

Комплекс ИКИ НЦФМ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ для ядерной физики

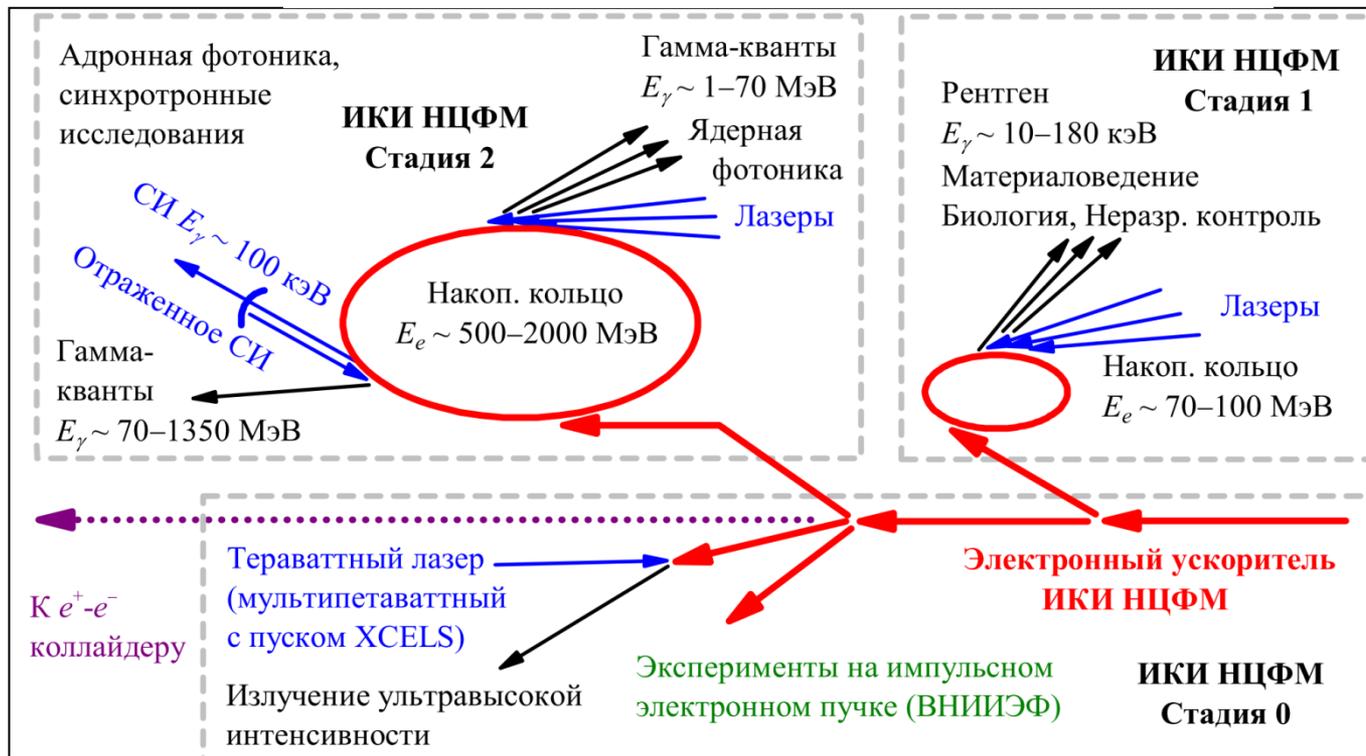
А.А. Кузнецов, Л.З. Джилавян, С. С. Бельшев, В.В. Варламов, А.М. Лапик,
А.Л. Полонский, А.В. Русаков, В.И. Шведунов, А.А. Шемухин
НИИЯФ МГУ, ИЯИ РАН

