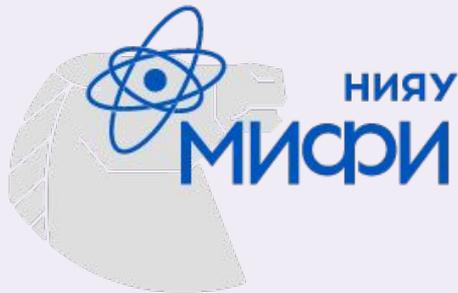


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»



Отчет
о научно-исследовательской работе

**Поток антинейтрино от реактора на быстрых
нейтронах БН-800**



Научный руководитель
к.ф.-м.н., доцент

Литвинович Е.А

Студент

Вакуленко В.А

Задачи

- ❖ Осуществить расчет потока и энергетического спектра антинейтрино от реактора на быстрых нейтронах БН-800
- ❖ Сравнить спектральные характеристики реакторов БН-800 и ВВЭР-1000 с целью исследования возможности использования реакторов типа БН для фундаментальных и прикладных нейтринных исследований, традиционно проводимых на реакторах типа ВВЭР-1000

Актуальность

- ❖ Детальный расчет потока антинейтрино для быстрых реакторов с топливной загрузкой, включающей МОКС топливо, ранее не проводился.
- ❖ Изучение спектральных характеристик антинейтрино, испускаемых реакторами, в частности БН-800, актуально для исследования фундаментальных задач нейтринных реакторных экспериментов, таких как объяснение спектральной аномалии реакторных антинейтрино, поиск новых т.н. “стерильных” состояний нейтрино, изучение упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах и т.д..

ВВЭР-1000

- ❖ **Тип нейтронов:** тепловые
- ❖ **Замедлитель:** вода
- ❖ **Теплоноситель:** вода
- ❖ **Материал топлива:** Урановое топливо с обогащением 3 - 5 %

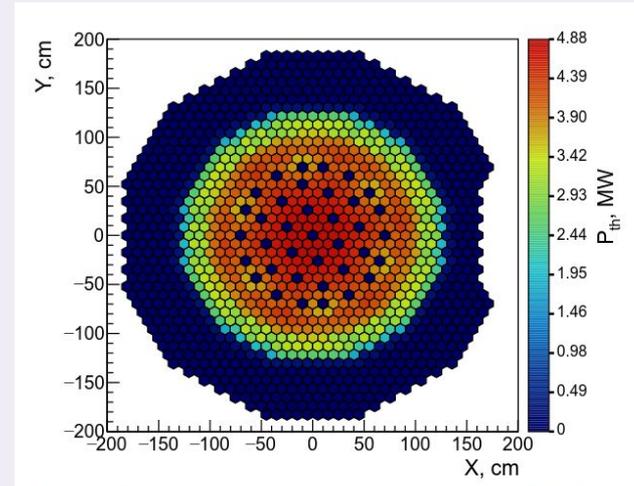
БН-800

- ❖ **Тип нейтронов:** быстрые
- ❖ **Замедлитель:** нет
- ❖ **Теплоноситель:** жидкий натрий
- ❖ **Материал топлива:** Смесь оксидного топлива (МОКС*) ~16 %, остальные 84% это урановое топливо с обогащением 18,5-24 %

* (Mixed Oxide Fuel, смешанное оксидное топливо) включает смесь оксидов урана и плутония

Моделирование кампании реактора БН-800: исходные данные для расчета

- ❖ Для расчета потока антинейтрино от активной зоны реактора БН-800 был использован программный комплекс КИР.
- ❖ Комплекс КИР (версия С) разработан для моделирования стационарных и нестационарных нейтронно-физических процессов с использованием метода Монте-Карло в системах с трехмерной геометрией, как в однородных, так и неоднородных средах.

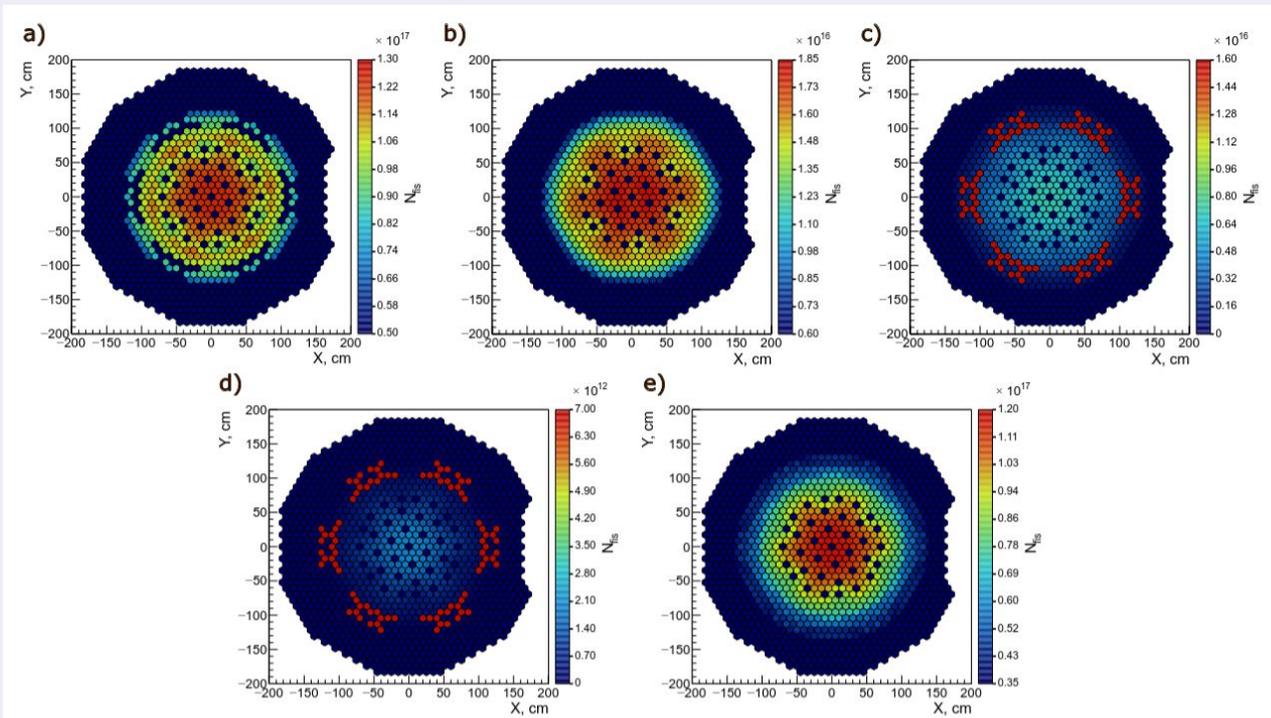


Распределение мощности по плоскости
ХОУ для БН-800

- ❖ В процессе моделирования «выгорания» реактора за **198.16 суток** была установлена **постоянная мощность 2100 МВт**.

