

ИМПУЛЬСНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ И РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Андреа Фавалли, Сасикумар Паланияппан,
Роберт Рейновски**

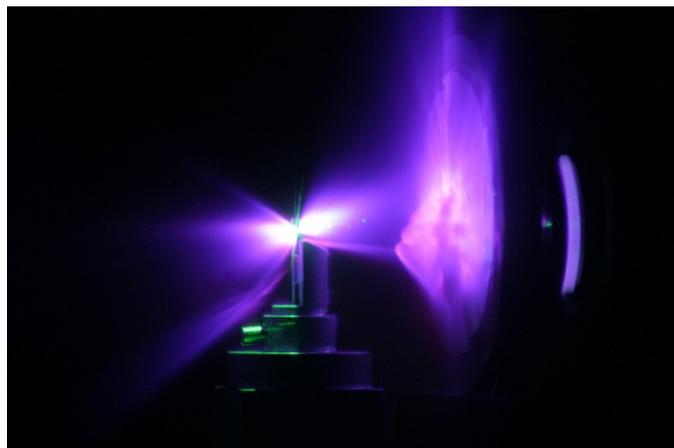
*Лос-Аламосская национальная лаборатория,
Лос-Аламос, США*

"Забабахинские научные чтения"

Россия, г. Снежинск

Март 2019 г.

Нейтронные и мегаэлектронвольтовые рентгеновские источники с лазерным инициированием для научных исследований и решения задач глобальной безопасности



- Работая на субпетаваттной лазерной установке Trident в Лос-Аламосе, ученые использовали **лазерное излучение со сверхвысокой плотностью потока** для получения **высокоинтенсивных нейтронных и рентгеновских вспышек малой длительности**.
- В число областей применения этого нового источника нейтронов входят повышение эффективности существующих технических средств и методов обнаружения "подпольных" ядерных материалов и контроль выполнения условий международных договоров, а также создание благоприятных возможностей для нового поколения экспериментов в ядерной физике и нейтронной терапии.

16 августа 2015 г. Новое достижение Лос-Аламосской национальной лаборатории:
<http://www.lanl.gov/newsroom/picture-of-the-week/pic-week-22.php>

Список соавторов

Лос-Аламосская национальная лаборатория

И. Дж. Олбрайт, Дж. Бриджуотер, Т. Беррис-Мог, М. Э. Эспи, Л. Фолк(1), Х. Ч. Фернандез, Д. К. Готье, Н. Гулер(2), К. Э. Гамильтон, Д. Хенцлова, Дж. Ф. Хьюнетер, Л. Д. Янакиев, М. Ильев, Р. П. Джонсон, К. Э. Кёлер, Р. О. Нельсон, П. Санти, Д. В. Шмидт, Т. Шимада, М. Суинхоу, Т. Н. Таддеучи, Б. Дж. Тобиас, Г. А. Иурден, Л. Ин

Университет г. Рочестер

В. Сефков

Политехнический университет г. Дармштадт (Германия)

М. Рот, О. Депперт, А. Кляйншмидт

Оук-Риджская национальная лаборатория

С. Крофт

(1)В настоящее время работает в Центре им. Гельмгольца, Дрезден-Россендорф (Германия)

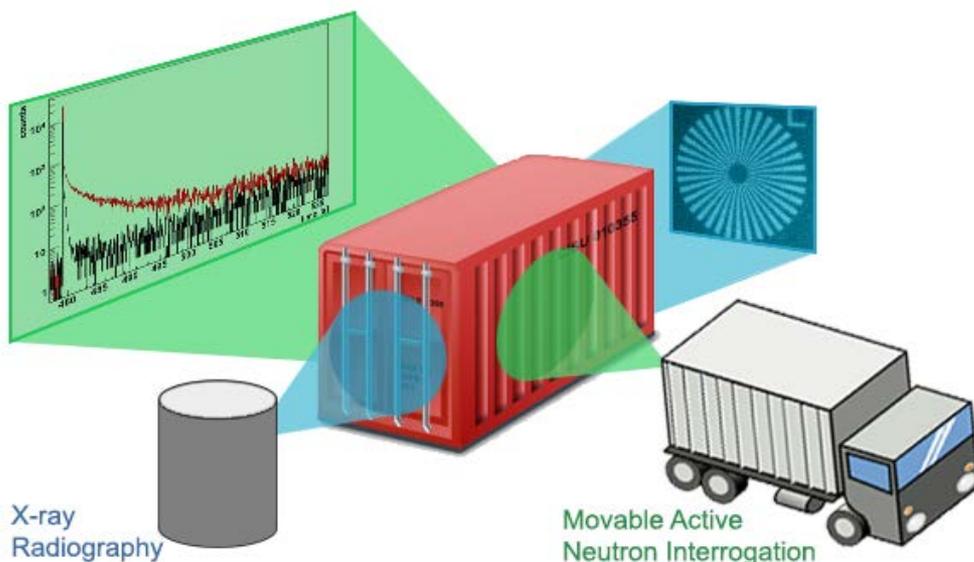
(2)В настоящее время - сотрудник компании Spectral Sciences (США, г. Бостон) и приглашенный научный сотрудник отделения ядерной техники и нераспространения (NEN-1) Лос-Аламосской национальной лаборатории

Программа руководимых лабораторией научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

ЦЕЛЬ: Изучение технической осуществимости активной идентификации материала при помощи нескольких возбуждаемых лазером контрольных изотопов

Системы активного обнаружения, предназначенные для выявления присутствия специального ядерного материала (СЯМ), включая экранированные материалы:

- Сигналы в установках пассивного обнаружения слабы, особенно в случае ВОУ
- Для инициирования деления используются внешние потоки нейтронов
- Для получения изображения содержимого используется рентгеновское излучение



Источник нейтронов:

Требуется быстродействующий, транспортируемый, безопасный в эксплуатации источник нейтронов, характеризующийся возможностью регулирования уровня энергии и выработкой высокоинтенсивного направленного потока нейтронов

Рентгенографирование:

Требуется коллимированный источник излучения высокой интенсивности (мегаэлектронвольты), имеющий малые размеры и обеспечивающий высокое пространственное разрешение

Ускорение ионов воздействием лазерного излучения - это техническая основа получения интенсивных нейтронных вспышек для целей идентификации материала

Лазерное излучение взаимодействует с электронами мишени



Заселенность релятивистскими электронами (e^-), выведенными из равновесия



Релятивистские электроны взаимодействуют с ионами



Направленный пучок ионов

- Пондеромоторная сила $-\nabla E^2$
 - Электроны движутся преимущественно вперед
- Результат: **нагрев, давление, ток**

- $I\lambda^2 > 1.33 \times 10^{18} \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2} \mu\text{м}^2$
- *Кинетическая энергия электрона превосходит его массу покоя*
- Направленное движение электронов, т.е. ток
- Релятивистская прозрачность с мишенями из фольги нанометровой толщины (эффективное объемное взаимодействие: $\approx 80\%$)

