



# МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО АНАЛИЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Роберт Рейновски и Андреа Фавалли  
Лос-Аламосская национальная лаборатория (ЛАНЛ), Лос-Аламос,  
шт. Нью-Мексико, США

КОНФЕРЕНЦИЯ "ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ 2019"  
18 - 22 МАРТА 2019 Г.  
Россия, Челябинская обл., г. Снежинск

# Строгий контроль и точный учет ядерных материалов (ЯМ) способствуют не только укреплению безопасности каждой страны на планете, но и улучшению здоровья и благосостояния каждого человека

- Несанкционированное "практическое употребление" (владение запасами, транспортировка, продажа или использование) специальных ядерных материалов, принявшее форму умышленных действий, недосмотра, халатности или итога аварии или административной ошибки, может иметь значительные последствия.
- Такие последствия могут быть в некотором мере смягчены внедрением действенной системы инспектирования и проверок соблюдения норм и правил, позволяющей гарантировать контроль и учет ядерных материалов.
- Для создания эффективных систем контроля требуются точные, экономически целесообразные, простые в осуществлении, безопасные и своевременные количественные исследования как взаимодействующих, так и невзаимодействующих объектов анализа.

# Строгий контроль и точный учет ядерных материалов (ЯМ) способствуют не только укреплению безопасности каждой страны на планете, но и улучшению здоровья и благосостояния каждого человека (2)

**Потребность в строгом контроле и точном учете ядерных материалов проявляется в ряде очевидных и не столь очевидных аспектов процессов взаимодействия на индивидуальном, местном, региональном и международном уровнях:**

- Заранее подготовленное хищение или переключение ЯМ для злонамеренного использования осуществляющими террористическую деятельность или не располагающими ядерным оружием странами, цель которых заключается в организации нападения с применением ядерных устройств или распространения материала, - это отвратительное, но реалистичное преступление.
- Весь мир обеспокоен возможностью неточного анализа ЯМ, содержащихся в хранилище, в отходах или материале, оставшемся после аварии, и предназначенных как для гражданского применения, так и для целей национальной обороны.
- Аналогичное беспокойство вызывается недокументированным и скрытым перемещением ЯМ, ядерных вооружений или оружейных компонентов по территории планеты.
- Неточный учет ЯМ гражданского применения, например, анализ отработавшего ядерного топлива, отрицательно влияет на общую безопасность ядерного топливного цикла.
- Халатное изъятие из технологического процесса или удаление на утилизацию медицинских или промышленных радиологических источников (закрытой конструкции непрерывного действия) опасно для окружающей среды и представляет собой значительно более скрытый фактор угрозы здоровью и благосостоянию всех людей.

# Строгий контроль и точный учет ядерных материалов (ЯМ) способствуют не только укреплению безопасности каждой страны на планете, но и улучшению здоровья и благосостояния каждого человека (3)

- Разработка технических решений, необходимых для обеспечения безопасности в мире, требует мобилизации существующих технических возможностей всех стран и, как следствие, придает еще более заметную актуальность сотрудничеству в поиске таких жизненно важных решений.
- **Научное сообщество обязано использовать свои колоссальные ресурсы, опыт, знания и энергию для создания технических средств и процессов, требующихся для обеспечения сохранности мировых запасов ядерных материалов, включая:**
  - Модернизированные методики для проведения точных, количественных и своевременных исследований.
  - Аппаратные средства (как традиционные, так и новаторские), позволяющие ввести в действие такие методики.
  - Протоколы организации охраны объектов, гарантирующие безопасный, защищенный и своевременный доступ.

# Методы неразрушающего анализа ядерных материалов занимают важное место в ряду методик контроля

- Неразрушающий анализ (НРА) позволяет экстренно определять физическую природу и количество ядерного материала (т.е. его характеристики) неинвазивным способом и без изменения его формы.
- Большинство методик и технических средств неразрушающего анализа разрабатывались в 1960-е и 1970-е годы.
  - В США методики неразрушающего анализа разрабатывались комплексом национальных лабораторий, входящим в структуру министерства энергетики.
  - Аналогичные технические средства и методики разрабатывались в России и других странах мира.
  - Многочисленные опубликованные обзорные статьи беспрепятственно доступны в сети Интернет. Ссылки на источники приводятся в тексте.
- Такие хорошо отработанные, но теперь, видимо, несколько устаревшие методы определения характеристик составляют предмет международного сотрудничества в течение десятилетий, и поэтому свежий взгляд на новое поколение детекторов, измерительных приборов и регистраторов данных может задать направление дальнейшего участия международного сообщества.

