МэВ	5 - 70 (10 - 136)
Интенсивность, кв./с	$10^{10} - 10^{11}$
Монохроматичность, FWHM %	0,2 - 0,5



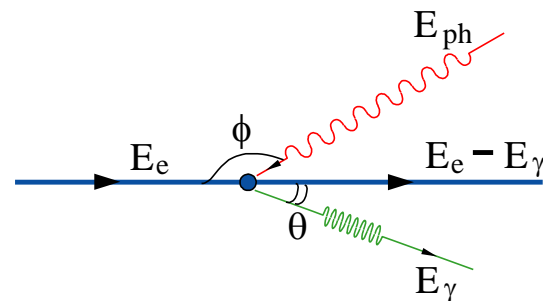
$$E_{\gamma} = \frac{2\gamma^2 E_{ph}}{1 + \gamma^2 \theta^2} (1 - \cos \phi), \quad \gamma \gg 1, \quad \theta \ll 1$$



Характеристика

СГ5

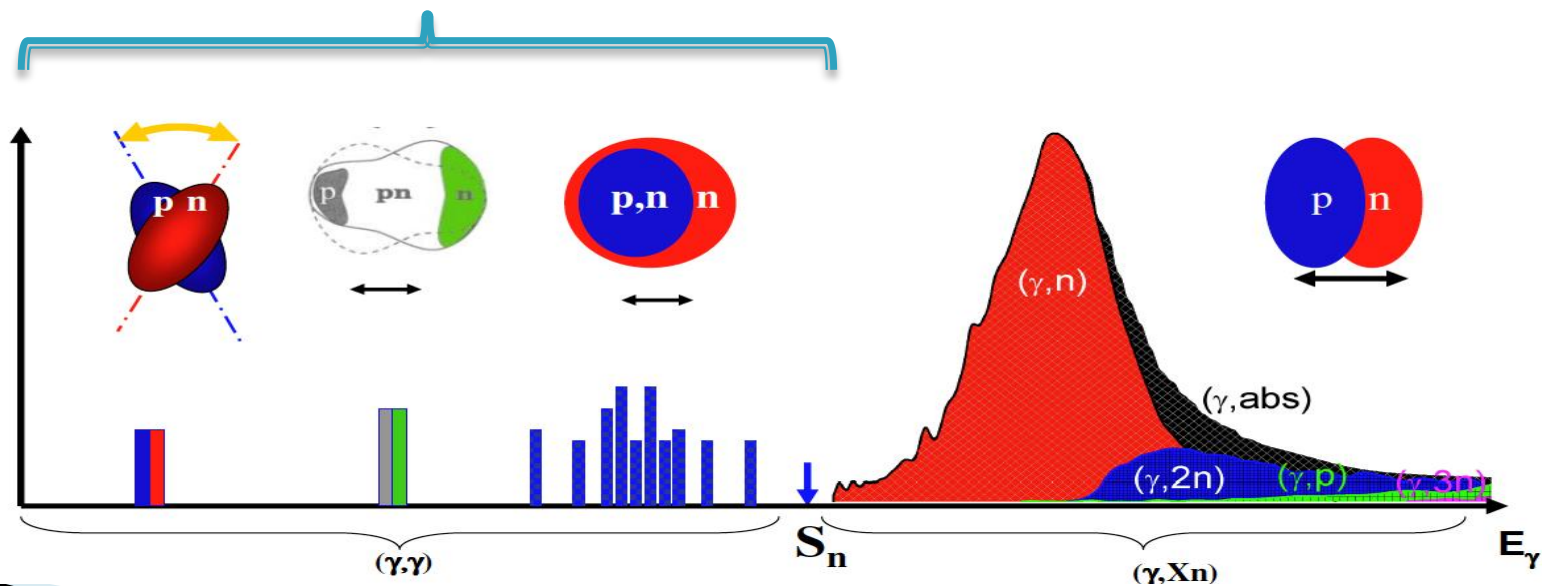
Диапазон энергии электронов, МэВ	500 - 2000
Максимальная частота сгустков, Гц	10^7
Длина волны лазерного излучения, нм	1030 (515)
Энергия импульса лазера, мДж	0,1
Длительность импульса, пс	300
Диапазон энергии квантов, МэВ	5 - 70
Интенсивность, кв./с	$10^{10} - 10^{11}$
Монохроматичность, FWHM %	0,2 - 0,5



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

Основные задачи станции СГ-5 ИКИ

- Получение новых непротиворечивых данных о сечениях фотоядерных реакций(7-40МэВ).
- Изучение структуры гигантского дипольного резонанса (ГДР).
- Ядерная астрофизика. Обойденные ядра. 5-15 МэВ
- Фотоделение. 0-40 МэВ
- Исследование кластерных состояний в ядрах. 0-15 МэВ.
- Изомерные состояния ядер. 0-40 МэВ.
- Ядерная резонансная флуоресценция. 0-8 МэВ.
- Изучение резонансов иной природы, пигми- и М1 резонансов. 5-40 МэВ.
- Прикладные исследования. Исследование возможности наработки радиоактивных ядер.10-40 МэВ.



Программа исследований в области ядерной физики на пучке квазимоноэнергетических фотонов, образующихся в процессах обратного комптоновского рассеяния (ОКР) излучения мощного лазера на пучке релятивистских электронов, ориентирована на использовании преимуществ пучка фотонов с уникальными характеристиками по сравнению с пучками, использованными ранее (КМА, тормозных, других ИКИ) для решения главной задачи исследований – **получению точной, надежной и достоверной информации о полных и парциальных сечениях фотоядерных реакций и характеристиках образующихся в таких реакциях частиц и легких ядер.**

	E_γ , MeV	ΔE_γ	I_γ , ph/sec
ELI-NP (VEGA) (Румыния, проект)	1-19.5	<0.5%	$\sim 10^{11}$
NewSubaru (Япония, SPRING8, работает)	0-76	1.2-10%	$\sim 10^7$
HI γ S (США, работает)	1-40	0.8-10	$\sim 10^{6-10}$
SLEGS (Китай, работает)	0.66 – 22	2-15%	$\sim 10^{4-7}$
ИКИ НЦФМ (Россия, проект)	0.02-250	0.5-1.5%	$\sim 10^{10-11}$

Основные требования и преимущества ИКИ НЦФМ:

1. Интенсивность, достаточная для проведения активационных экспериментов - порядка $10^7 - 10^8$ фотонов в секунду;
2. Высокая монохроматичность (полуширина не хуже 0.2-0.5% и малая расходимость);
3. Быстрая и плавная перестройка энергии
4. Короткая длительность импульса – десятки – сотни пикосекунд - для проведения экспериментов по времяпролетной методике на достаточно короткой базе;

Необходима разработка методов прецизионного мониторинга энергии и интенсивности пучка гамма-квантов в процессе проведения эксперимента.



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. Для методик прямого измерения необходимо разрешение по энергии не более 0.3%.
2. В проекте ИКИ количество гамма квантов в пределах полосы 0.3% составит 10^8 с⁻¹. Это позволяет проводить измерения одной точки по энергии прямыми методами в течении нескольких минут. Для измерения сечения на одном ядре прямыми методами (порядка 300 точек с учетом перестроения энергии) это займет сутки.
3. Необходимо дополнительно к прямым методам использовать методику наведенной активности для некоторого числа точек.
4. Активационные исследования фотоядерных реакций на g- пучках от обратного комптоновского рассеяния при $E_g \lesssim 40$ МэВ имеют фундаментальную ценность для выяснения множественности образования фотонейтронов. В некоторых случаях для активационной методики требуется большая интенсивность гамма-пучка.
5. Для дальнейшего развития адекватного модельного описания возбуждения и релаксации изовекторного электрического дипольного гигантского резонанса в атомных ядрах существенно изучение распределений по энергии и углам для парциальных сечений образования быстрых нейтронов в (g, n)- реакциях. Короткая длительность импульса излучения – для линейного ускорителя – несколько пикосекунд дает возможность реализации времяпролетной методики с высоким разрешением на короткой базе.



Особенности возможных экспериментов на пучке монохроматического гамма-излучения

6. Реакции с заряженными частицами.

По сравнению с многочисленными исследованиями фотонейтронных реакций, выполненных на пучках как тормозного излучения, так и квазимонроэнергетических аннигиляционных фотонов, исследований реакций с образованием протонов, дейтронов, тритонов и альфа-частиц, проведено относительно немного.