Семинар имени Б.С. Ишханова

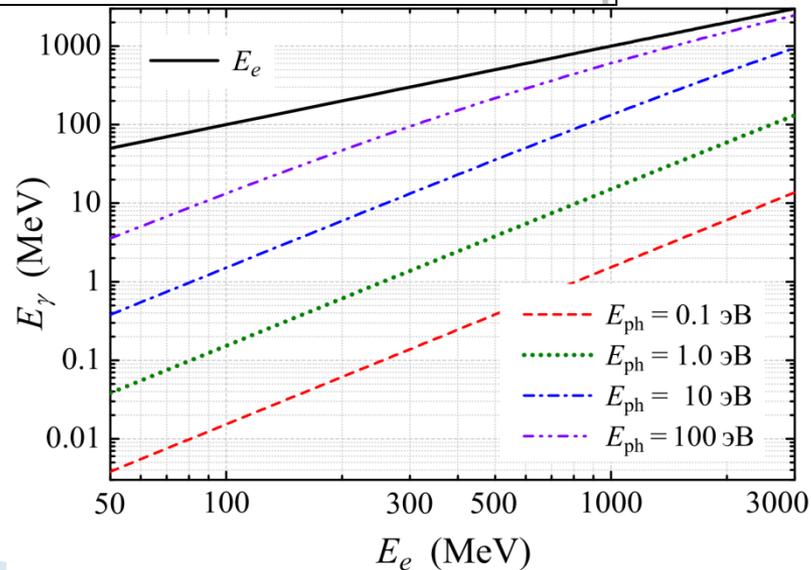
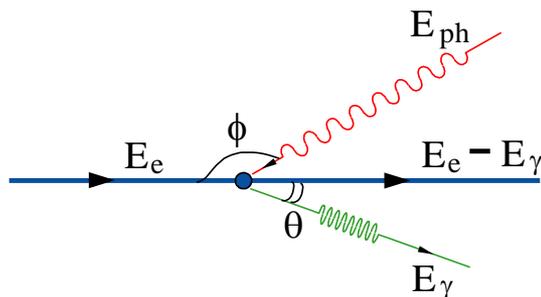
“Фотоядерные исследования. Состояние и перспективы”

26 октября 2023 года, НИИЯФ МГУ



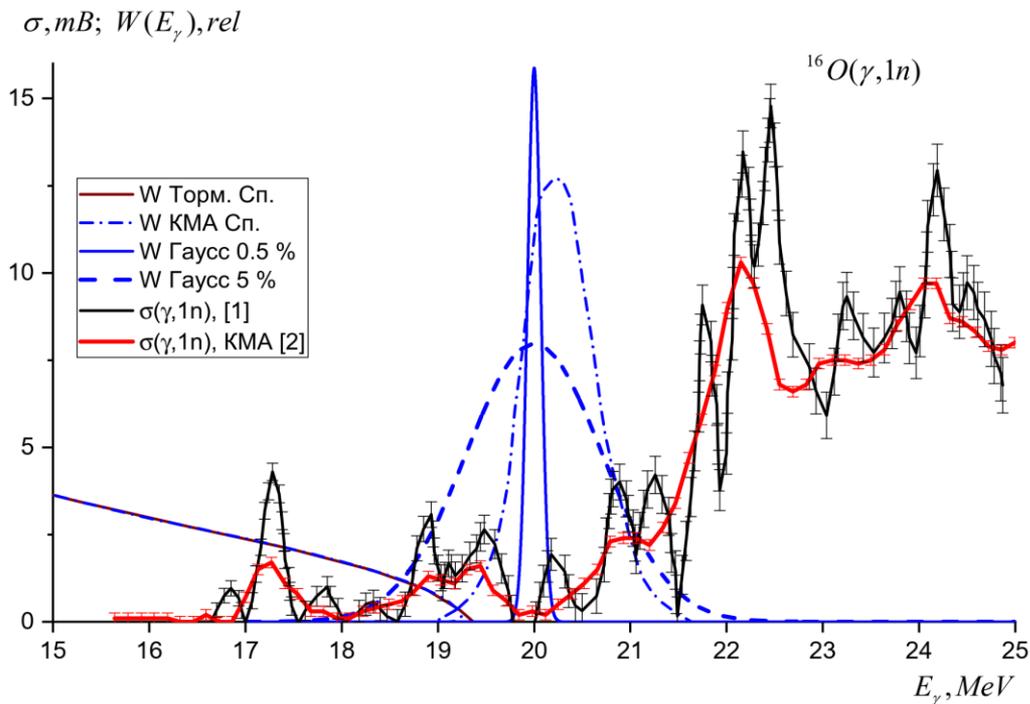


$$E_\gamma = \frac{2\gamma^2 E_{ph}}{1 + \gamma^2 \theta^2} (1 - \cos \phi), \quad \gamma \gg 1, \quad \theta \ll 1$$



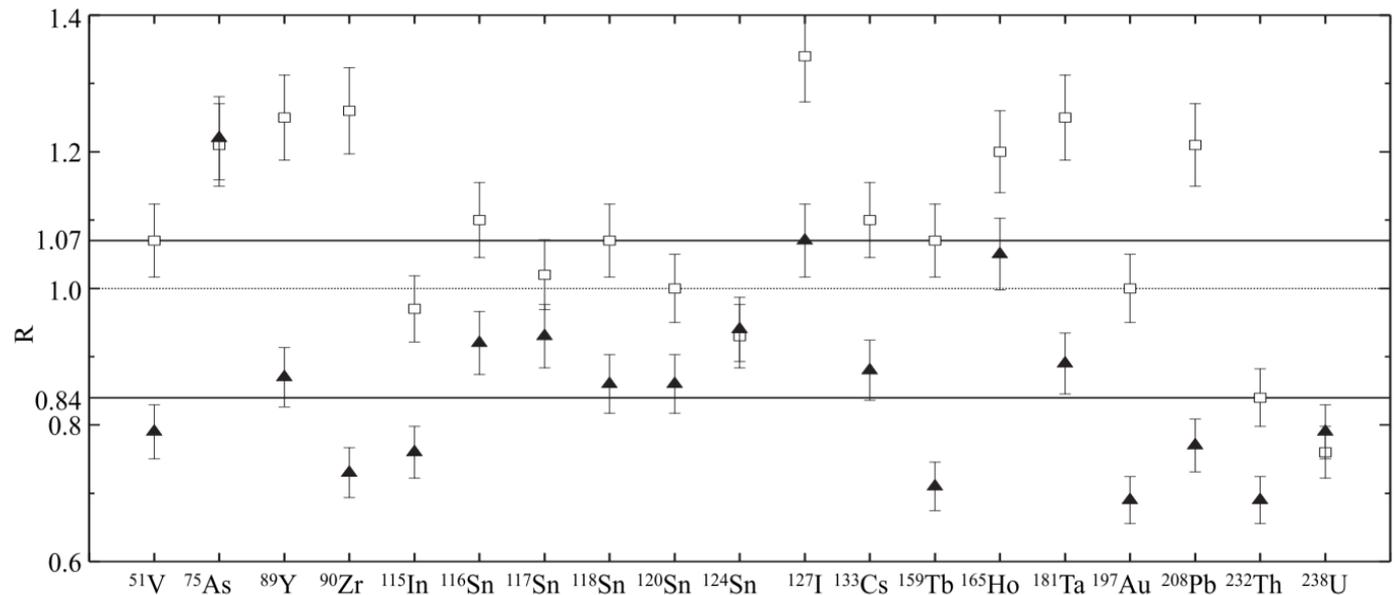
Программа возможных исследований на пучке гамма-квантов комптоновского источника, сооружение которого планируется в НЦФМ, полностью определяется характеристиками этого пучка. Создание источника гамма-квантов, параметры которого повторяют параметры действующих источников, не позволят сделать прорыв в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



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.

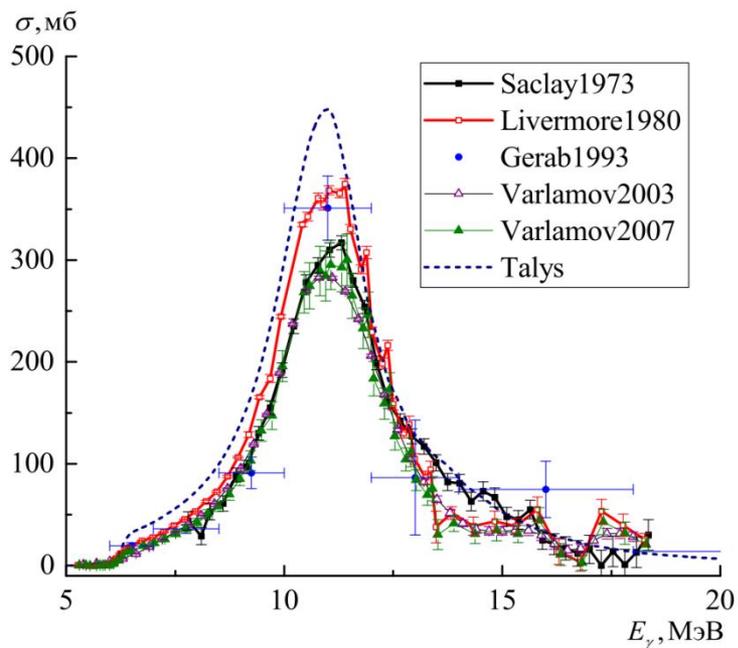


Рис. 2. Сечения реакции $^{238}\text{U}(\gamma, n)^{237}\text{U}$

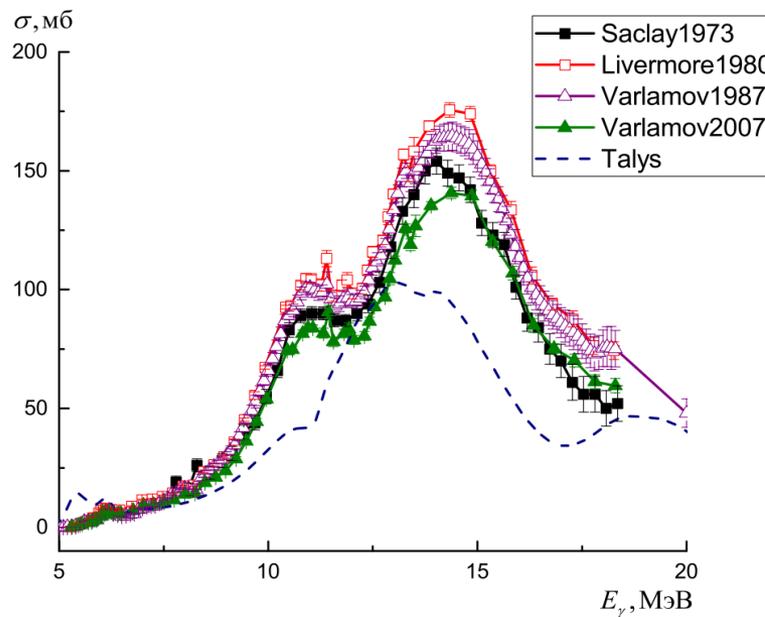


Рис. 4. Сечения реакции фотodelения $^{238}\text{U}(\gamma, F)$

Для исследования фотоядерных реакций в настоящем проекте предлагается, помимо прямых методов регистрации нейтронов, использовать также офлайн методики активационного анализа и времяпролетные методики измерения спектра нейтронов. Предлагаемые измерительные методики, а также характеристики самых изучаемых процессов накладывают жесткие требования к характеристикам пучка гамма-квантов ИКИ

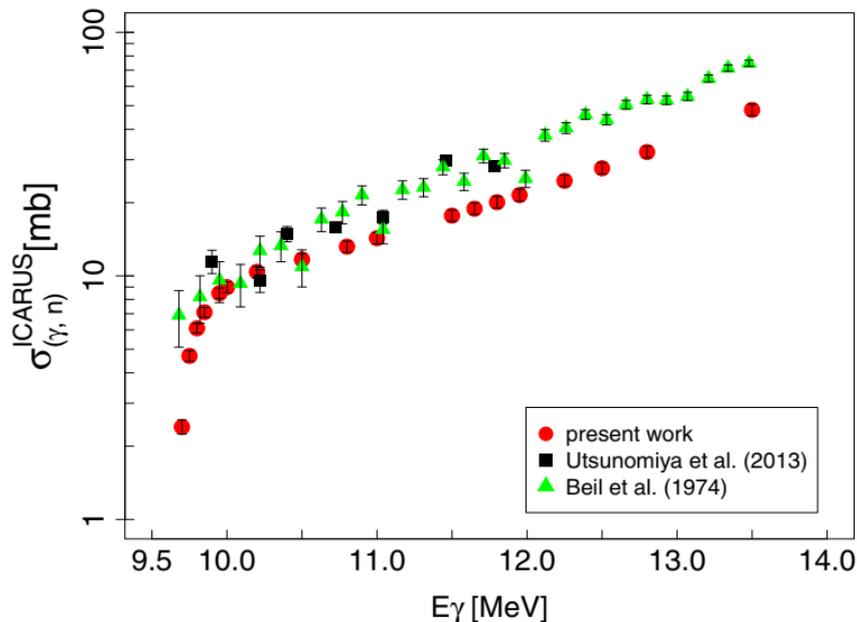


FIG. 5. ICARUS excitation function for $^{94}\text{Mo}(\gamma, n)$ of this work compared with the previous measurements [18,43].

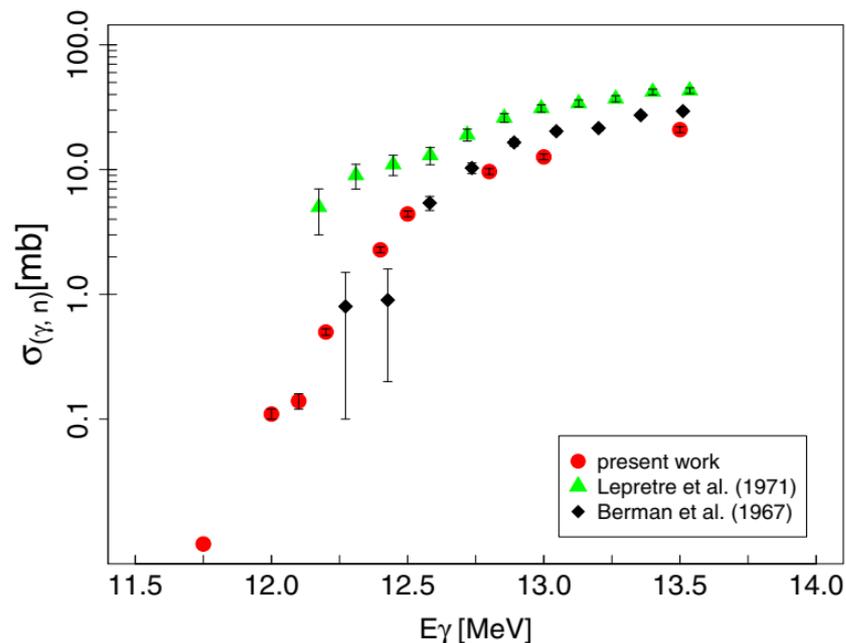


FIG. 6. Excitation function for $^{90}\text{Zr}(\gamma, n)$ of this work compared with the previous measurements [44,45].

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

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

	E_γ , MeV	ΔE_γ	I_γ , ph/sec
ELI-NP (VEGA) (Румыния, проект)	0.2-19.5	0.5	$\sim 10^8$
NewSubaru (Япония, SPRING8) работает	0-76	1.2	$\sim 10^5$
HIγS (США, работает)	0-100	0.8-10	$\sim 10^7$
ИКИ НЦФМ (Россия, проект)	0-300?	0.1-0.3	$\sim 10^7$

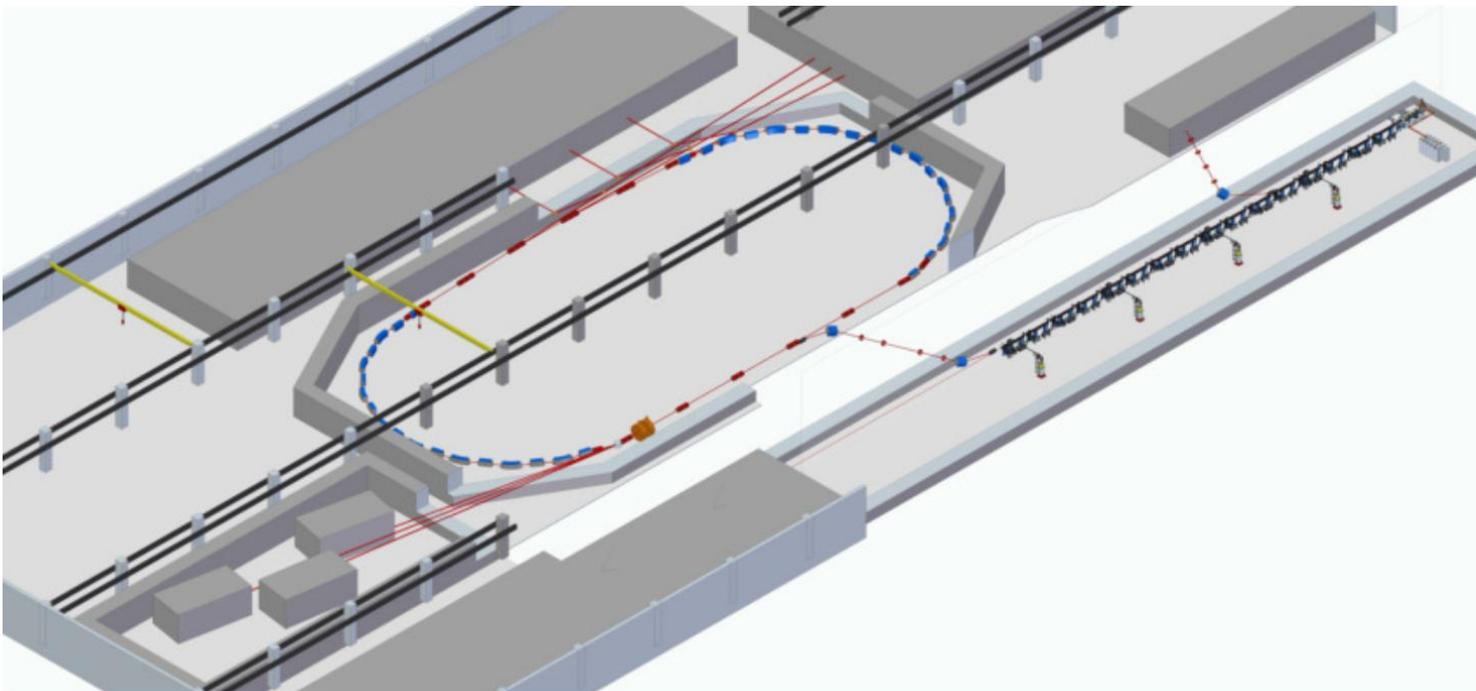
Основные требования и преимущества ИКИ:

1. Интенсивность, достаточная для проведения активационных экспериментов - порядка $10^7 - 10^8$ фотонов в секунду;
2. Высокая монохроматичность (среднеквадратичный относительный разброс по энергии не хуже 0.1-0.3% и малая расходимость);
3. Быстрая и плавная перестройка энергии с шагом не более 100 КэВ в диапазоне от 10 до 40 МэВ
4. Короткая длительность импульса - пикосекунды - 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.