# Методы и технические средства НРА позволяют осуществлять экстренное определение физической природы и количества (характеристик) ядерного материала бесконтактным способом

- Методы неразрушающего анализа можно применять для оценки характеристик материалов, находящихся в хранилище, в контейнерах, в партиях доставляемых коммерческим транспортом грузов и в личных вещах.
- Методы оценки характеристик путем НРА должны быть применимы как к взаимодействующим, так и к не взаимодействующим объектам исследования.
- От метода определения характеристик путем НРА требуются:
  - Простота и точность
  - Скорость и экономичность
- Определением характеристик путем НРА должны охватываться оба вида исследований:
  - **Подтверждающие измерения**, представляющие собой определение качественных характеристик и указывающие на присутствие некоего атрибута ядерного материала, т.е. "подтверждающие" присутствие, но не количество ЯМ.
  - **Верификационные измерения**, представляющие собой определение количественных характеристик и позволяющие оценить количество ЯМ, содержащееся в объекте исследования. Эти измерения могут быть использованы для уточнения официальных учетных документов.



# Методы и технические средства НРА применяются и для пассивных измерений, и для активной идентификации, когда исследуются как взаимодействующие, так и невзаимодействующие объекты

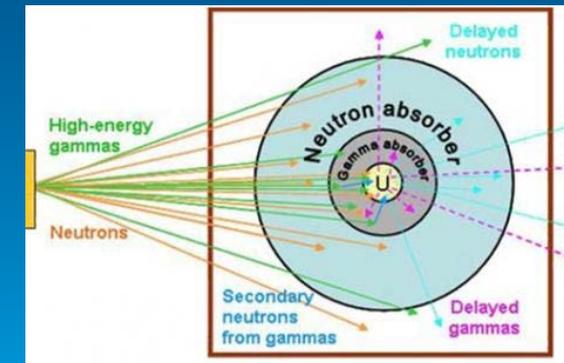
## Пассивные методы

- Основаны на регистрации демаскирующих признаков: нейтронов, гамма-излучения или даже тепла, создаваемого естественным процессом (распадом) в ядерном материале.
- Методы относительно просты и безопасны.
- Признаки могут быть относительно слабыми (как у ВОО) и зависящими от затенения упаковкой или умышленно установленным экраном.
  - Но - при обнаружимости - признаки могут быть характерными.
  - Длительность получения статистически значимого результата исследования, может быть большой и зависящей от состава и геометрии материала.



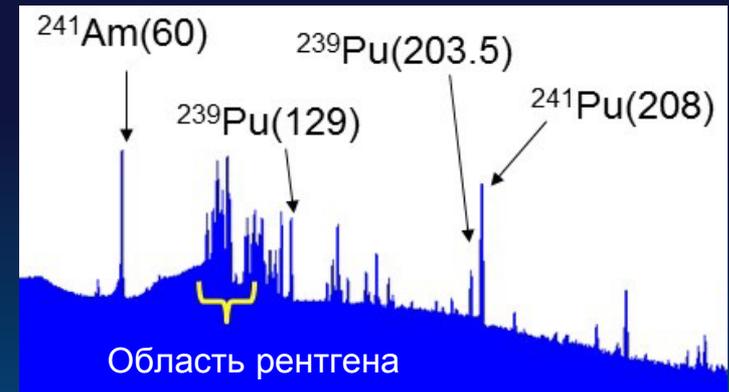
## Активная идентификация

- Основана на зондировании внешним источником гамма-излучения (как правило) или нейтронов, например, для инициирования процессов деления ядер, и на обнаружении признаков генерирования мгновенных и запаздывающих нейтронов.
- Возможно применение формирования изображений (радиографии), дающих более детализированную пространственную информацию, облегчающую экстренный досмотр.
- Для реализации методов может потребоваться дорогостоящая и сложная аппаратура.
- Применение может быть сопряжено с риском повреждения объекта исследования или причинения вреда людям.



# Гамма-спектроскопия, относящаяся к пассивным методам, дает детальную информацию о составе и относительном содержании изотопов

- Отличие рентгеновских и гамма-линий от спонтанного распада обеспечивает определение качественных характеристик изотопов, присутствующих в образце.
- Можно использовать ряд эффективных детекторов, отличающихся энергетическим разрешением и построенных на основе следующих материалов:
  - NaI, LaBr, Cd Te и высокочистый германий (HPGe)
- Мерой активности изотопа и, как следствие, массы изотопа служит площадь фотопика.



- гамма-линия 143,8 кэВ, интенсивность 7800  $\mu\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}$
- гамма-линия 163,8 кэВ, интенсивность 3700  $\mu\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}$
- гамма-линия 185,7 кэВ, интенсивность 43 200  $\mu\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}$
- гамма-линия 205,3 кэВ, интенсивность 4000  $\mu\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}$



- гамма-линия 742,8 кэВ, интенсивность 7  $\mu\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}$
- гамма-линия 766,4 кэВ, интенсивность 26  $\mu\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}$
- гамма-линия 786,3 кэВ, интенсивность 4  $\mu\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}$
- гамма-линия 1001,0 кэВ, интенсивность 75  $\mu\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}$

- Уран имеет относительно простой гамма-спектр по сравнению со спектрами плутония (Pu), что делает гамма-спектроскопию целесообразным методом оценки обогащения урана.
  - При снижении степени обогащения пик гамма-излучения с энергией 186 кэВ от распада изотопа  $^{235}\text{U}$  становится менее заметным.