В экспериментах на пучках тормозного излучения это обусловлено присутствием значительного фона от электронов. В экспериментах на пучках квазимонроэнергетических аннигиляционных фотонов интенсивность весьма невелика (вследствие многоэтапного процесса получения гамма-квантов от аннигиляции позитронов), что с относительно невысокой статистической точностью позволяет получать данные по фотонейтронным реакциям, в которых возможно использование толстых мишеней, и не позволяет получать данные по фотопротонным реакциям, в которых использование толстых мишеней невозможно.

На пучках фотонов КИ возможно эффективное отделение фона электронов, поскольку пучки рассеянных электронов и рассеянных фотонов геометрически разведены. Уникальные характеристики пучка КИ позволяют организовать на новом современном уровне разнообразные исследования фотоядерных реакций с образованием заряженных частиц. Прежде всего это относится к определению сечений фотопротонных реакций для большого количества ядер, которые в настоящее время отсутствуют. Получение такой информации и ее детальное сравнение с результатами фотонейтронных исследований позволит на качественно новом уровне изучить явление изоспинового расщепления ГДР, а также уточнить сведения о таком явлении, как конфигурационное расщепление ГДР. Этому будет способствовать реализация новых возможностей по измерению энергетических и угловых распределений вылетающих протонов (как и других заряженных продуктов реакций). Данные о таких процессах позволят уточнить многие известные и изучить неизвестные пока особенности процессов фоторасщепления ядер, свойств электромагнитных взаимодействий.



SLEGS

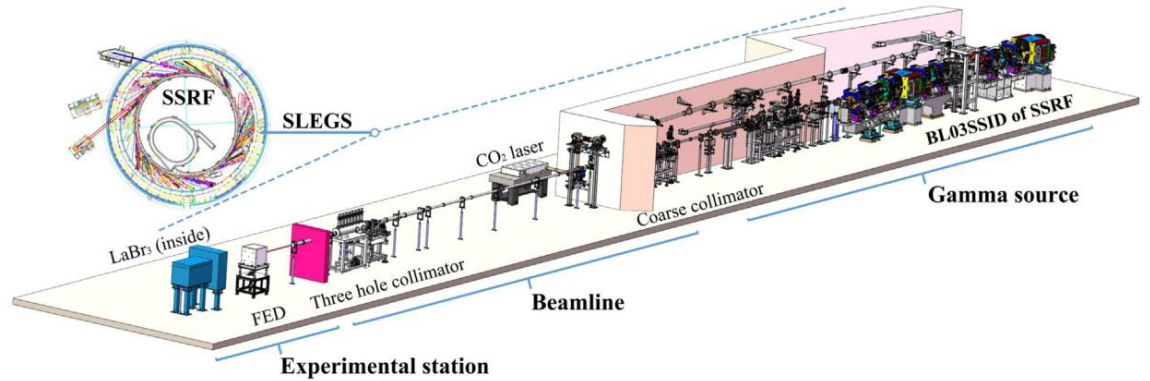
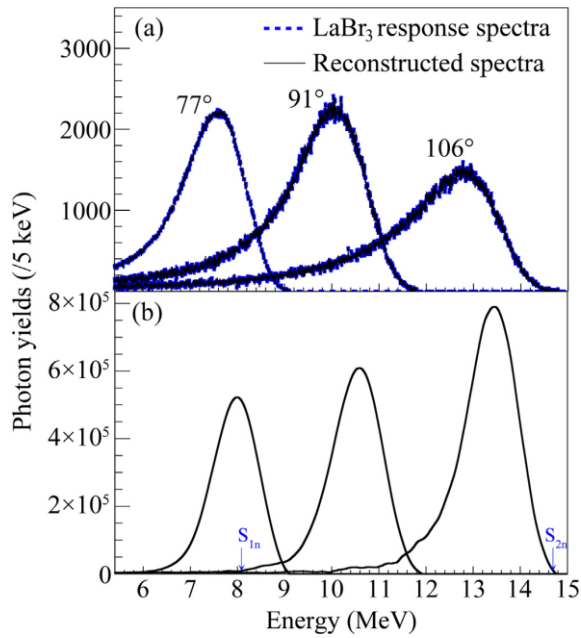
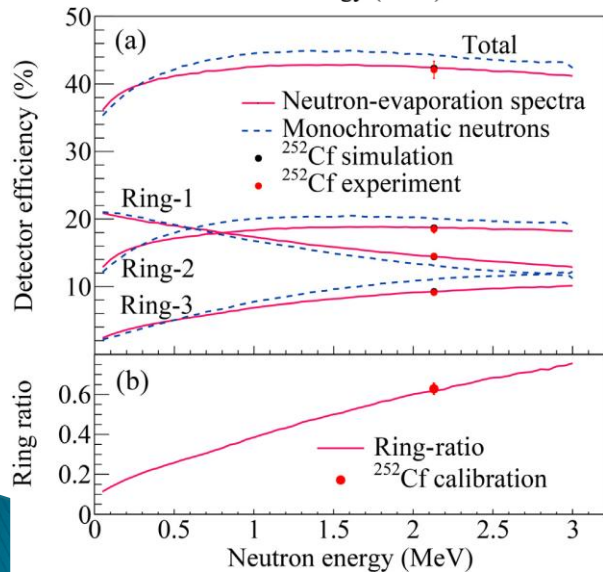
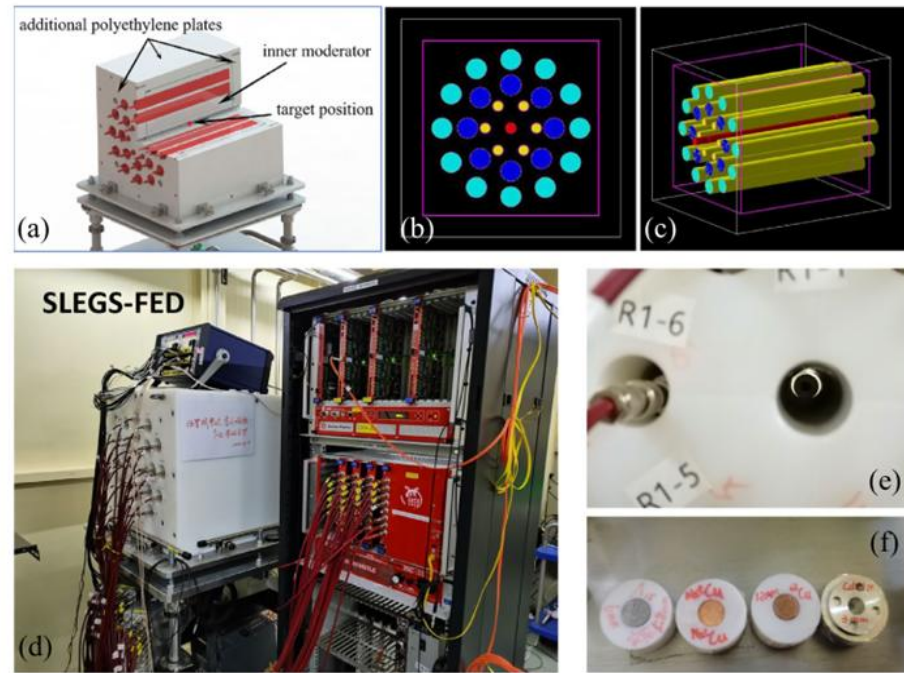


Fig. 2 (Color online) **a** The schematic diagram of the FED. **b** and **c** are the construction used in Geant4 simulations, showing the front and side views, respectively. **d** The photograph of the FED and its electronics, including the pre-amplifier, high-voltage power supply, and data acquisition (DAQ). **e** The photograph of the central channel of the FED, with a target placed inside. **f** The photograph of the target



The total detector efficiency and the efficiencies of individual rings. The detector efficiency curves were simulated by neutron-evaporation spectra and monochromatic neutrons. The red dots are given by the neutron described by the Maxwell-Boltzmann distribution $E \propto T^{-1} \exp(-E/T)$, at the average neutron energy ($T = 1.42$ MeV). (b) The Ring-Ratio curve of the FED.

NewSubaru

arXiv:2501.07876

NewSUBARU 0.5 to 1.5 GeV electron storage and accelerator ring with currents between 60 and 300 mA.

