



РФЯЦ-ВНИИЭФ  
РОСАТОМ



БФУ  
ИМЕНИ И. КАНТА

Skoltech

# ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКЕ НА МАЛОМ КОЛЬЦЕ ИКИ

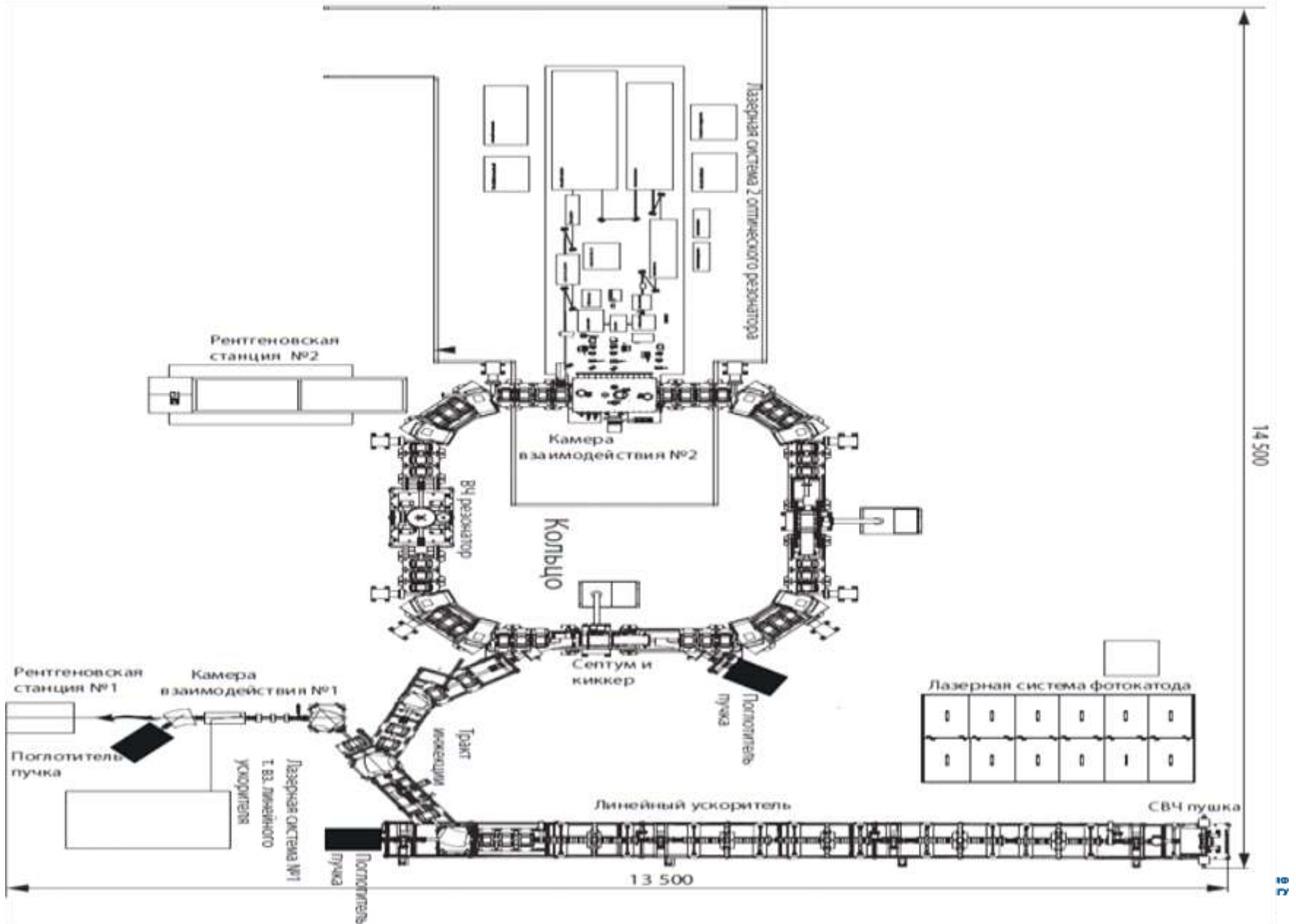
А.А. Шемухин

ИЯФ СО РАН, Новосибирск

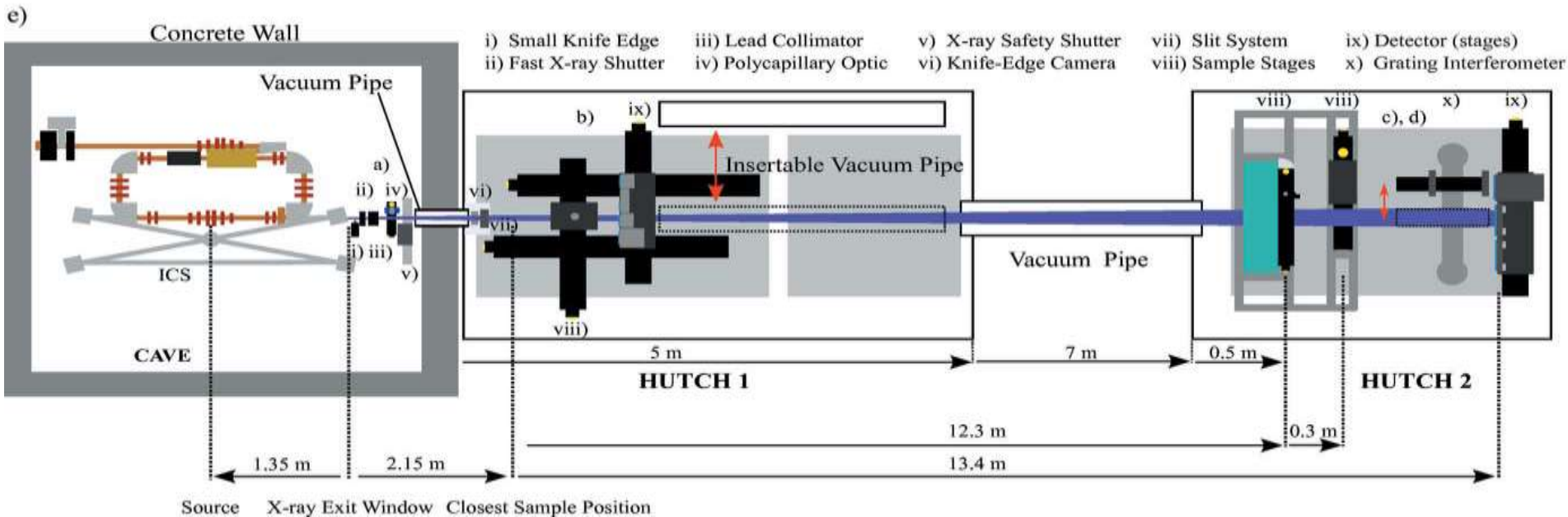
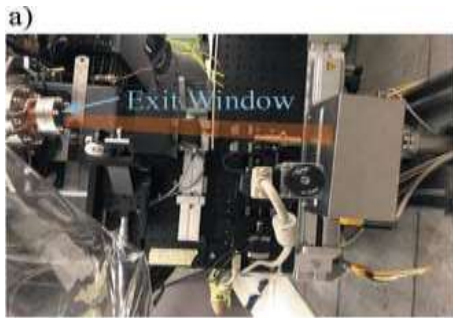
10.03.2026

Шемухин А.А. | ЛИНТ | shemuhin@gmail.com

# СХЕМА МАЛОГО КОЛЬЦА ИКИ



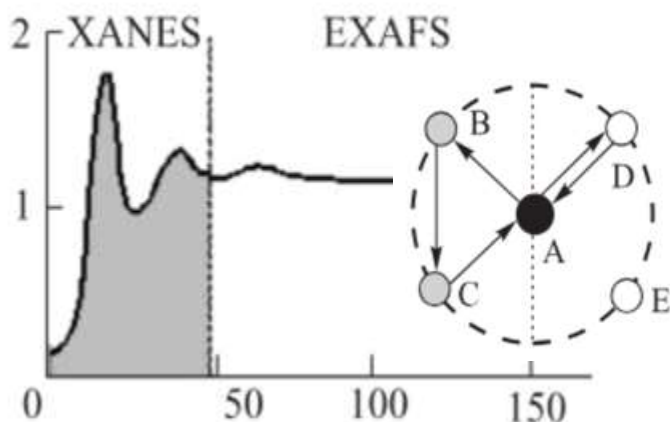
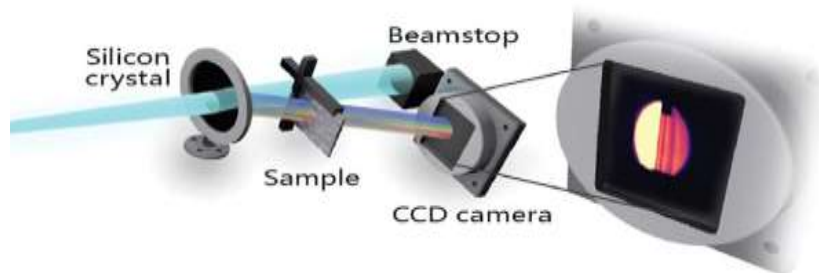
# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫ МОДУЛИ МАЛОГО КОЛЬЦА ИКИ



1. Рабочий модуль «Микрофокус» (энергии фотонов 25-270 кэВ). Размер пучка на станции «Микрофокус» составляет от 10 до 200 мкм. **Нелинейный Комптон**
2. Разработка и создание на рентгеновском пучке рабочего модуля «Рентгенография» (энергии фотонов 30-540 кэВ). Размер пучка на станции «Рентгенография» от 5 мм до 2 см.
3. Оффлайн гамма спектрометрии для исследования фотоядерных реакций методом наведенной активности. Подготовка исходных данных для экспериментов по исследованию фотоядерных реакций на тормозных пучках до 120 МэВ.
4. Онлайн гамма спектрометрии на пучке обратного комптоновского гамма-излучения. Подготовка исходных данных для ЯРФ экспериментов по исследованию структуры ядер и изомерных состояний.