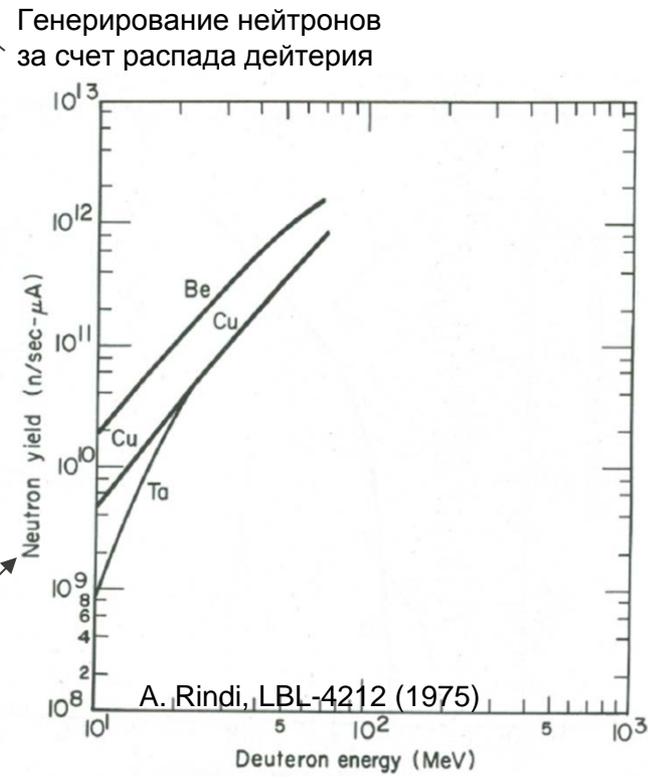
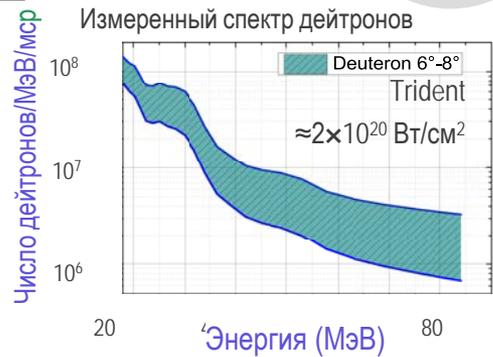
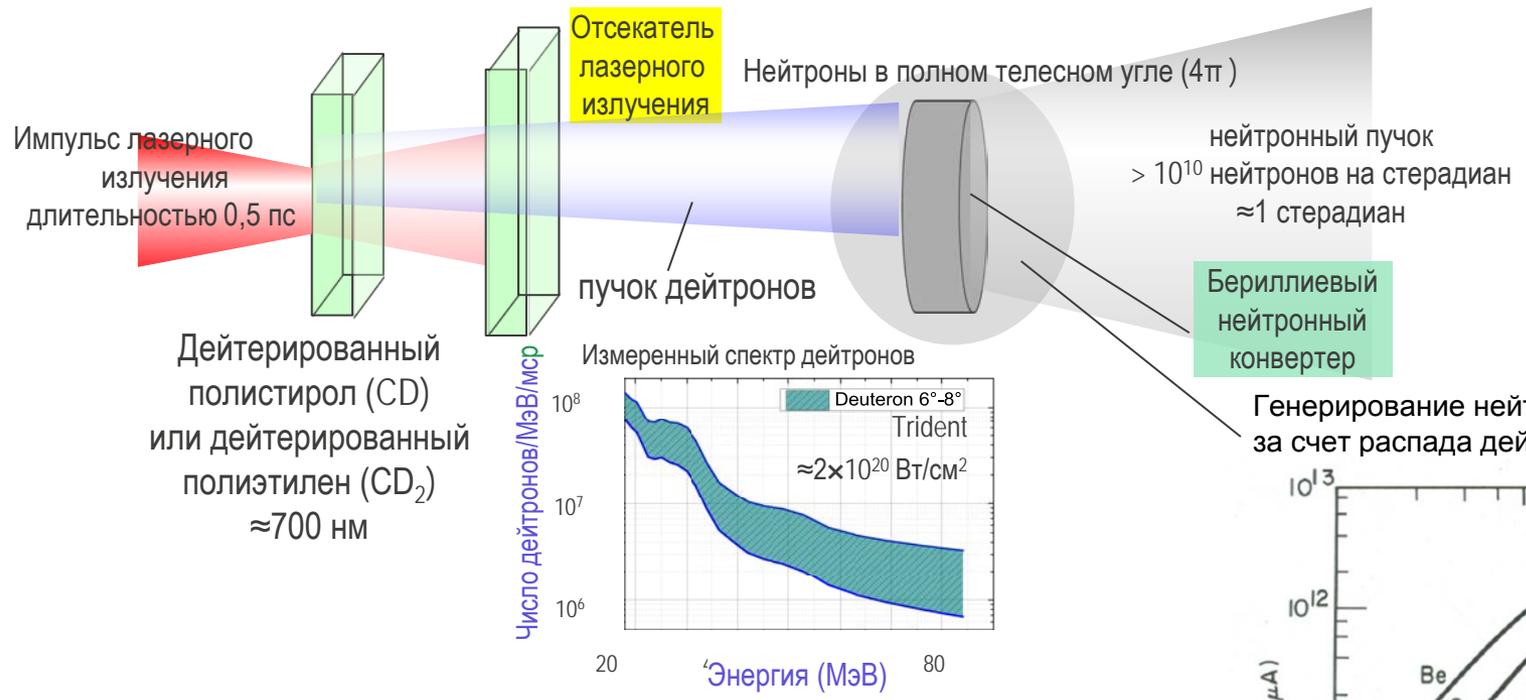
- Разделение зарядов
- **Схема получения ионных потоков высокой интенсивности при воздействии лазерным излучением с относительно малой энергией ([BOA])***
- Нестабильность, создающая плазменную волну, ускоряющую ионы

- Ионы с энергиями в диапазонах МэВ и ГэВ, протоны с энергией ≈ 100 МэВ
- Эффективная передача энергии лазерного излучения ионам ($\approx 10\%$)
- Широкий или узкий поток энергии
- Время возникновения, измеряемое в пикосекундах

E - напряженность электрического поля, I - мощность лазерного излучения, λ - длина волны лазерного излучения

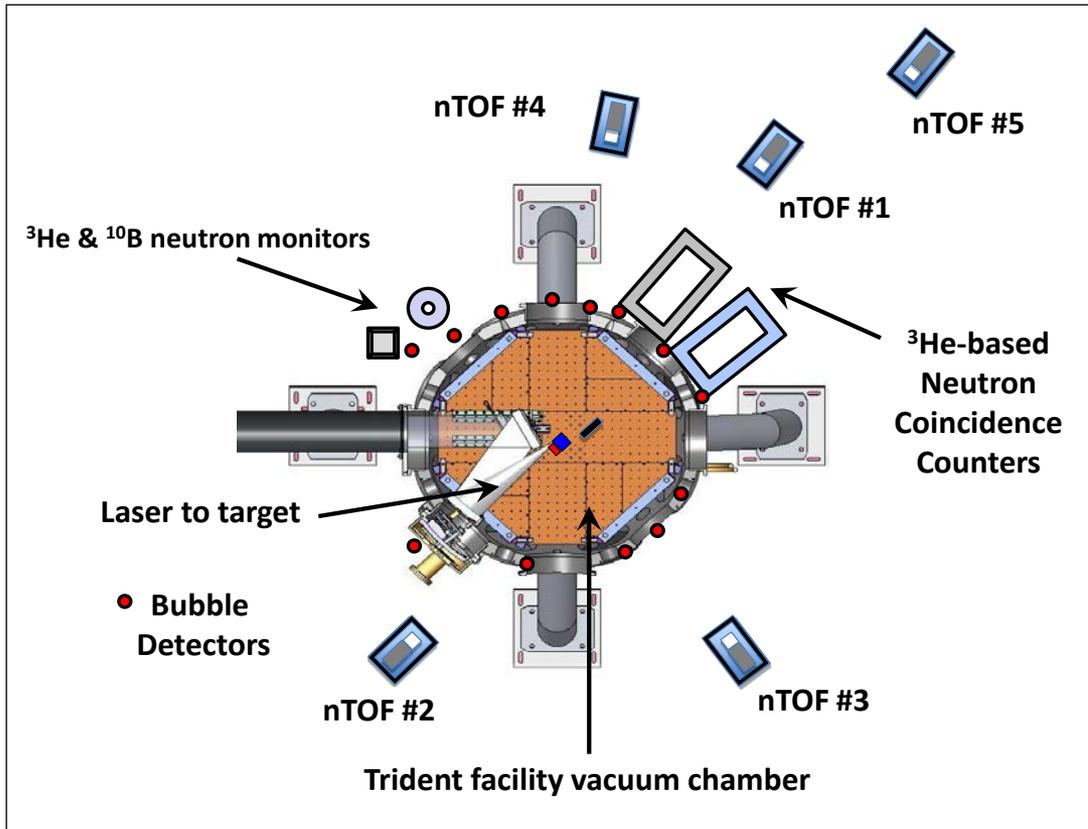
*L. Yin et al., PRL 107 (2011), L. Yin et al, PoP 18 (2011); B.J.Albright et al., PoP (2007), L. Yin et al., PoP (2007) , B.J.Albright , L. Yin, & A.Favalli, Laser and Particle Beam (2018)