Распределение количества делений p по плоскости XOY для

a) ^{235}U b) ^{238}U c) ^{239}Pu и d) ^{241}Pu e) (n, γ)



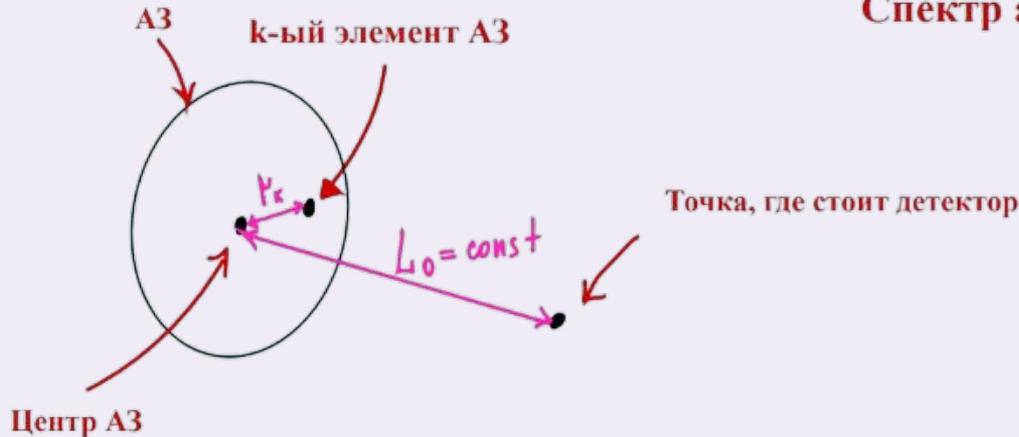
◆ Деления изотопов
происходят неоднородно

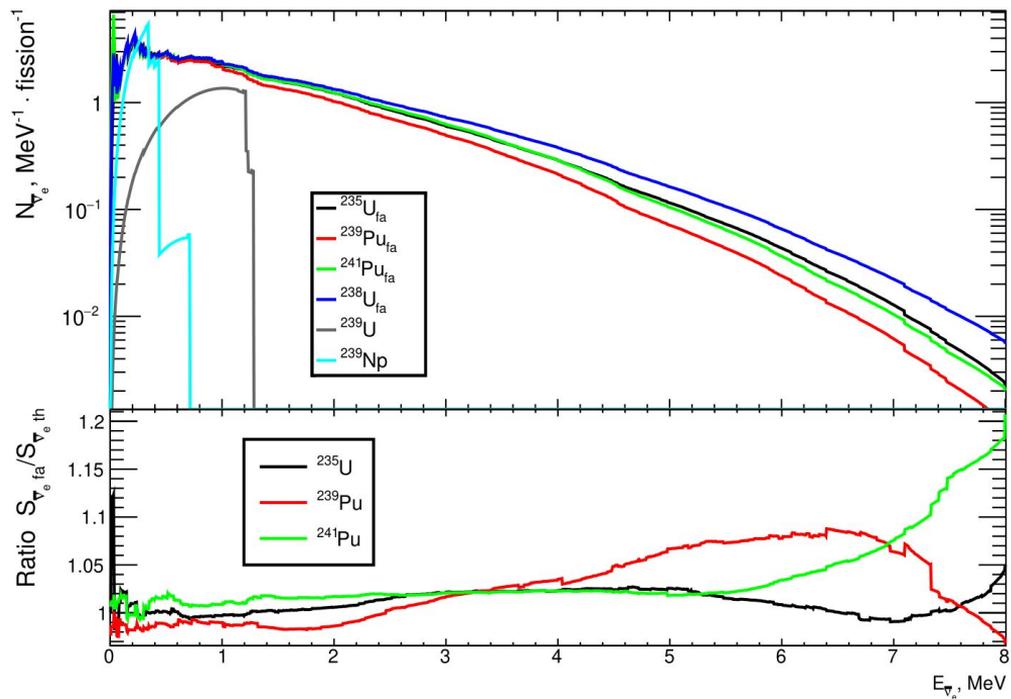
Методика расчета потока антинейтрино от реактора БН

Число делений в элементе АЗ

$$\Phi(t, E \bar{\nu}_e, L_0) = \frac{1}{4\pi} \cdot \sum \frac{N_f(t, r_k)}{(L_0 - r_k)^2} \cdot S_f(t, r_k, E \bar{\nu}_e)$$

Спектр антинейтрино



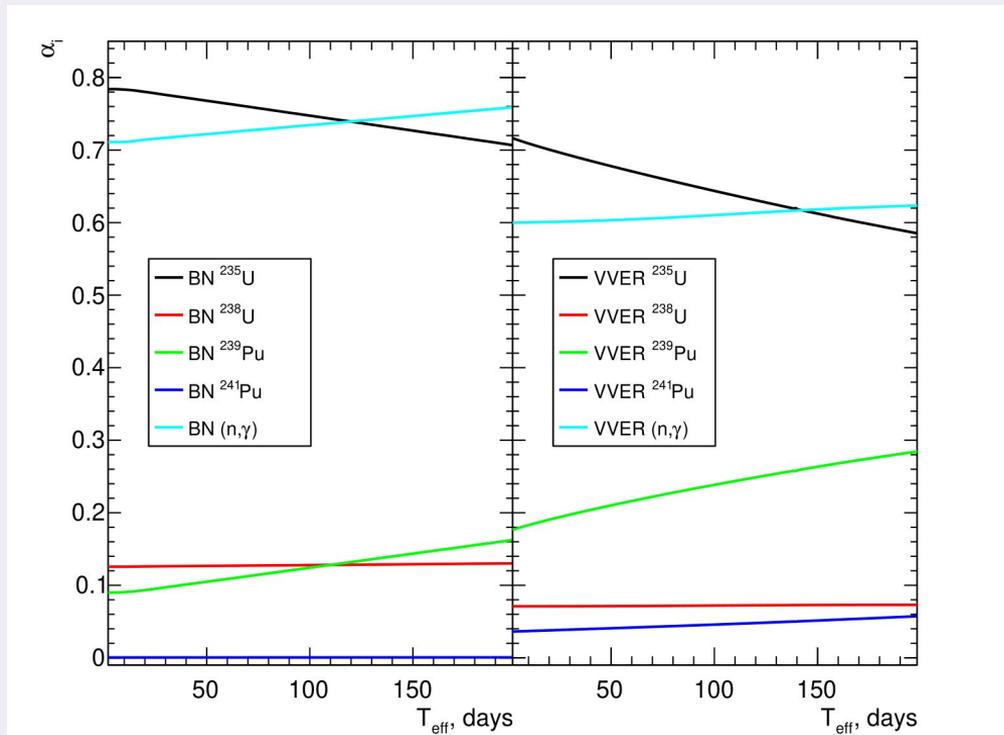


Сверху: использованные для расчета спектры антинейтрино от делящихся нуклидов при делении быстрыми нейтронами и спектры антинейтрино от β -распадов ^{239}U и ^{239}Np .

Снизу: отношение спектров антинейтрино при делении быстрыми нейтронами к спектрам при делении тепловыми нейтронами для ^{235}U (черный), ^{239}Pu (красный) и ^{241}Pu (зеленый).