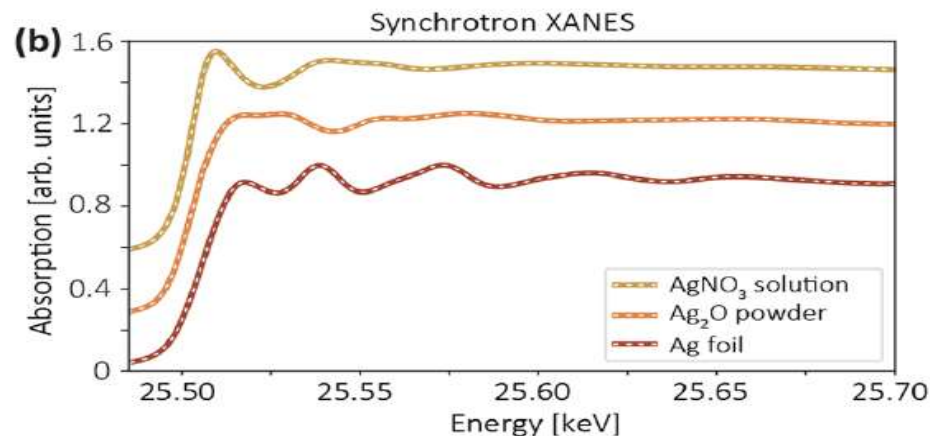
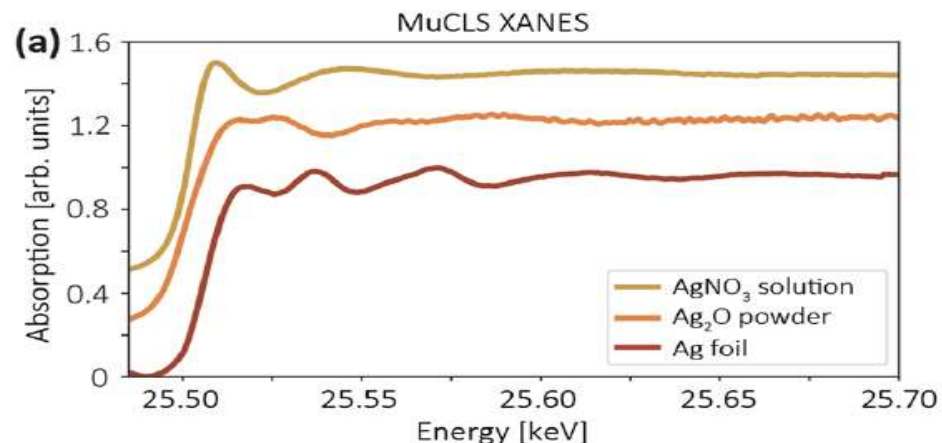


## Приложение: XANES и EXAFS



XAFS (от английского X-ray absorption fine structure) спектроскопия - метод, основанный на изучении тонкой структуры спектров поглощения рентгена

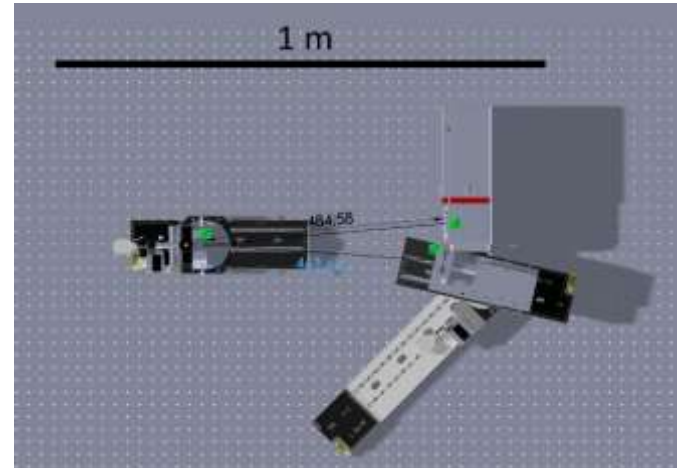
Слайд 5



Huang, Juanjuan, et al. "Scientific reports 10.1 (2020): 1-10.

Ширина спектра (порядка 1% от энергии) позволяет исследовать структуру EXAFS в области ряда K- и L-краев.





## \* Инструмент для анализа структуры

- выявление локальной и электронной структуры вещества (*определение валентного состояния и формы нахождения элементов определяют их поведение, как в технологических средах, так и объектах окружающей среды;*)
- новые материалы (*определение зонной структуры и т.д.*)

## \* Инструмент для анализа различных типов воздействия

*(при воздействии электронов, гамма-квантов, ВЭП, ТЗЧ и нейтронов)*

- относительно простой способ определения химического состояния и локальной атомной структуры для выбранных видов атомов
- многоступенчатый подход по решению проблем радиационной стойкости и сбоеустойчивости, а также разработке новых электронных компонент
- **(время накопления спектра порядка 10 мин)**



# Быстропротекающие процессы

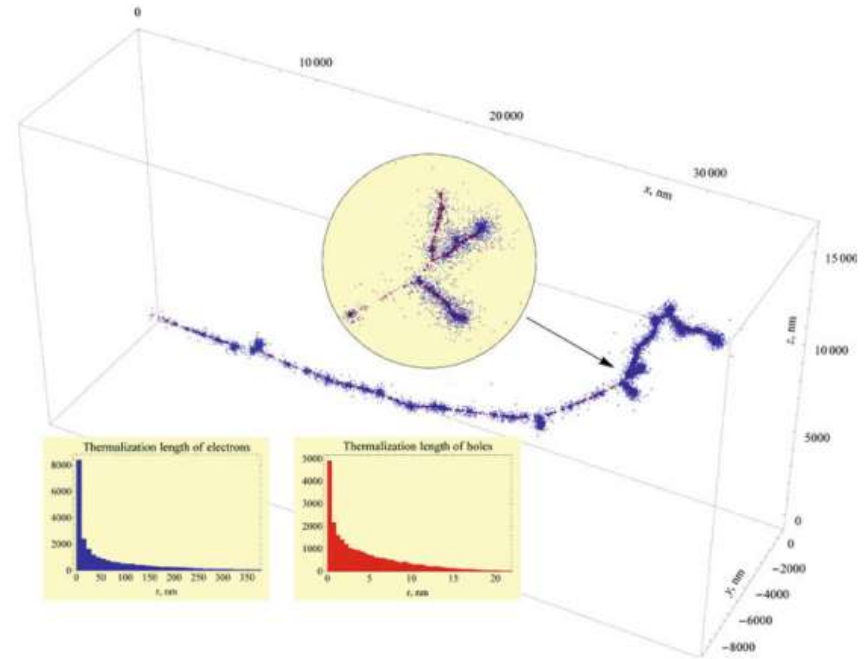
## \* Быстропротекающие процессы

(*In situ* образование дефектов, разработка детекторов)

Кинетика (поглощение, люминесценция) – пикосекундные процессы.

