

Поток антинейтрино от реактора на быстрых нейтронах БН-800

Выполнила

В.А Вакуленко

Науч. руководитель Е. А. Литвинович

Москва, 2025

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

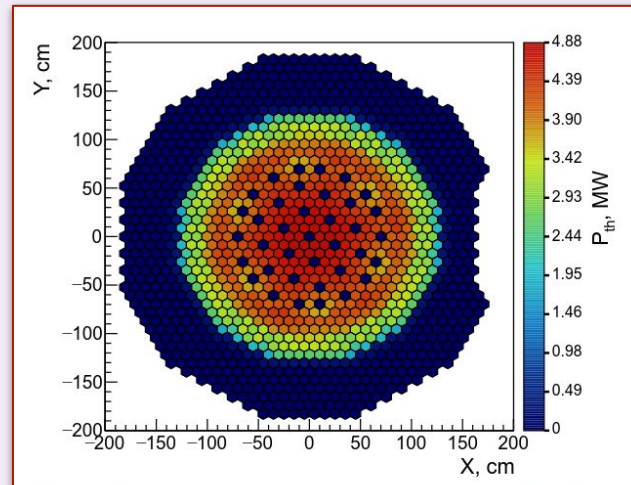
- ❖ **Тип нейтронов:** быстрые
- ❖ **Замедлитель:** нет
- ❖ **Теплоноситель:** жидкий натрий
- ❖ **Материал топлива:** Смесь оксидного топлива (МОКС*) ~16 %, остальные 84% это урановое топливо с обогащением 18,5-24 %

* (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.

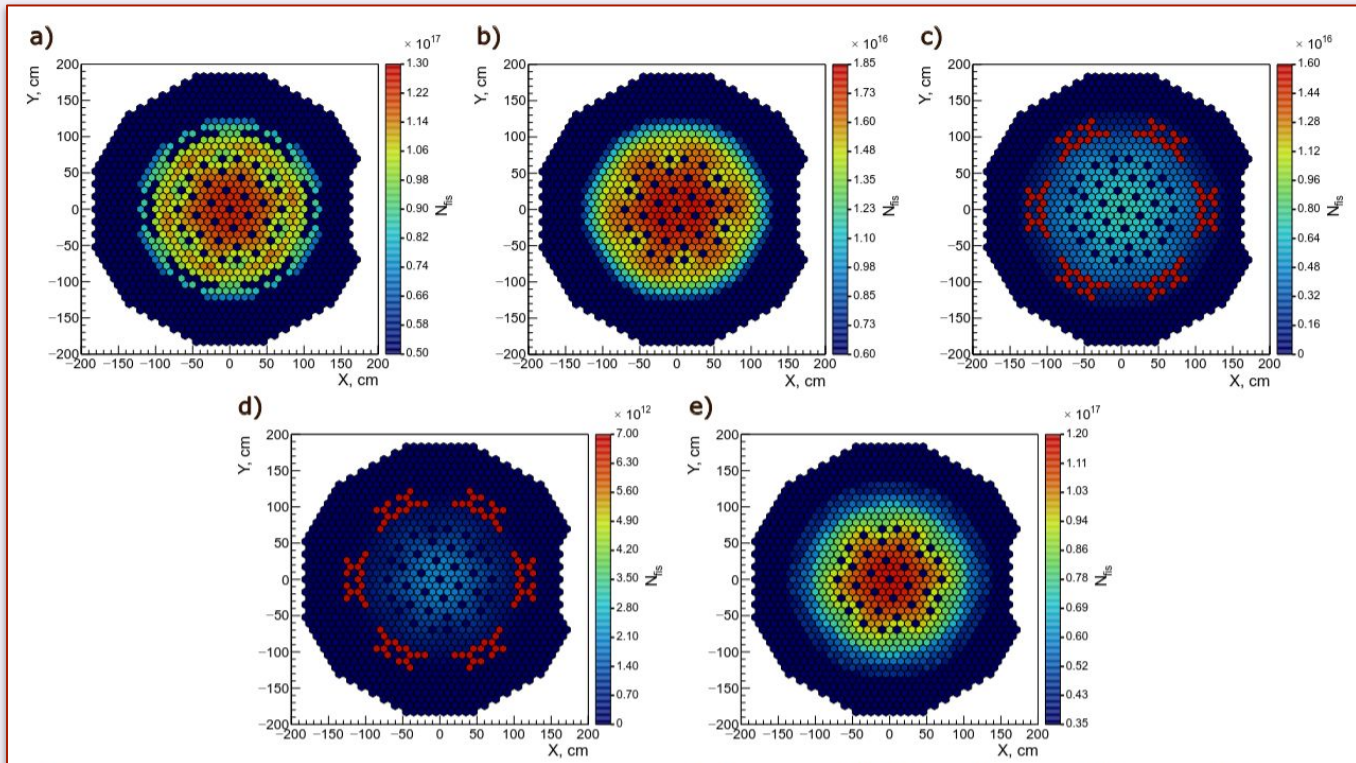


Распределение мощности по плоскости
ХОУ для БН-800

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

Распределение количества делений в плоскости XOY для

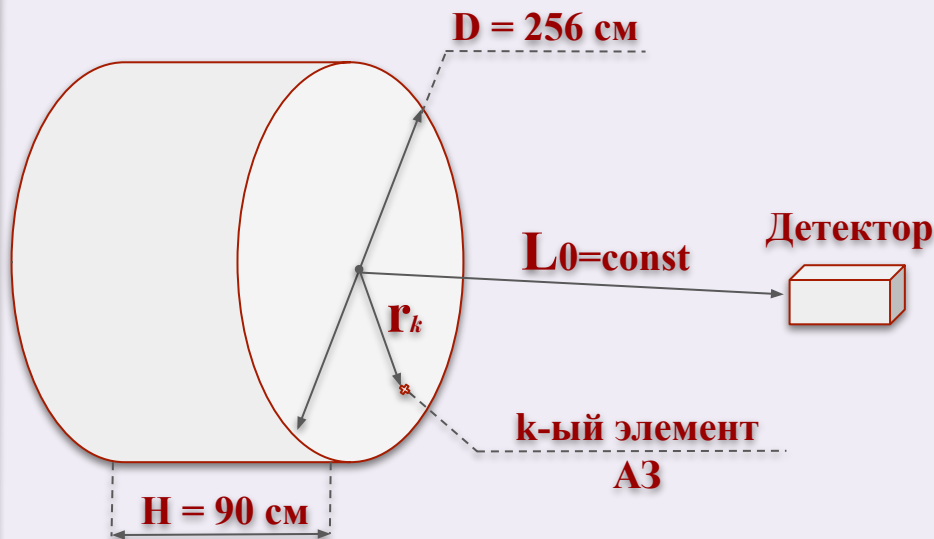
a) ^{235}U b) ^{238}U c) ^{239}Pu d) ^{241}Pu e) (n, γ)