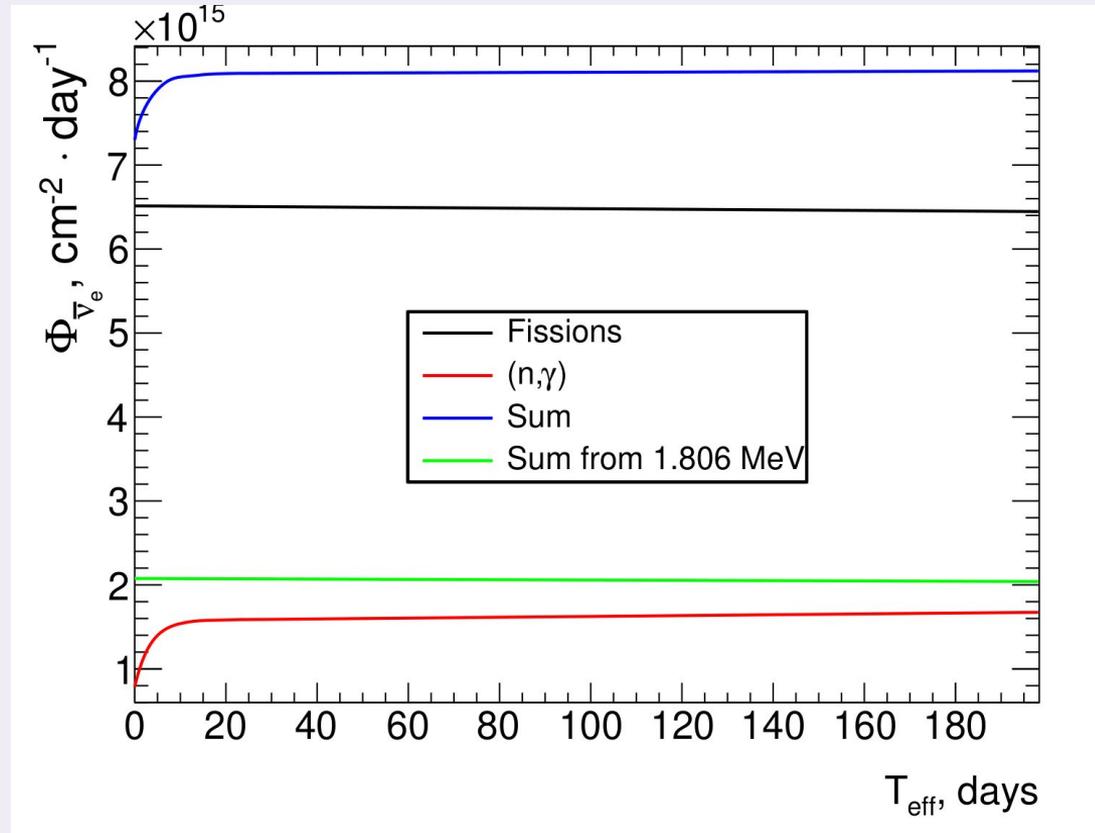
Зависимость долей деления (α_i) от времени для БН-800 (слева), для ВВЭР-1000 (справа)



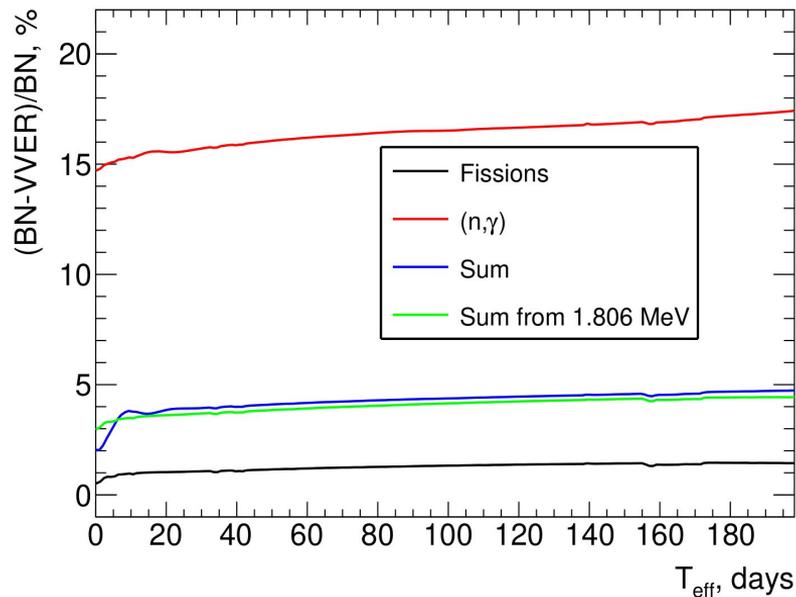
❖ Выбраны идентичные интервалы топливной кампании (198 эфф. сут).

❖ Данные ВВЭР-1000 перенормированы на тепловую мощность реактора БН-800 $P_{th}=2100$ МВт.

Поток антинейтрино от реактора БН-800 на протяжении топливной кампании длительностью 198 эфф. сут. для реакций деления (черный), (n, γ)-реакций на ^{238}U (красный), суммарного потока (синий), а также суммарного потока, превышающего порог обратного β -распада (зелёный).

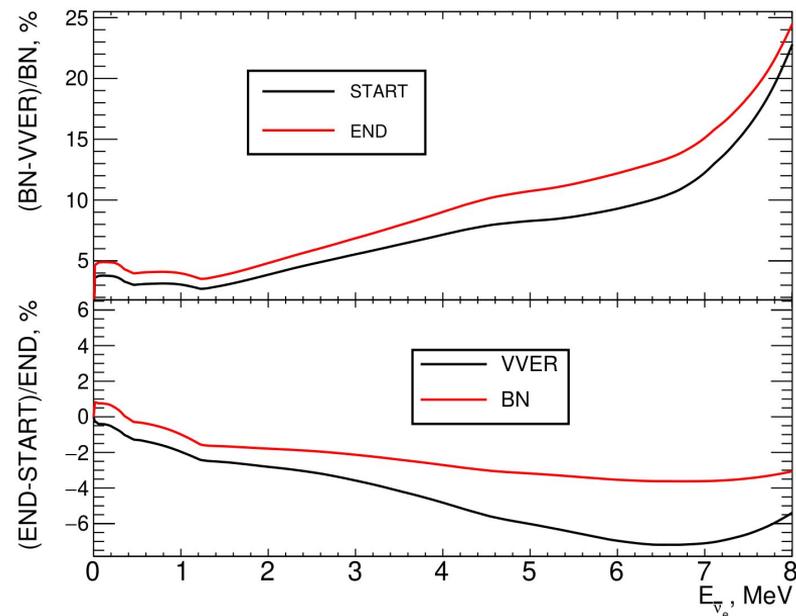


Сравнение с ВВЭР-1000



- ❖ Разность потоков антинейтрино реакторов БН-800 и ВВЭР-1000 в зависимости от эффективного времени для отдельных компонент: от делений (черный), от захватов на ядрах ^{238}U (красный), суммарного потока (синий), а также суммарного потока выше порога реакции обратного бета-распада (зелёный)

- ❖ Разность спектров антинейтрино между реакторами БН-800 и ВВЭР-1000 в середине кампании (верхний график), а также разность спектров между началом и концом кампании для указанных типов реакторов (нижний график).