- физика высоких энергий с предельными временными характеристиками
- Промышленное применение
- Разработка детекторов рентгеновского излучения с учетом возможностей спектральной калибровки

Опыт использования фемтосекундных лазеров с генерацией высоких гармоник с аналогичной частотой повторения импульсов (1 кГц) показывает, что на измерение кинетики **требуется время порядка десятков минут**, что вполне приемлемо.

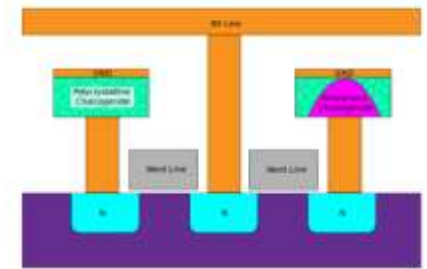
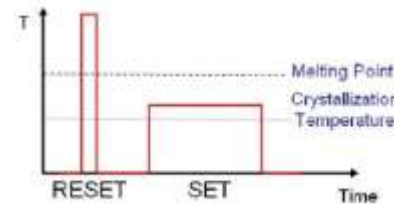
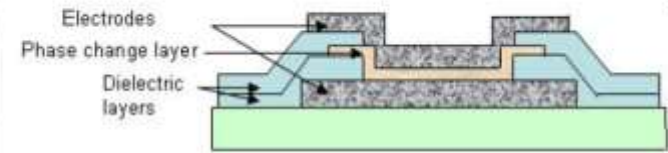
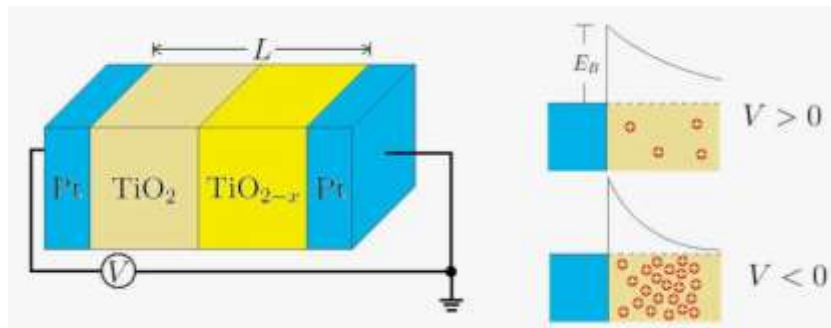


Пространственное распределение электронов и дырок после термализации за счет фотопоглощения  $\gamma$ -кванта с энергией 200 кэВ в сцинтилляторе NaI(Tl)

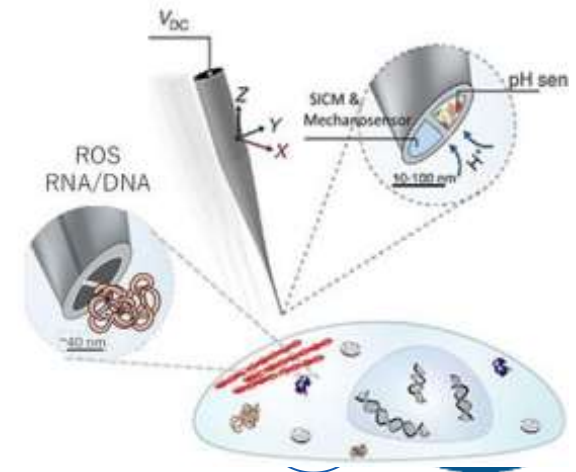


# Быстропротекающие процессы

- Электронные компоненты (фазовая память, мемристоры, In situ образование дефектов)