# Второй пассивный метод - измерение количества теплоты, выделяющегося вследствие естественного радиоактивного распада (один из наиболее однозначно идентифицируемых признаков присутствия ЯМ)

## Калориметр LVC



Для измерения полного количества тепла, вырабатываемого объектом исследования, содержащим ядерный материал, может применяться метод прямой калориметрии.

- Калориметр большого объема (LVC) измеряет мощность, отбираемую от стандартного цилиндрического контейнера емкостью 55 галлонов (208 л при диаметре 60 см), и позволяет получать точные результаты в случае крупногабаритных объектов.
- Каждый изотоп вырабатывает характерную удельную мощность (мВт/г).
  - Полная мощность – это просто сумма мощностей, отдаваемых всеми вырабатывающими тепло изотопами.
  - Материалы, содержащие плутоний и америций, имеют самую высокую удельную мощность.

Ядерные параметры наиболее часто анализируемых нуклидов			
Изотоп	Тип распада <sup>1</sup>	Удельная мощность (мВт/г)	T <sup>1/2</sup> (y)
<sup>238</sup> Pu	α	567.57	8.77E+01
<sup>239</sup> Pu	α	1.9288	2.41E+04
<sup>240</sup> Pu	α	7.0824	6.56E+03
<sup>241</sup> Pu	β	3.412	1.43E+01
<sup>242</sup> Pu	α	0.1159	3.76E+05
<sup>241</sup> Am	α	114.2	4.34E+02
Tritium	β	324	1.23E+01
<sup>233</sup> U	α	0.281	1.59E+05
<sup>234</sup> U	α	0.18	2.44E+05
<sup>235</sup> U	α	6.00E-05	7.04E+08
<sup>236</sup> U	α	1.75E-03	2.34E+07
<sup>238</sup> U	α	8.51E-06	4.47E+09

<sup>1</sup>Для всех перечисленных нуклидов доминирующий тип распада имеет коэффициент ветвления >99,99%.

- Зная относительное содержание изотопов (например, из гамма-спектрологии), удельную мощность, вырабатываемую изотопами, и полную мощность, измеренную калориметром, можно определять количество (массу) изотопов в объекте.

# Суть методов активной идентификации: "Пощупаем и посмотрим, что произойдет"

- Как взаимодействующие, так и не взаимодействующие объекты исследования осложняют применение пассивных методов
  - ЯМ во взаимодействующих объектах может экранироваться упаковочным материалом, дополнительно ослабляющим и без того слабые пассивные признаки ЯМ, например, урана.
  - Не взаимодействующие объекты могут быть умышленно снабжены экраном, скрывающим ЯМ и делающим пассивные признаки атрибутов ЯМ необнаружимыми и (или) недостоверными.
- **Методы активной идентификации по** признакам присутствия нейтронов (мгновенных и запаздывающих), возникающих при вызванном нейтронами делении (например, в изотопе  $^{235}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$ ), удобны и практичны.

**Мгновенные нейтроны:** признак создается нейтронами, испускаемыми в процессе деления ядер

**Запаздывающие нейтроны:** признаки появляются 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 1 деление)

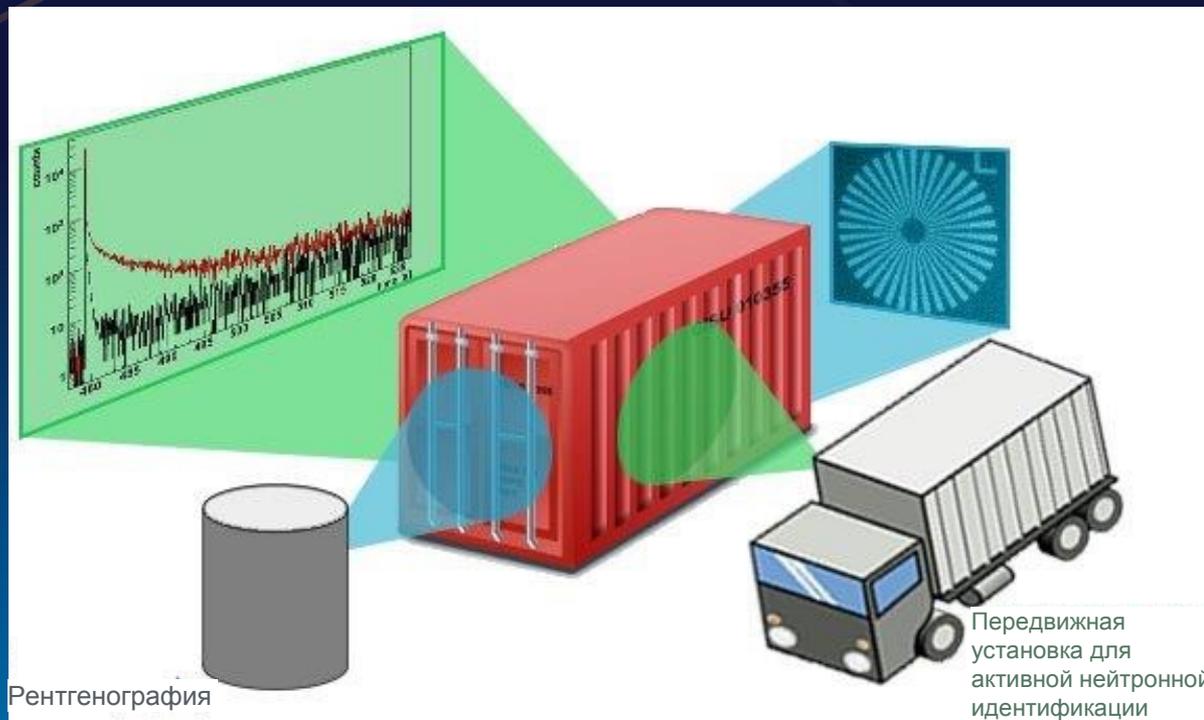
*Недостаток:* осложненное измерение параметров и различение от идентифицирующих нейтронов