Погрешность теоретического расчета потока

тепловая мощность данного элемента АЗ

$$\Phi(t, E_{\bar{\nu}_e}) = \frac{1}{4\pi} \cdot \int \frac{P_{\text{th}}(t, \vec{r})}{(\vec{L}_0 - \vec{r})^2 E_f(t, \vec{r})} \cdot S_f(t, \vec{r}, E_{\bar{\nu}_e}) dV,$$

$$E_f(t, \vec{r}) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}) E_i \longrightarrow \text{средняя тепловая энергия, выделяющаяся в данном элементе активной зоны (АЗ) на одно деление}$$

$$S_f(t, \vec{r}, E_{\bar{\nu}_e}) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}) S_i(E) \longrightarrow \text{спектр антинейтрино, приходящийся на одно деление для данного элемента АЗ}$$

Доля деления i -го изотопа

Погрешности, вносимые энергией и спектром антинейтрино, приходящиеся на одно деление изотопа

$$\sigma_E^2 = \sum_i \left(\frac{\Delta\Phi}{\Phi} \right)_{E_i}^2 = \frac{\sum_i \alpha_i^2 \Delta E_i^2}{(\sum_t \alpha_t E_t)^2}$$

$$\sigma_S^2 = \sum_i \left(\frac{\Delta\Phi}{\Phi} \right)_{S_i}^2 = \frac{\sum_i \alpha_i^2 \Delta S_i^2}{(\sum_t \alpha_t S_t)^2}$$



Поток антинейтрино

Получаем следующие значения погрешностей: $\sigma_E \approx \sigma_S \approx 0.8\%$

Погрешность, вносимая долями деления в поток антинейтрино

$$\sigma_{\alpha} = \frac{1}{\Phi} \sqrt{\sum_{i,j} \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_i} \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_j} \delta \alpha_i \delta \alpha_j \rho_{i,j}}$$

Коэффициент корреляции
между изотопами

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_i} \propto \frac{S_i \left(\sum_j \alpha_j E_j \right) - E_i \left(\sum_k \alpha_k S_k \right)}{\left(\sum_t \alpha_t E_t \right)^2}, \quad \rho_{i,j} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \frac{\alpha_i^k - \bar{\alpha}_i}{\sigma_{\alpha_i}} \frac{\alpha_j^k - \bar{\alpha}_j}{\sigma_{\alpha_j}}$$

Получаем следующее значение погрешности: $\sigma_{\alpha} \approx 4 \%$

Pu-239 и U-235 (оранжевая зависимость):

- Значение ближе всего к **+1**.
- Это означает, что доли деления обоих изотопов **одновременно уменьшаются**.

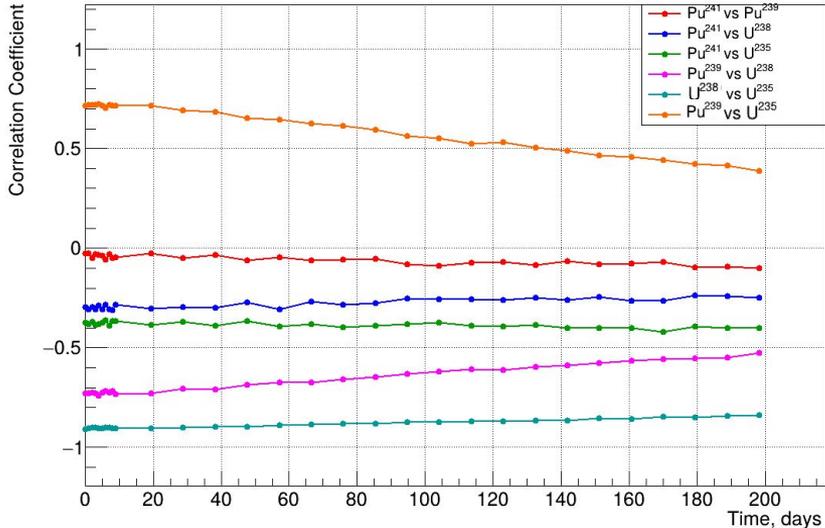
Pu-241 и Pu-239 (красная зависимость):

- Коэффициент корреляции близок к **0**.
- Это связано с тем, что **количество Pu-241 практически не изменяется**, в то время как **Pu-239 нарабатывается**.

U-238 и U-235 (бирюзовая зависимость):

- Коэффициент корреляции близок к **-1**.
- Это отражает процесс: **U-235 выгорает**, а **Pu-238 нарабатывается**.

Correlations Between Isotopes



Зависимость коэффициентов корреляций изотопов от времени

Итоговая погрешность потока антинейтрино

$$\sigma_{\Phi}^2 = \sigma_W^2 + \sigma_E^2 + \sigma_S^2 + \sigma_{\alpha}^2$$

, где σ_W погрешность в определении мощности реактора равная 5 %

Получаем $\sigma_{\Phi} \approx \mathbf{6.5\%}$

Заключение

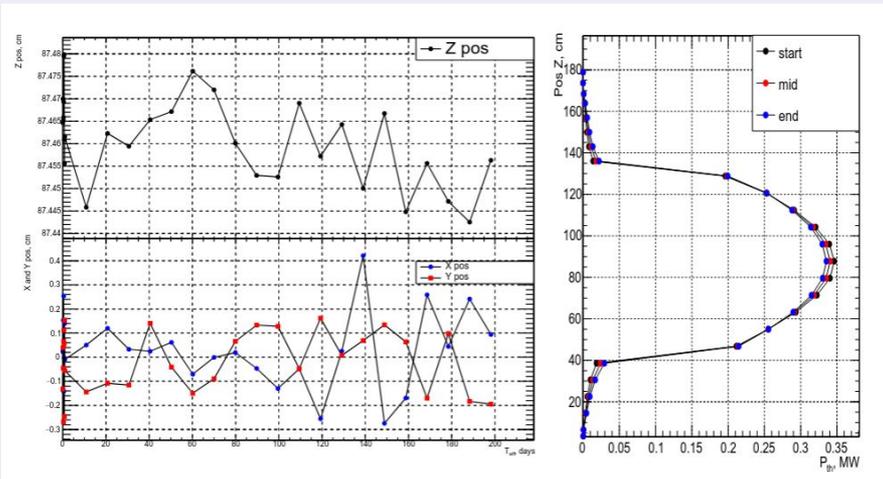
- ❖ Произведён расчёт потока антинейтрино для реактора на быстрых нейтронах БН-800, проанализированы его спектральные характеристики в сравнении с ВВЭР-1000.
- ❖ Анализ полученных результатов демонстрирует сходство спектральных и интегральных характеристик потоков антинейтрино от реактора БН-800 со смешанной загрузкой топлива и реактора на тепловых нейтронах ВВЭР-1000.
- ❖ Наибольшие различия проявляются на краю спектра (20%) и обусловлены различиями в изотопных составах загруженного топлива.
- ❖ Падение потока антинейтрино, связанное с выгоранием топлива на протяжении топливной кампании, в БН-800 выражено слабее, чем в реакторе на тепловых нейтронах ВВЭР-1000.
- ❖ Сходство изменений спектральных характеристик антинейтрино для обоих типов реакторов при энергиях выше порога реакции обратного бета-распада указывает на возможность использования реакторов на быстрых нейтронах для фундаментальных и прикладных нейтринных исследований, традиционно проводимых на реакторах типа ВВЭР.
- ❖ Погрешность теоретического расчета потока составляет 6.5 %.