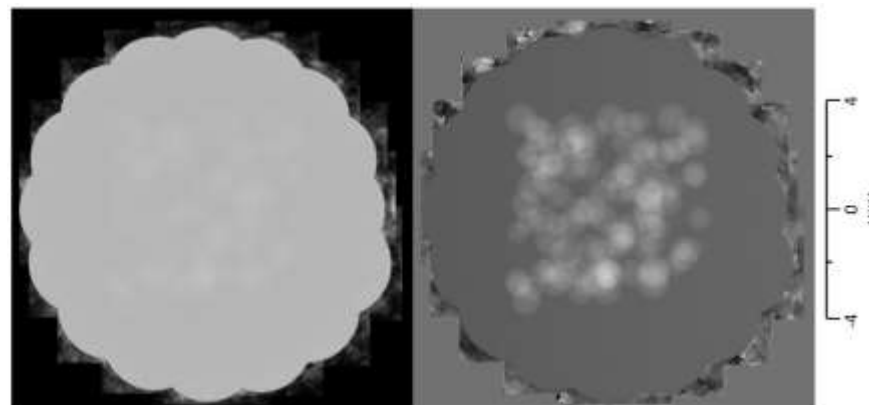
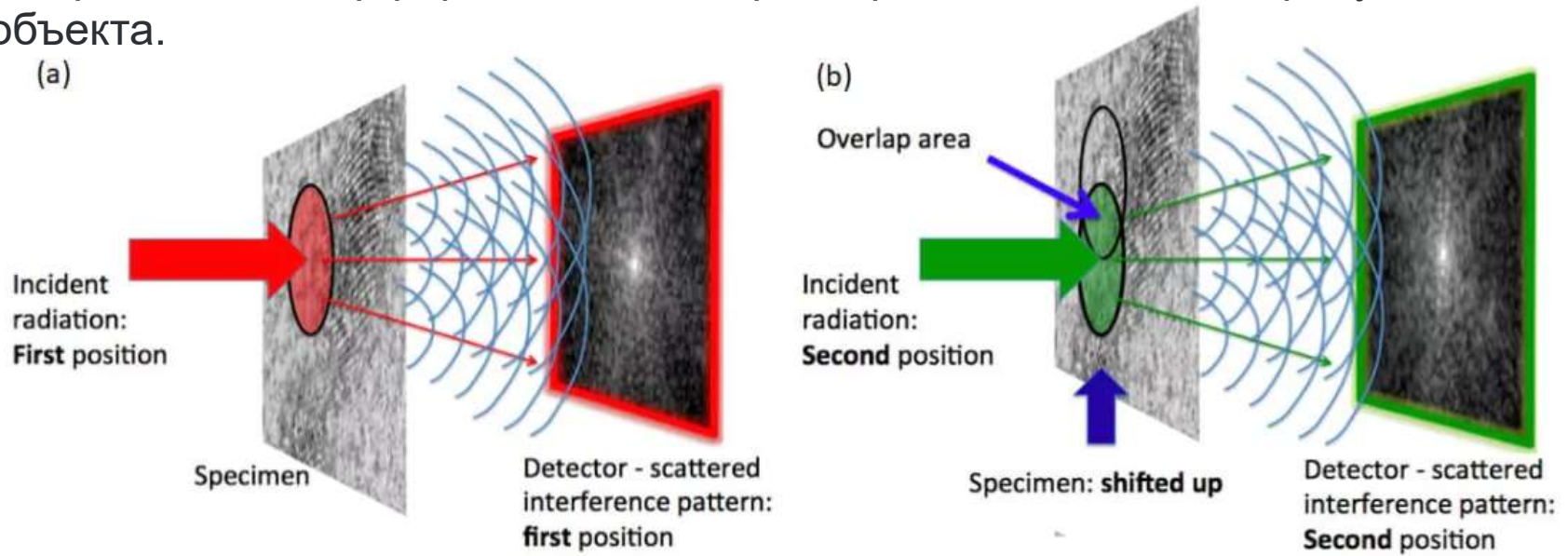
- Медицинская визуализация (корреляционные изменения мембранного потенциала клетки с высоким временным разрешением, распространения потенциала действия, изменения конформации и агрегации белков, изменения потенциала митохондрий, изменений внутриклеточных метаболических циклов)

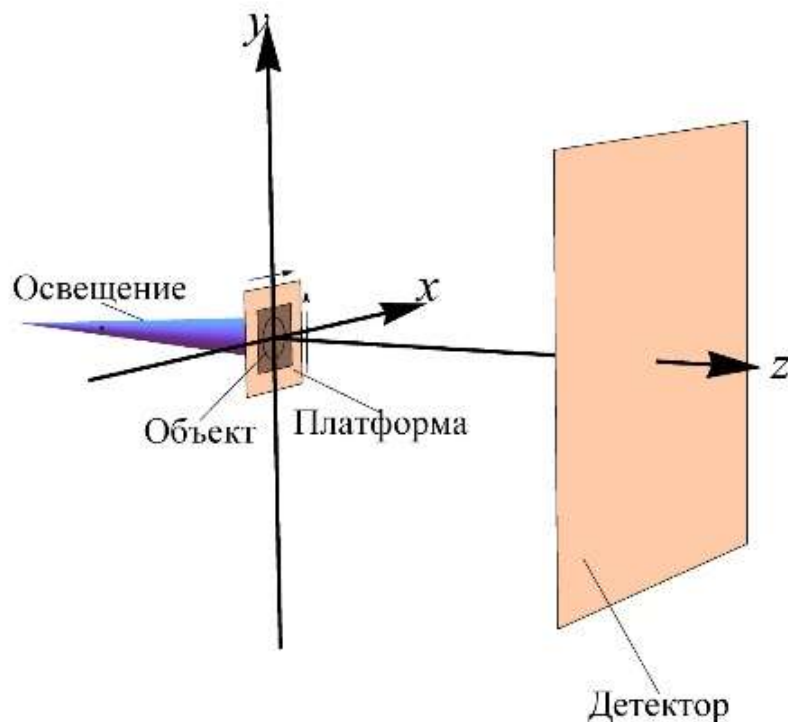




# ПТИХОГРАФИЯ

**Птихография** - это вычислительный метод микроскопической визуализации. Она генерирует изображения путем обработки множества когерентных интерференционных картин, рассеянных от интересующего объекта.