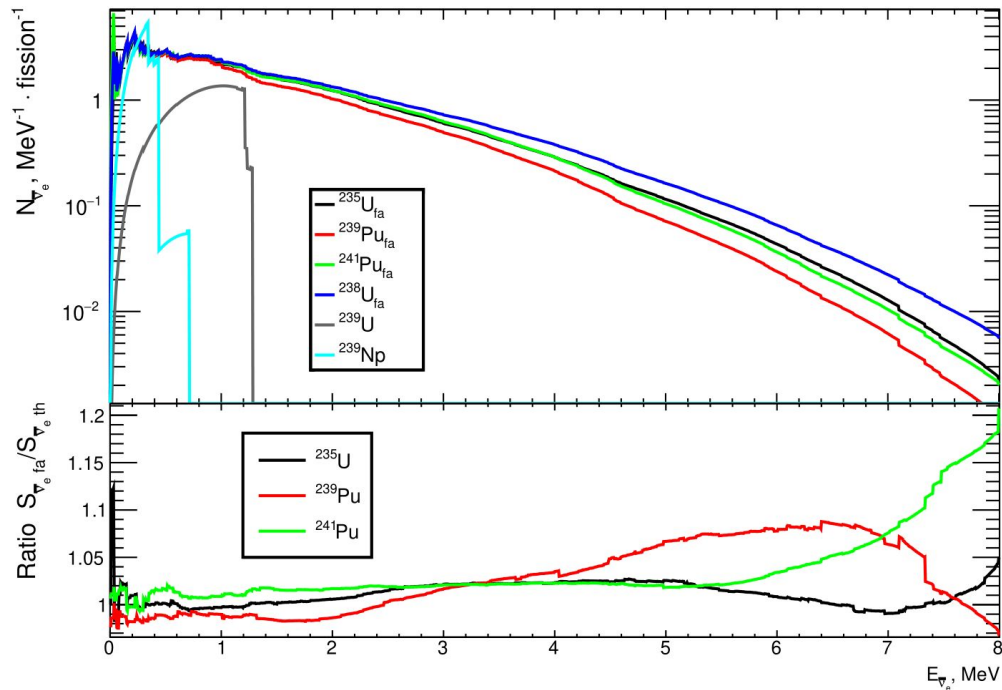
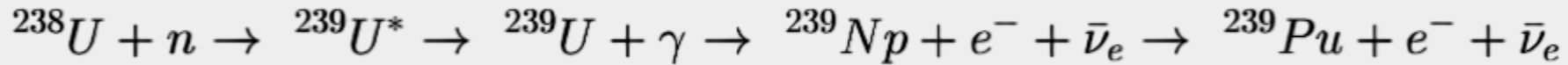
Деления изотопов происходят неоднородно

Методика расчета потока антинейтрино от реактора БН

$$\Phi(t, E_{\bar{\nu}_e}, \mathbf{L}_0) = \frac{1}{4\pi} \cdot \sum_k \frac{N_f(t, \mathbf{r}_k)}{(\mathbf{L}_0 - \mathbf{r}_k)^2} \cdot S_f(t, \mathbf{r}_k, E_{\bar{\nu}_e})$$

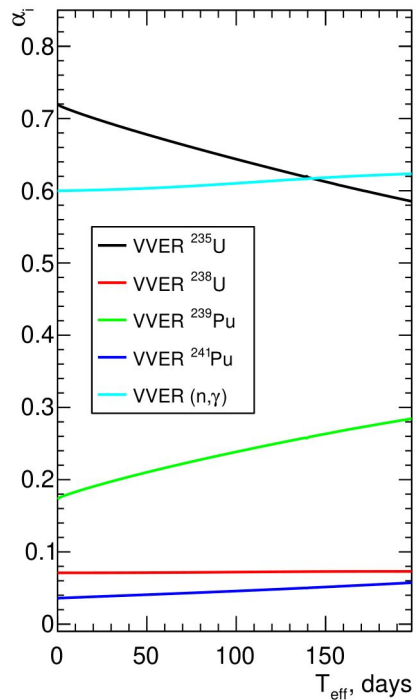
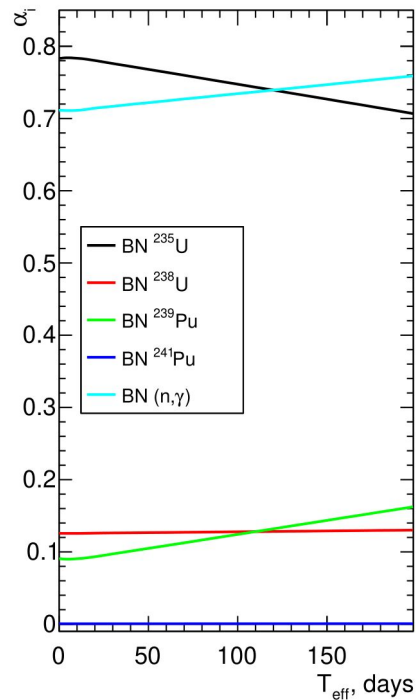


- $N_f(t, \vec{r}_k)$ — число делений в ед. времени;
- $E_f(t, \vec{r}_k) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}_k) e_i$ — Тепловая энергия одного деления;
- $P_{th}(t, \vec{r}_k) = N_f(t, \vec{r}_k) \cdot E_f(t, \vec{r}_k)$ — Тепловая мощность;
- $S_f(t, \vec{r}_k, E_{\bar{\nu}_e}) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}_k) S_i(E)$ — Спектр антинейтрино;
- $S_i(E)$ и e_i — спектры антинейтрино и энергии деления i -го нуклида;
- $\alpha_i(t, \vec{r}_k)$ — доля делений i -го нуклида, причём $\sum_i \alpha_i = 1$;



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).

