

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Изучение характеристик детектора реакторных
антинейтрино iDREAM на Калининской АЭС

Подготовил

Студент группы М20-115

Растимешин А.А.

Руководитель НИРС:

к.ф.- м.н. Е.А. Литвинович

Постановка задач

- Детектор реакторных антинейтрино iDREAM располагается на третьем энергоблоке Калининской АЭС. Набор данных проводился со 2 мая 2021 по 20 ноября 2021. В настоящее время ведётся их анализ.
- Детектор iDREAM регистрирует заряд который возникает при преобразовании сцинтилляционных вспышек в электрический импульс фотоэлектронными умножителями. В общем случае собранный заряд является нелинейной функцией энергии, выделенной частицей в детекторе. Данная функция называется функцией отклика детектора и является одной из важнейших его характеристик поскольку от неё зависит точность с которой определяется энергия частицы.
- Антинейтрино регистрируется по реакции ОБР ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$) методом задержанных совпадений, в котором регистрируется мгновенный сигнал позитрона и задержанный сигнал нейтрона. Для определения временного интервала для задержанных совпадений необходимо определить время захвата нейтрона в мишени.

Применение антинейтринного излучения от ядерного реактора.

Какие задачи можно решать с помощью антинейтринного излучения?

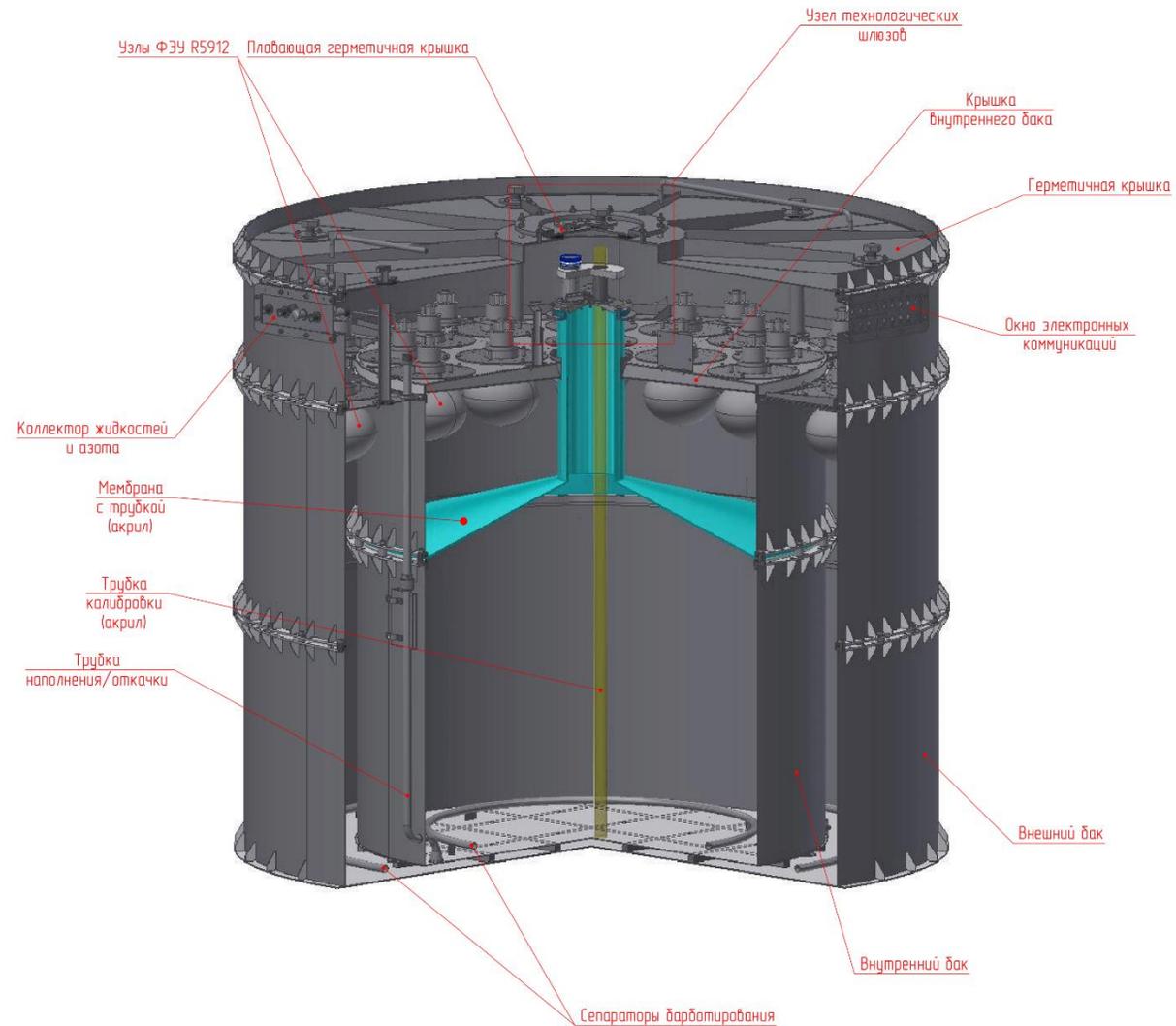
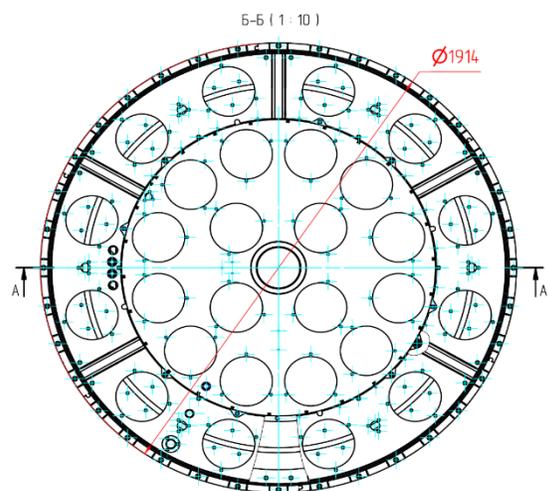
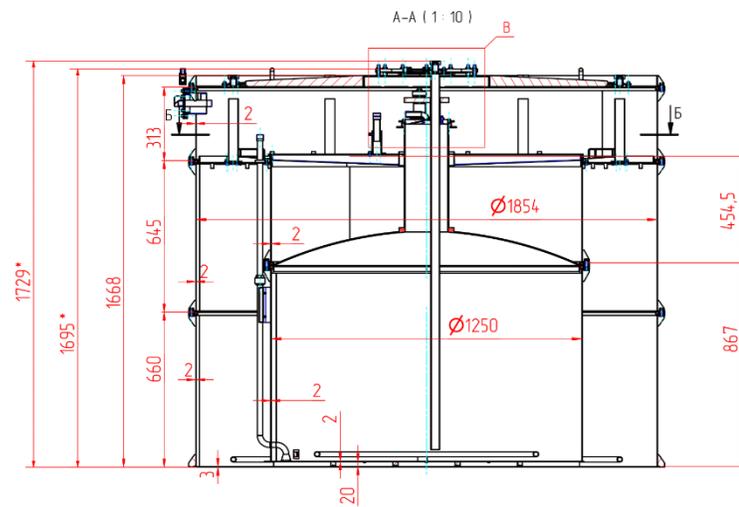
1. Выявление несанкционированных режимов работы реактора, в т.ч. наработку оружейного плутония
2. Дистанционный контроль энерговыработки реакторов
3. Мониторинг отработавшего ядерного топлива