**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  $^{235}\text{U}$  и 0,0065 для  $^{239}\text{Pu}$ )

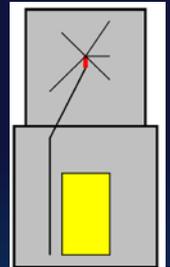
# Импульсные источники гамма-излучения и нейтронов делают возможной активную идентификацию и по ядерным демаскирующим признакам, и по результатам радиографии с пространственным разрешением



- Источники нейтронов или гамма-излучения для активной идентификации должны быть быстродействующими, компактными, создающими высокую интегральную плотность потока и преимущественно направленное излучение и безопасными в эксплуатации.
- Даже изображения с малым разрешением, полученные методами рентгенографии, могут способствовать ускорению досмотра груза.

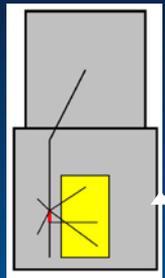
# При использовании простых источников непрерывного действия активная идентификация пригодна для обследования взаимодействующих объектов путем регистрации вызванного нейтронами деления и генерируемых запаздывающих нейтронов

- В устройстве "шафлер", работающем по принципу перестановок, сначала источником нейтронов (изотоп  $^{252}\text{Cf}$ ) вызывается деление ядер в объекте исследования, а затем источник убирается и начинается подсчет запаздывающих нейтронов.



(a) Фон

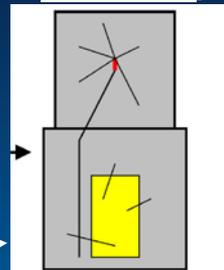
- Источник на основе изотопа  $^{252}\text{Cf}$  хранится вблизи объекта, но закрыт от него экраном (для измерений фона).



(b) Облучение

- Источник механически переставляется в зону рядом с образцом и, облучая его, вызывает деление.

- Источник убирается, а запаздывающие нейтроны регистрируются детекторной матрицей, окружающей образец.



(c) Регистрация запаздывающих нейтронов

- Задержка между событиями вынужденного деления и испускания нейтронов может составлять несколько минут. Затем источник переставляется многократно до завершения подсчета достаточного числа запаздывающих нейтронов



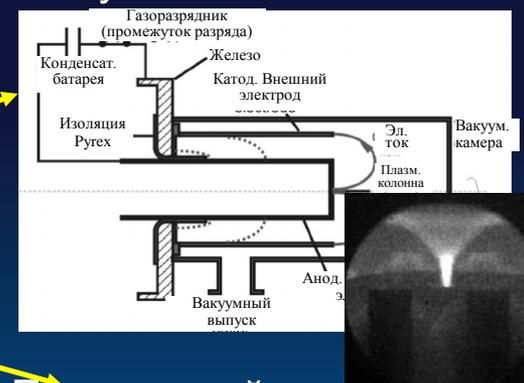
**Перестановочные устройства, рассчитанные на использование как 55-галлонных цилиндрических контейнеров, так и крупногабаритных брусковых образцов, находятся в регулярной эксплуатации**



# Импульсные источники гамма-излучения и нейтронов делают возможной активную идентификацию как взаимодействующих, так и невзаимодействующих образцов

- Активная идентификация возможна благодаря использованию источников, возбуждаемых импульсами энергии и отдающих мощные потоки нейтронов или гамма-квантов.
- Источники нейтронов типа "дейтерий - дейтерий" или "дейтерий - тритий", создающие фокус плотной плазмы
- Рентгеновские или нейтронные источники на базе установок с плазменным шнуром ("зета-пинч")
- Предназначенные для радиографии или инициирования фотонного деления в объекте источники интенсивного гамма- или нейтронного излучения, создаваемого ускорителем
- Преимущество источников с малой длительностью импульса состоит в том, что они "отключаются" и впоследствии не вносят вклад в уровень фона.
- При определенной мощности применяемого для идентификации источника фон мгновенных нейтронов не позволит выявить признаки мгновенных нейтронов или гамма-квантов, но могут регистрироваться запаздывающие нейтроны и гамма-излучение.
- В качестве средства активной идентификации перспективны также лазерные нейтронные источники (доклад Фавалли на данной конференции).