Возбуждаемый лазером поток дейтронов (ионов), бомбардируя бериллиевый конвертер, порождает мощный нейтронный пучок



- Взаимодействие дейтронов с бериллиевой мишенью
 - В результате распада дейтерия (энергия связи дейтронов 2,2 МэВ) **получаются нейтроны с угловым распределением, в котором максимум рассеяния направлен вперед (дополняют нейтроны, рассеиваемые в полном телесном угле, т.е. 4π)**
- Получение нейтронного пучка
 - Единственный импульс - по определению
 - $\approx 10^{10}$ нейтронов на стерадиан **в переднем конусе с телесным углом 1 ср**
 - Выход нейтронов значительно зависит от энергии дейтронов
 - Спектр можно задавать, выбирая геометрию преобразователя

Эксперименты на установке Trident позволяют проанализировать генерацию нейтронов под действием вызванных лазерным излучением ионных пучков



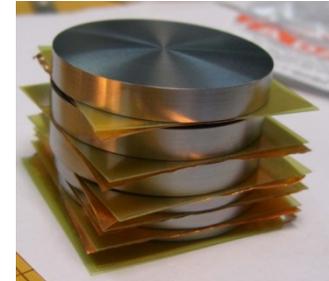
Нейтронная диагностика:

- Пузырьковые детекторы (нечувствительны к гамма-излучению) → малая точность/выход нейтронов в широкоугольном пучке
- Время пролета нейтронов (NTOF) (nTOF) - пластиковый сцинтиллятор + ФЭУ → спектр энергий
- Детекторы на изотопе гелия ^3He + полиэтилен → признаки деления и точно определяемый выход нейтронов в узком пучке

Для обработки мощного динамического потока нейтронов в течение одного импульса установки Trident спроектированы мониторы времени пролета нейтронов и приборы контроля мгновенных нейтронов.

Новаторская конструкция нейтронного преобразователя (на основе бериллия) оптимизирует преобразование вызванных лазерным излучением ионных пучков в нейтронные вспышки.

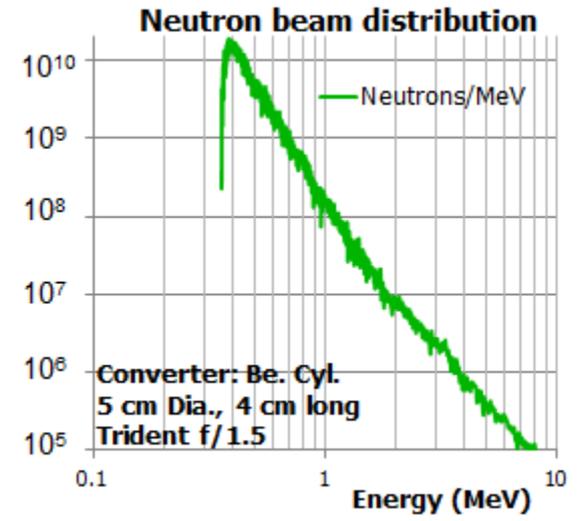
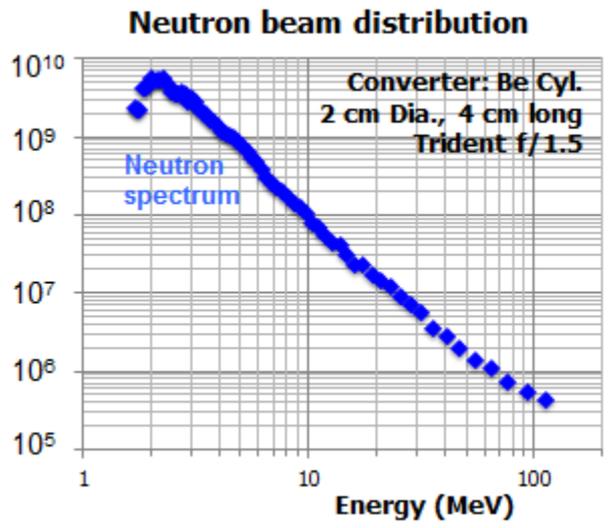
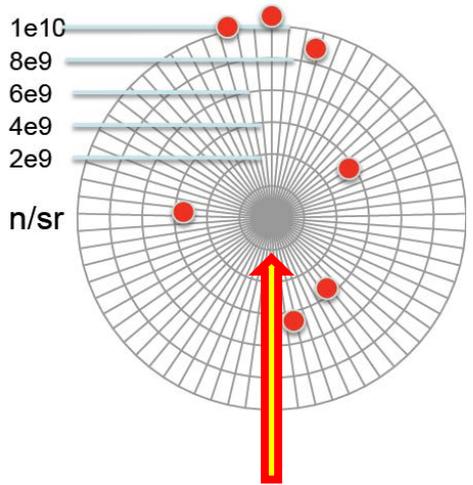
- Преобразователь, примененный на первом этапе: цилиндр (из бериллия) диаметром 2 см и глубиной 4 см
- Модифицированная конструкция бериллиевого преобразователя, характеризующаяся гибкой и возможностью изменять компоновку, состоит из дисков: (3 диска толщиной по 3 мм, 2 диска толщиной по 6 мм и 1 диск толщиной 12 мм (все диски имеют диаметр 5 см) - и построена на основе моделирования взаимодействий частиц с помощью программы MCNPX*
- Вольфрамовое кольцо, охватывающее бериллиевые детали, действует как отражатель и радиатор $(n,2n), (n,3n) \dots$ *
- Радиохромные пленки, используемые в качестве средства ионной диагностики и размещенные между дисками вдоль преобразователя, предназначены для подтверждения результатов моделирования с помощью программы MCNPX



*A.Favalli et al., LAUR-14-25881; LAUR-14-25768; A.Favalli et al., IEEE Nuclear Science Symposium, 2014 Seattle

Определение параметров генерирования нейтронов, спектра энергий и углового распределения

ГЕНЕРИРОВАНИЕ НЕЙТРОНОВ НА УСТАНОВКЕ TRIDENT >10¹⁰ нейтронов на стерадиан за 1 импульс



Спектр энергий и угловое распределение можно перестраивать выбором сочетания (1) оптики и материала мишени и (2) формы бериллиевого преобразователя

Применение иницируемого лазером источника нейтронов для активной идентификации материала

Активная идентификация: "Пощупаем и посмотрим, что произойдет"

Принцип: инициированное нейтронами деление в ядерном материале (например, ^{235}U или ^{239}Pu).