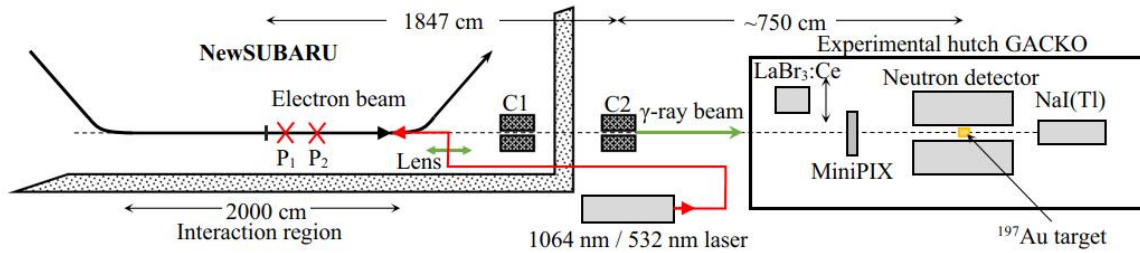
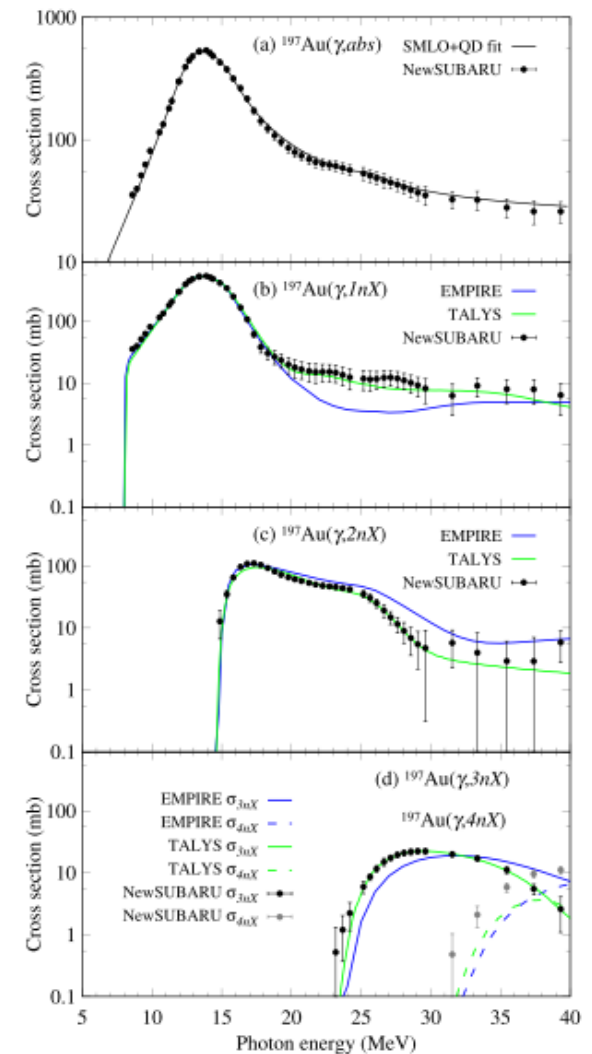
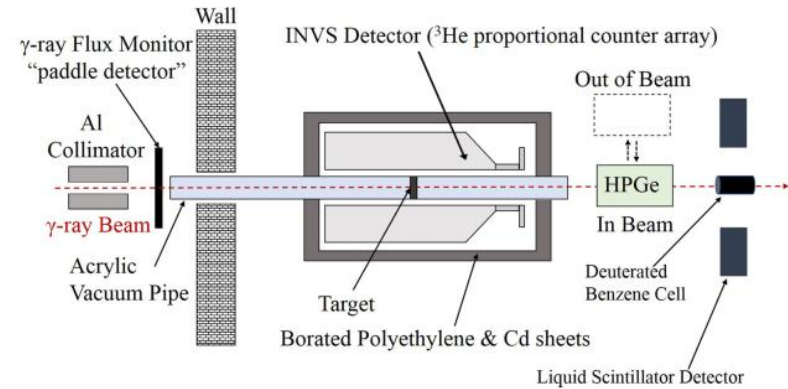
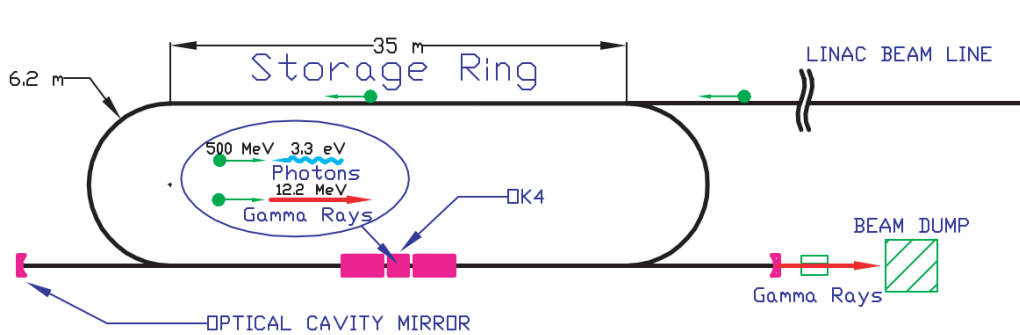


FIG. 1. Schematic representation (not to scale) of the BL01 LCS γ -ray beam line and the experimental hutch GACKO at the NewSUBARU facility. P1 and the P2 mark the focus point positions of the 1064 nm and, respectively, the 532 nm laser beams at 1.8 and, respectively, 3.8 m downstream of the electron beam focus in the middle of the BL01.



Present cross sections (filled circles) for the (a) (γ, abs) , (b) $(\gamma, 1nX)$, (c) $(\gamma, 2nX)$, and (d) $(\gamma, 3nX)$ and $(\gamma, 4nX)$ reactions in ^{197}Au compared with EMPIRE and TALYS statistical model calculations. The SMLO + QD curve in (a) corresponds to a three-Lorentzian fit to the present photoabsorption data using the Simple Modified Lorentzian function described in Refs. [1,44] and a quasideuteron (QD) component.



arXiv:1808.04937v2

Schematic diagram of the HIγS facility 14 for the production of intense MeV gamma beams.

<https://arxiv.org/pdf/1912.06915>

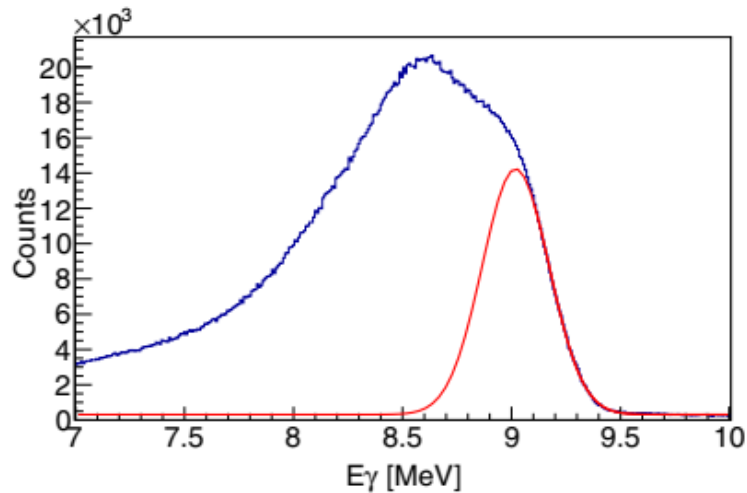
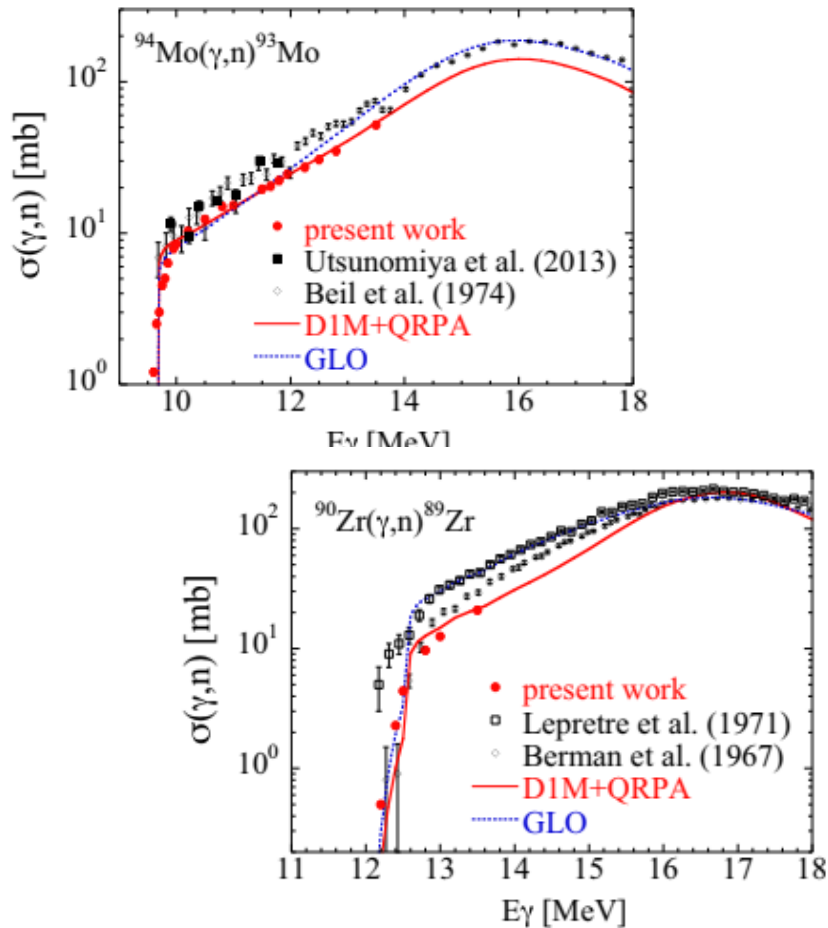


FIG. 2. γ -ray spectrum recorded by the 123% HPGe detector in anticoincidence with the NaI(Tl) annulus at a γ -ray beam energy of 9 MeV. The red curve represents a Gaussian fit from where the centroid of the full-energy peak of the γ -ray beam was determined. The peak at 8.5 MeV corresponds to the first-escape peak.