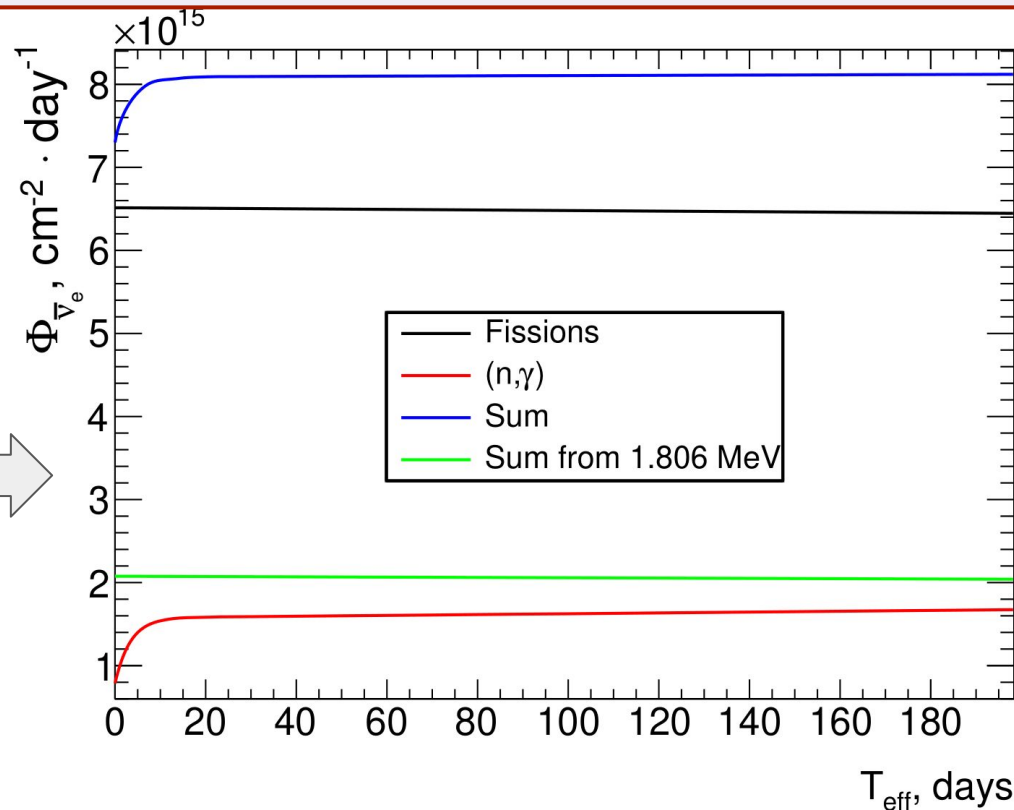


Зависимость долей деления (α) от времени для БН-800 (слева), для ВВЭР-1000 (справа)

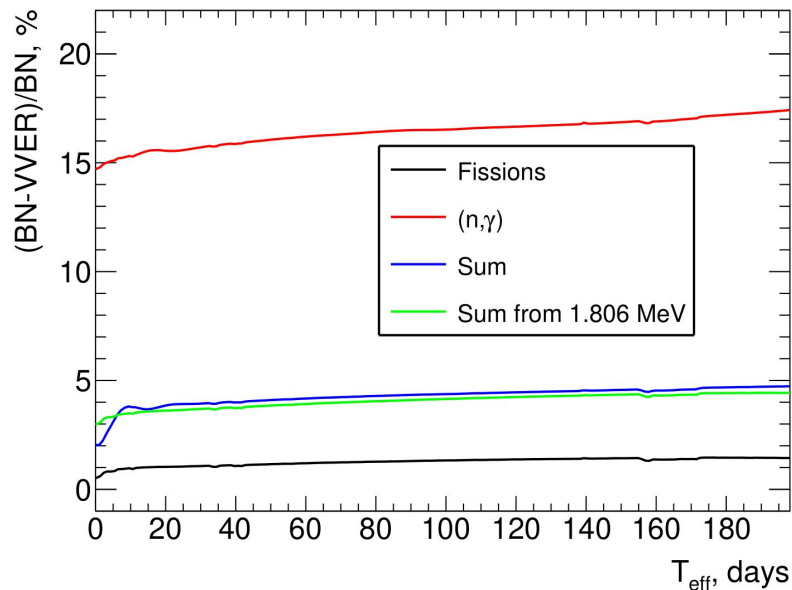
- ❖ Выбраны идентичные интервалы топливной кампании (198 эфф. сут).
- ❖ Данные ВВЭР-1000 перенормированы на тепловую мощность реактора БН-800 $P_{th} = 2100$ МВт.
- ❖ Число (n, γ) - реакций сравнимо с числом делений ^{235}U и увеличивается в ходе кампании, поскольку оно пропорционально возрастающему потоку нейтронов.

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

На протяжении кампании поток практически не меняется.

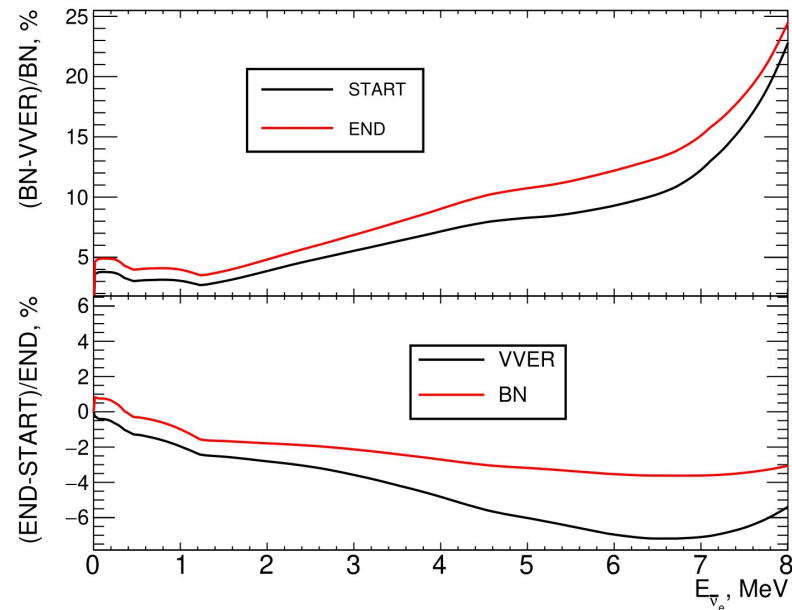


Сравнение с ВВЭР-1000



- 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 (зеленый)