Основные наиболее примечательные демаскирующие признаки деления:

- Мгновенные нейтроны деления
- Запаздывающие нейтроны деления

Мгновенные нейтроны: признак, наблюдаемый в процессе идентификации ядерных материалов (нейтроны, испускаемые в процессе деления ядер)

Запаздывающие нейтроны : запаздывающие нейтроны образуются в результате распада продуктов деления на измеряемых секундами или минутами интервалах после деления ядер (поэтому достигается надежное разграничение от идентифицирующих нейтронов)

Демаскирующий признак мгновенных нейтронов:

Преимущество: генерация большого числа нейтронов (в среднем 2 - 3 нейтрона на каждое деление)

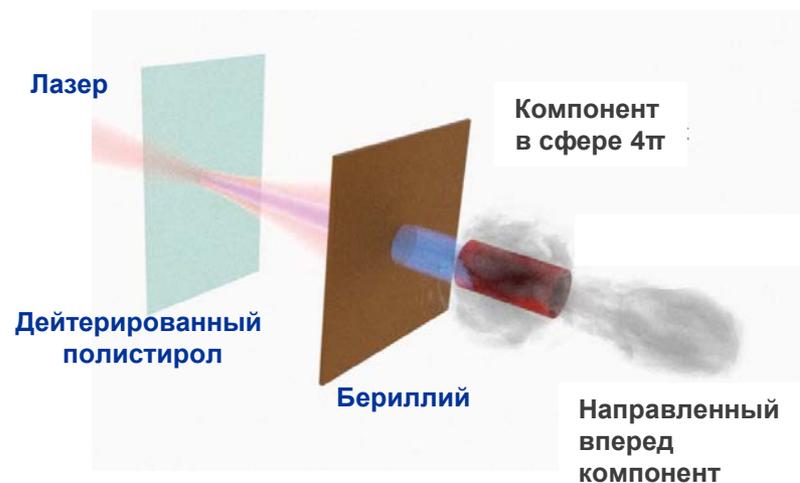
Недостаток: осложненное измерение параметров и различение от идентифицирующих нейтронов

Демаскирующий признак запаздывающих нейтронов:

Преимущество: измерение параметров проще, чем в случае мгновенных нейтронов деления

Недостаток: очень низкий выход нейтронов от каждого деления (например, 0,017 для ^{235}U и 0,0065 для ^{239}Pu).

Для активной идентификации материала применение источников нейтронов с инициированием лазерным излучением особенно целесообразно



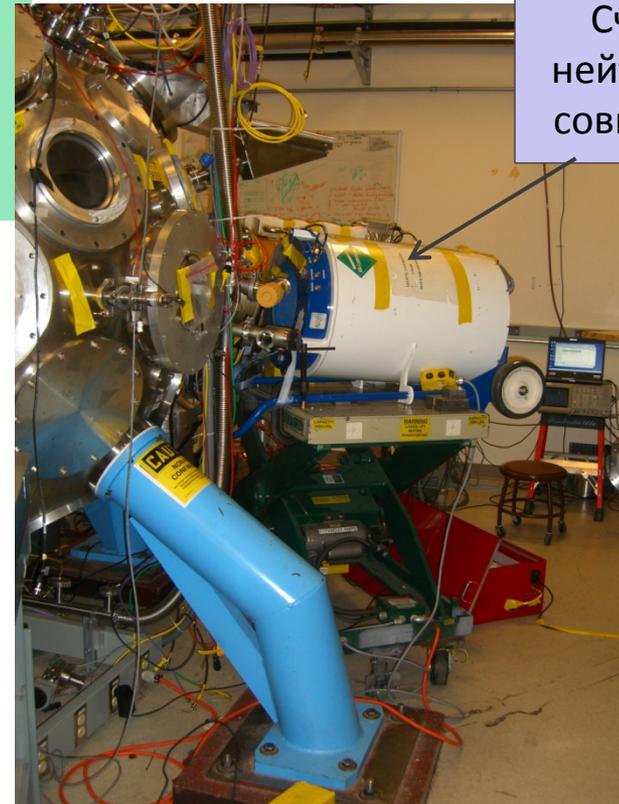
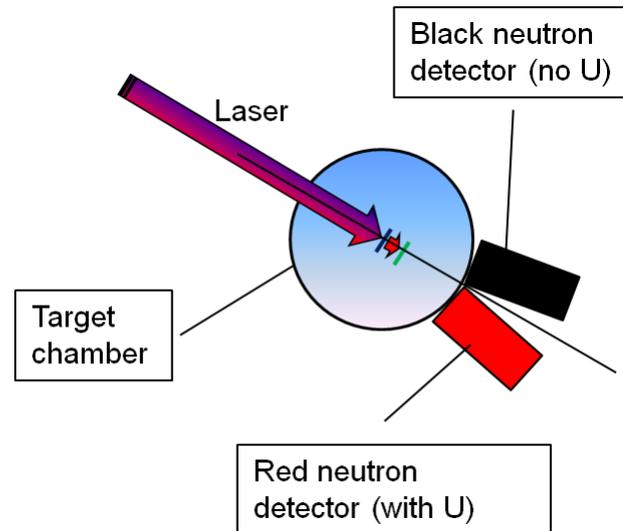
Некоторые особенности источника нейтронов, инициированных коротким импульсом лазерного излучения:

- Генерирование кратковременных, но высокоинтенсивных импульсных нейтронных потоков, позволяющее получать высокие значения отдаваемой энергии и отношения сигнал/шум
- Направленность, увеличивающая используемый для идентификации сигнал и способствующая обеспечению безопасности операторов
- Перестраиваемость энергии, удобная для идентификации при наличии защитных экранов разных видов и толщин
- Возможность создания источника с габаритными размерами, удобными для перемещения (транспортировки)

Демонстрация активной идентификации материала при использовании инициируемого лазером источника нейтронов и детектирования запаздывающих нейтронов

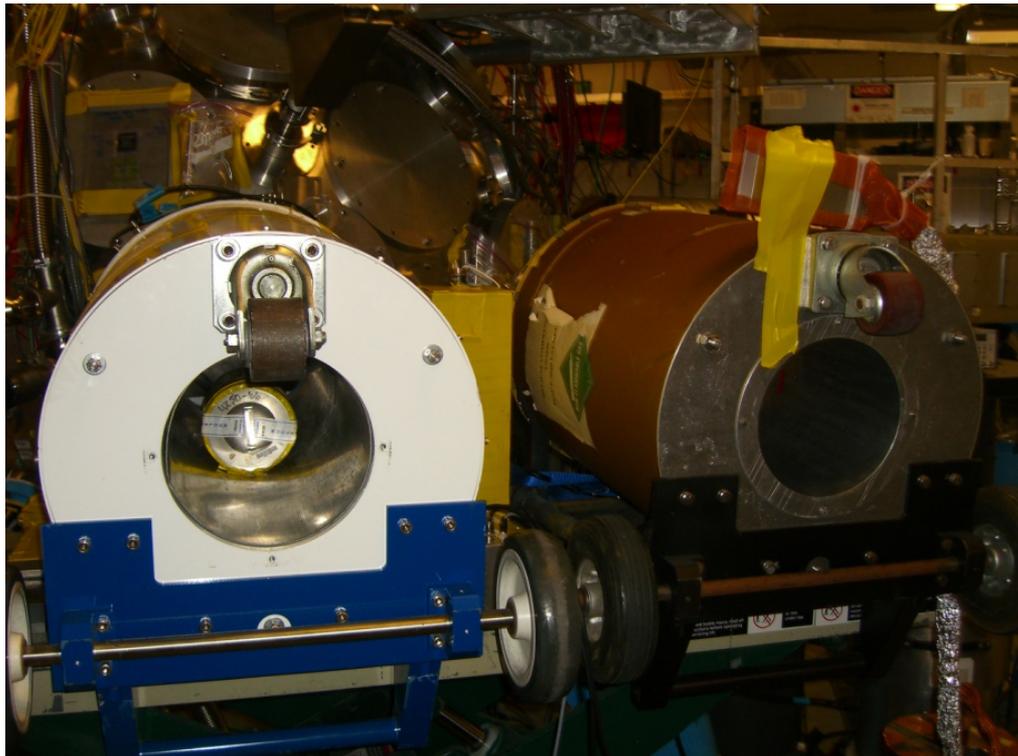
Счетчики нейтронных совпадений

- **HLNCC-II**: состоит из единственного кольца, образованного 18 детекторами изотопа ^3He , запрессованными в полиэтилен с кадмиевой облицовкой (эффективность 17,5%, мертвое время 43 мкс)
- **AWCC**: двойное кольцо из 42 детекторов изотопа ^3He , запрессованных в полиэтилен с кадмиевой облицовкой (эффективность 32,8%, мертвое время 50 мкс)