Сравнение современных данных. (γ, n)

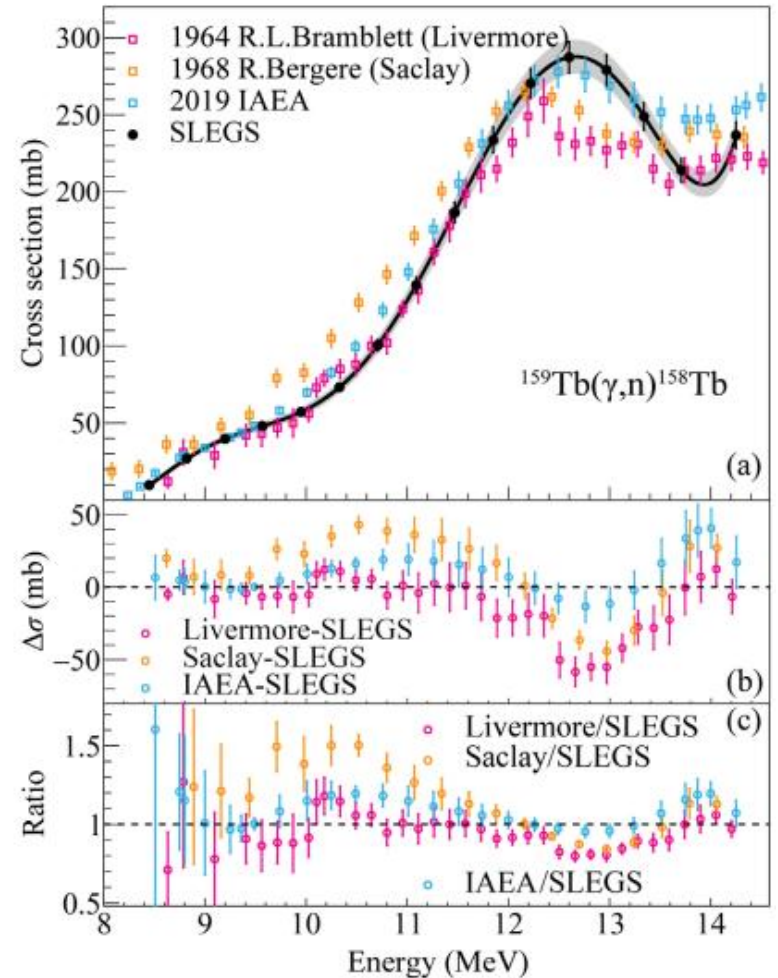
HiGS (present)/ NewSubaru (Utsunomia)

SLEGS (present)/NewSubaru (IAEA)



Comparison between the present (γ, n) photoneutron reaction cross sections as a function of the γ -ray beam energy and the previous data

arXiv:1808.04937v2



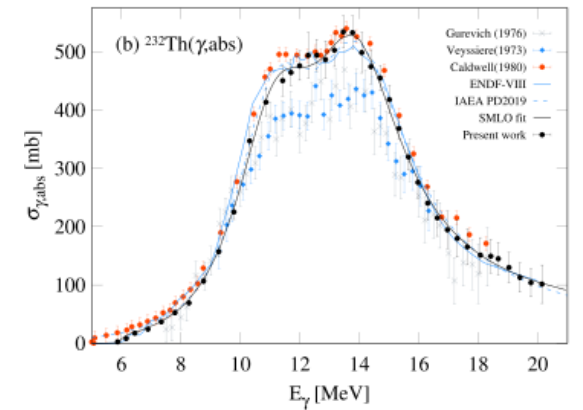
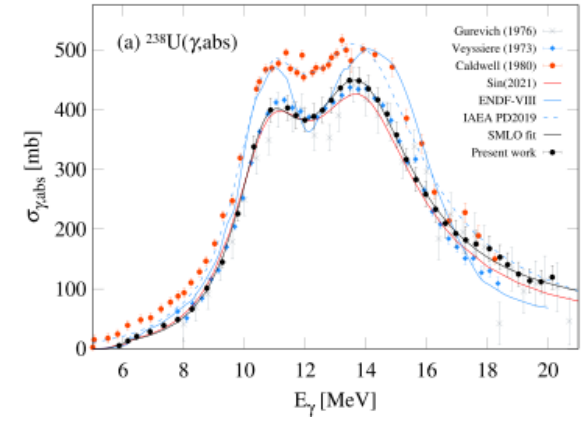
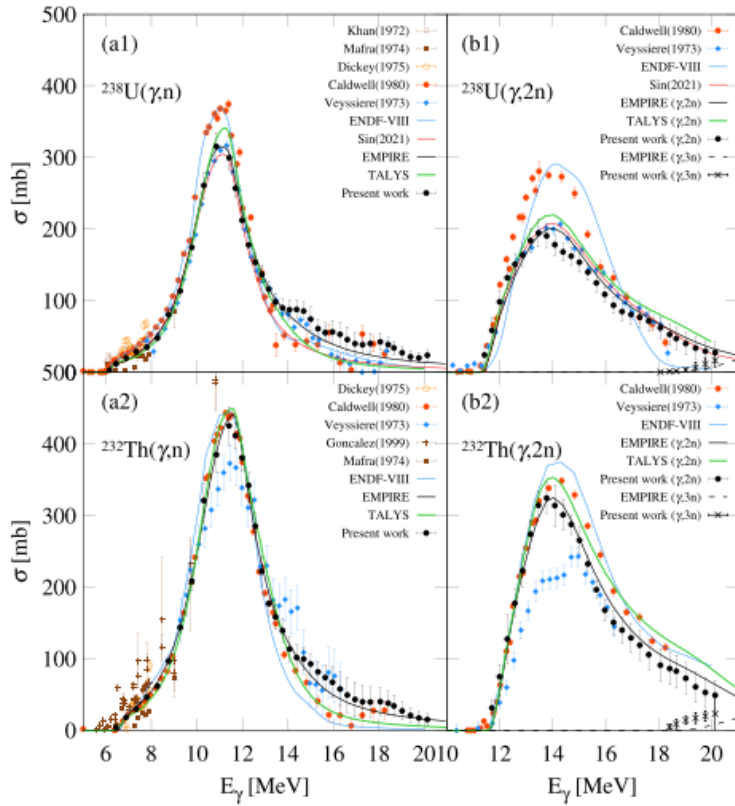
(a) Comparison between present unfolded cross section of Tb and Livermore, Saclay data, as well as the IAEA dataset from NewSUBARU, one of the LCS gamma sources. (b) difference and (c) ratio in values between Livermore, Saclay, IAEA and SLEGS data.

<https://doi.org/10.1016/j.scib.2025.05.037>



Сравнение современных данных. (многоуклонные реакции).

NewSubaru (Utsunomia)



Эксперименты первого дня - получение новых непротиворечивых прецизионных данных о сечениях фотоядерных реакций и фотоделения в широкой области масс атомных ядер. Первые эксперименты должны быть выполнены на моноизотопах: $Co59$, $Y89$, $Rh103$, $Au197$, $U238$ и др. Из-за использования разных методик измерения нейтронов и модельно-зависимой эффективности регистрации сохраняются большие расхождения в данных, полученных в разных лабораториях. Обычно используется метод прямой регистрации нейтронов с помощью $He3$ счетчиков, помещенных в замедлителе. Данные, полученные даже на современных установках отличаются до 1.5 раз в реакции $(g,1n)$ (особенно в районе порога) и более на многонуклонных реакциях.