Планы на будущее

Поскольку данные расчеты проведены для определенной загрузки топлива (16 % МОКС и урановое топливо), планируется исследование результатов симуляции реактора БН-800 с загрузкой топлива из 100% МОКС

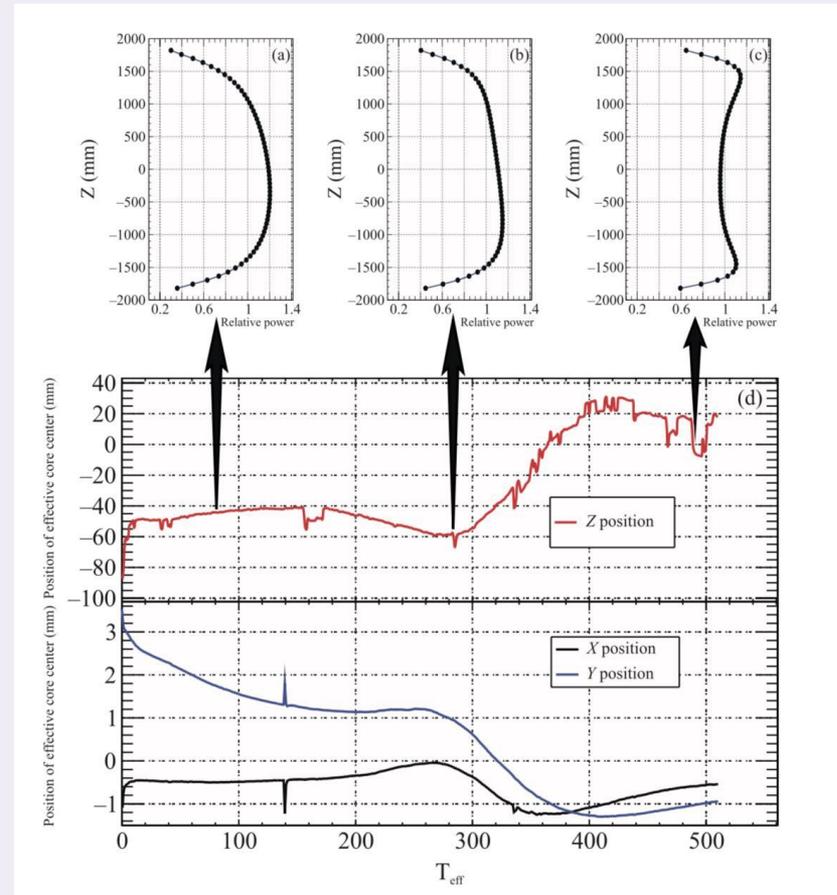
Спасибо за внимание!

Сравнение положения центра энерговыделения для ВВЭР-1000 и БН-800



Положение центра энерговыделения для модели БН-800 (слева) и профили энерговыделения по высоте (справа)

Усредненные по горизонтальной плоскости профили энерговыделения ВВЭР - 1000 для начала (а), середины (б) и конца (в) кампании; (д) – изменение положения эффективного центра АЗ относительно ее геометрического центра по осям Z (красная кривая), X (черная) и Y (синяя) в зависимости от эфф. сут.

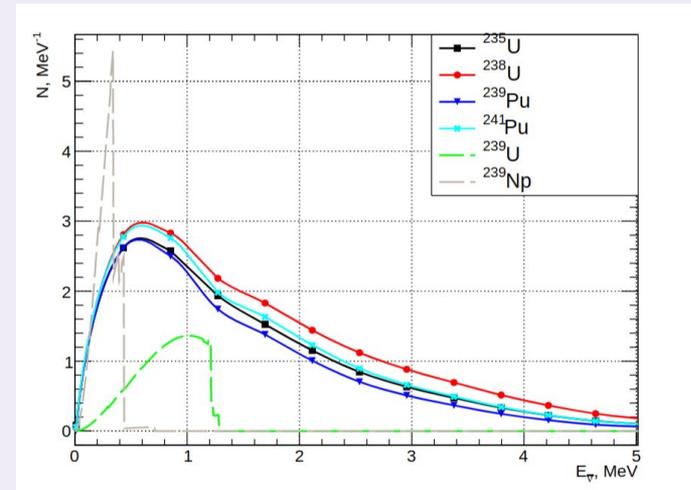


Важной особенностью реакторов типа БН является большее число захватов нейтронов на ^{238}U

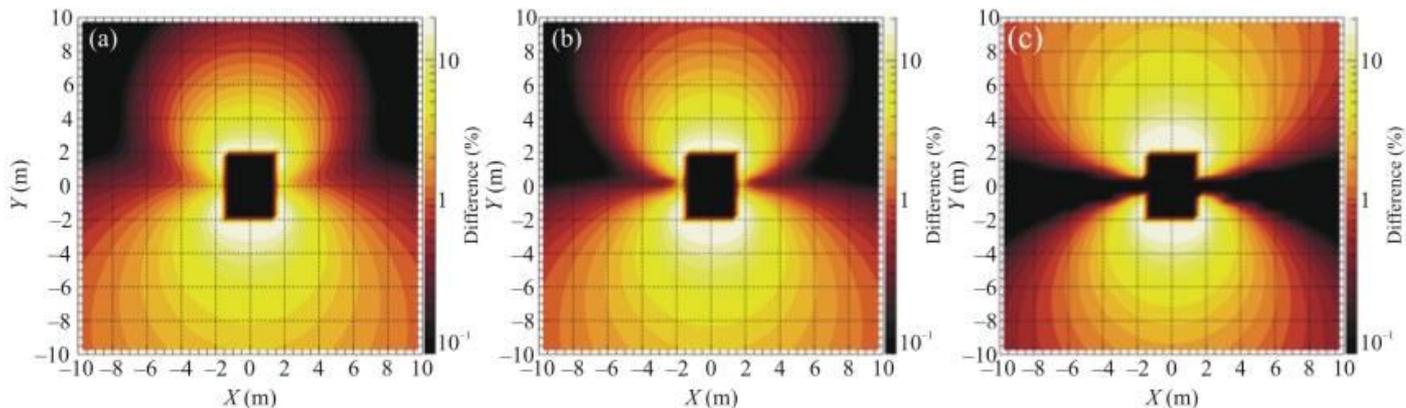
Период полураспада ^{239}U : 23.45 минуты

Период полураспада ^{239}Np : 2.33 дня

Равновесие в радиоактивных цепочках определяется наибольшим периодом полураспада, потому именно ^{239}Np оказывает значительное влияние на изменение потока антинейтрино, на протяжении примерно ≈ 7 дней (три периода полураспада ^{239}Np от начала кампании: два пика в области 0.5 и 1 МэВ