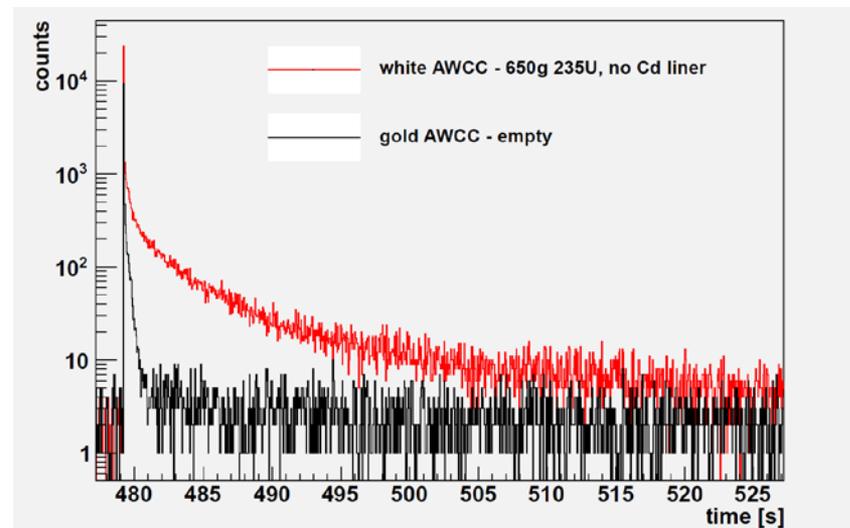
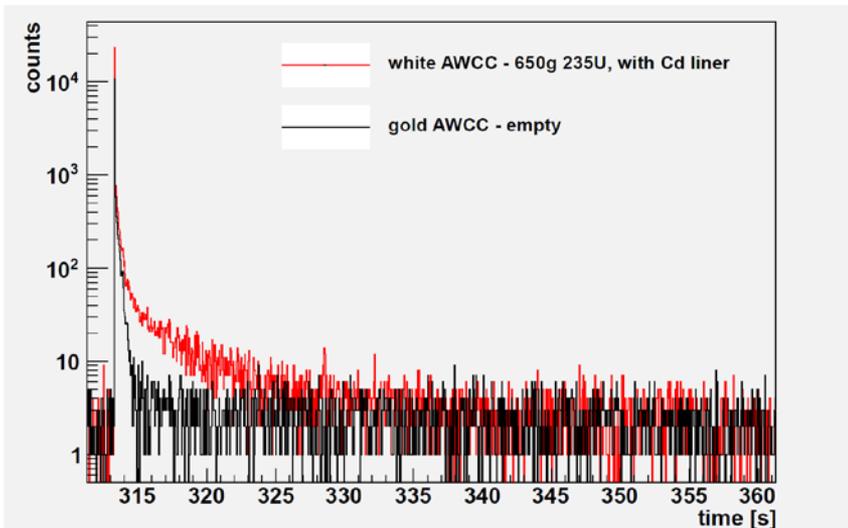
Исследованные образцы урана

- Обедненный уран с массой до 4,5 кг
- Образцы обогащенного урана со степенью обогащения до массовой доли 65% по изотопу ^{235}U



- Два счетчика нейтронных совпадений, в каждом из которых используется кольцо пропорциональных детекторов изотопа ^3He , заделанных в полиэтилен
- В показанном слева детекторе можно видеть урановый образец
- Детектор, расположенный справа, дает опорный отсчет

Идентификация образца высокообогащенного урана (масса 990 г, массовая доля изотопа ^{235}U 65%)

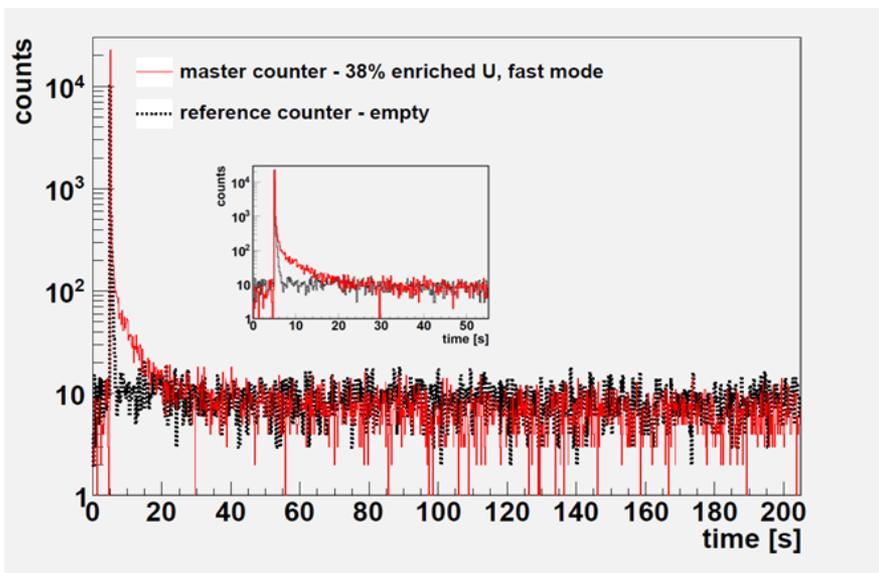


Быстрое исследование (с внутренней кадмиевой гильзой)

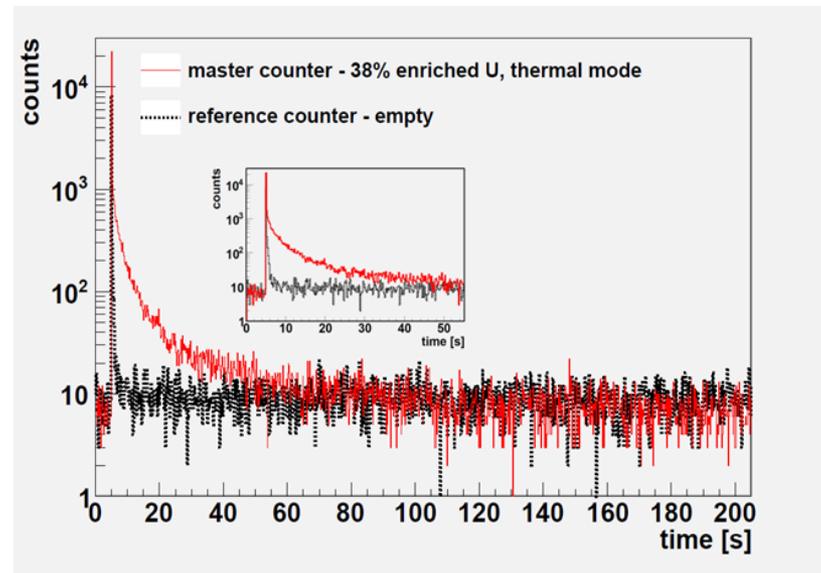
Тепловой режим (без кадмиевой гильзы)