- Различие в спектрах гамма-квантов, в некоторых случаях широкий спектр 10% для обратного комптоновского излучения. Определяется как коллимацией выходного гамма-излучения, так и эмиттансом электронного пучка. Для аннигиляционных квазимонохроматических фотонов ширина спектра до 10%, плюс наличие хвоста тормозного излучения. В этом случае определяется не сечение, а разность выходов реакции.
- Нормировка потока гамма-квантов.
- Использование при расчетах и обосновании плоской эффективности детектирующей системы модельного спектра нейтронов. (Данные о спектрах нейтронов в фотоядерных реакциях практически отсутствуют в литературе)
- В случае многонуклонных реакций возникают неоднозначности с разделением нейтронов по множественности.



Задача измерения сечений фотоядерных реакций с помощью детектора нейтронов на основе He^3 счётчиков

- Знать спектр нейтронов. Запланированы измерения спектров нейтронов с помощью времяпролетной методики. Разрабатывается нейтронный времяпролетный детектор для измерения спектров и угловых распределений нейтронов в фотоядерных реакциях на пластиках и жидких сцинтилляторах. Проведены первые эксперименты на тормозных пучках электронов лазерного ускорения на стилибене. Прецизионные спектры возможно измерять из-за короткой длительности импульса на ИКИ и хорошего энергетического разрешения.

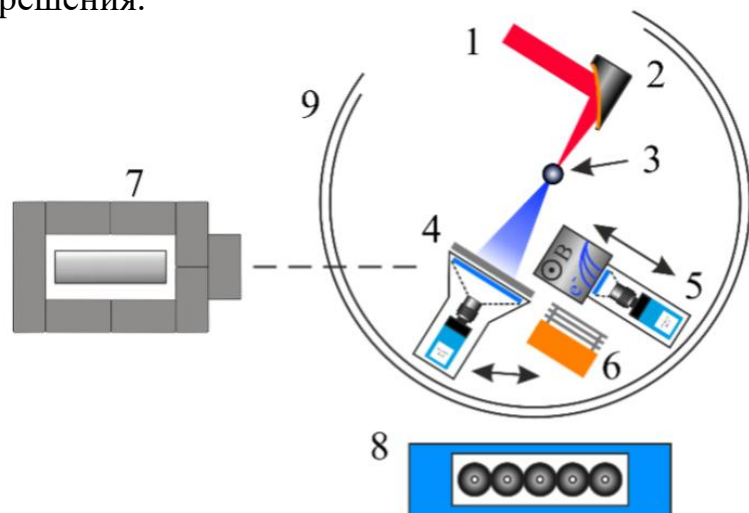


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1. Излучение Ti:Sapphire, 2. Внеосевое параболическое зеркало, 3. Газовая струя, 4. Свинцовый фильтр и экран Lanex, 5. Магнитный спектрометр, 6. Ячейка Фарадея, 7. Времяпролётный детектор, 8. Массив 3He -счётчиков, 9. Вакуумная камера.

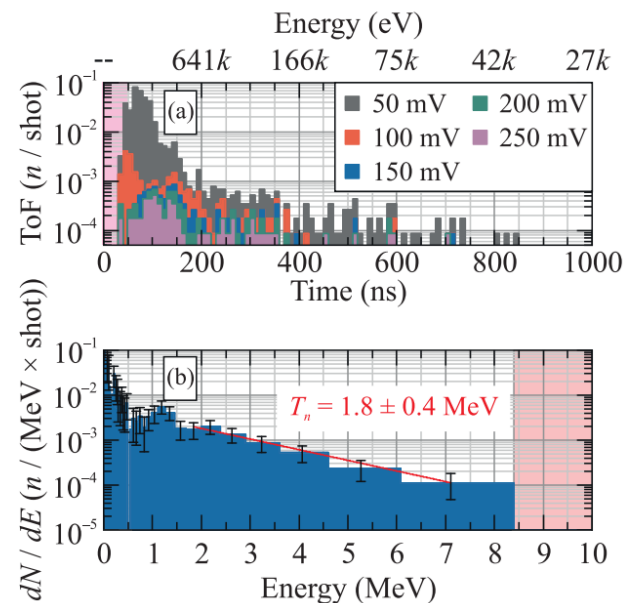


Рис. 4. (Цветной онлайн) (а) – Времяпролетные гистограммы (ToF) при различных пороговых уровнях регистрации импульсов в сигнале; (b) – энергетический спектр нейтронов, соответствующий уровню 150 мВ

С. А. Шуляпов, Е. М. Стародубцева, И. Н. Цымбалов, А. Ю. Заворотный, М. А. Бакулев, А. С. Чепурнов, А. А. Кузнецов, and А. Б. Савельев. Измерение энергетического спектра короткоимпульсных источников нейтронов на основе фотоядерных реакций. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 121(11):865–870, 2025

Задача измерения сечений фотоядерных реакций с помощью детектора нейтронов на основе He^3 счетчиков

Измерения многонуклонных реакций должны сопровождаться активационными экспериментами, лишенными недостатков методов прямой регистрации нейтронов. Разработана система для оффлайн гамма-спектрометрии на основе германиевых детекторов для регистрации редких событий. Активационная методика возможна благодаря высокой интенсивности пучка гама-квантов. Проведённый анализ и оценки показывают значительную перспективность активационных исследований на проектируемом комптоновском источнике квазимонохроматических γ -квантов

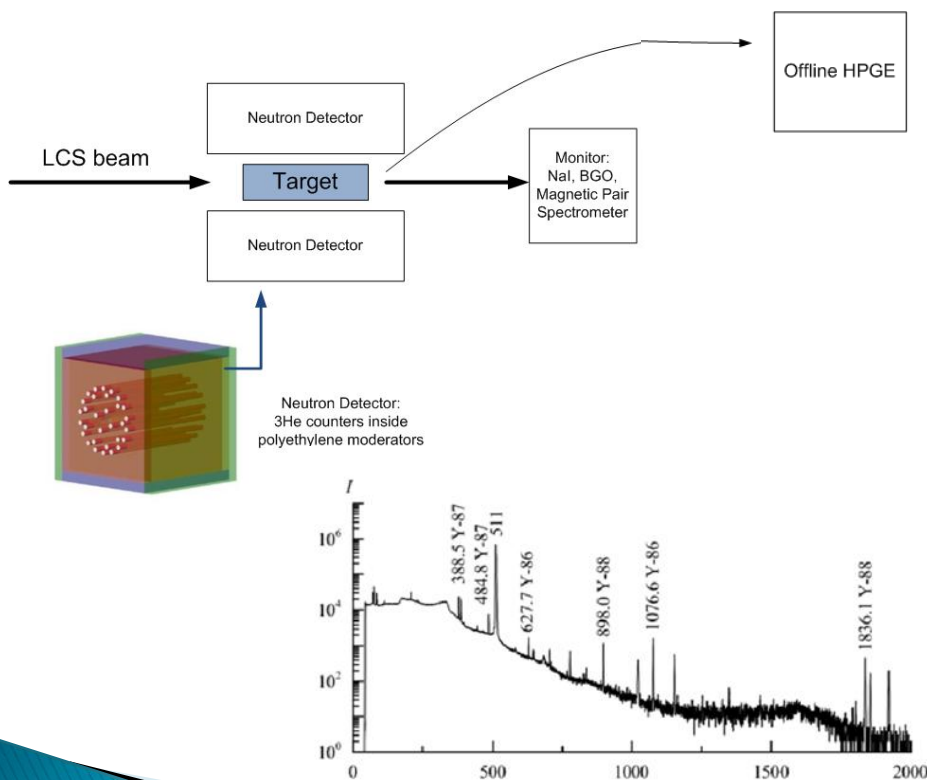


Таблица 2. Характеристики облучений, реакций, мишеней, распадов и регистраций

Характеристики	Реакции		
	$^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')$	$^{63}\text{Cu}(\gamma, n)$	$^{63}\text{Cu}(\gamma, 2n)$
t	$T_{1/2} \cong 4.486$ час	$T_{1/2} \cong 9.74$ мин	$T_{1/2} \cong 3.333$ час
N_γ, c^{-1}	$\sim 10^7$	$\sim 10^7$	$\sim 10^7$
$E_\gamma, \text{МэВ}$	$\cong 9$	$\cong 17$	$\cong 23.7$
$\sigma(E_\gamma), \text{мбарн}$	$\cong 1$	$\cong 75$	$\cong 10$
η_{is}	0.9571	0.6917	0.6917
$M_{tag}, \text{Г} \times \text{моль}^{-1}$	114.82	63.54	63.54
$r_{tag}, \text{Г} \times \text{см}^{-3}$	7.31	8.96	8.96
$D_{tag}, \text{см}$	0.16	0.16	0.16
$X_{tag}, \text{см}$	1	1	1
$E_\gamma \text{ втор}, \text{кэВ}$	$\cong 336$	$\cong 1173$	$\cong 283$
I_γ	$\cong 0.4583$	$\cong 0.0034$	$\cong 0.122$
a, c^{-1}	~ 183	~ 22027	~ 2936
$\varepsilon(E_\gamma \text{ втор}, l = 10 \text{ см})$	$\cong 0.0073$	$\cong 0.0025$	$\cong 0.0086$
$\varepsilon(E_\gamma \text{ втор}, l = 0 \text{ см})$	$\cong 0.1033$	$\cong 0.0342$	$\cong 0.1206$
N_{HPGe} при $l = 10 \text{ см}, \text{c}^{-1}$	~ 0.61	~ 0.19	~ 3.08
N_{HPGe} при $l = 0 \text{ см}, \text{c}^{-1}$	~ 8.66	~ 2.56	~ 43.19

С. С. Бельшев, В. В. Варламов, Л. З. Джилаян, и др. К активационным исследованиям фотоядерных реакций на g-пучках от обратного комптоновского рассеяния при $E_g < 40$ МэВ. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*, 79(1):2410201, 2024.