## Фокус плотной плазмы



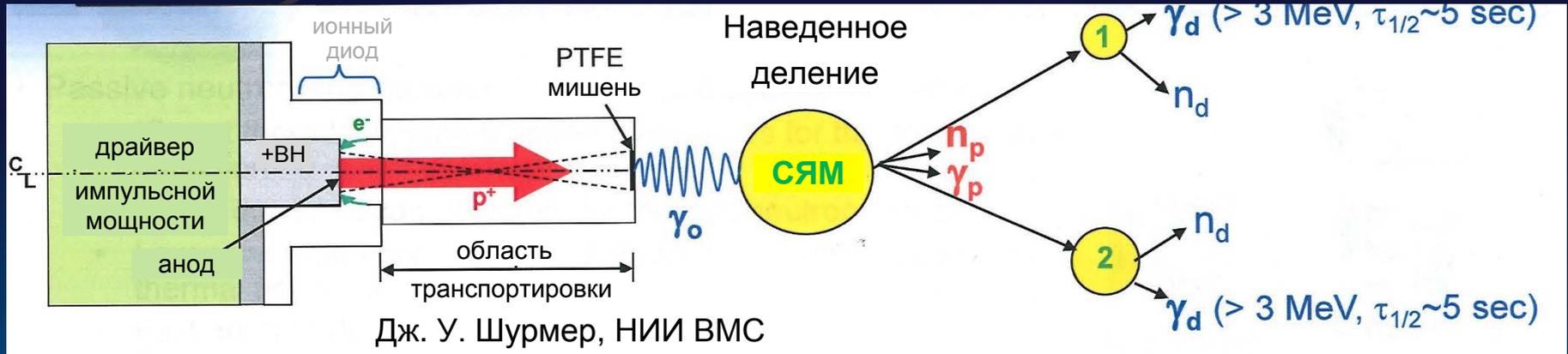
## Плазменный шнур в газе



## Линейный бетатрон установки DARHT



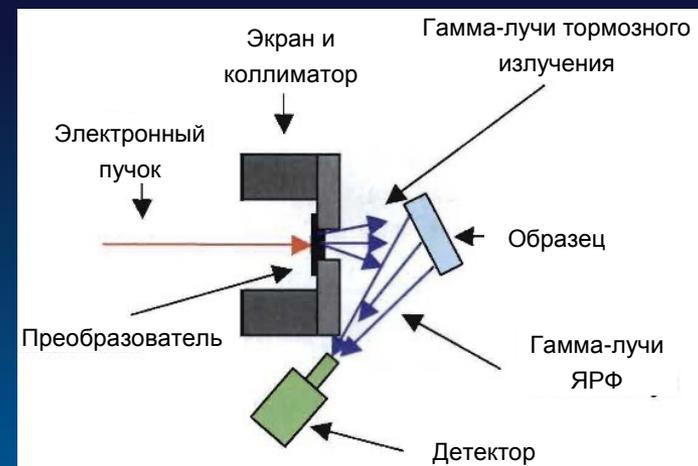
# Импульсные ускорители электронов создают мощные потоки гамма-излучения, способные возбуждать фотонное деление в СЯМ, присутствующем в образце



- Мощные потоки фотонов с энергией 5 - 10 МэВ, требующиеся для инициирования фотонного деления в объекте исследования, могут быть беспрепятственно получены с помощью ВВ импульсных диодов или линейных индукционных ускорителей.
- Фотоны с энергиями в диапазоне МэВ беспрепятственно проходят через упаковку.
- Детекторы регистрируют распад осколков деления по испускаемым нейтронам или гамма-квантам.
- Такая методика может быть полезна для обнаружения и оценки содержащих уран образцов, у которых естественные демаскирующие признаки могут быть замаскированы.

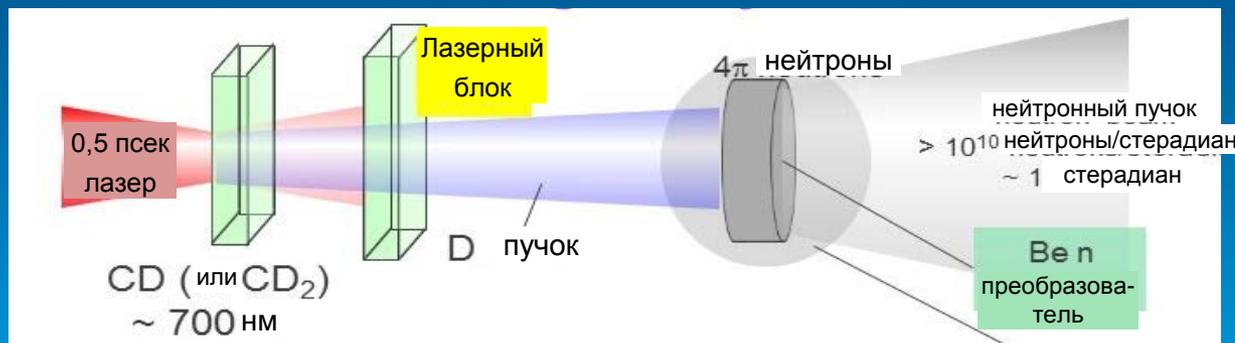
# Импульсные электронные ускорители, генерирующие мощные потоки гамма-квантов, могут применяться также для ядерно-резонансной флюоресцентной спектроскопии

- Идентифицирующие фотоны возбуждают ядра, которые, в свою очередь, переходят на более низкий уровень возбуждения за счет переизлучения гамма-квантов на характерных для ядра длинах волн, позволяя идентифицировать СЯМ, а также изотопный состав.
- Характерные энергии эмиссии для изотопа  $^{235}\text{U}$ , равные 1733, 1815 и 1862 кэВ, в сравнении с энергиями для изотопа  $^{238}\text{U}$ , составляющими 2176, 2255 и 2468 кэВ, могут быть использованы в анализе отношения интенсивностей спектральных линий для определения обогащения урана.
- Измерение пропускания или комптоновское рассеяние от объекта исследования могут способствовать определению массы урана.



# Лазеры, излучающие ультракороткие импульсы, перспективны для получения мощных потоков нейтронов, полезных для активной идентификации

- Мощные направленные ионные пучки, инициированные короткоимпульсным лазером, тщательно изучены.
  - Пикосекундные импульсы лазерного излучения сопрягаются с электронами в очень тонких мишенях из дейтерированного полистирола (CD) или дейтерированного полиэтилена (CD<sub>2</sub>).
  - Разделение зарядов и (или) нарушения устойчивости ускоряют ионы дейтерия до десятков и сотен МэВ с очень высокой эффективностью (10%)
- Пучки ионов дейтерия с очень высокой энергией попадают на преобразователь из материала с малым атомным номером (например, из бериллия), вызывая генерирование почти изотропных нейтронов благодаря распаду дейтерия.
- В недавних экспериментах на установке Trident получали  $10^{10}$  нейтронов на стерадиан за 1 импульс лазера, причем для активного облучения, возможно, целесообразно использовать поток в угле 1 стерадиан.



Andrea Favalli: "Laser-driven Pulsed Neutron/X-ray Sources for Nuclear Material Security and Scientific Applications"

# К актуальным направлениям НИОКР для наращивания возможностей принадлежит создание средств обнаружения и источников для активной идентификации

- **Средства обнаружения**

- Средства следующего поколения, предназначенные для проверки соблюдения условий международных договоров
- Анализ отработанного топлива
- Высокоточный неразрушающий анализ, заменяющий разрушающий анализ на крупных объектах
- Охрана производственных объектов большой мощности
- Средства измерения массового баланса для заводов по обогащению урана
- Системы следующего поколения, предназначенные для сбора данных



Портативный регистратор множественности нейтронов (JSR-15), запущенный в серийное производство в 2008 г.



Система верификации атрибутов нейтронных и гамма-потоков (АВНГ), построенная в России в тесном сотрудничестве с ЛАНЛ и установленная на оружейном объекте ВНИИЭФ в Сарове, Россия

Современные задачи обнаружения и определения характеристик ядерных материалов, составляющие часть проблемы обеспечения глобальной ядерной безопасности, сложны, многочисленны и весьма актуальны.

Для решения таких задач требуются длительные и целенаправленные усилия нескольких стран, позволяющие:

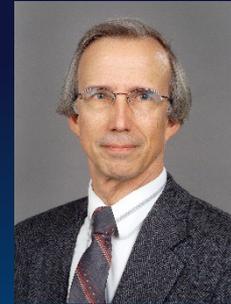
- Оценить технико-экономическую осуществимость формирующихся или новых технических средств и технологических процессов
- Определить масштаб деятельности, необходимой для воплощения технических идей в зрелые практические решения
- Разработать перспективные планы обеспечения пользователей в разных странах мира усовершенствованными техническими средствами и технологиями, а также профессиональный инструментарий и протоколы, необходимые для их практического применения
- Способствовать вовлечению молодых ученых и инженеров в разработку таких технических средств и технологий

Частью будущего фундамента совместной, основанной на сотрудничестве программы НИОКР могут стать два конкретных направления деятельности, которые рассматриваются в настоящем докладе, а именно:

- Разработка методов создания надежной системы оперативного контроля материалов, необходимой для повышения эффективности процесса хранения и учета запасов ядерных материалов
- Внедрение активных методов распознавания содержимого хранилищ или контейнеров с отходами, партий грузов гражданского назначения и содержащего ЯМ мусора путем использования средств неразрушающего анализа с помощью нейтронных потоков или гамма-излучения

## Боб Рейновски, Андреа Фавалли (ЛАНЛ)

- "Методы и технические средства неразрушающего анализа для решения задач обеспечения сохранности ядерных материалов"



## Андреа Фавалли (ЛАНЛ)

- "Импульсные нейтронные/рентгеновские источники с лазерным иницированием для проведения научных исследований и решения задач, связанных с обеспечением сохранности ядерных материалов"

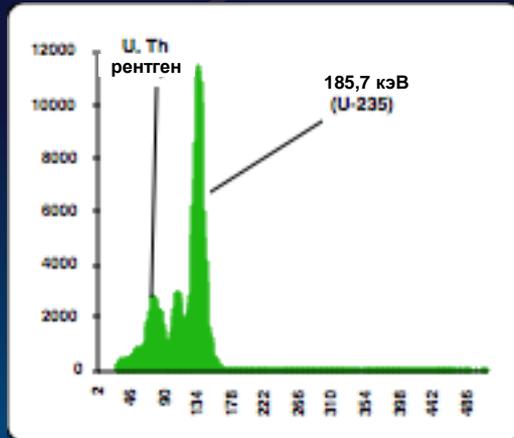


1. “Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials,” Nuclear Regulatory Commission report NUREG/CR-5550, Los Alamos National Laboratory report LA-UR-90-732 (March 1991).
2. D. Reilly et al., Addendum to “Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials” (2007).
3. J. Parker, “Uranium Enrichment Measurement by Gamma-Ray Spectroscopy: a Review of History, Methods, Capability, Limitation.” Доклад, представленный в ЛАНЛ 15 августа 1997 г.
4. T. D. Reilly, R. B. Walton, and J. L. Parker, “The Enrichment Meter – A Simple Method for Measuring Isotopic Enrichment,” Los Alamos National Laboratory report LA-4605 (1970).
5. T. Sampson, T. Kelley, and D. Vo, Application Guide to Gamma-Ray Isotopic Analysis Using the FRAM Software, Los Alamos National Laboratory report, LA-14018 (2003).
6. T. Sampson, “Verification and Validation of the FRAM Isotopic Analysis Software,” LA-14057 (2003).
7. D. S. Bracken and C. R. Rudy, “Principles and Applications of Calorimetric Assay,” Los Alamos National Laboratory report LA-UR-07-5226 (2007).
8. P. M. Rinard, “Shuffler Instruments for the Nondestructive Assay of Fissile Materials,” Los Alamos National Laboratory report LA-12105 (1991).
9. P. M. Rinard, “Shuffler,” Los Alamos National Laboratory report LA-UR-03-4404 (2003).
10. H. Menlove, “Description and Operation Manual for the Active Well Coincidence Counter,” Los Alamos National Laboratory report LA-7823-M (1979).

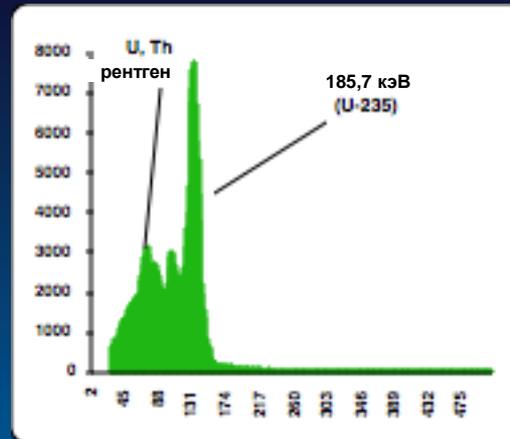
# Дополнительные материалы

# При снижении степени обогащения пик гамма-излучения с энергией 186 кэВ от распада изотопа $^{235}\text{U}$ становится менее заметным

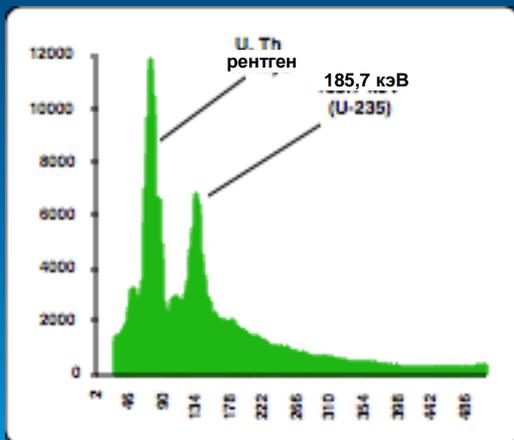
Высокообогащенный уран [93%  $^{235}\text{U}$ ]



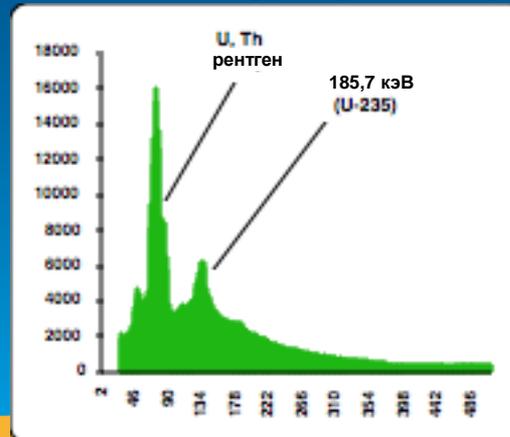
Уран со средней степенью обогащения [10%  $^{235}\text{U}$ ]



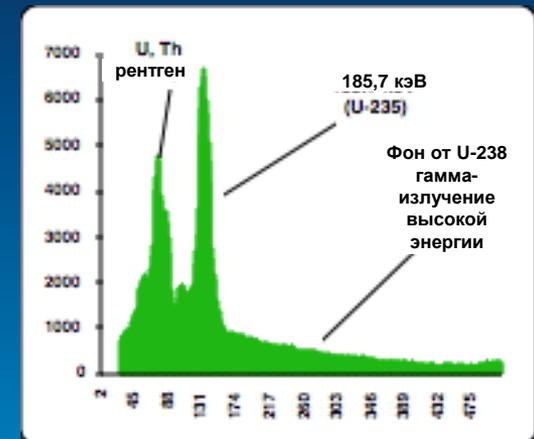
Природный уран (0,7%)



Обедненный уран [0,2%  $^{235}\text{U}$ ]



Низкообогащенный уран [3%  $^{235}\text{U}$ ]



# Калориметрия - точный метод неразрушающего анализа, но ее результаты необходимо объединять с дополнительными данными

## Преимущества

- Калориметрия - это простой, характеризующийся высокой воспроизводимостью результатов, почти свободный от систематической ошибки и самый точный метод неразрушающего анализа.
  - Систематические ошибки можно определять количественно в процессе поверки измерительной аппаратуры
  - Масса Pu (г) = (суммарная тепловая мощность) / ("P<sub>эфф</sub>" Вт на 1 грамм Pu)
- Измерительная характеристика правильно сконструированного калориметра не зависит ни от местонахождения источника внутри измерительной камеры, ни от формы материала.
- Количество материала, которое можно исследовать в калориметре, ограничивается только факторами безопасности ядерной критичности и объемом измерительной камеры.

## Ограничения

- Образец плутония должен характеризоваться обилием изотопа (т.е. для гамма-спектроскопии)
- Калориметрические измерения, как правило, требуют больше времени (1 - 8 часов), чем другие методы неразрушающего анализа
  - Основное влияние на длительность измерений оказывает, как правило, материал упаковки
- Калориметр не позволяет отличить тепло, выделяемое в результате радиоактивного распада, от тепла, вырабатываемого в других процессах (например, при фазовых превращениях и химических реакциях)

# Калориметр большого объема (LVC) дает точные результаты исследования крупногабаритных образцов

- ✦ Калориметр большого объема измеряет мощность, отбираемую от стандартного цилиндрического контейнера емкостью 55 галлонов (208 л при диаметре 60 см).
- ✦ В калориметре LVC используются две теплопроводные зоны, нагреваемые проволочными поверхностными нагревателями, герметизированными кремнийорганической резиной, которые обеспечивают постоянную опорную температуру на холодной стороне термоэлектрических датчиков теплового потока.
- ✦ Термостатирование осуществляется с помощью цепи следящей обратной связи, предусмотренной для каждого нагревателя. Сигнал обратной связи, несущий информацию о температуре и поступающий от каждого нагревателя, формируется с помощью дифференциальной схемы моста сопротивлений с термистором.
- ✦ Для регулирования температуры в калориметре LVC не используется ни вода, ни иной материал, в заметной степени замедляющий или отражающий нейтроны.
- ✦



# Системы с перестановочными устройствами могут работать с большими контейнерами и достигать высокой воспроизводимости и точности измерений

Большое перестановочное устройство, используемое в ЛАНЛ для работ с цилиндрическими контейнерами емкостью 55 галлонов (208 л)



Перестановочное устройство, используемое в ЛАНЛ для работ с брусковыми образцами



Камера для образцов

Макеты брусковых образцов

Контейнер для хранения изотопа  $^{252}\text{Cf}$

- ✦ При использовании относительно небольшого источника с изотопом  $^{252}\text{Cf}$  (30 – 60 мкг) это устройство имеет воспроизводимость результатов 0,25% ( $1\sigma$ ) и погрешность 0,5% ( $1\sigma$ ), хотя длительность анализа (включая измерение фона) составляла всего 10 минут.
- ✦ Высокая воспроизводимость результатов стала возможной благодаря большой загрузке изотопа  $^{235}\text{U}$  (1,7 кг) и наличию полости в бруске, позволившим эффективно использовать нейтроны от изотопа  $^{252}\text{Cf}$ .

# Для исследования как взаимодействующих, так и невзаимодействующих объектов требуются также методы активной идентификации

- Ядерный материал, содержащийся во взаимодействующих объектах исследования, может экранироваться упаковочным материалом, дополнительно ослабляющим и без того слабые пассивные признаки ЯМ, например, урана.
- Методы, требующие затрат времени до нескольких минут, могут быть основаны на использовании значительно оптимизированной геометрии детекторов, геометрические параметры которых служат ограничивающим фактором.



- Кроме того, невзаимодействующие объекты могут быть умышленно снабжены экраном, скрывающим присутствие ЯМ и делающим пассивные признаки атрибутов ЯМ необнаружимыми и (или) недостоверными.
- Источники нейтронов или гамма-излучения для активной идентификации должны быть быстродействующими, компактными, создающими высокую интегральную плотность потока и преимущественно направленное излучение и безопасными в эксплуатации.