## Требования к станции для птихографии:

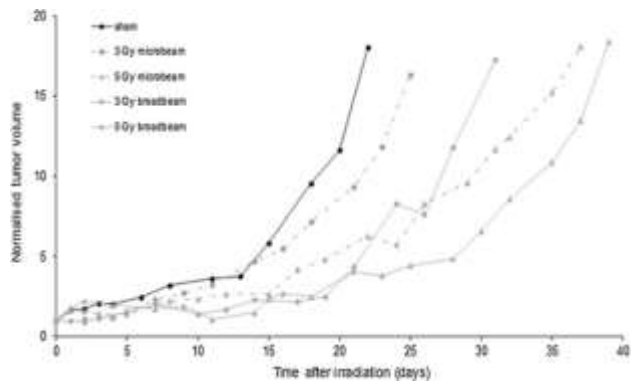
- энергия фотонов:  $< 0.1$  МэВ
- размер источника:  $< 1$  мм
- монохроматичность:  $\leq 0.1\%$
- средний поток фотонов:  $> 10^6$  с<sup>-1</sup>

## Преимущества:

- Не требует дорогостоящей оптики!
- Построение изображений с атомными длинами волн
- Позволяет очень четко видеть прозрачные объекты (клетки не нужно окрашивать или маркировать для создания контраста)



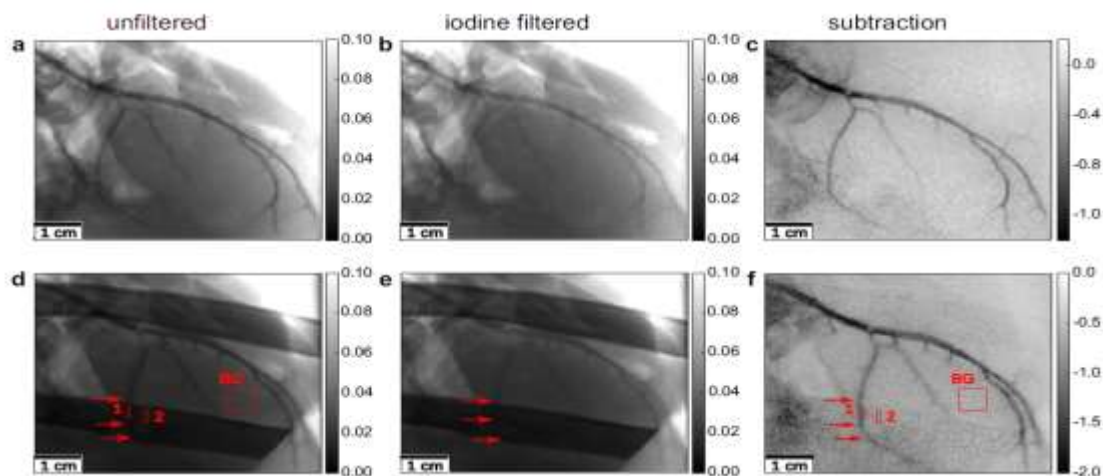
## Приложение: микропучковая радиационная терапия



## Приложение: биологическая фазово-контрастная рентгенография



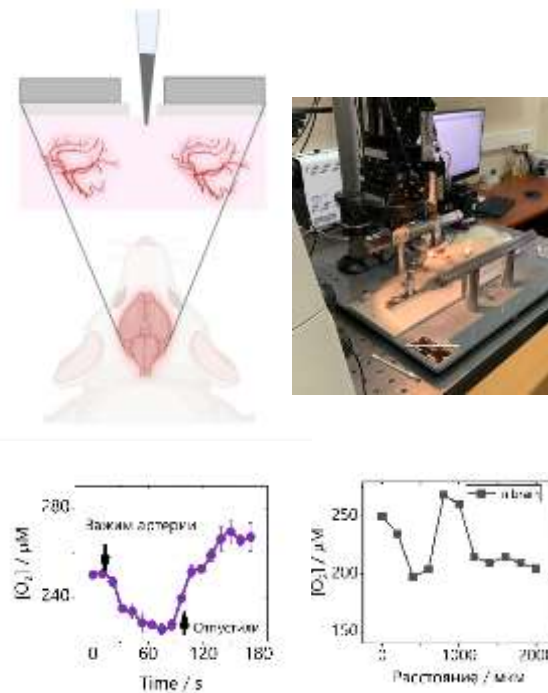
## Приложение: ангиография с разностным контрастом