Реакция обратного бета-распада

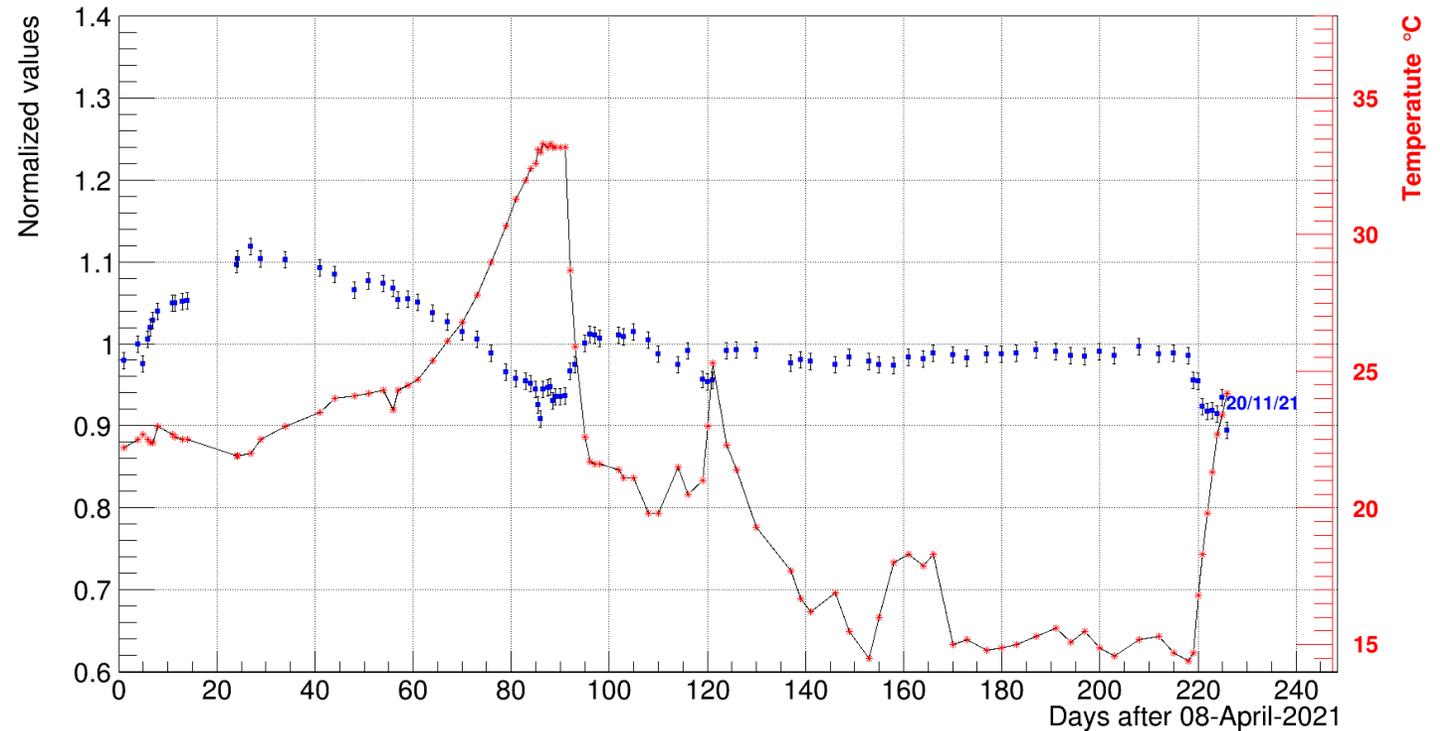
При регистрации антинейтрино используется метод задержанных совпадений: сначала регистрируется позитрон, после чего регистрируется нейтрон. По энергии позитрона восстанавливается энергия антинейтрино, регистрация нейтрона служит подтверждением того, что произошёл обратный бета-распад.

Устройство детектора iDREAM



Определение энергетической шкалы

- Перевод условного заряда в зарегистрированную энергию осуществляется путем деления условного заряда на коэффициент \underline{QE} .
- \underline{QE} вычисляется при калибровках р/а источниками: измеряем зарядовый спектр, получаем энергию источника в условном заряде, делим энергию, выраженную в усл. заряде на энергию в кэВх и т.о. получаем \underline{QE}
- Из-за случайного изменения температуры меняется световой выход сцинтиллятора
- Появляется необходимость коррекции \underline{QE} для каждого регулярного рана¹
- Предложено скорректировать \underline{QE} с помощью калибровочных ранов с ^{60}Co путем интерполяции коэффициентов \underline{QE} соседних калибровочных ранов

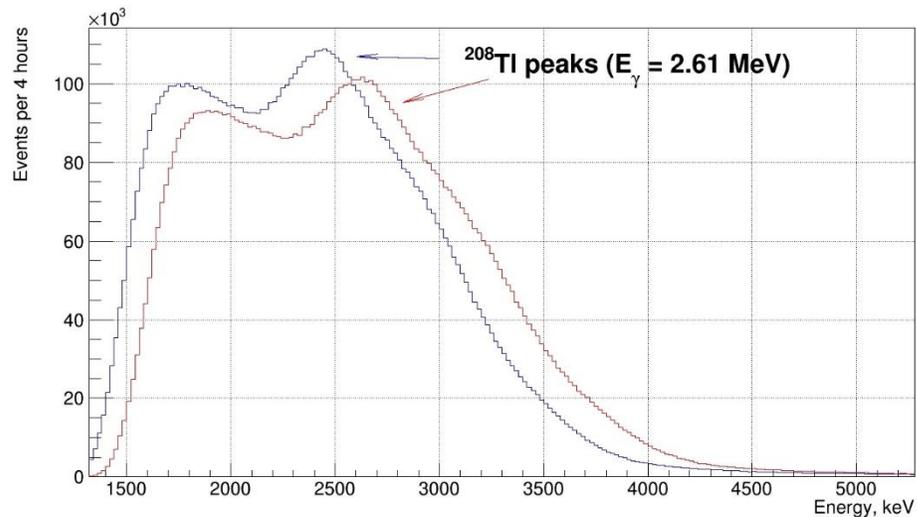


Изменение световых выходов сцинтиллятора. Синими точками отмечено положение пика кобальта-60 относительно положения 8 апреля 2021, красными точками показана температура сцинтиллятора

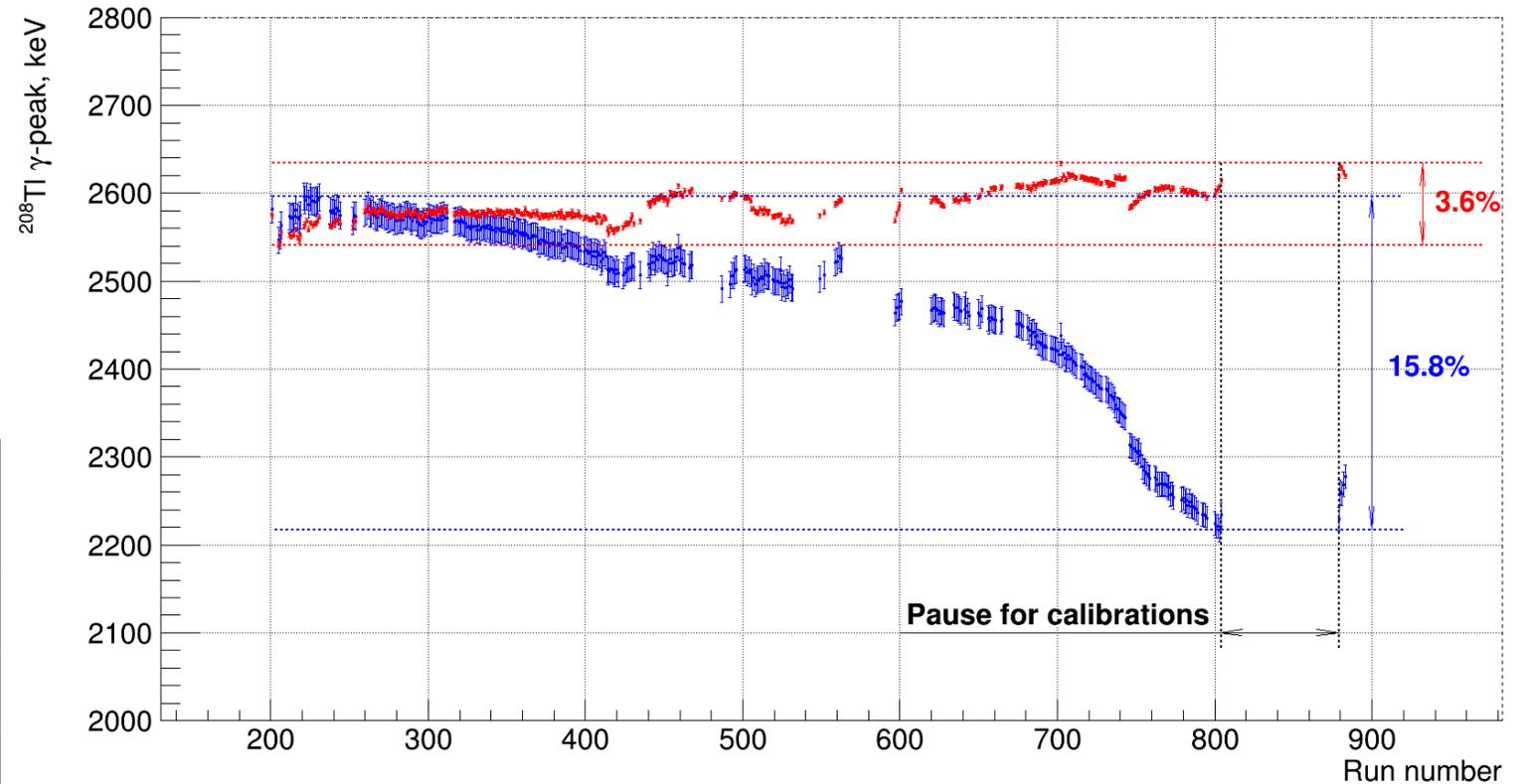
¹ Под «раном» здесь и далее подразумевается серия набора данных.

Определение энергетической шкалы

Проверить результат коррекции шкалы можно по пику ^{208}Tl , содержащегося в стали

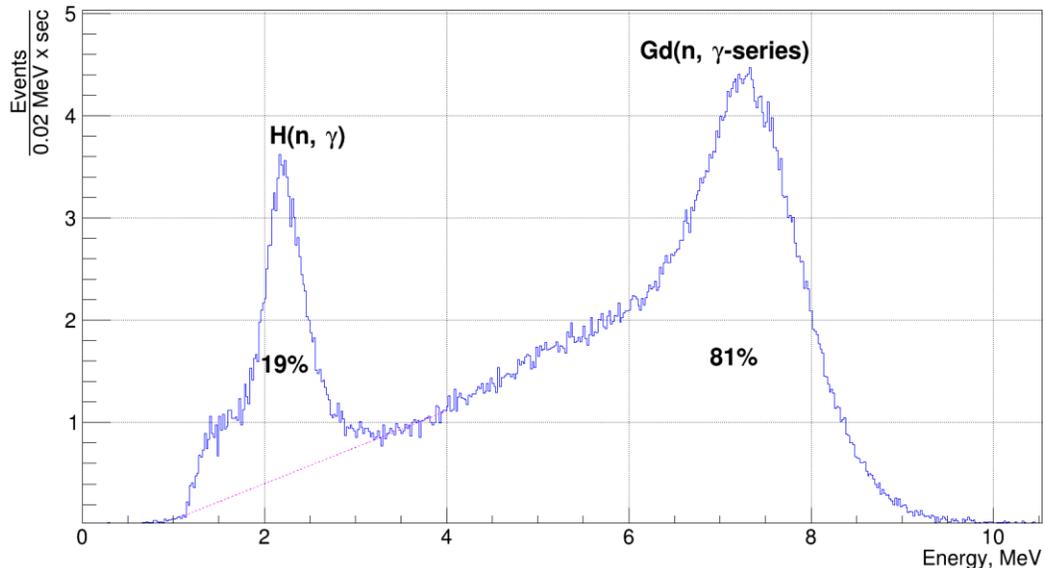
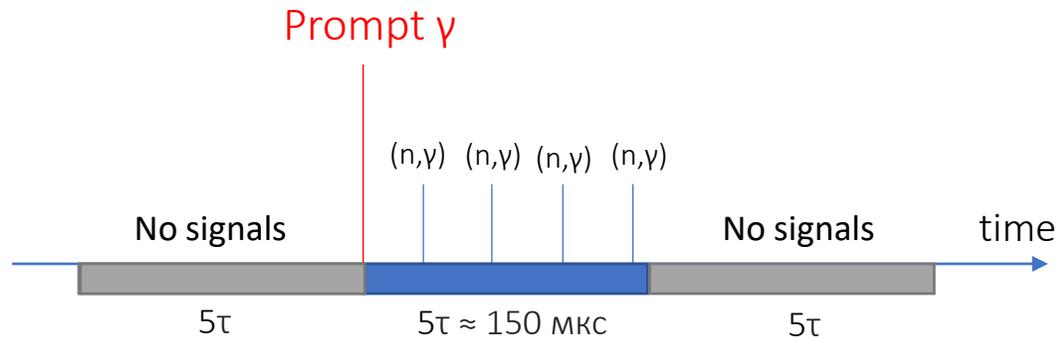


Спектр регулярного 690-го рана до (синий) и после (красный) коррекции шкалы



Результат коррекции шкалы: синим показаны пики ^{208}Tl до коррекции шкалы, красным -- после коррекции.

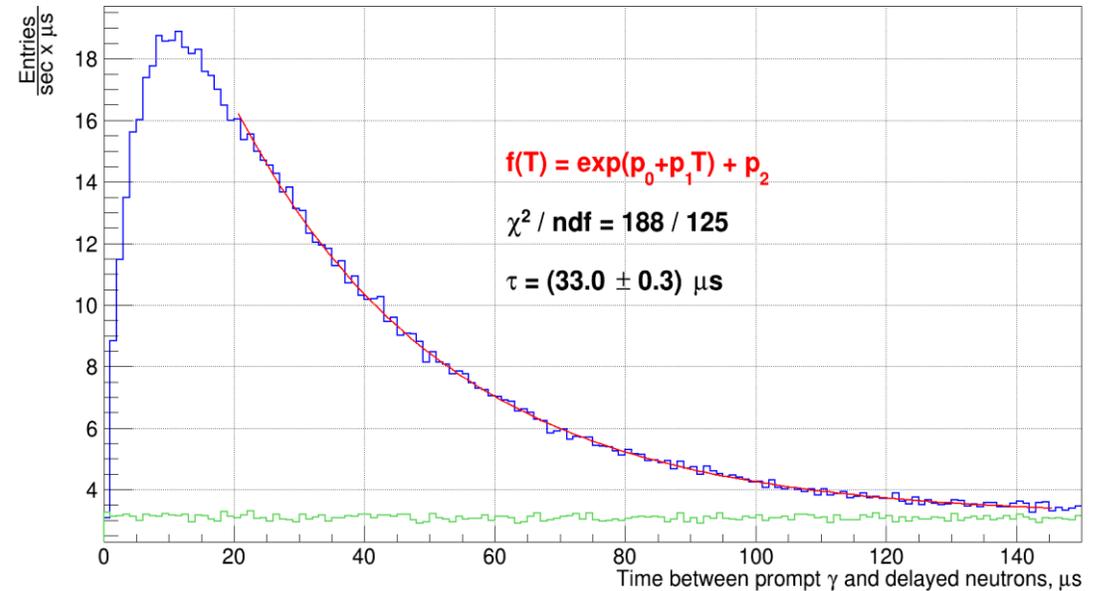
Определение времени захвата нейтронов в гадолиниевом сцинтилляторе



Спектр задержанных событий от ^{252}Cf

$\text{Eff} = 1 - e^{-t/\tau}$, где τ -- время захвата нейтрона;

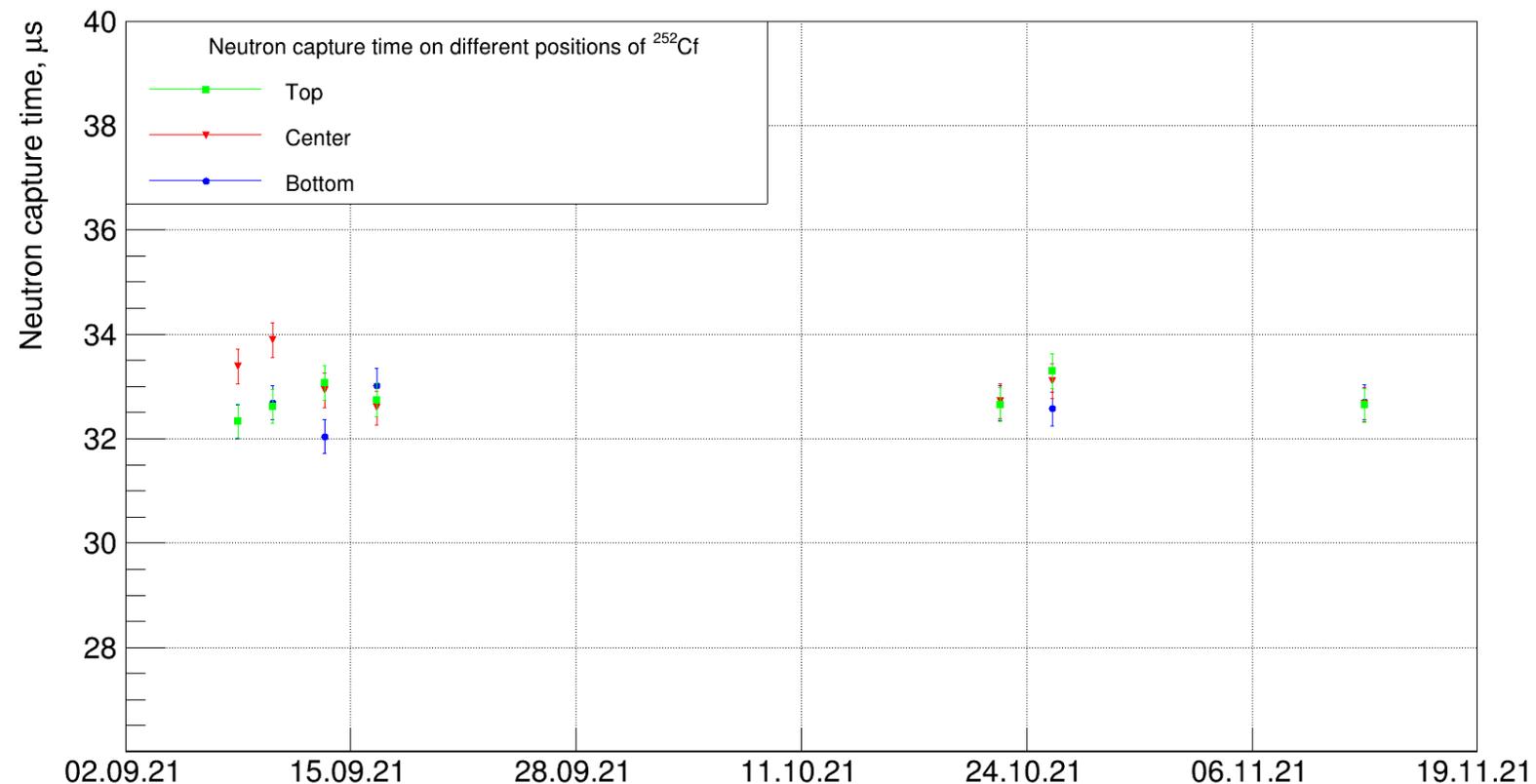
$$\tau = (33.0 \pm 0.3) \mu\text{s}$$



Распределение времен захвата нейтронов в окне 150 мкс после регистрации мгновенных γ -квантов (синий). Зеленым цветом показано аналогичное распределение случайных совпадений.

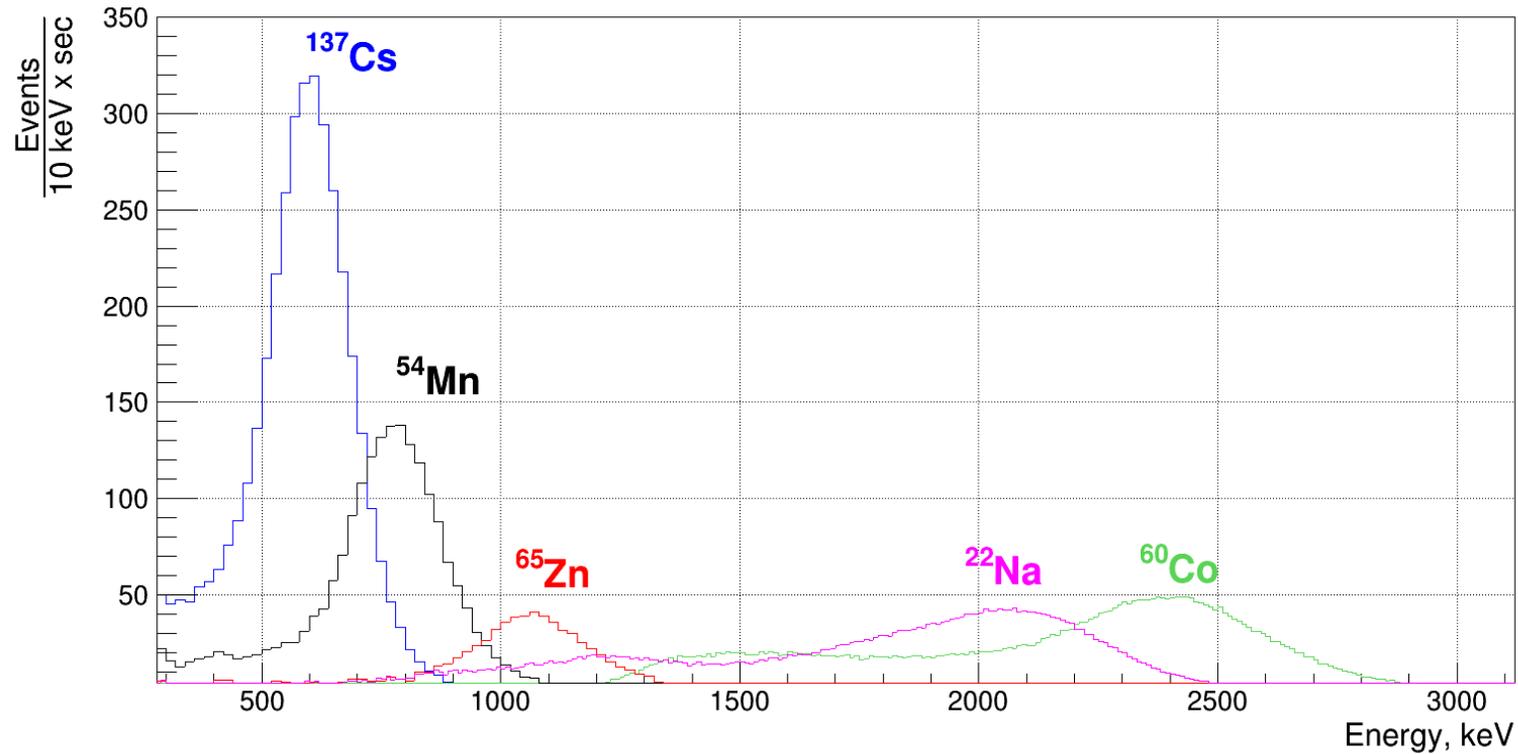
Стабильность времени захвата нейтрона

- Каждая калибровка калифорнием-252 включала в себя измерения при расположении источника вверху, в центре и внизу мишени
- На протяжении двух месяцев время захвата нейтрона для всех положений источника совпадает в пределах ошибок измерений



Стабильность времени захвата нейтрона в положениях «Низ мишени», «Центр мишени», «Верх мишени»

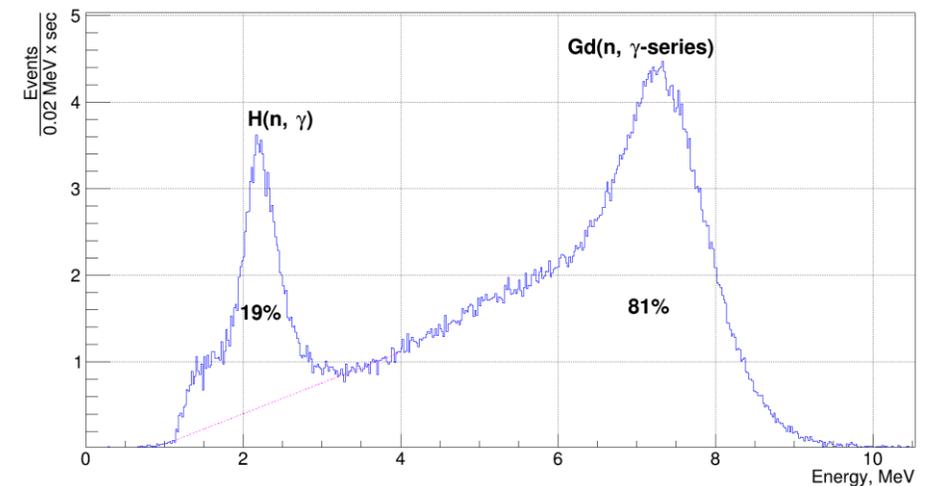
Функция отклика детектора



Измеренные спектры ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{65}Zn , ^{22}Na , ^{60}Co

Источники, используемые для определения функции отклика:

- ^{137}Cs ($E_\gamma = 662$ кэВ)
- ^{54}Mn ($E_\gamma = 835$ кэВ)
- ^{65}Zn ($E_\gamma = 1115$ кэВ)
- ^{252}Cf (по реакции (n, γ) на водороде, $E_\gamma = 2223$ кэВ)

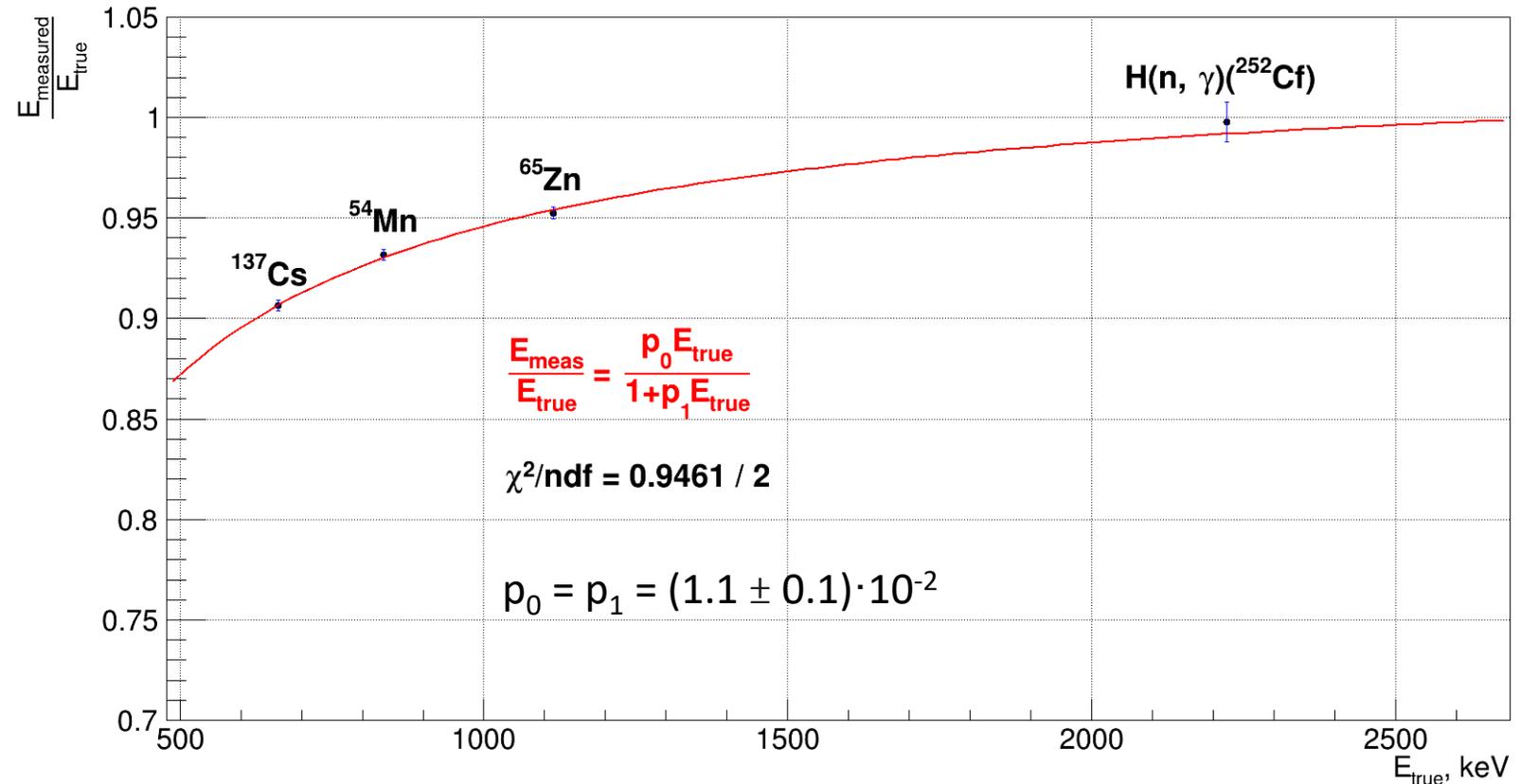


Спектр (n, γ) от захвата нейтронов ^{252}Cf

Функция отклика детектора

- ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{65}Zn и $\text{H}(n, \gamma)$ от нейтронов ^{252}Cf были выбраны для построения функции отклика поскольку излучают одиночный гамма-квант тогда как при испускании двух и более гамма-квантов наблюдается серьезный сцинтилляционный дефект.
- Чем выше энергия γ -кванта, тем ниже сцинтилляционный дефект.
- Относительные изменения отклика профитированы функцией

$$f(E_\gamma) = \frac{p_0 \cdot E_\gamma}{1 + p_1 \cdot E_\gamma}, \text{ где } p_0 = p_1 = (1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-2} \text{ кэВ}^{-1}$$



Функция отклика детектора iDREAM

Заключение

- Исследован отклик детектора iDREAM и измерено время захвата нейтрона в содержащем металлический гадолиний сцинтилляторе, которое составило $\tau = (33.0 \pm 0.3)$ мкс
- Показано, что время захвата нейтрона не меняется на протяжении времени работы детектора и не зависит от местоположения нейтронного источника.
- Показано, что отклик детектора меняется на протяжении времени в результате колебаний температуры в помещении, в котором расположен детектор. Для компенсации эффекта «дрейфа» энергетической шкалы разработан и применен алгоритм коррекции отклика по калибровкам ^{60}Co . Данный алгоритм позволил снизить эффект от дрейфа в 4.5 раза.
- Получена функция отклика детектора iDREAM, которая описывается выражением $f(E_\nu) = \frac{p_0 \cdot E_\nu}{1 + p_1 \cdot E_\nu}$, где $p_0 = p_1 = (1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-2} \text{кэВ}^{-1}$