- 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

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

- $\vec{L}_0$ — радиус-вектор от центра АЗ до точки, в которой рассчитывается поток;
- $\vec{r}$ — радиус-вектор от центра АЗ до элементарного объёма dV ;
- $P_{\text{th}}(t, \vec{r})$ — тепловая мощность элементарного объёма в момент времени t ;
- $E_f(t, \vec{r}) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}) E_i$ — средняя энергия, выделяющаяся при делении, где E_i — энергия деления i -го изотопа, α_i — его доля в делениях;
- $S_f(t, \vec{r}, E_{\bar{\nu}_e}) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}) S_i(E_{\bar{\nu}_e})$ — спектр антинейтрино на одно деление.

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

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

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

Подставив необходимые значения из таблиц в формулы, получаем следующие значения погрешностей: $\sigma_E \approx \sigma_S \approx 0.5\%$

Изотоп	E_i
^{235}U	202.5 ± 0.2
^{238}U	205.7 ± 0.5
^{239}Pu	211.3 ± 0.3
^{241}Pu	213.9 ± 0.4

Изотоп	KI, $\langle \sigma \rangle_i \times 10^{-43}$ см ² /деление
^{235}U	6.27 ± 0.13
^{238}U	9.34 ± 0.47
^{239}Pu	4.33 ± 0.11
^{241}Pu	6.01 ± 0.13

Погрешность, вносимая долями деления в поток антинейтрино

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

Стадия выгорания	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁹ Pu	²⁴¹ Pu
Начало кампании	2.03	5.84	5.19	6.08
Середина кампании	2.80	5.63	4.41	5.76
Конец кампании	3.30	5.50	3.98	5.60

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_i} \propto \frac{S_i \left(\sum_j \alpha_j E_j \right) - E_i \left(\sum_k \alpha_k S_k \right)}{\left(\sum_t \alpha_t E_t \right)^2},$$

$$\rho_{i,j} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \frac{\alpha_i^k - \bar{\alpha}_i}{\sigma_{\alpha_i}} \frac{\alpha_j^k - \bar{\alpha}_j}{\sigma_{\alpha_j}}$$

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

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 2 %

Получаем $\sigma_{\Phi} \approx 4.5\%$

Заключение

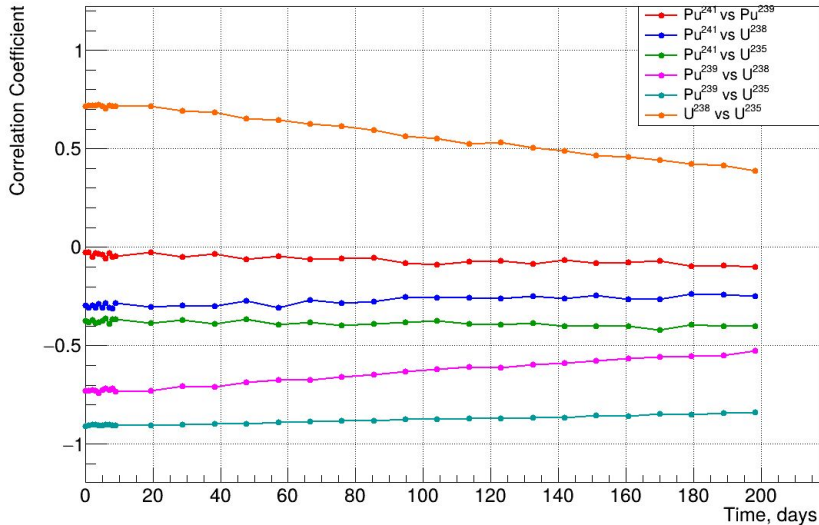
- ❖ Выполнен расчет потока и энергетического спектра антинейтрино для реактора БН-800 со смешанной загрузкой активной зоны (16% МОКС-топлива), произведена оценка погрешности теоретического расчета потока антинейтрино (4.5%).
- ❖ Установлено сходство спектральных и интегральных характеристик реакторов БН-800 и ВВЭР-1000: наибольшие различия (до 20%) наблюдаются на краю спектра из-за различий в изотопных составах 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.

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!

Correlations Between Isotopes



Зависимость коэффициентов
корреляций изотопов от времени

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

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

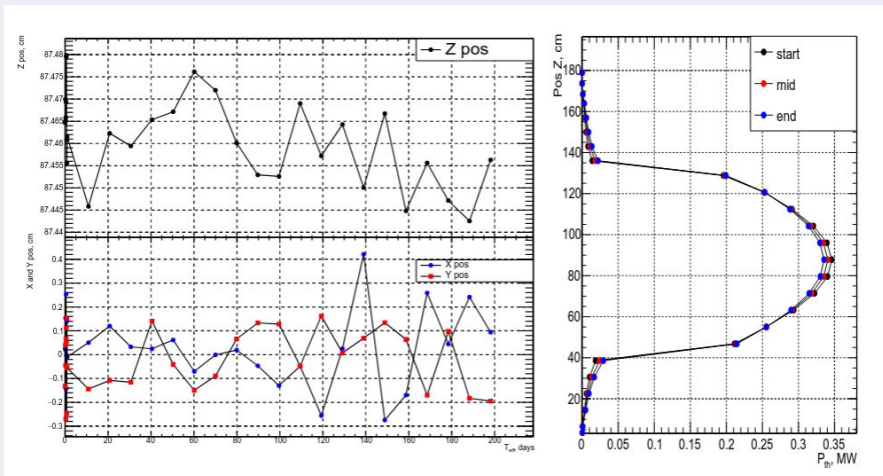
Pu-241 и Pu-239 (красная зависимость):

- 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):