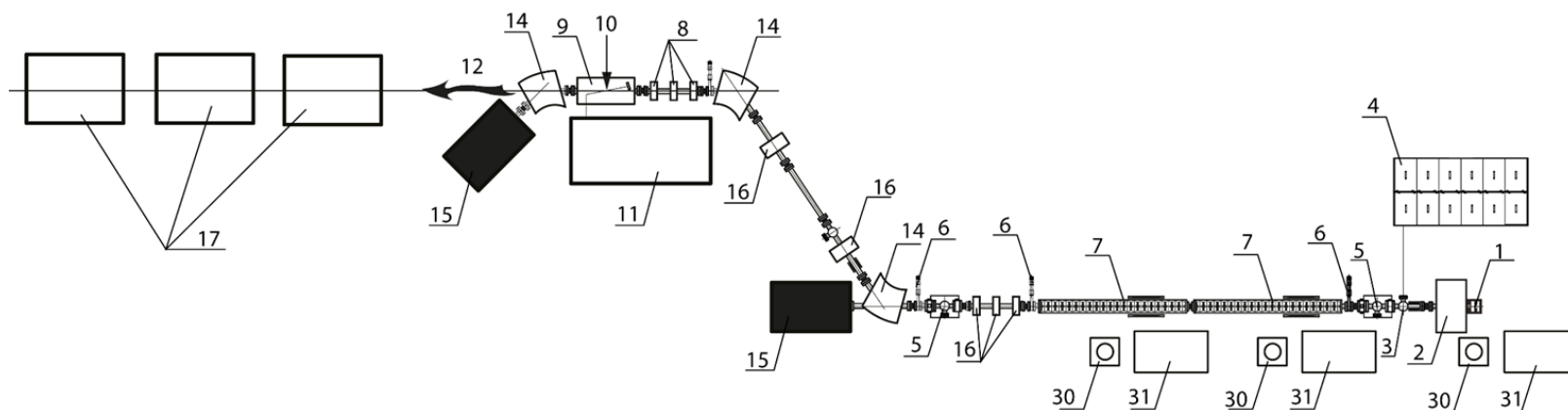
Стенд комптоновского источника НИИЯФ МГУ

Отработка детекторных систем до создания ИКИ НЦФМ планируется в НИИЯФ МГУ на создаваемом прототипе малого комптоновского источника НИИЯФ на выведенном тормозном пучке электронов. Запланированы первые эксперименты на инжекторе (фотопушке) к концу 2026 г.

Выходные параметры рентгеновского излучения комптоновского источника

Параметр	Значение для 50 МэВ
Число рентгеновских фотонов в импульсе	$1,64 \cdot 10^7$
Средний рентгеновский поток, фот/с	$1,64 \cdot 10^{10}$
Пиковая спектральная яркость, $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}0,1\%$	$3,8 \cdot 10^{18}$
Средняя спектральная яркость, $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}0,1\%$	$3,8 \cdot 10^{10}$
Минимальная спектральная ширина без монохроматора	350 эВ
Минимальная угловая ширина без коллимации	1,8 мрад

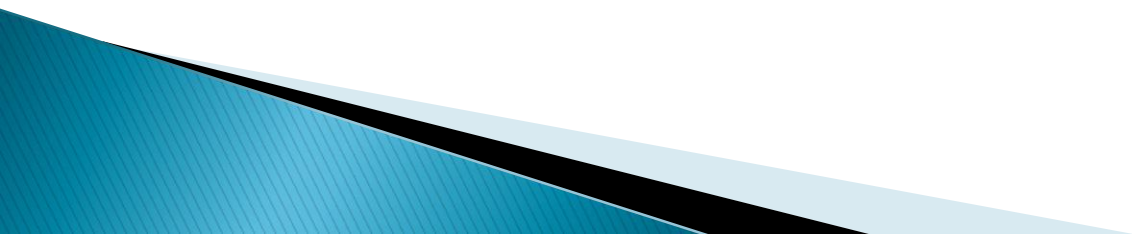
Максимальная энергия ускоренного пучка	50 ± 2 МэВ
Диапазон регулирования энергии	35 – 50 МэВ
Разброс по энергии	$0,25 \pm 0,1\%$
Нормализованный эмиттанс	$1 \pm 0,5$ мм мрад
Среднеквадратичный радиус пучка в точке взаимодействия	30 ± 10 мкм
Заряд сгустка	100_{-0}^{+100} пКл
Длительность сгустка	10 ± 4 пс
Максимальная частота следования сгустков	1000 Гц



1 – СВЧ пушка с фотокатодом, 2 – соленоид, 3 – окно ввода лазерного излучения, 4 – лазер фотокатода, 5 – станция диагностики пучка, 6 – вакуумный затвор, 7 – ускоряющая структура, 8 – триплет квадрупольных линз, 9 – камера взаимодействия, 10 – точка взаимодействия, 11 – основной лазер, 12, 13 – рентгеновское излучение, 14 – поворотный магнит, 15 – поглотитель пучка, 16 – квадрупольная линза, 17 – рабочая станция, 30 – импульсный клистрон, 31 – модулятор

Спасибо за внимание!





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. Для методик прямого измерения необходимо разрешение по энергии не более 0.3%.
2. В проекте ИКИ количество гамма квантов в пределах полосы 0.3% составит 10^8 с⁻¹. Это позволяет проводить измерения одной точки по энергии прямыми методами в течении нескольких минут. Для измерения сечения на одном ядре прямыми методами (порядка 300 точек с учетом перестроения энергии) это займет сутки.
3. Необходимо дополнительно к прямым методам использовать методику наведенной активности для некоторого числа точек.
4. Активационные исследования фотоядерных реакций на g- пучках от обратного комптоновского рассеяния при $E_g \lesssim 40$ МэВ имеют фундаментальную ценность для выяснения множественности образования фотонейтронов. В некоторых случаях для активационной методики требуется большая интенсивность гамма-пучка.
5. Для дальнейшего развития адекватного модельного описания возбуждения и релаксации изовекторного электрического дипольного гигантского резонанса в атомных ядрах существенно изучение распределений по энергии и углам для парциальных сечений образования быстрых нейтронов в (g, n)- реакциях. Короткая длительность импульса излучения – для линейного ускорителя – несколько пикосекунд дает возможность реализации времяпролетной методики с высоким разрешением на короткой базе.



Особенности возможных экспериментов на пучке монохроматического гамма-излучения

6. Реакции с заряженными частицами.

По сравнению с многочисленными исследованиями фотонейтронных реакций, выполненных на пучках как тормозного излучения, так и квазимонроэнергетических аннигиляционных фотонов, исследований реакций с образованием протонов, дейтронов, тритонов и альфа-частиц, проведено относительно немного.

В экспериментах на пучках тормозного излучения это обусловлено присутствием значительного фона от электронов. В экспериментах на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов интенсивность весьма невелика (вследствие многоэтапного процесса получения гамма-квантов от аннигиляции позитронов), что с относительно невысокой статистической точностью позволяет получать данные по фотонейтронным реакциям, в которых возможно использование толстых мишеней, и не позволяет получать данные по фотопротонным реакциям, в которых использование толстых мишеней невозможно.