В качестве демаскирующего признака выбраны **запаздывающие нейтроны**, поскольку они характерны для процесса деления ядер (лишь немногие иные процессы могут порождать запаздывающие нейтроны)

Идентификация образца менее обогащенного урана (масса 990 г, массовая доля изотопа ^{235}U 38%)



Быстрое исследование (с внутренней кадмиевой гильзой)



Тепловой режим (без кадмиевой гильзы)

Образцы обогащенного урана: массовая доля 12 - 65%

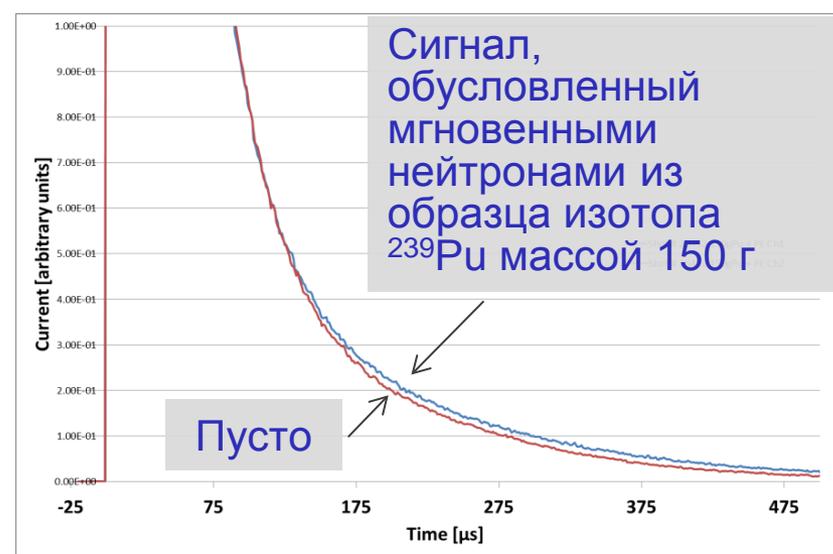
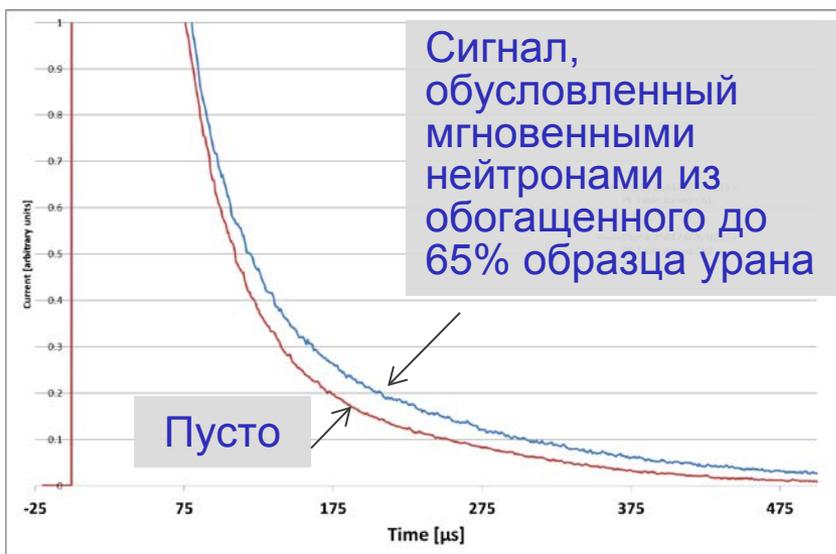
Перспективы применения метода идентификации, основанного на делении, вызванном мгновенными нейтронами при воздействии одного импульса лазера

Преимущества:

- Повышение **чувствительности** обнаружения ядерного материала, обусловленное испусканием мгновенных нейтронов деления, почти в 100 раз превышающим выход запаздывающих нейтронов
- Значительное **увеличение отношения сигнала к шуму** в осложненных условиях проведения измерений, например, при высокой интенсивности испускания фоновых нейтронов, наблюдаемой в ситуации активной идентификации плутония

Перспективы применения метода идентификации, основанного на делении, вызванном мгновенными нейтронами при воздействии одного импульса лазера

На этапе экспериментов в июле - августе 2015 г.: мгновенные нейтроны деления? (Мы получили разрешение на использование образца плутония массой 170 г, который содержал около 150 г изотопа ^{239}Pu)



Впервые: нами обнаружены мгновенные нейтроны деления от образцов изотопа ^{235}U и образца изотопа ^{239}Pu (*) (окончательные результаты анализируются, графики имеют предварительный характер)

* В случае плутония обнаружен также сигнал от задержанных нейтронов

Разработка источника инициируемого лазером рентгеновского излучения для рентгенографии в процессе активной идентификации

Мы изучали две разные схемы получения рентгеновского излучения с энергией в диапазоне МэВ на установке Trident

Схема 1: Комбинированная схема (объединение мишени с преобразователем)