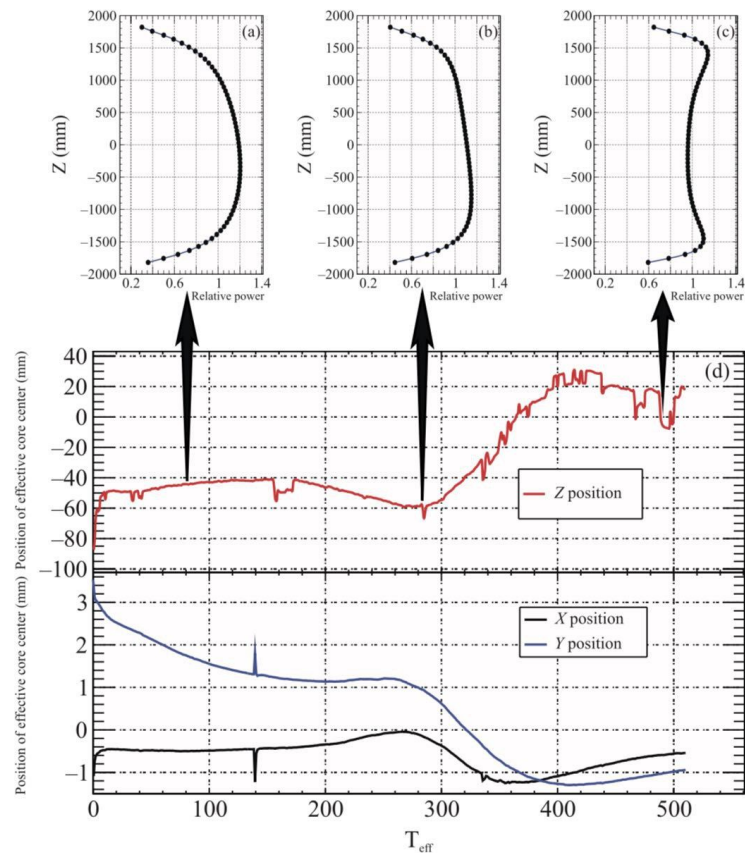
- Коэффициент корреляции близок к **-1**.
- Это отражает процесс: **U-235 выгорает**, а **Pu-238 нарабатывается**.

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



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

Усредненные по горизонтальной плоскости профили энерговыведения 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.

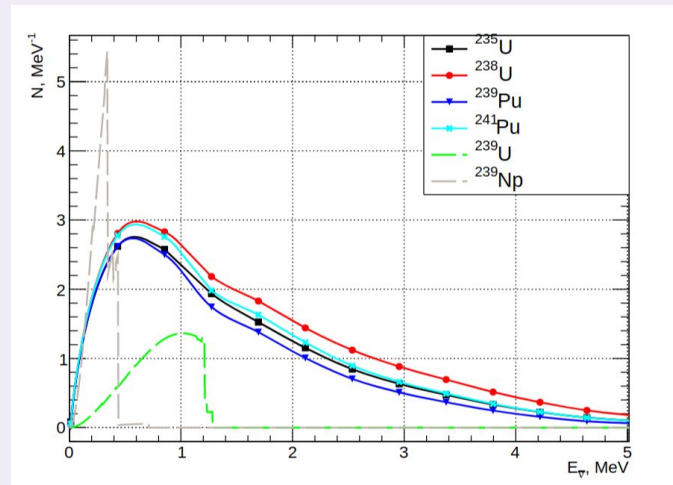


Важной особенностью реакторов типа БН является большее число захватов нейтронов на ^{238}U

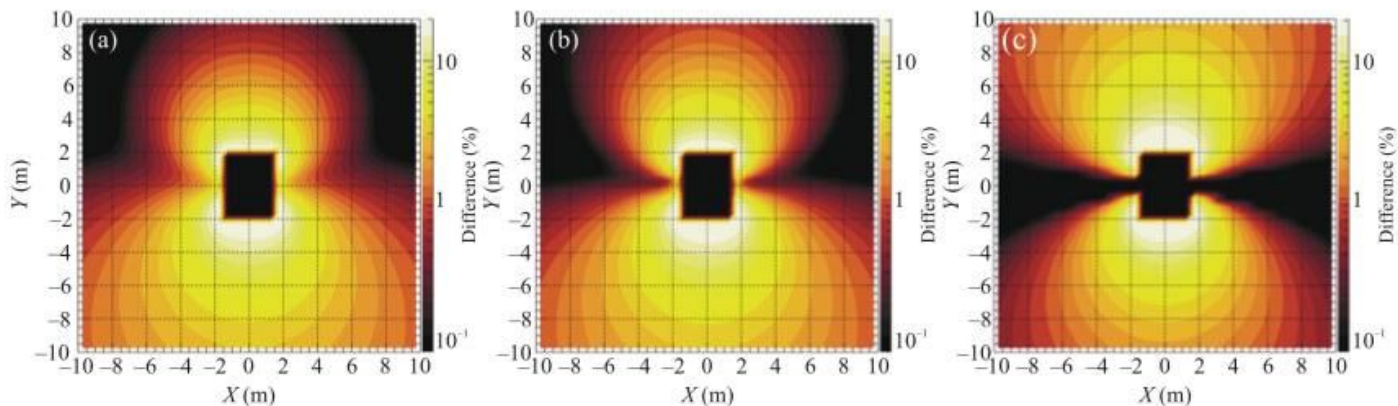
Период полураспада ^{239}U : 23.45 минуты

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

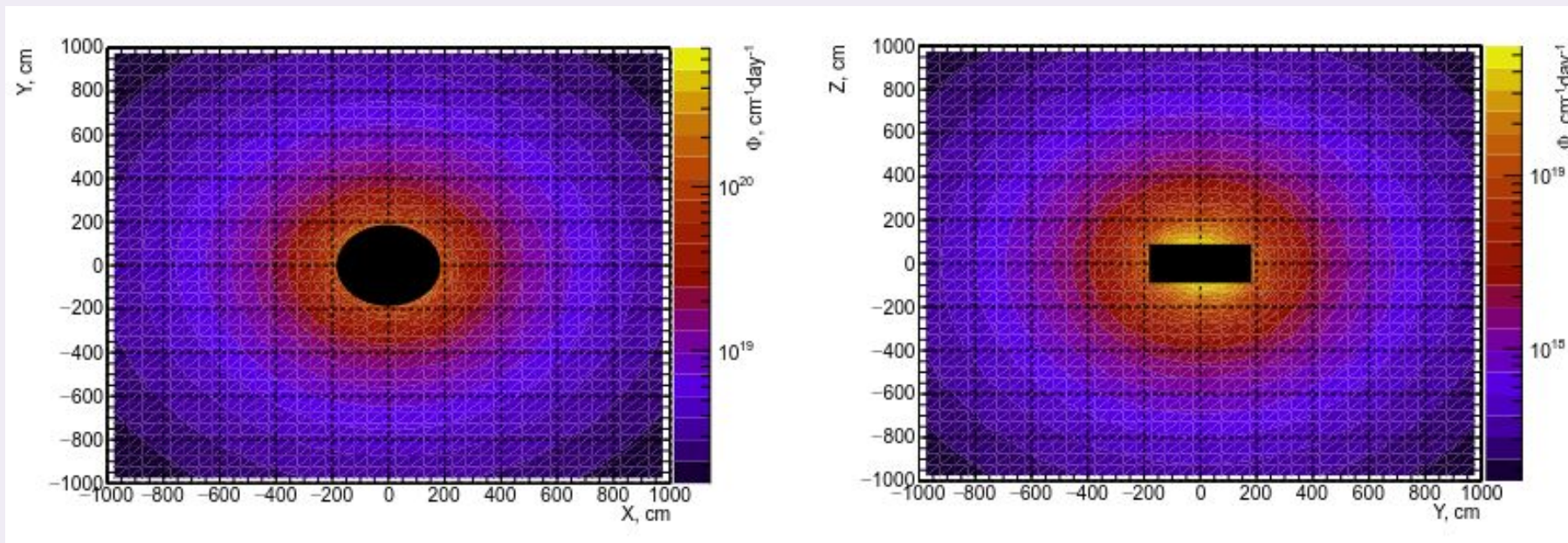


Спектры антинейтрино от делящихся изотопов для модели Fallot и спектры бета-распадов от ^{239}U и ^{239}Np



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)**

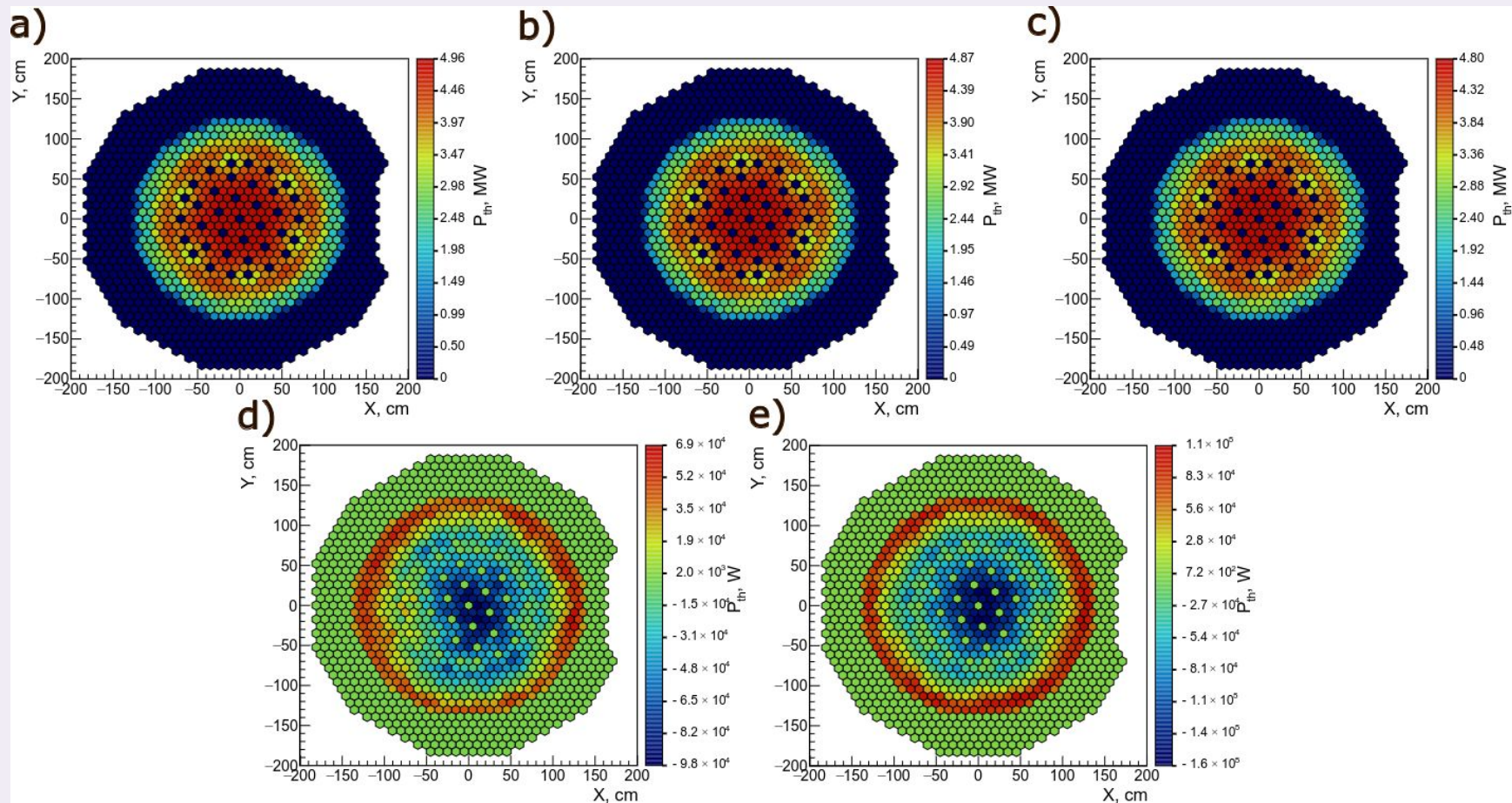
В рамках этой модели кумулятивные спектры бета-электронов от ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu , измеренные в институте Лауэ-Ланжевена (ILL) в 1980-х гг. пересчитываются в соответствующие спектры антинейтрино. Спектр антинейтрино от ^{238}U вычисляется путем суммирования спектров от всех продуктов его деления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

- **Модель ЕСТЬЕН-ФАЛЛО (ЕФ)**

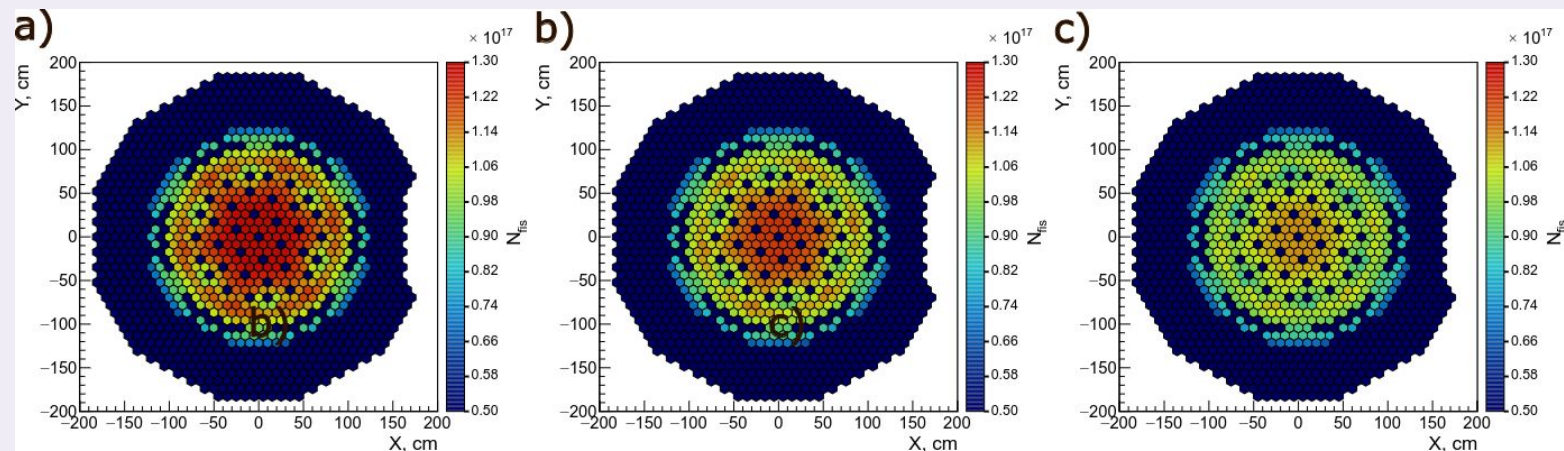
Спектры антинейтрино от всех четырех делящихся изотопов вычисляются посредством суммирования спектров от всех продуктов его деления с учетом их активностей и схем распада.

- **Модель Курчатовского института (КИ)**

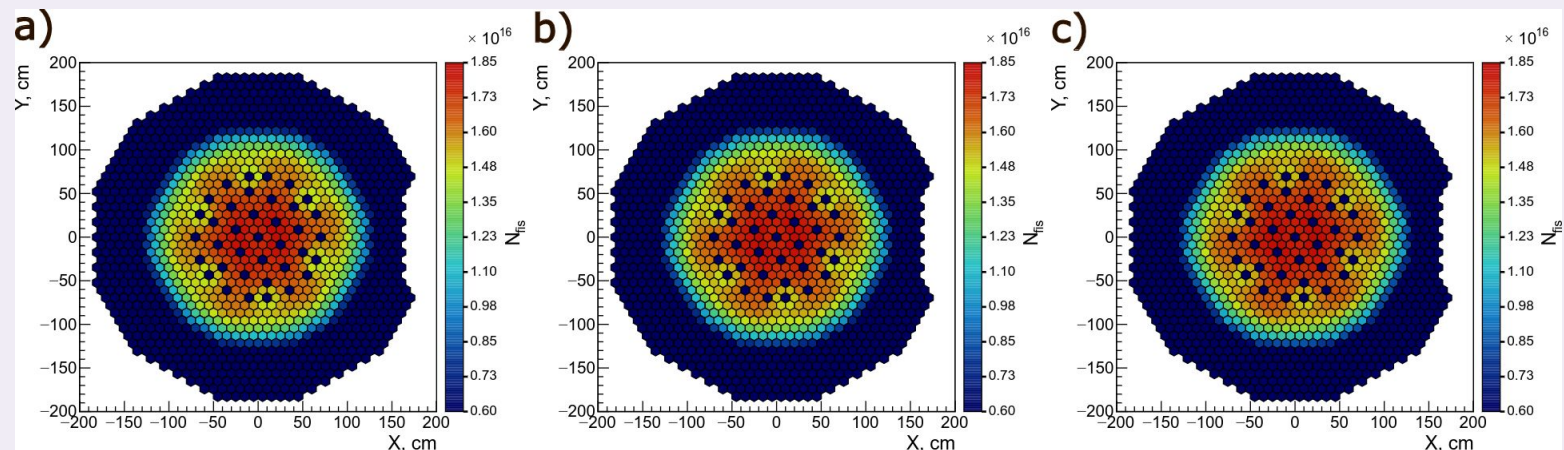
В модели производится пересчет кумулятивных спектров бета-электронов от трёх делящихся изотопов, измеренных в работах ILL (использовался последний перевыпуск их работ). При этом, с учетом результатов измерений отношения бетаспектров ^{235}U и ^{239}Pu , выполненных в НИЦ КИ, кумулятивные бетаспектры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



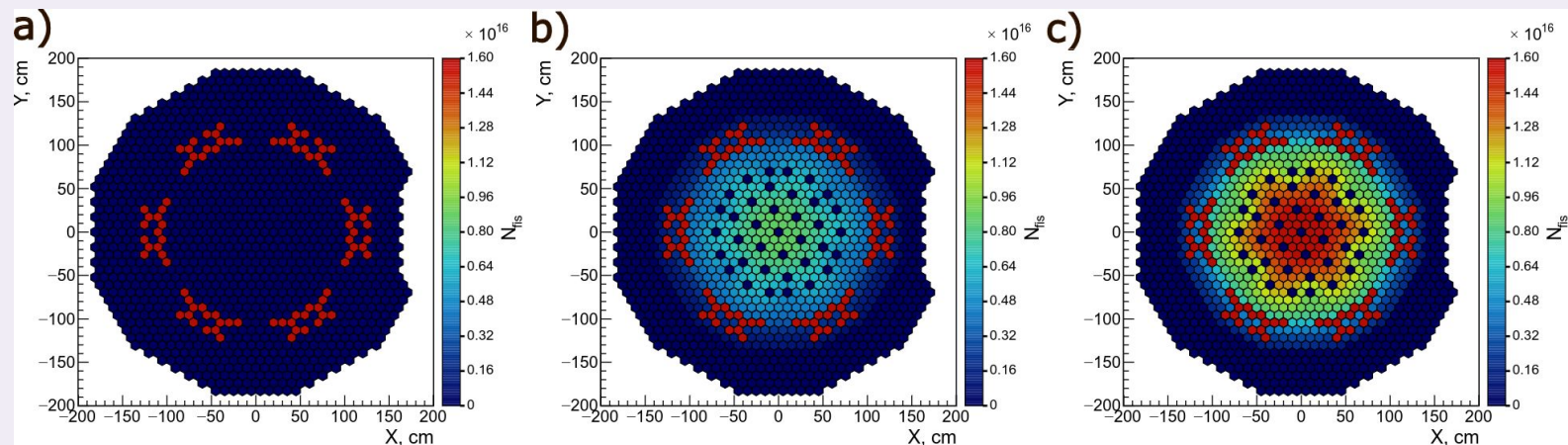
Распределение мощности в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании, д)– разница между началом и серединой кампании, е)– разница между началом и концом кампании



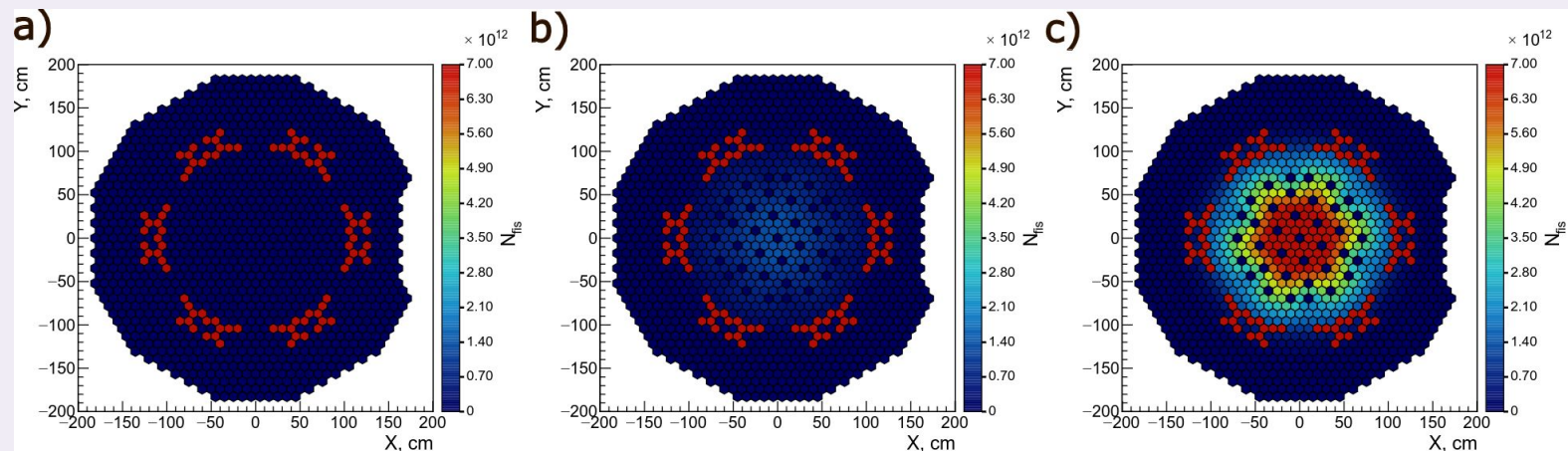
Распределение количества делений ^{235}U в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании



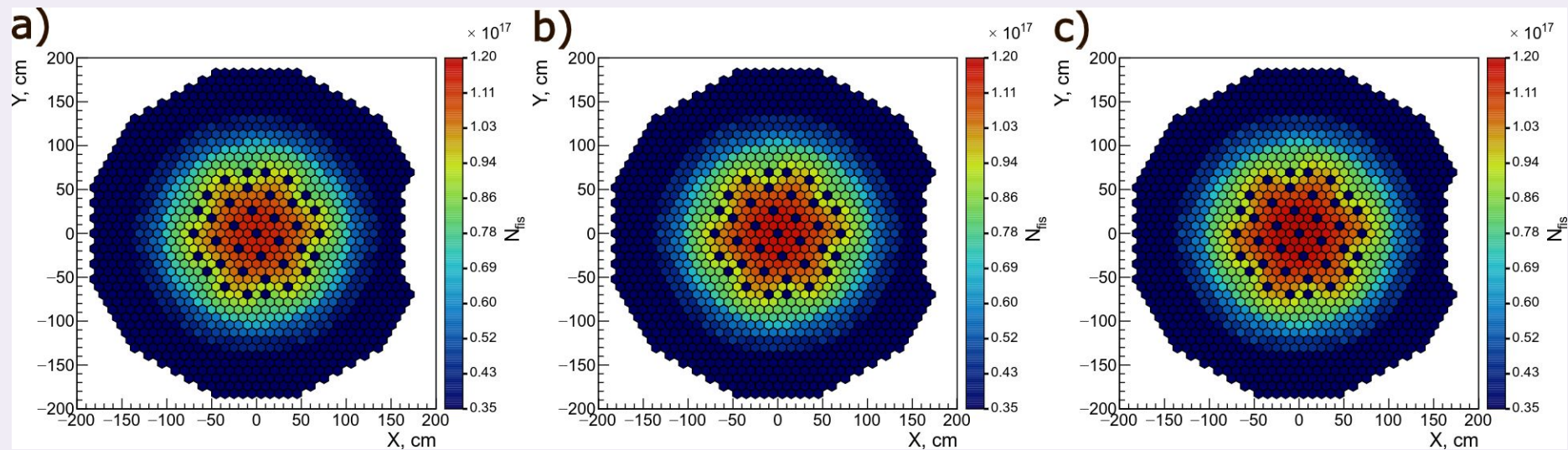
Распределение количества делений ^{238}U в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании



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



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



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