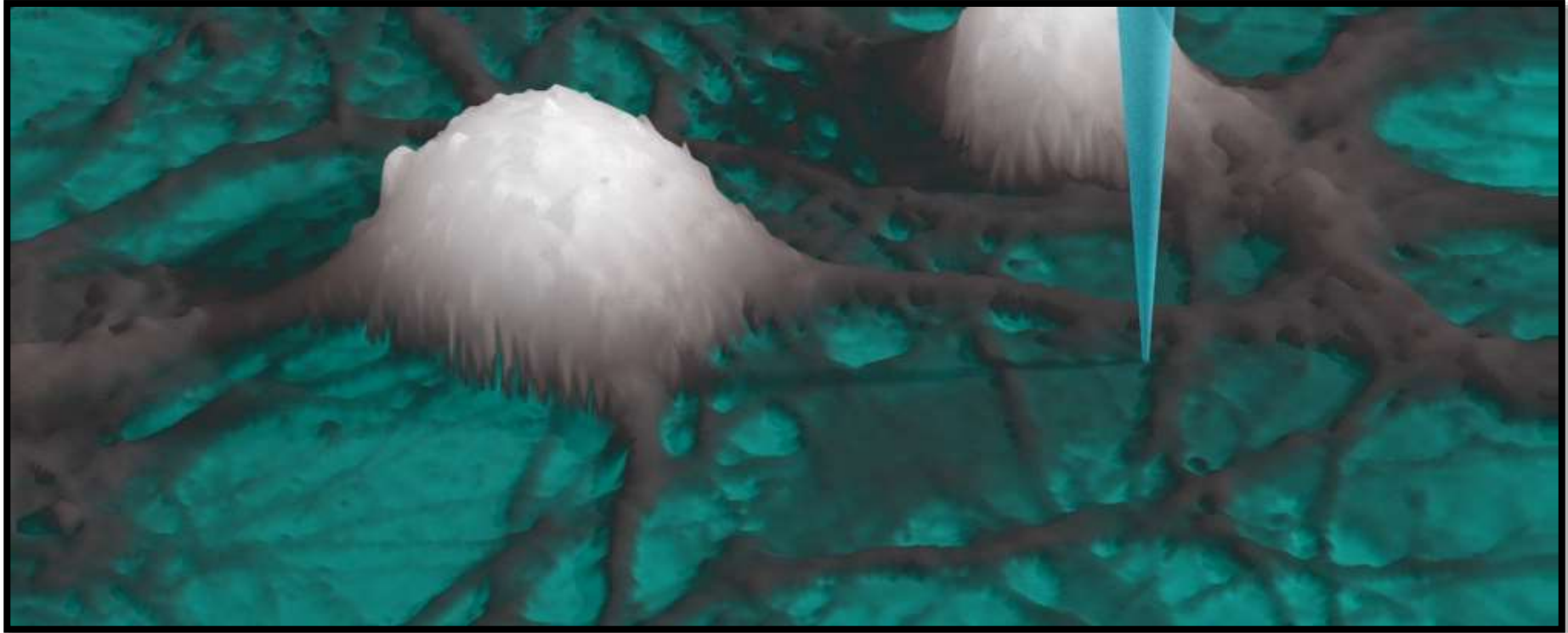


Создания биостанции с использованием *In vivo* электрохимического обнаружения биоаналитов:

- в режиме реального времени позволит эффективно исследовать влияния облучения.
- Изучение образования аналитов в режиме реального времени позволит максимально точно подбирать эффективную дозу при прямой корреляции образования активных форм кислорода.
- Использование наноэлектродов позволит осуществлять картирование образования метаболитов в результате воздействия излучения синхротрона
- измерять градиент их генерации от точки максимума направляемого излучения в тканях исследуемых животных.

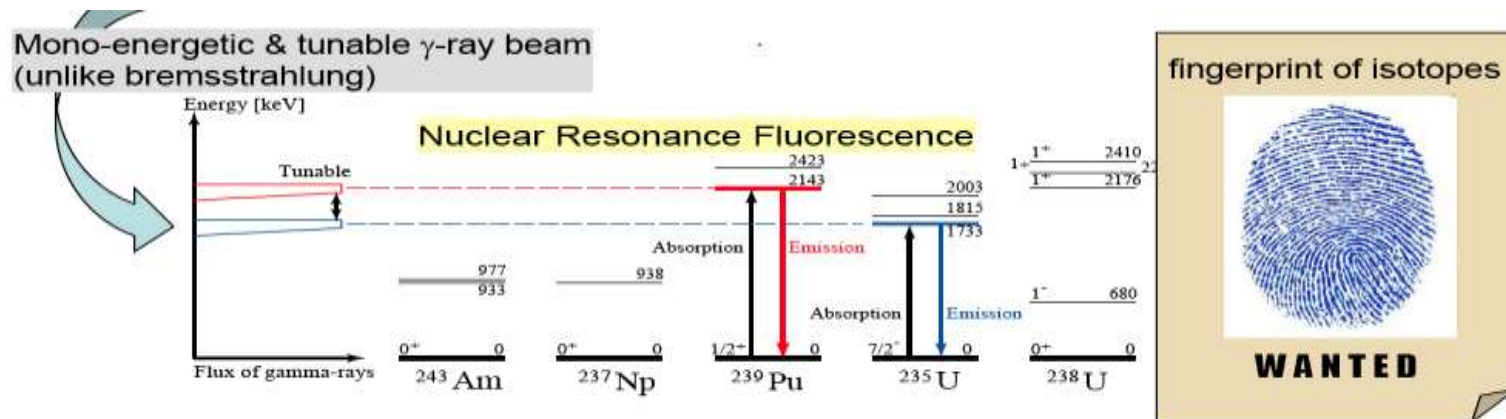
## Определение кислорода в мозге крысы *in vivo*





# Ядерно-физические исследования на малом кольце ИКИ

- Структуры атомных ядер (эксперименты по ядерно-резонансной флуоресценции, спектроскопии низколежащих ядерных возбуждений) и изомерных состояний атомных ядер в результате реакций ( $g, g'$ ).
- Эксперименты на тормозном пучке линейного ускорителя электронов с энергией до 120 МэВ, включающие в себя как эксперименты по исследованию заселения изомерных состояний в результате фотоядерных реакций ( $gn, gp$ ),
- Исследование фотоядерных реакций с целью определения исходных данных для экспериментов на большом кольце ИКИ