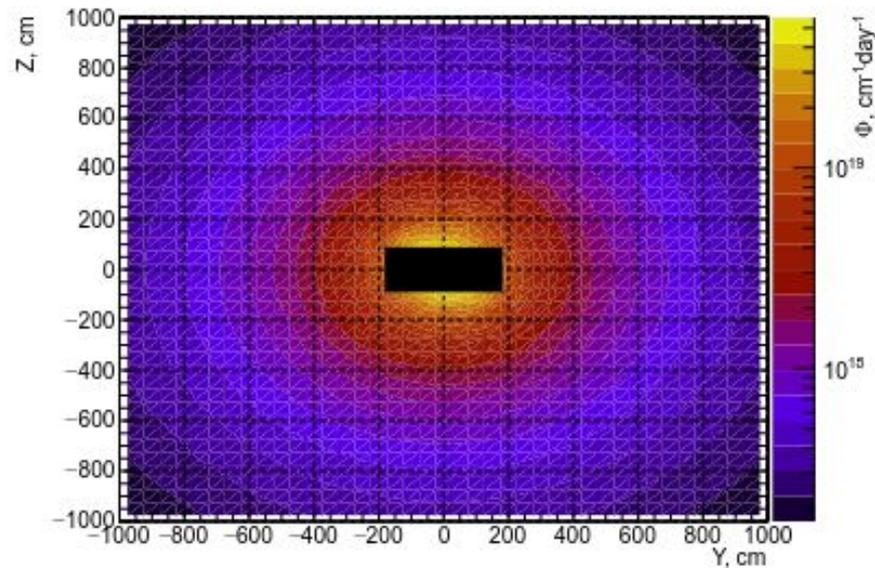
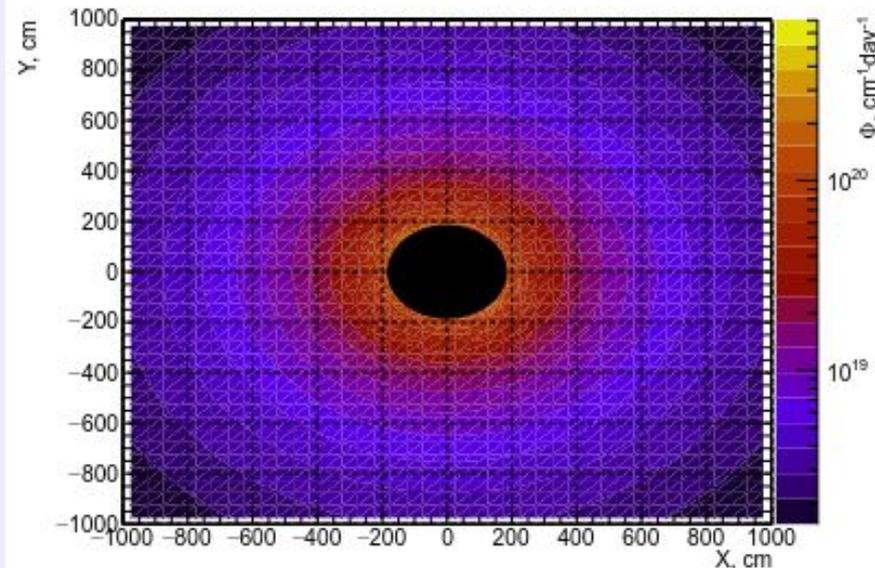


Спектры антинейтрино от делящихся изотопов для модели Fallot и спектры бета-распадов от ^{239}U и ^{239}Np



Разность между детальным расчетом и упрощенной моделью в зависимости от координаты в вертикальной плоскости XOZ для: а (d) – начала, (b), (e) – середины и (c), (f) – конца кампании

Зависимость потока антинейтрино от координат в плоскостях XOY и XOZ для середины кампании



- ❖ Поток антинейтрино получился достаточно однородным относительно угла, под которым наблюдается АЗ.

Модели, использующиеся для расчетов

- **Модель Хьюбера-Мюллера (НМ)**

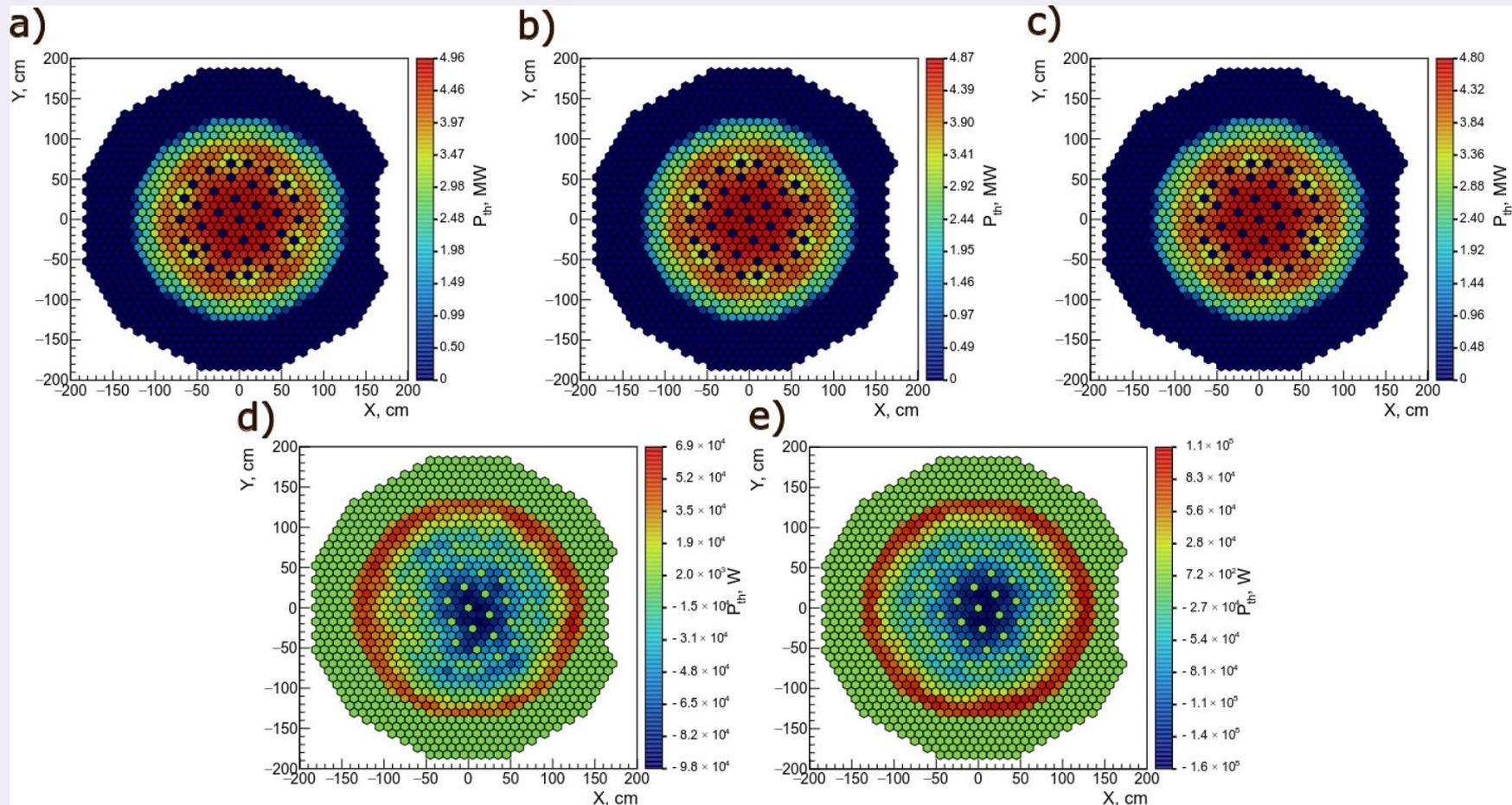
В рамках этой модели кумулятивные спектры бета-электронов от ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu и, измеренные в институте Лауэ-Ланжевена (ILL) в 1980-х гг. пересчитываются в соответствующие спектры антинейтрино. Спектр антинейтрино от ^{238}U вычисляется путем суммирования спектров от всех продуктов его деления с учетом их активностей и схем распада.