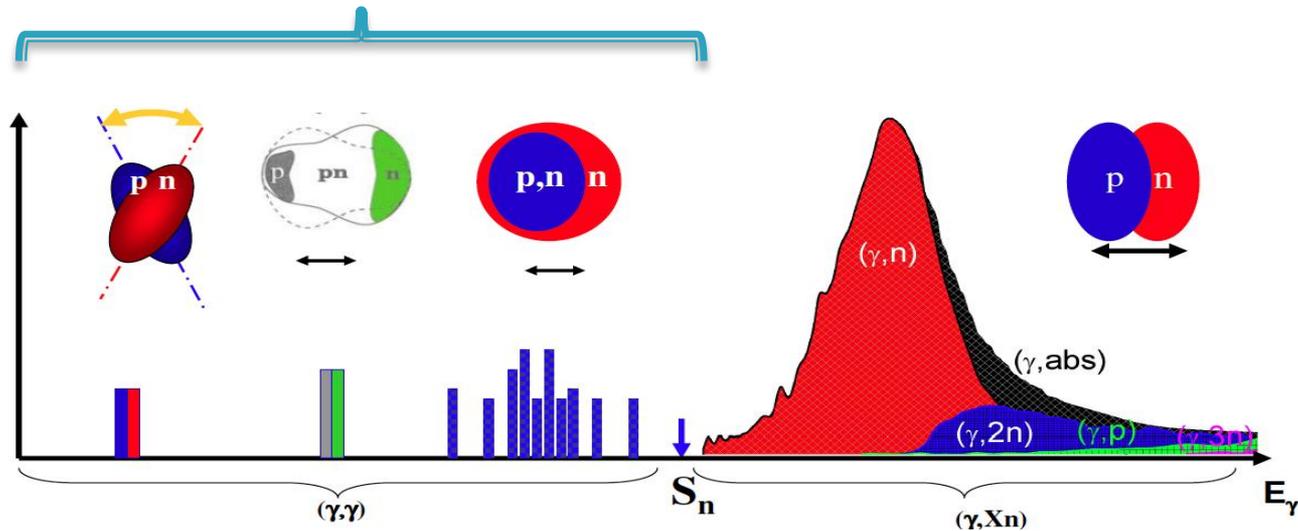


Метод комптоновского рассеяния лазерного излучения на электронном пучке позволяет получать пучок гамма-квантов с требуемыми характеристиками, однако исполнение систем такого источника – ускорительного и лазерного комплексов - должно быть близко к предельно достижимому по отношению к характеристикам электронного и лазерного пучков. В частности, среднеквадратичные относительные разбросы по энергии электронного и лазерного пучков, относительная среднеквадратичная стабильность их энергий должны быть на уровне лучше 0.1%, а среднеквадратичный нормализованный эмиттанс электронного пучка должен быть менее 0.5 мм мрад, что близко к тепловому эмиттансу СВЧ пушек с металлическим фотокатодом или эмиттансу электронных пучков источников синхротронного излучения 4-го поколения.



Задачи

- Получение новых непротиворечивых данных о сечениях фотоядерных реакций (7-40 МэВ).
- Изучение структуры гигантского дипольного резонанса (ГДР), гигантских резонансов иной природы, пигми- и М1 резонансов.
- 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.



Старт. ИКИ МГУ.

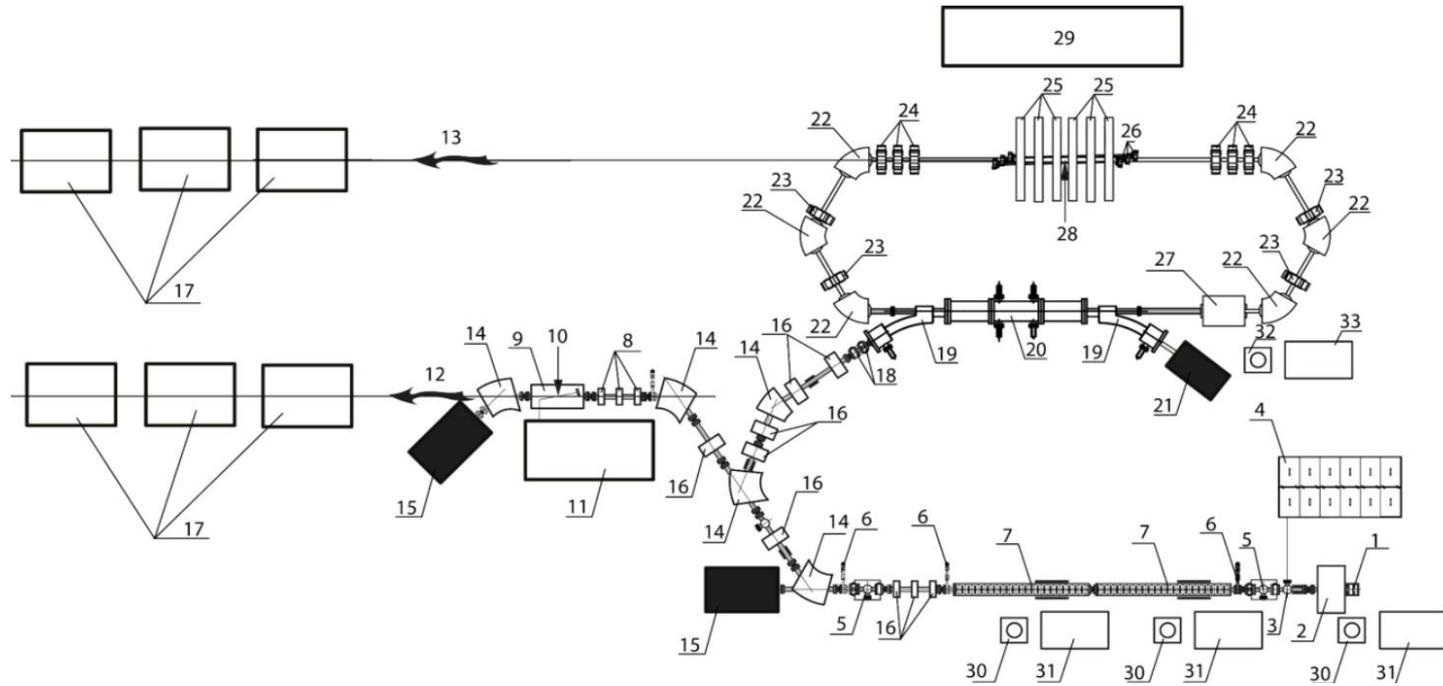


Рис. 3.5: Состав ИКИ МГУ (рентгеновский диапазон) на основе линейного ускорителя. 1 — СВЧ пушка с фотокатодом, 2 — соленоид, 3 — окно ввода лазерного излучения, 4 — лазер фотокатода, 5 — станция диагностики пучка, 6 — вакуумный затвор, 7 — ускоряющая структура, 8 — триплет квадрупольных линз, 9 — камера взаимодействия, 10 — точка взаимодействия, 11 — основной лазер, 12, 13 — рентгеновское излучение, 14 — поворотный магнит, 15 — поглотитель пучка, 16 — квадрупольная линза, 17 — рабочие станции, 30 — импульсный клистрон, 31 — модулятор.

Рис. 3.6: Состав ИКИ МГУ (рентгеновский диапазон) с линейным ускорителем и кольцом. 13 — тракт рентгеновского пучка, 18 — станция диагностики инжектируемого пучка, 19 — септум магнит, 20 — киккер, 21 — поглотитель отработанного пучка, 22 — поворотные магниты кольца, 23 — секступольные линзы кольца, 24 — триплеты квадрупольных линз кольца, 25 — триплеты точки взаимодействия, 26 — зеркала лазерного резонатора, 27 — ВЧ резонатор кольца, 28 — точка взаимодействия электронных пучков с лазерным излучением. 29 — лазерная система кольца, 32 — клистрон непрерывного действия, 33 — источник питания клистрона непрерывного действия. Остальные обозначения как на Рис. 3.5.

Спасибо за внимание!