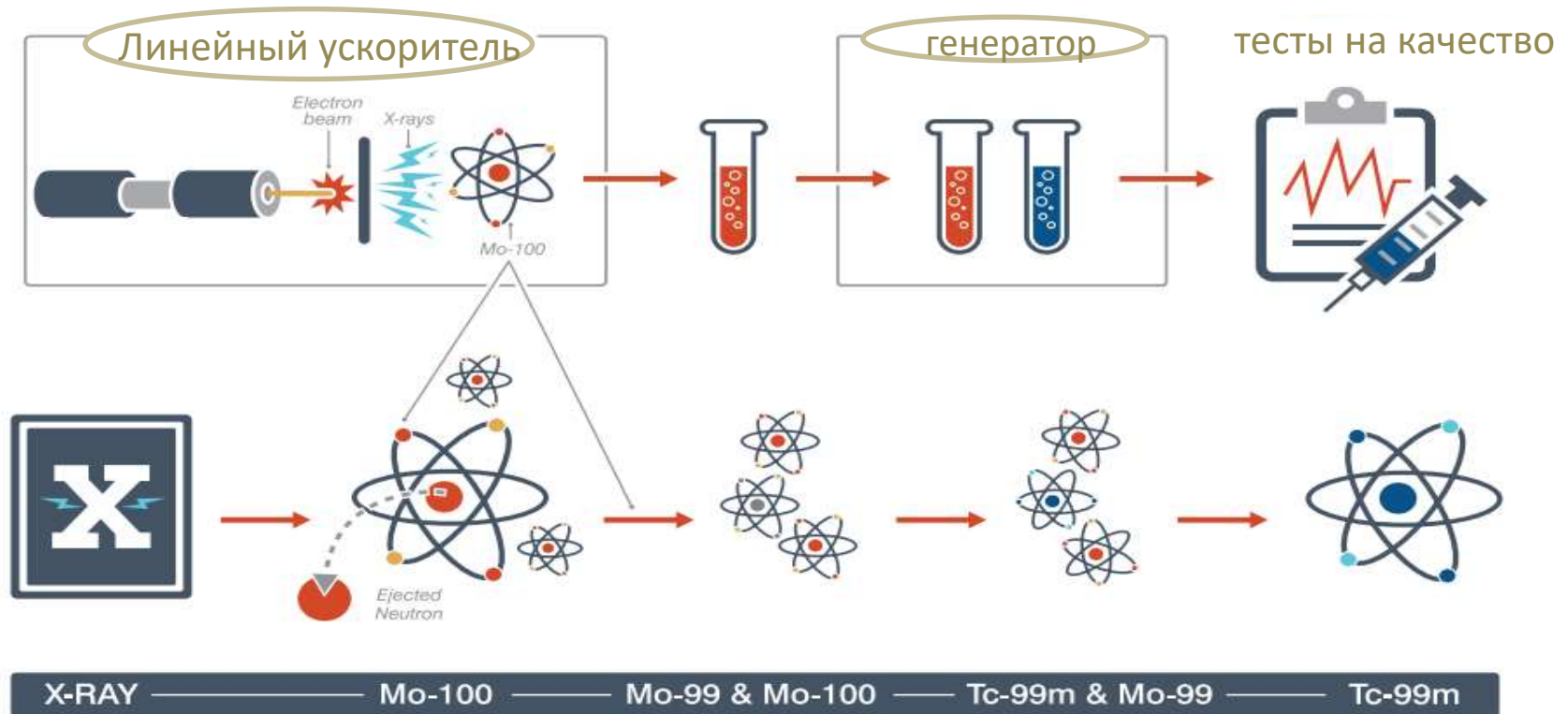


R. Hajima et al., J. Nuclear Science and Technology, 45, 441-451 (2008).

14



# Ядерно-физические исследования на малом кольце ИКИ



**Для  $^{67}\text{Cu}$  радиохимический выход 95 % за 1 час. Активность побочных радионуклидов цинка ниже предела детектирования**



**Классическим подходом ядерной медицины является использование таргетных молекул, содержащих векторный фрагмент, и хелатирующую часть удерживающую радионуклид**

## Список соисполнителей / коллаборация

- Московский Университет
- РФЯЦ ВНИЭФ
- Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва
- Институт ядерных исследований Российской академии наук, г. Москва
- Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
- Университет МИСИС
- Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
- Нижегородский государственный университет

## Список соисполнителей / коллаборация

- Московский университет
- Нижегородский университет
- ФГАОУ ВО "Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова" Министерства здравоохранения Российской Федерации
- ФГБУН "Национальный медицинский исследовательский центр психиатрии и наркологии имени В.П. Сербского" Министерства здравоохранения Российской Федерации
- ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)
- ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина»
- ФМБА России





# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Ведется разработка и создание на рентгеновском пучке рабочего модуля «Микрофокус» (энергии фотонов 25-270 кэВ). Размер пучка на модуле «Микрофокус» составляет от 10 до 200 мкм. **Нелинейный Комптон.**
2. Разработка и создание на рентгеновском пучке рабочего модуля «Рентгенография» (энергии фотонов 30-540 кэВ). Размер пучка на модуле «Рентгенография» от 5 мм до 2 см.
3. Разработка, расчет и тестирование системы для оффлайн гамма спектрометрии для исследования фотоядерных реакций методом наведенной активности. Подготовка исходных данных для экспериментов по исследованию фотоядерных реакций на тормозных пучках до 120 МэВ.
4. Разработка, расчет и тестирование системы для онлайн гамма спектрометрии на пучке обратного комптоновского гамма-излучения. Подготовка исходных данных для ЯРФ экспериментов по исследованию структуры ядер и изомерных состояний.





**Спасибо за внимание!**

НИИЯФ МГУ

28.07.2022

Шемухин А.А. | ЛИИТ | [shemuhin@gmail.com](mailto:shemuhin@gmail.com)