- **Модель ЕСТЬЕН-ФАЛЛО (ЕФ)**

Спектры антинейтрино от всех четырех делящихся изотопов вычисляются посредством суммирования спектров от всех продуктов его деления с учетом их активностей и схем распада.

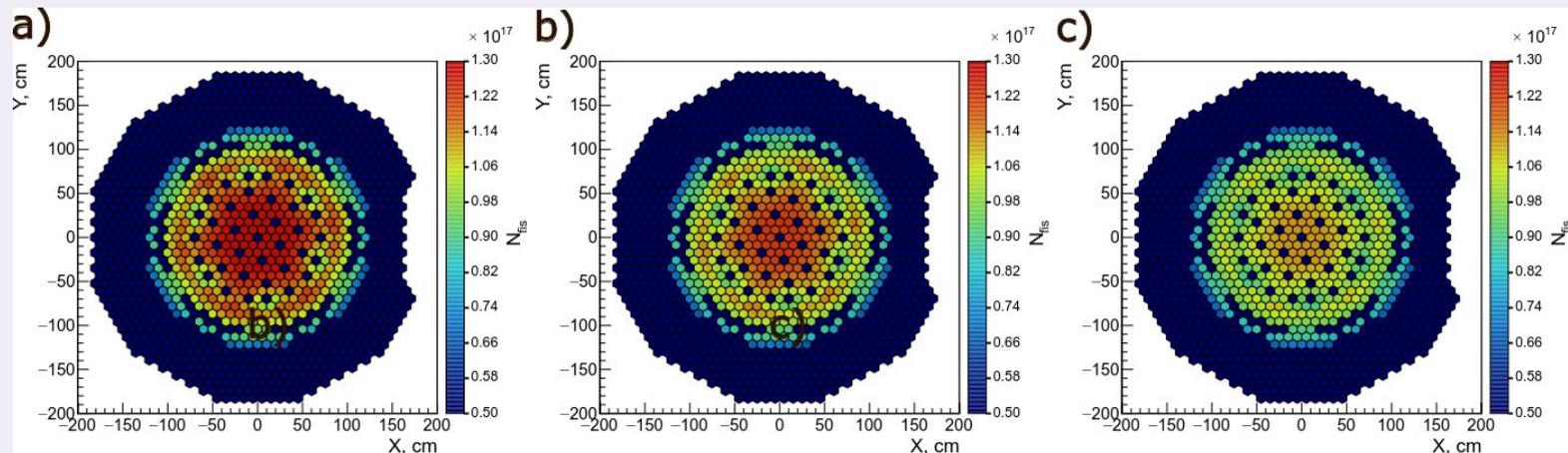
- **Модель Курчатовского института (КИ)**

В модели производится пересчет кумулятивных спектров бета-электронов от трёх делящихся изотопов, измеренных в работах ILL (использовался последний пере выпуск их работ). При этом, с учетом результатов измерений отношения бетаспектров ^{235}U и ^{239}Pu , выполненных в НИЦ КИ, кумулятивные бетаспектры от ^{235}U и ^{238}U дополнительно уменьшены на 5.4%.

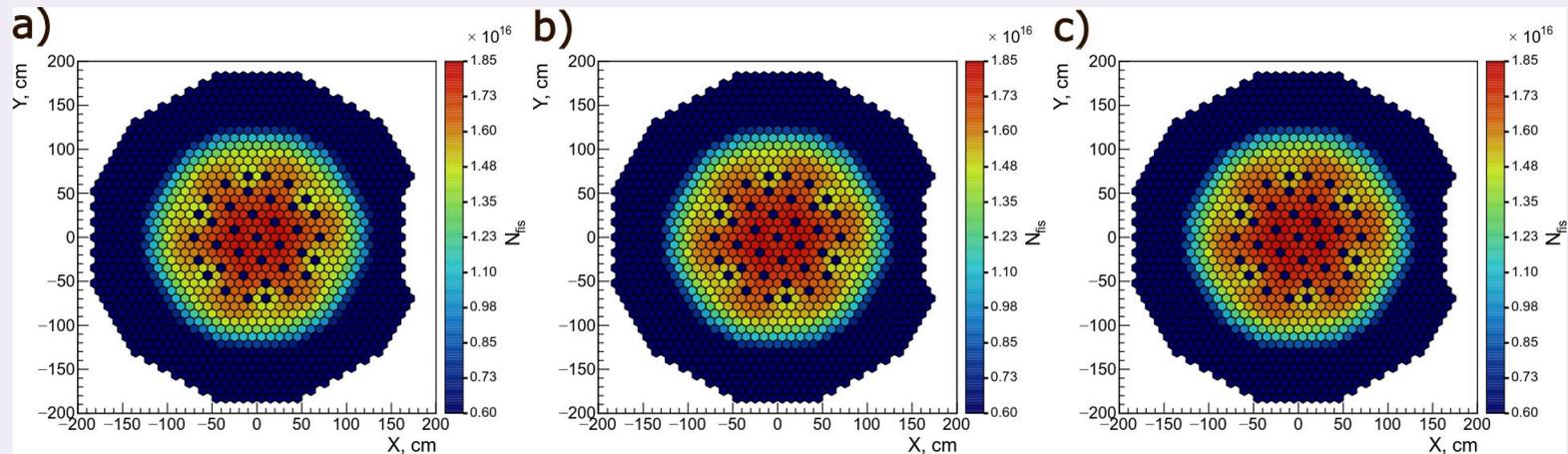


Распределение мощности в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании, д)– разница между началом и серединой кампании, е)– разница между началом и концом кампании