На пучках фотонов КИ возможно эффективное отделение фона электронов, поскольку пучки рассеянных электронов и рассеянных фотонов геометрически разведены. Уникальные характеристики пучка КИ позволяют организовать на новом современном уровне разнообразные исследования фотоядерных реакций с образованием заряженных частиц. Прежде всего это относится к определению сечений фотопротонных реакций для большого количества ядер, которые в настоящее время отсутствуют. Получение такой информации и ее детальное сравнение с результатами фотонейтронных исследований позволит на качественно новом уровне изучить явление изоспинового расщепления ГДР, а также уточнить сведения о таком явлении, как конфигурационное расщепление ГДР. Этому будет способствовать реализация новых возможностей по измерению энергетических и угловых распределений вылетающих протонов (как и других заряженных продуктов реакций). Данные о таких процессах позволят уточнить многие известные и изучить неизвестные пока особенности процессов фоторасщепления ядер, свойств электромагнитных взаимодействий.



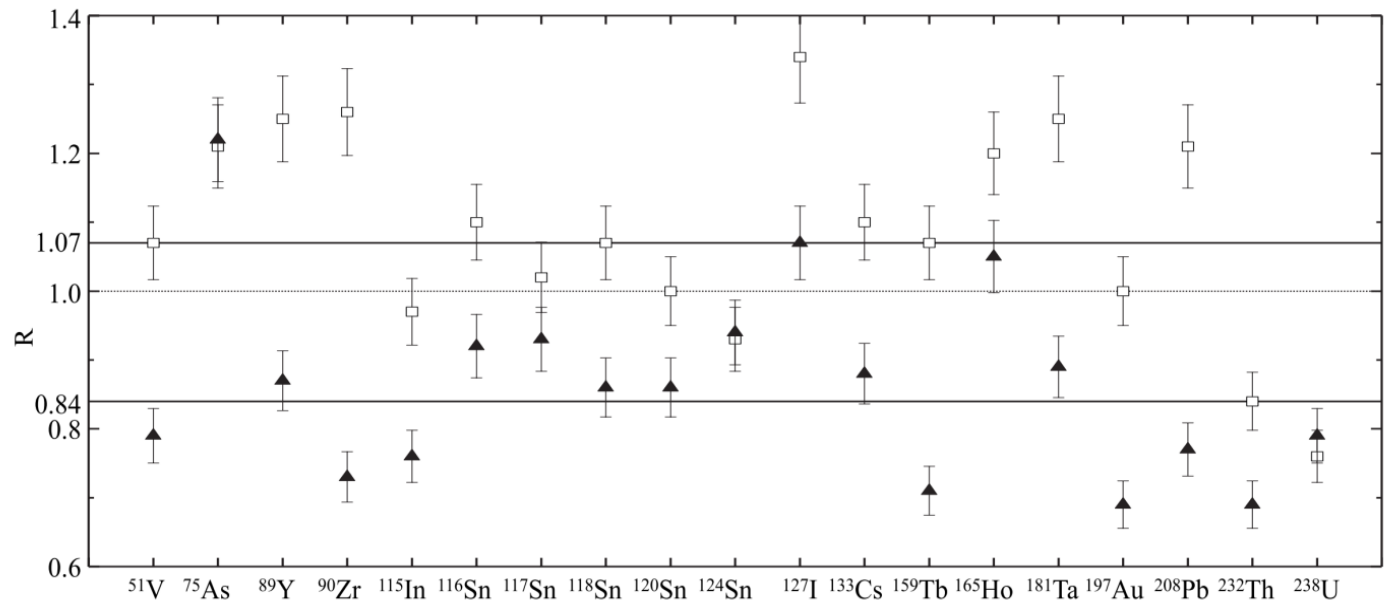
Первоочередные задачи в области ядерной физики для ИКИ НЦФМ (СГ5)

1. Получение новых непротиворечивых прецизионных данных о сечениях фотоядерных реакций и фотоделения в широкой области масс атомных ядер. Эти данные необходимы как для улучшения модельных и теоретических подходов к описанию фотоядерных реакций, так и для решения широкого круга прикладных задач, таких как: разработка систем трансмутации ядерных отходов, создания пучков радиоактивных ядер, получения экзотических ядер (высокоспиновых изомеров, сильнонейтроноизбыточных ядер, сильнодеформированных ядер), задач наработки перспективных медицинских радионуклидов;
2. Изучение фотоядерных реакций в области порога, необходимые, прежде всего, для ответа на вопрос о механизмах образования обойденных ядер в фотоядерных реакциях в процессе звездного нуклеосинтеза;
3. Исследование структурных особенностей и возбужденных состояний атомных ядер, поиск и исследование ядерных изомеров, в частности низколежащих изомерных состояний атомных ядер методом ядерной резонансной флуоресценции;
4. Изучение структурных особенностей дипольных состояний, таких как гросс-, промежуточная и тонкая структура, включая тонкую структуру пигми–дипольного резонанса, и альфа-кластерные состояния. Изучение особенностей гигантского дипольного резонанса, таких как изоспиновое, деформационное и конфигурационное расщепление.



Данные по фотоядерным реакциям, прежде всего, $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 1p)$, востребованы и широко используются в разнообразных приложениях. Энергетические зависимости полных и парциальных сечений фотоядерных реакций, измеренные с высокой точностью (лучше 1\% по абсолютной величине) и высоким энергетическим разрешением (десятки кэВ) в диапазоне энергий от порогов до (30-40) МэВ, крайне важны для решения проблемы существенных расхождений между результатами разных экспериментов, дальнейшего развития моделей атомного ядра и описания механизма фотоядерных реакций, для построения и уточнения моделирования во многих задачах фундаментальных исследований: от астрофизики до проектирования экспериментальных установок, а также для прикладных целей, например, для разработки методик гамма-активационного анализа, наработки медицинских изотопов, детектирования взрывчатых веществ, радиоактивных и делящихся материалов.

$$R = \frac{\sigma_{\text{инт}}^{\text{Сакле}}}{\sigma_{\text{инт}}^{\text{Ливермор}}}$$



Полная систематика отношений R интегральных сечений парциальных реакций и полученных в Ливерморе и Сакле: квадраты — данные для реакции $(\gamma, 1n)$, треугольники — $(\gamma, 2n)$

Помимо плохого энергетического разрешения на квазимонохроматических пучках в предыдущих работах, существенное влияние оказывали используемые методы регистрации нейтронов в фотоядерных реакциях. В частности, в экспериментах на аннигиляционных гамма-квантах существуют систематические проблемы как с разделением нейтронов по множественности от многочастичных реакций, так и с энергозависимой эффективностью нейтронных детекторов, что накладывает свои ограничения при неизвестных нейтронных спектрах.

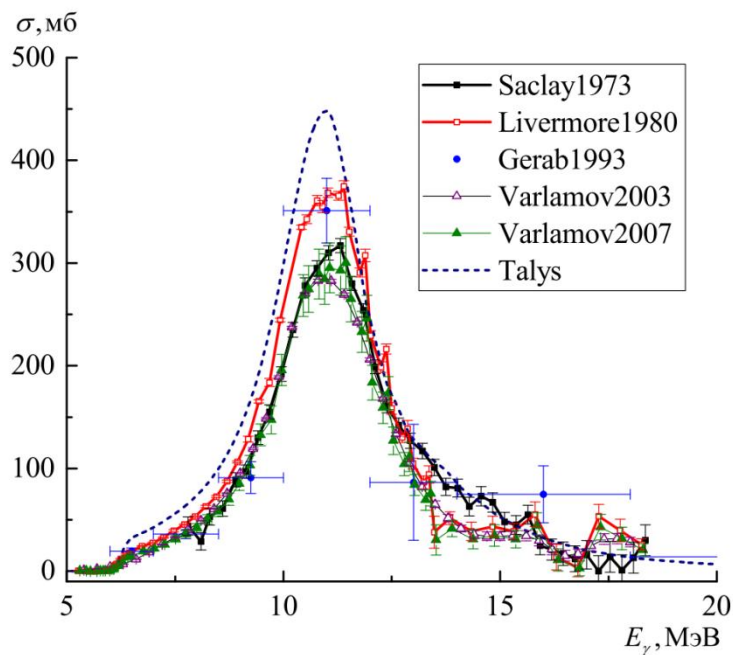


Рис. 2. Сечения реакции $^{238}\text{U}(\gamma, n)^{237}\text{U}$

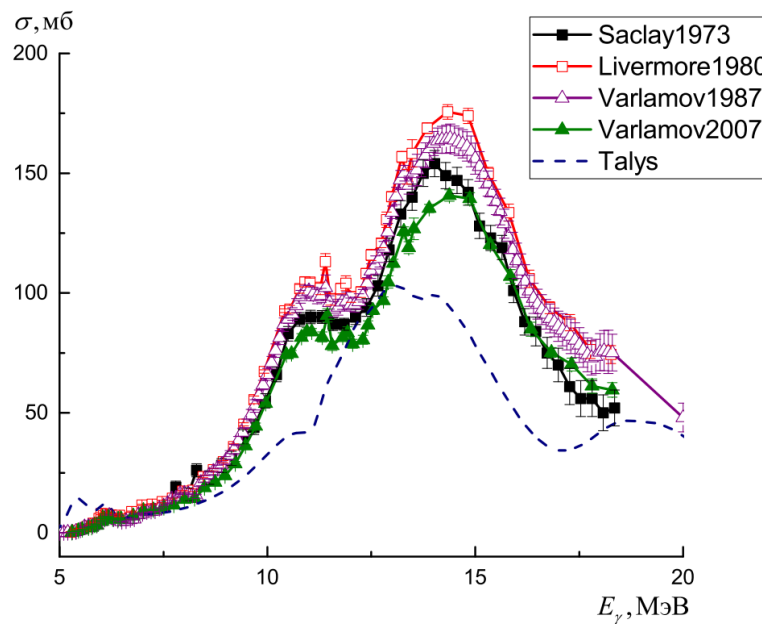
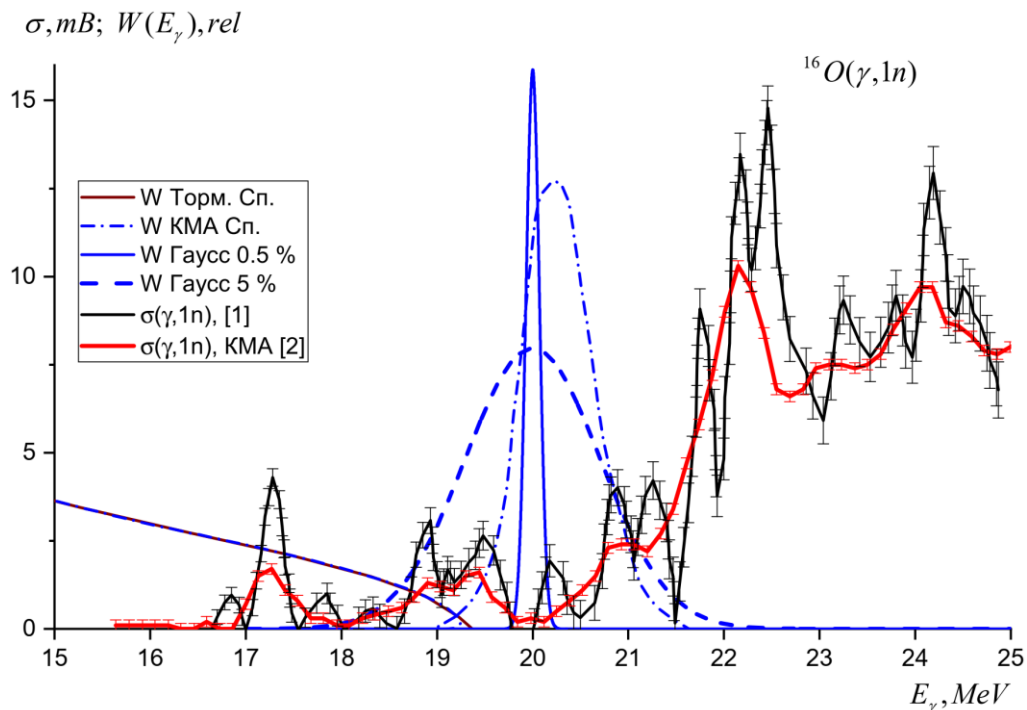


Рис. 4. Сечения реакции фотodelения $^{238}\text{U}(\gamma, F)$

Программа возможных исследований на пучке гамма-квантов комптоновского источника, сооружение которого планируется в НЦФМ, полностью определяется характеристиками этого пучка. Создание источника гамма-квантов, параметры которого повторяют параметры действующих источников, не позволят сделать прорыв в исследовании фотоядерных реакций.

В качестве источников гамма-квантов использовались : (1) резонансные (n, γ) и (p, γ) реакции – монохроматические линии с фиксированной энергией; (2) тормозное излучение с непрерывным спектром, генерируемое пучками электронных ускорителей; (3) излучение, генерируемое при аннигиляции позитронов на лету – квазимонохроматический спектр с достаточно широким ($\sim 10\%$) аннигиляционным пиком и подложкой тормозного излучения; (4) квазимонохроматические источники на основе обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на электронном пучке накопителя с шириной спектра от единиц до десятков процентов.



Для прецизионного измерения сечений фотоядерных реакций с помощью высокоэффективного детектора нейтронов на основе замедлителя и гелиевых счётчиков необходимо:

- Знать спектр нейтронов. Запланированы измерения спектров нейтронов с помощью времяпролетной методики. Разрабатывается нейтронный времяпролетный детектор для измерения спектров и угловых распределений нейтронов в фотоядерных реакциях на пластиках и жидких сцинтилляторах. Проведены первые эксперименты на тормозных пучках электронов лазерного ускорения на стильбене. Прецизионные спектры возможно измерять из-за короткой длительности импульса на ИКИ и хорошего энергетического разрешения.

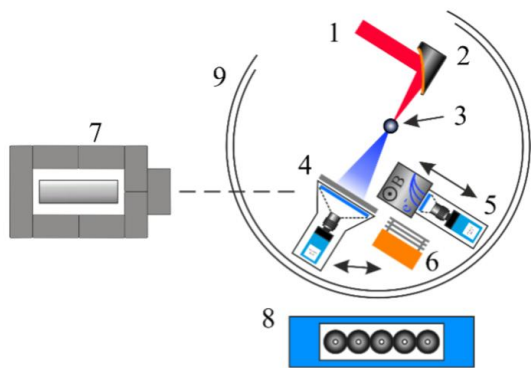


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1. Излучение Ti:Sapphire, 2. Внеосевое параболическое зеркало, 3. Газовая струя, 4. Свинцовый фильтр и экран LaBr₃, 5. Магнитный спектрометр, 6. Ячейка Фарадея, 7. Времяпролётный детектор, 8. Массив ³He-счётчиков, 9. Вакуумная камера.

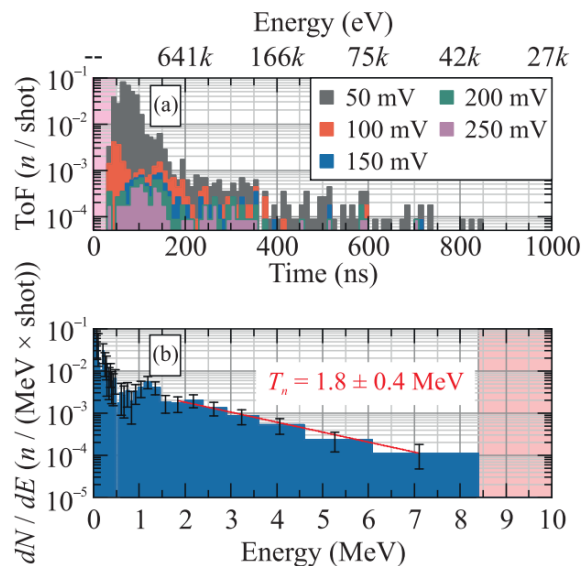
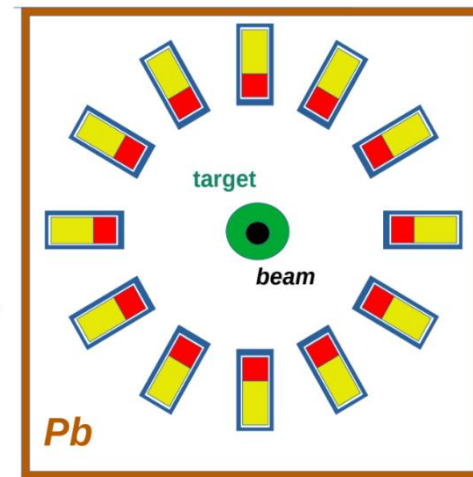


Рис. 4. (Цветной онлайн) (а) – Времяпролетные гистограммы (ToF) при различных пороговых уровнях регистрации импульсов в сигнале; (б) – энергетический спектр нейтронов, соответствующий уровню 150 мВ



С. А. Шуляпов, Е. М. Стародубцева, И. Н. Цымбалов, А. Ю. Заворотный, М. А. Бакулев, А. С. Чепурнов, А. А. Кузнецов, and А. Б. Савельев. Измерение энергетического спектра короткоимпульсных источников нейтронов на основе фотоядерных реакций. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 121(11):865–870, 2025