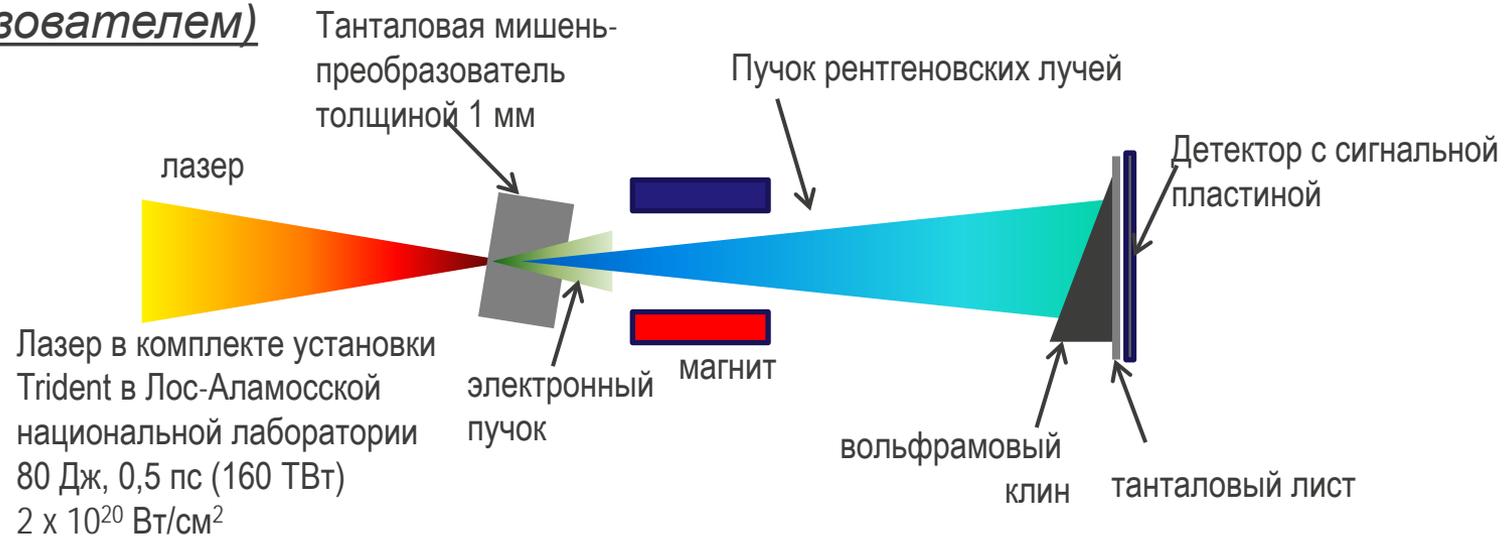
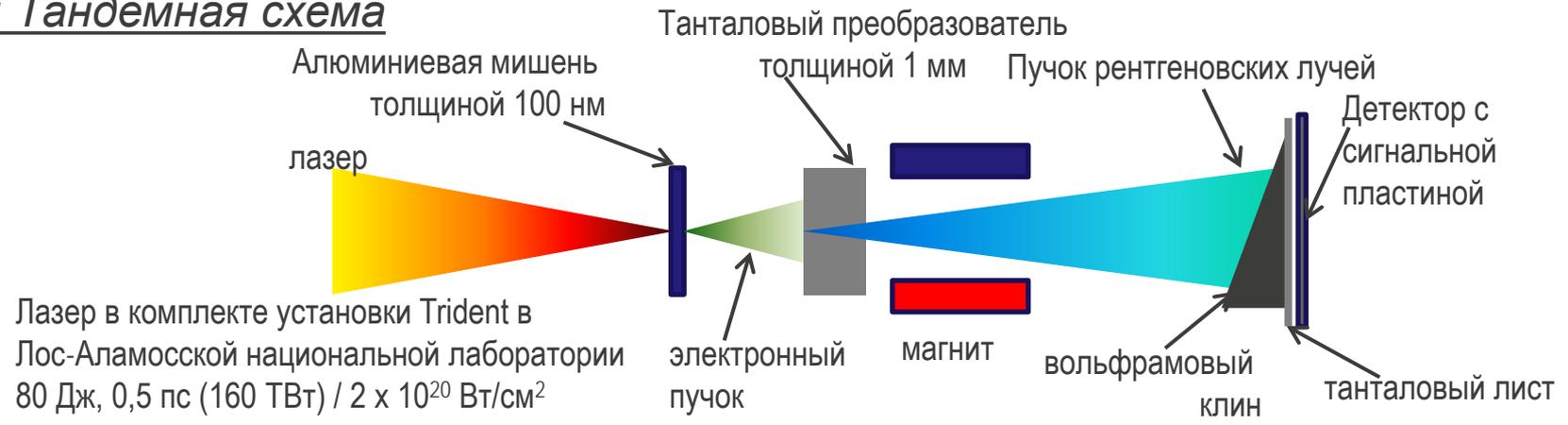
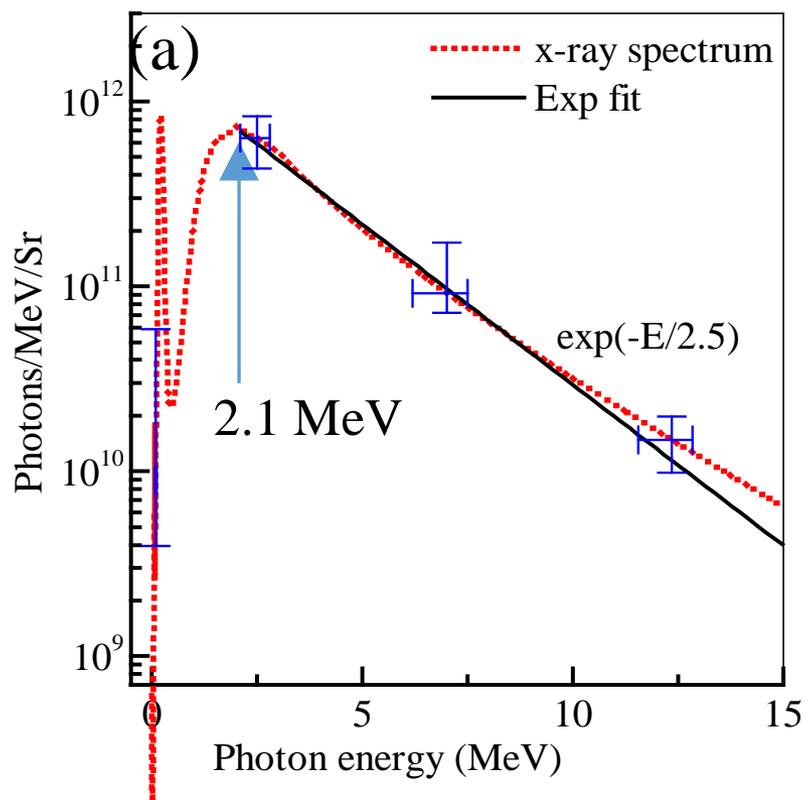


Схема 2: Тандемная схема



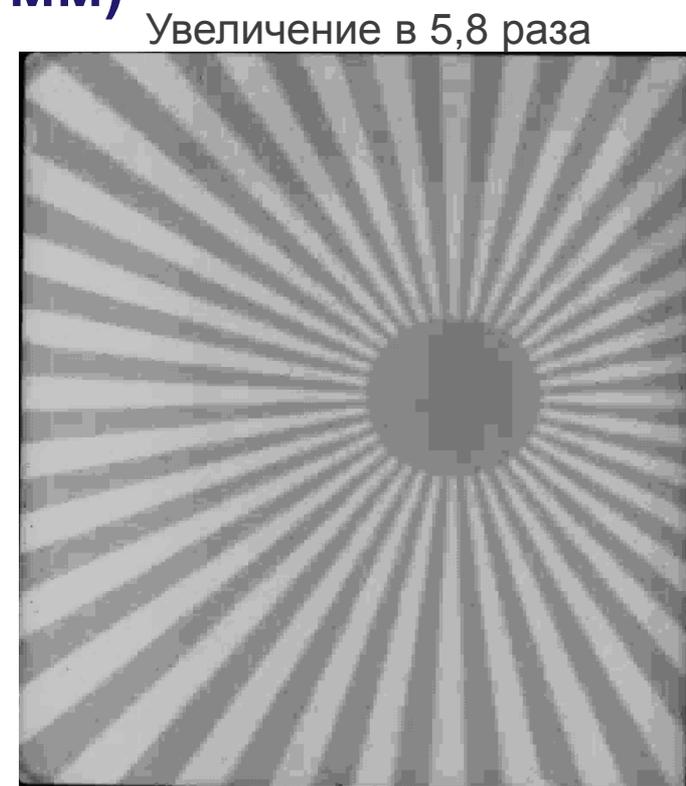
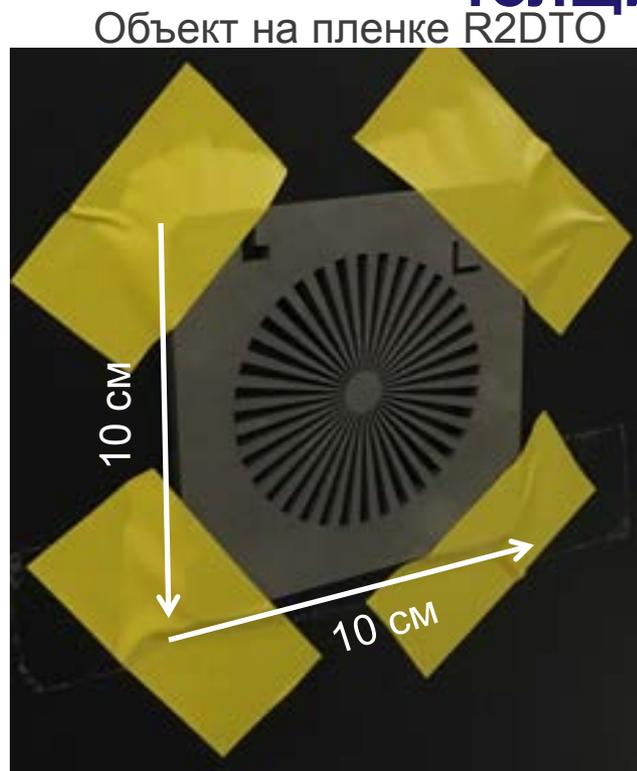
Комбинированная мишень дает мощное рентгеновское излучение с энергией в диапазоне МэВ



- Комбинированная (из листа тантала толщиной 1 мм) мишень-преобразователь работает значительно эффективнее тандемной мишени
- Значительно более простая схема
- Очень легко воспроизводима
- Не требует высокого контраста лазерного излучения

3×10^{12} фотонов на импульс
1 Дж энергии рентгеновского излучения с энергией в диапазоне МэВ,
получаемый из 80 Дж энергии падающего потока лазерного излучения
(к.п.д. $\approx 1\%$)

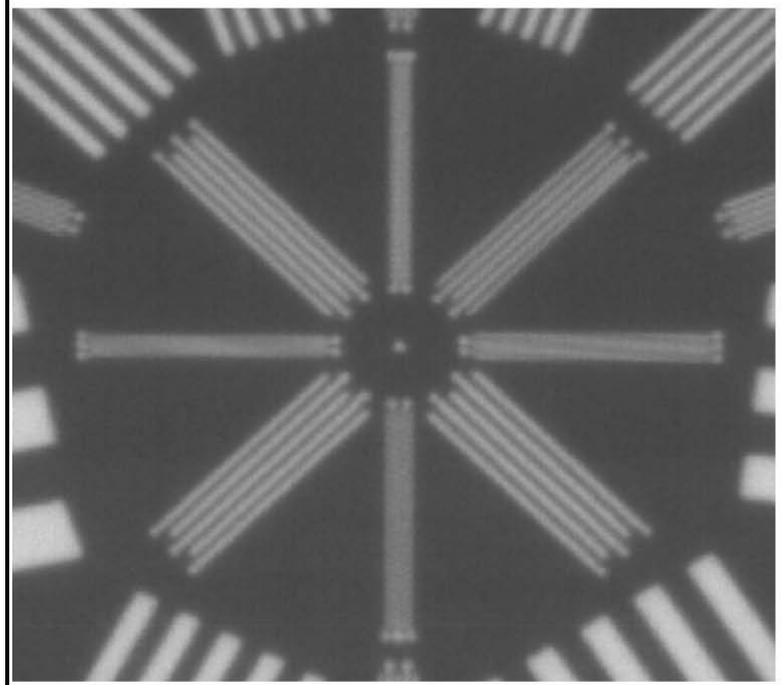
Вывод о 80-мкм размере рентгеновского источника по результатам рентгенографии высококонтрастной мишени для измерения разрешающей способности (вольфрам, толщина 6 мм)



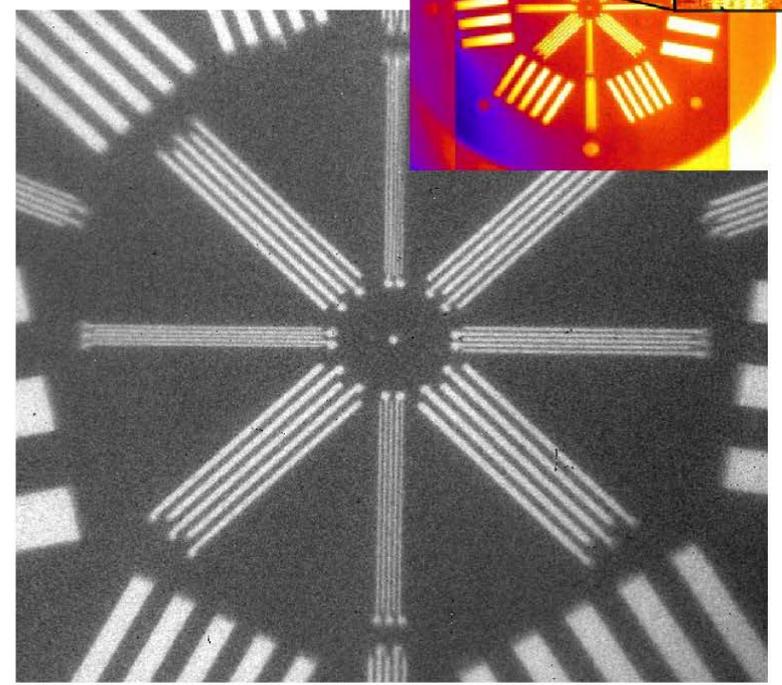
Анализ, выполненный с помощью прикладной программы *Bayesian Inference Engine (BIE)*, позволяет сделать вывод о том, что источник рентгеновского излучения с длительностью на уровне половины максимальной мощности имеет размер 80 мкм

Теневое рентгенографическое изображение объекта в калейдоскопе с линзой AWE, полученное при энергии излучения в диапазоне МэВ на рентгенографической установке DARHT (слева) и лазерной установке Trident (справа), - наглядное подтверждение высокого разрешения

Zoomed images



DARHT Axis 1, 19mm cathode:
~750 μ m source size



TRIDENT: 125 μ m features resolved
(measurement limited by detector-pixel size)

Выводы по источнику нейтронов, инициированных коротким импульсом лазерного излучения

- На базе лазерной установки TRIDENT наглядно подтверждена техническая осуществимость источника нейтронов с высоким выходом.

Активная идентификация при помощи инициированных лазерным излучением нейтронов:

- Впервые экспериментально доказана возможность активной идентификации ядерных материалов при использовании источника нейтронов, инициированных коротким импульсом лазерного излучения
- Измерены параметры образцов из обогащенного (от $\approx 12\%$ до 65%) урана и получена калибровочная кривая зависимости массы ^{235}U от числа импульсов счета (*демаскирующий признак запаздывающих нейтронов*)
- Впервые обнаружен признак запаздывающих нейтронов от ядерного материала при воздействии единственным идентифицирующим импульсом от лазера
- Впервые малое количество плутония (150 г) обнаружено путем подсчета запаздывающих нейтронов при использовании источника нейтронов, инициированных одним импульсом лазерного излучения

Выводы по источнику рентгеновского излучения, имеющего энергию в диапазоне МэВ и инициированного коротким импульсом лазерного излучения

- На базе лазерной установки TRIDENT наглядно подтверждена техническая осуществимость источника рентгеновского излучения, имеющего энергию в диапазоне МэВ и инициированного коротким импульсом лазерного излучения ($\approx 10^{13}$ фотонов в секунду; расхождение пучка 0,1 ср).
- Высокий к.п.д. $\approx 1\%$ (1 Дж энергии рентгеновского излучения с энергией в диапазоне МэВ, получаемый из 80 Дж энергии падающего потока лазерного излучения)
- На мишенях, предназначенных для измерения разрешения, наглядно доказано, что метод рентгенографии дает высокую разрешающую способность, достаточную для активной идентификации

Практическое внедрение метода

Перспективные изучаемые нами области применения:

- Нейтронная идентификация грузов (обнаружение специальных ядерных материалов, взрывчатых веществ и наркотиков)
- Обнаружение методами формирования изображений
- Контроль выполнения условий международных договоров (по признакам присутствия боеголовок и ядерных материалов) и управление ядерным арсеналом с сертификацией
- Анализ отработавшего топлива (в хранилище, в защитном контейнере - для радиоактивных отходов и обломков, образовавшихся при ядерных авариях, например, на АЭС в Фукусиме)
- Нейтронная терапия
- Эксперименты в области ядерной физики (например, нейтронная резонансная спектроскопия, измерения эффективного сечения захвата)
- Иные области (см. подробные сведения в указанных литературных источниках)

Этот научно-исследовательский проект, выполненный в Лос-Аламосской национальной лаборатории, финансировался из средств программы руководимых лабораторией научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (LDRD).