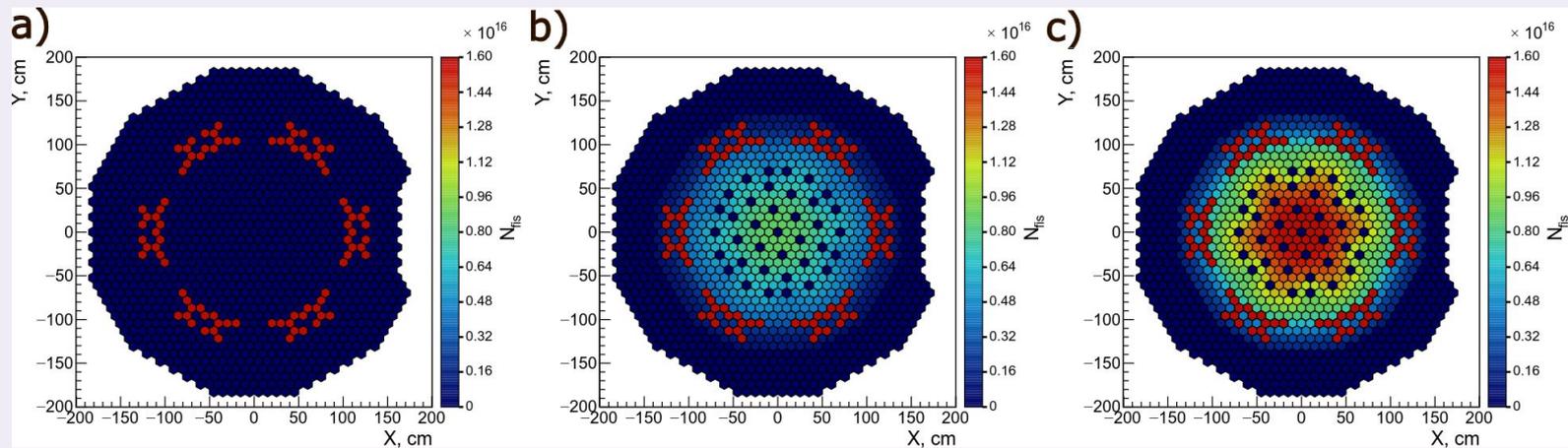
200– 150– 100– 50– 0



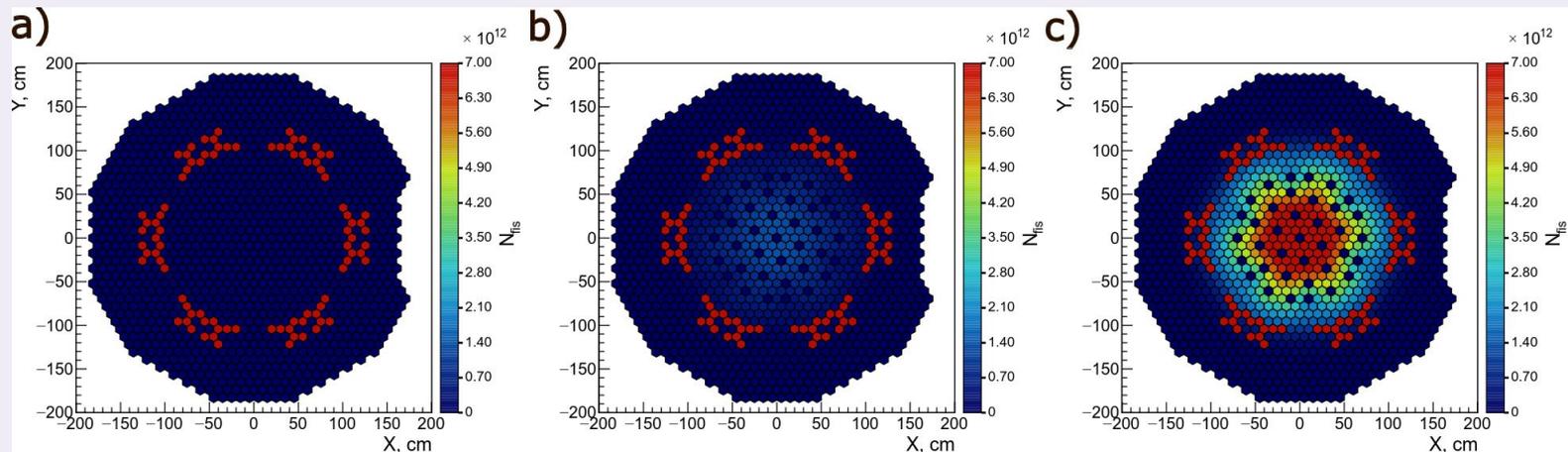
Распределение количества делений ^{235}U в плоскости XY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании



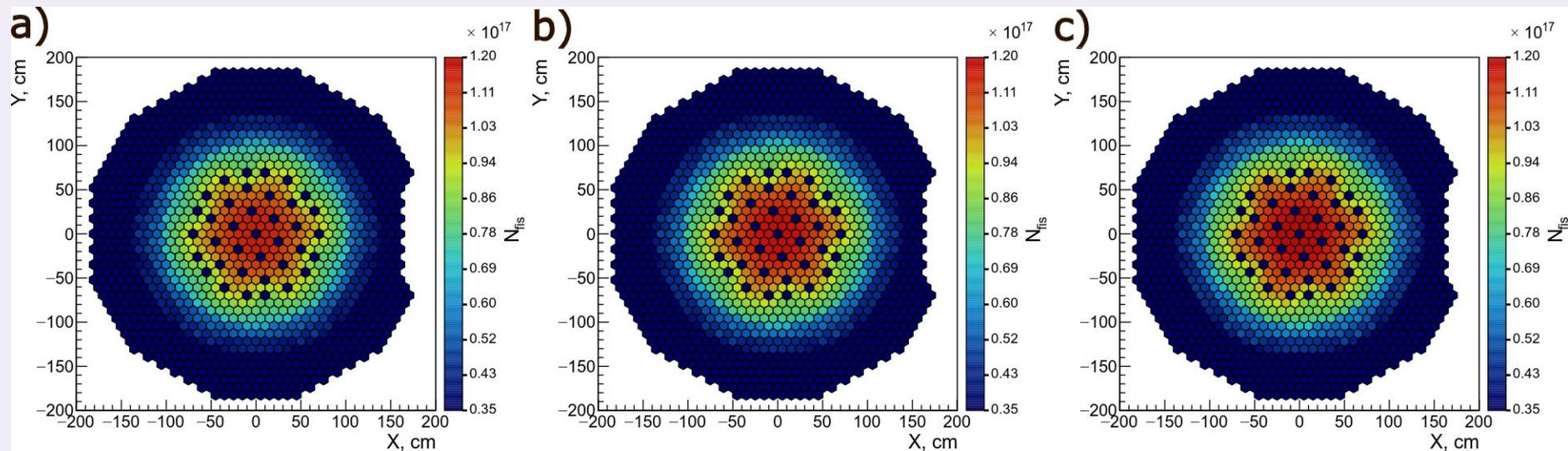
Распределение количества делений ^{238}U в плоскости XY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании



Распределение количества делений ^{239}Pu в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании



Распределение количества делений ^{241}Pu в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании



Распределение количества реакций (n, γ) в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании