

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 антинейтрино от реактора на быстрых нейтронах
- ❖ Сравнить полученные данные для БН-800 с данными для ВВЭР-1000 с целью исследования влияние таких параметров как загрузка топлива и количество захвата нейтронов на поток антинейтрино
- ❖ Рассмотреть применимость нейтринного метода мониторинга реактора ВВЭР-1000 для реактора БН-800

Актуальность

- ❖ Детальный расчет потока антинейтрино для быстрых реакторов с топливной загрузкой, включающей 16% МОКС и урановое топливо, ранее не проводился.
- ❖ В реакторах на тепловых нейтронах основной вклад в поток антинейтрино дают ^{235}U и продукты его деления. На быстрых реакторах деления происходят у более широкого спектра изотопов, включая ^{238}U , который вносит значительный вклад в низкоэнергетический спектр. Возможность получения данных о наработке плутония в данном диапазоне энергий делает реакторы на быстрых нейтронах выгодными для мониторинга, особенно в задачах анализа выгорания топлива и оценки эффективности реактора.

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 86% это урановое топливо с обогащением 18,5-24 %

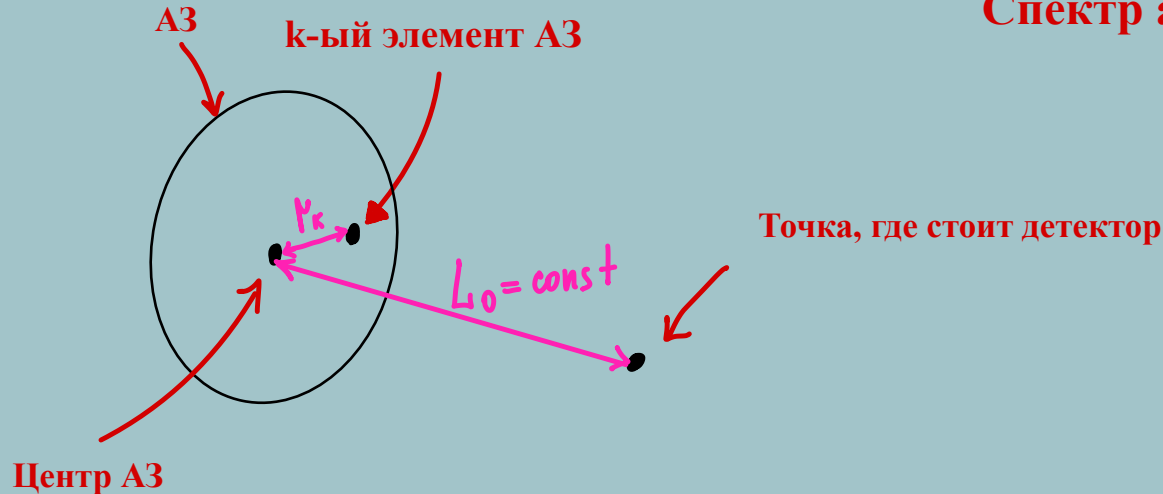
* (Mixed Oxide Fuel, смешанное оксидное топливо) включает смесь оксидов урана и плутония

Методика расчета потока антинейтрино от реактора БН

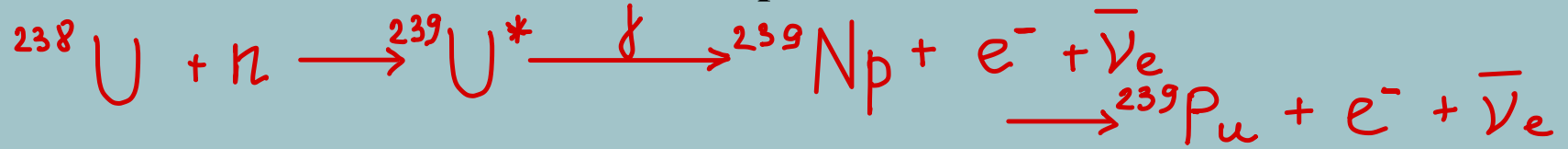
Число делений в элементе АЗ

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

Спектр антинейтрино



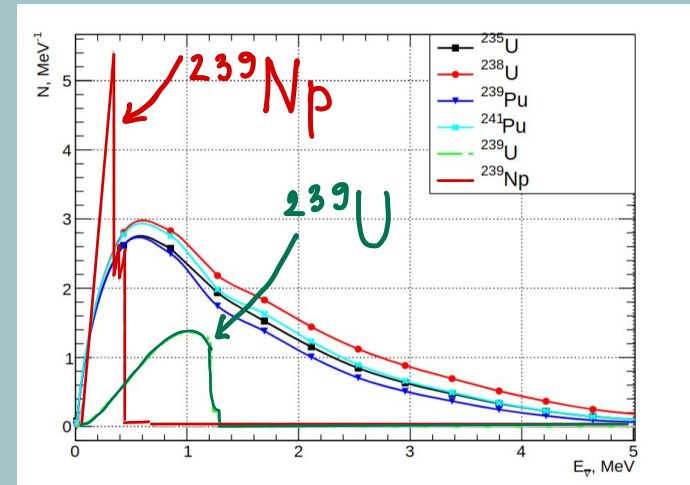
Важной особенностью реакторов типа БН является большее число захватов нейтронов на ^{238}U



Период полураспада ^{239}U : 23.45 минуты

Период полураспада ^{239}Np : 2.33 дня

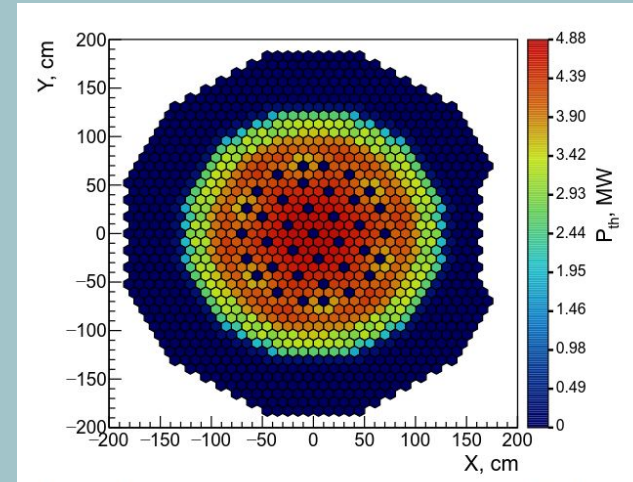
Равновесие в радиоактивных цепочках определяется наибольшим периодом полураспада, потому именно ^{239}Np оказывает значительное влияние на изменение потока антинейтрино, на протяжении примерно ≈ 7 дней (три периода полураспада ^{239}Np от начала кампании: два пика в области 0.5 и 1 МэВ



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

Симуляция кампании реактора БН-800: исходные данные для расчета

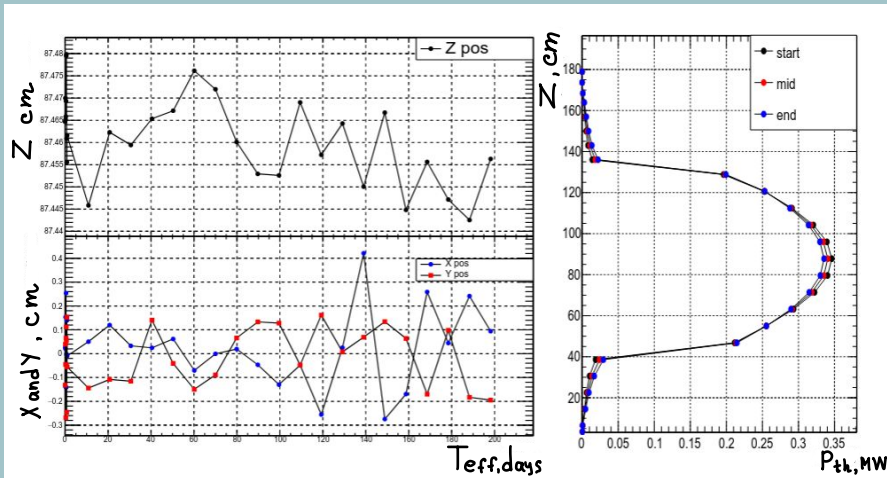
- ❖ Для расчета потока антинейтрино от активной зоны реактора БН-800 был использован программный комплекс КИР.
- ❖ Комплекс КИР (версия С) разработан для моделирования стационарных и нестационарных нейтронно-физических процессов с использованием метода Монте-Карло в системах с трёхмерной геометрией, как в однородных, так и неоднородных средах.
- ❖ В процессе моделирования «выгорания» реактора за **198.16 суток** была установлена **постоянная мощность 2100 МВт**.



Распределение мощности по плоскости
ХОУ для БН-800

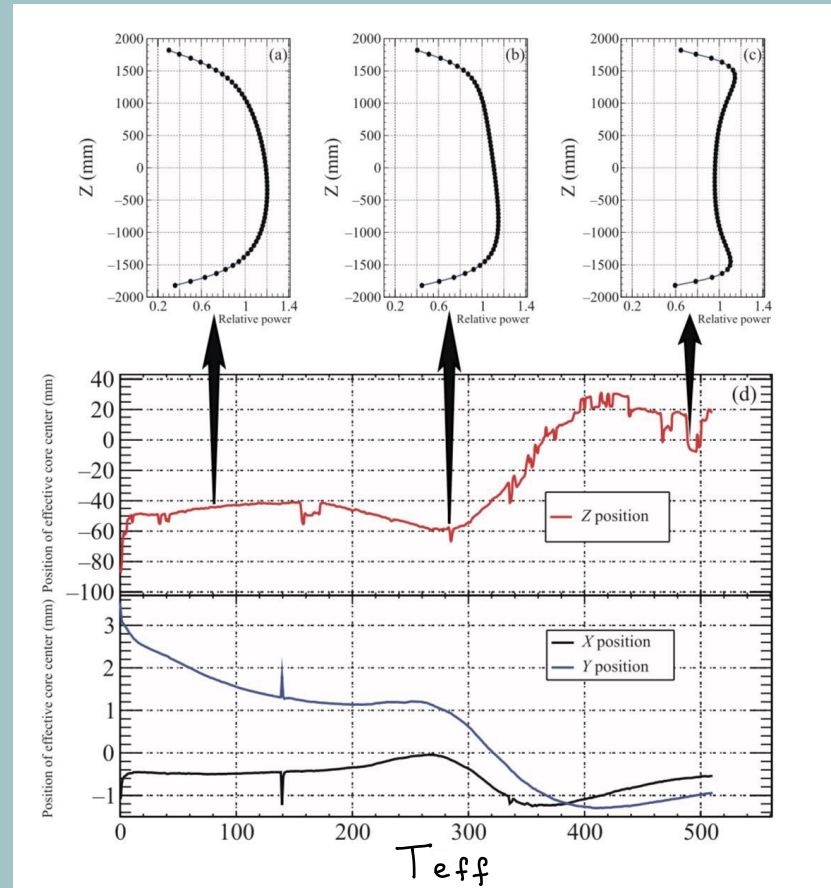
Результаты симуляции

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

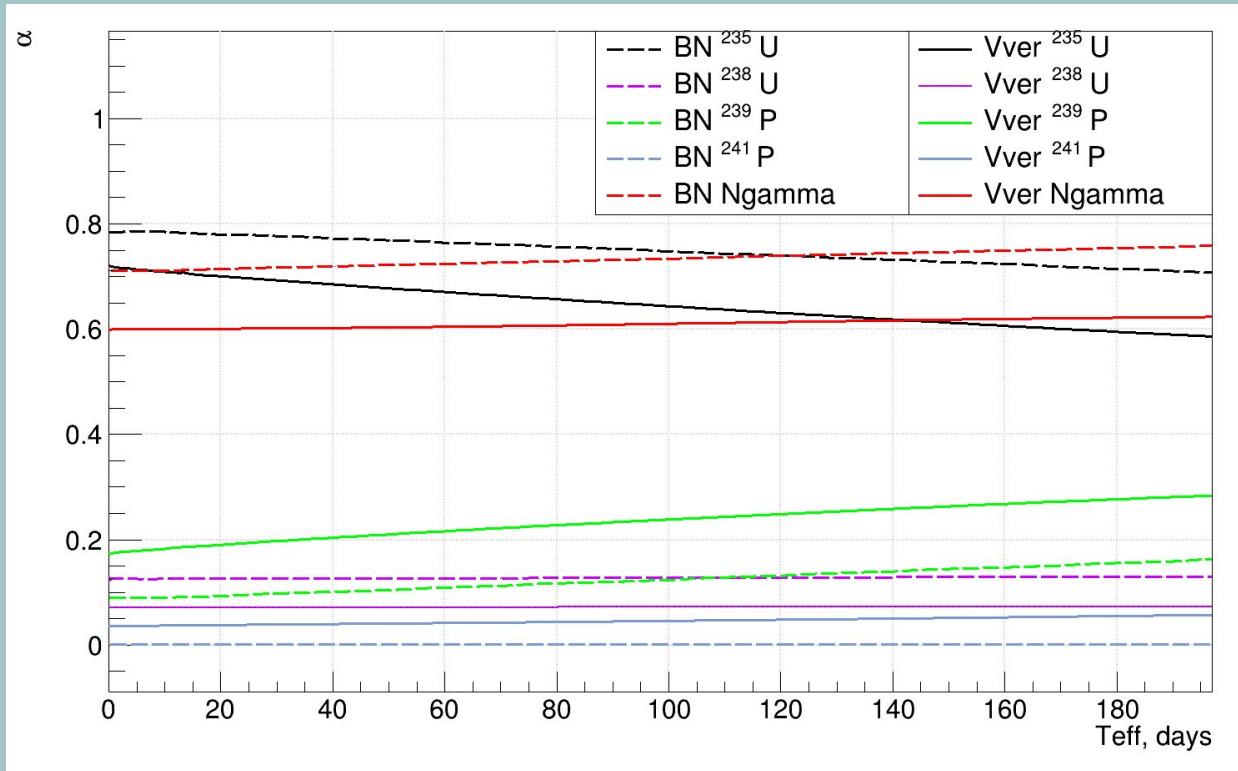


Положение центра энерговыделения для модели БН-800 (слева) и профили энерговыделения по высоте (справа)

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.



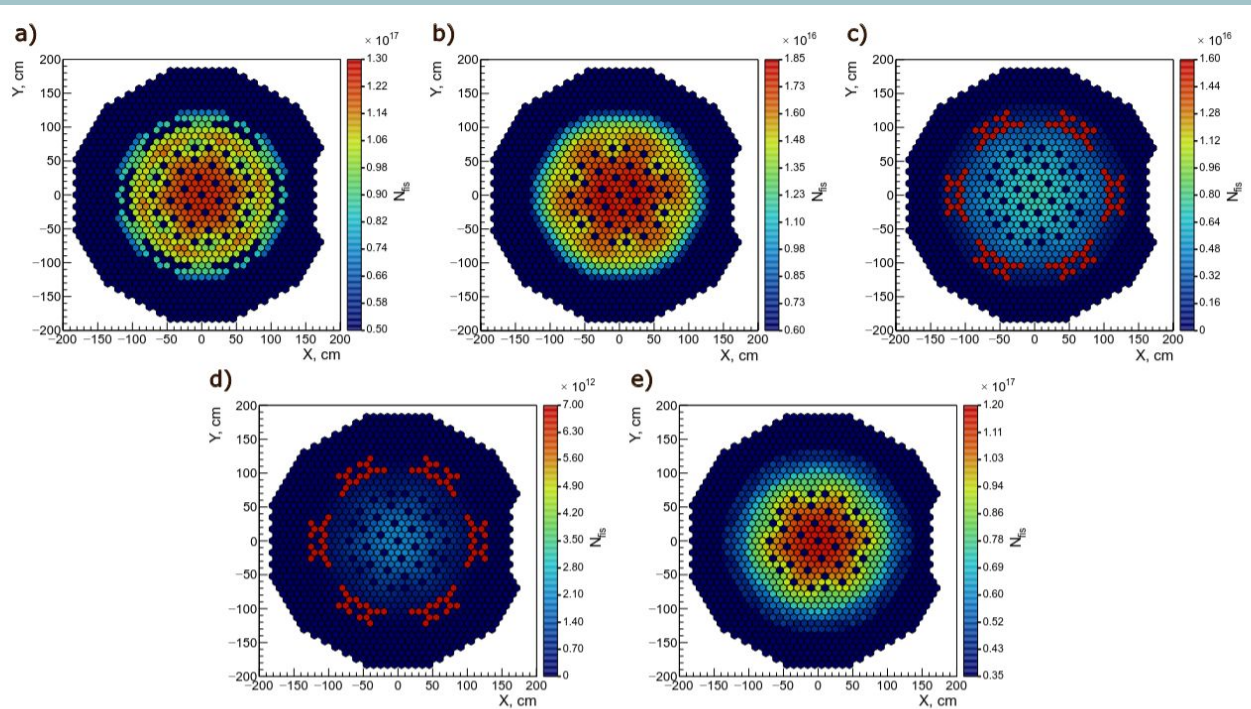
Зависимость долей деления (α) от времени



◆ Количество захватов нейтронов сравнимо с количеством делений ^{235}U .

◆ Количество захватов растёт в ходе кампании.

Распределение количества делений p по плоскости XOY для а) ^{235}U б) ^{238}U в) ^{239}Pu д) ^{241}Pu е) (n, γ)

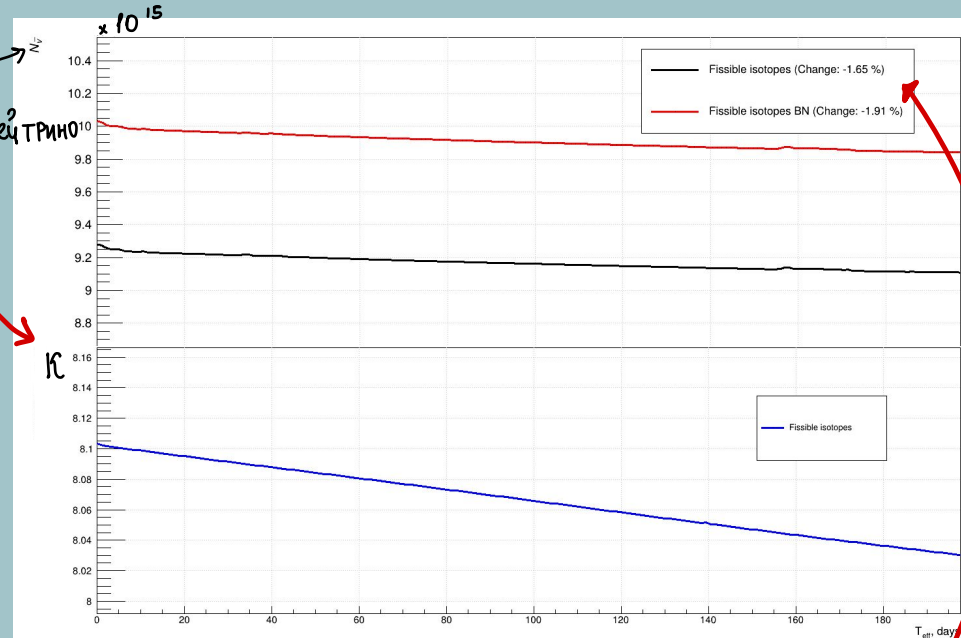
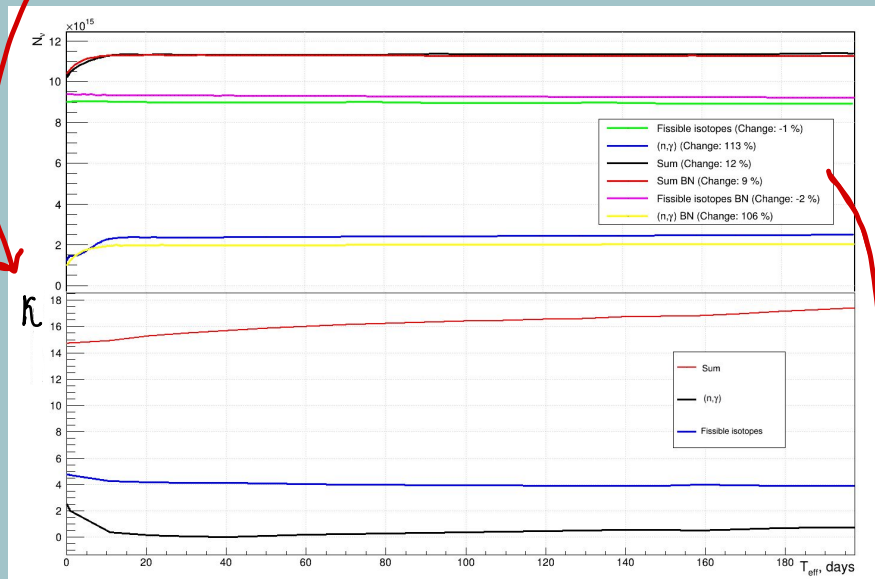


◆ Деления изотопов
происходят неоднородно

Зависимость потока антинейтрино от эффективного времени без порога (слева) и с порогом обратного бета распада 1.806 МэВ (справа)

$$K = (BN - VVER) / VVER, \%$$

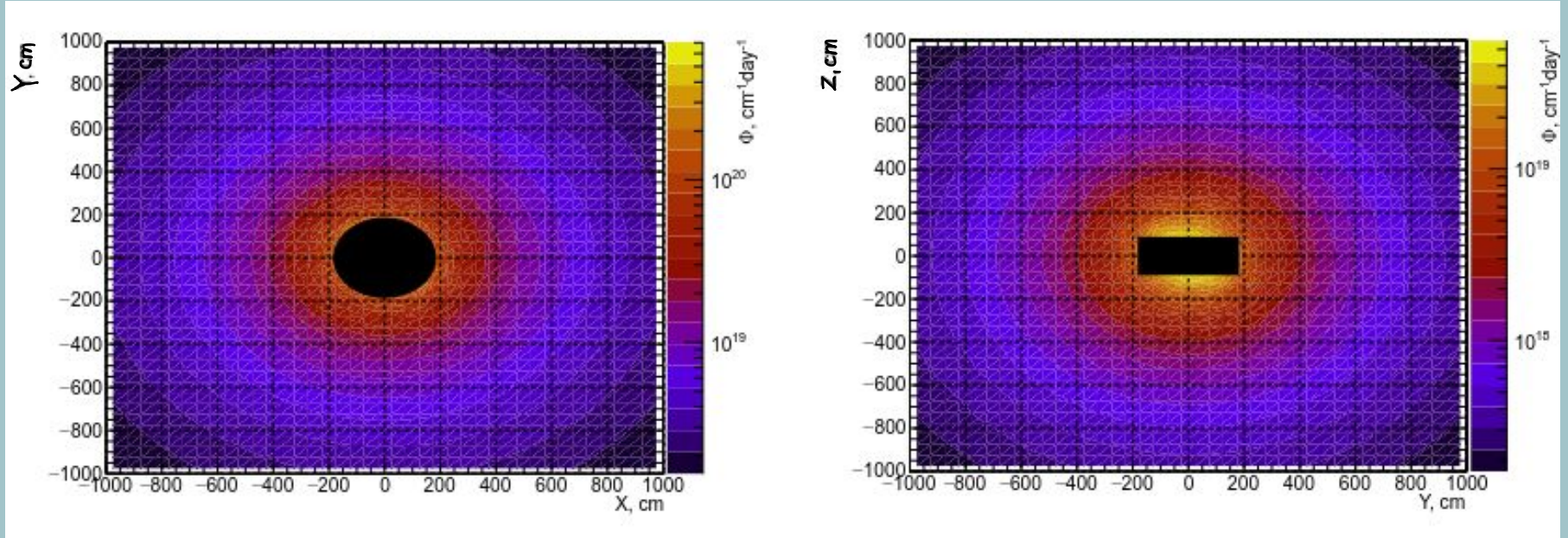
Поток
АНТИНЕЙТРИНО



- Fissile isotopes (Change: -1 %)
- (n, γ) (Change: 113 %)
- Sum (Change: 12 %)
- Sum BN (Change: 9 %)
- Fissile isotopes BN (Change: -2 %)
- (n, γ) BN (Change: 106 %)

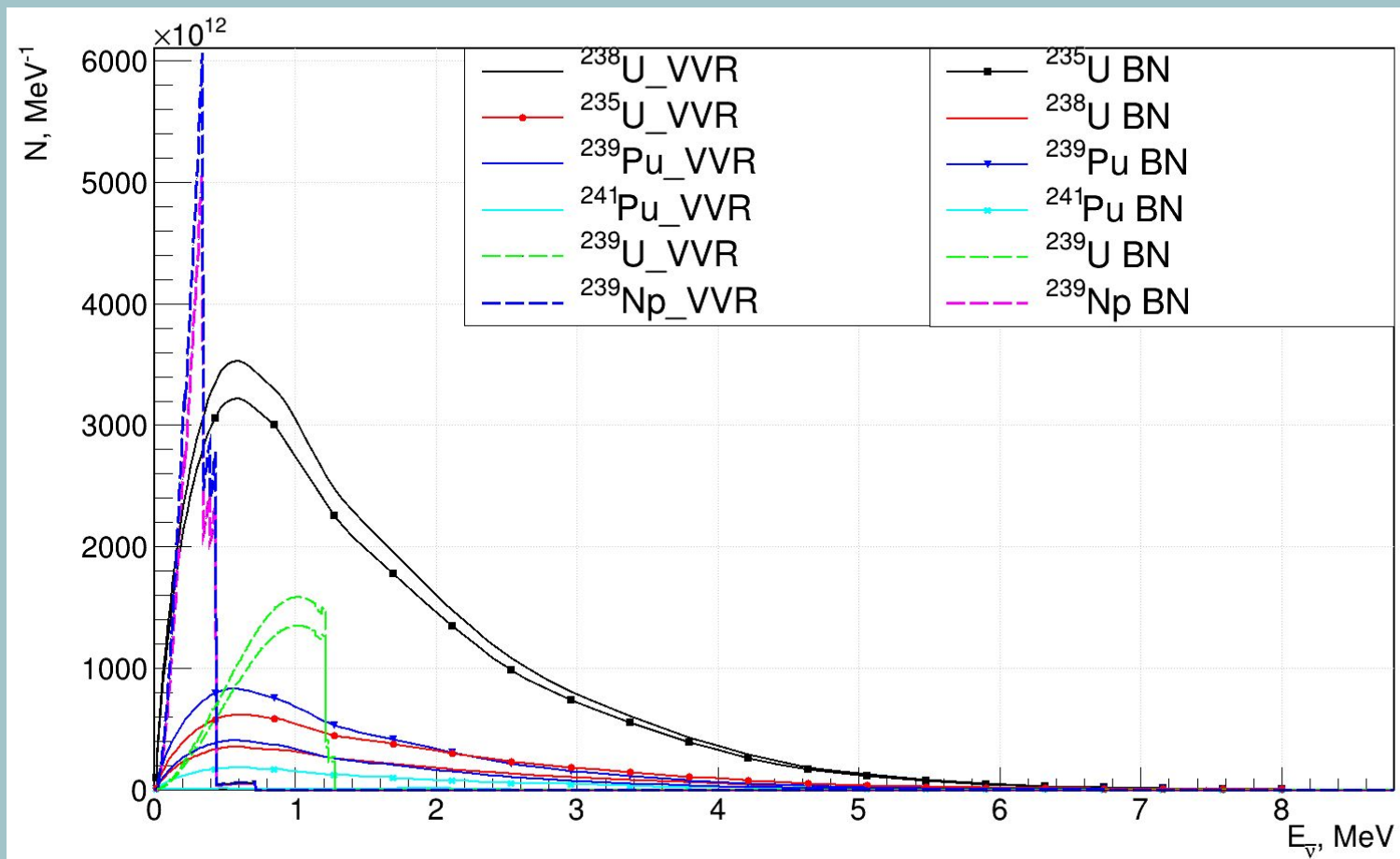
- Fissile isotopes (Change: -1.65 %)
- Fissile isotopes BN (Change: -1.91 %)

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

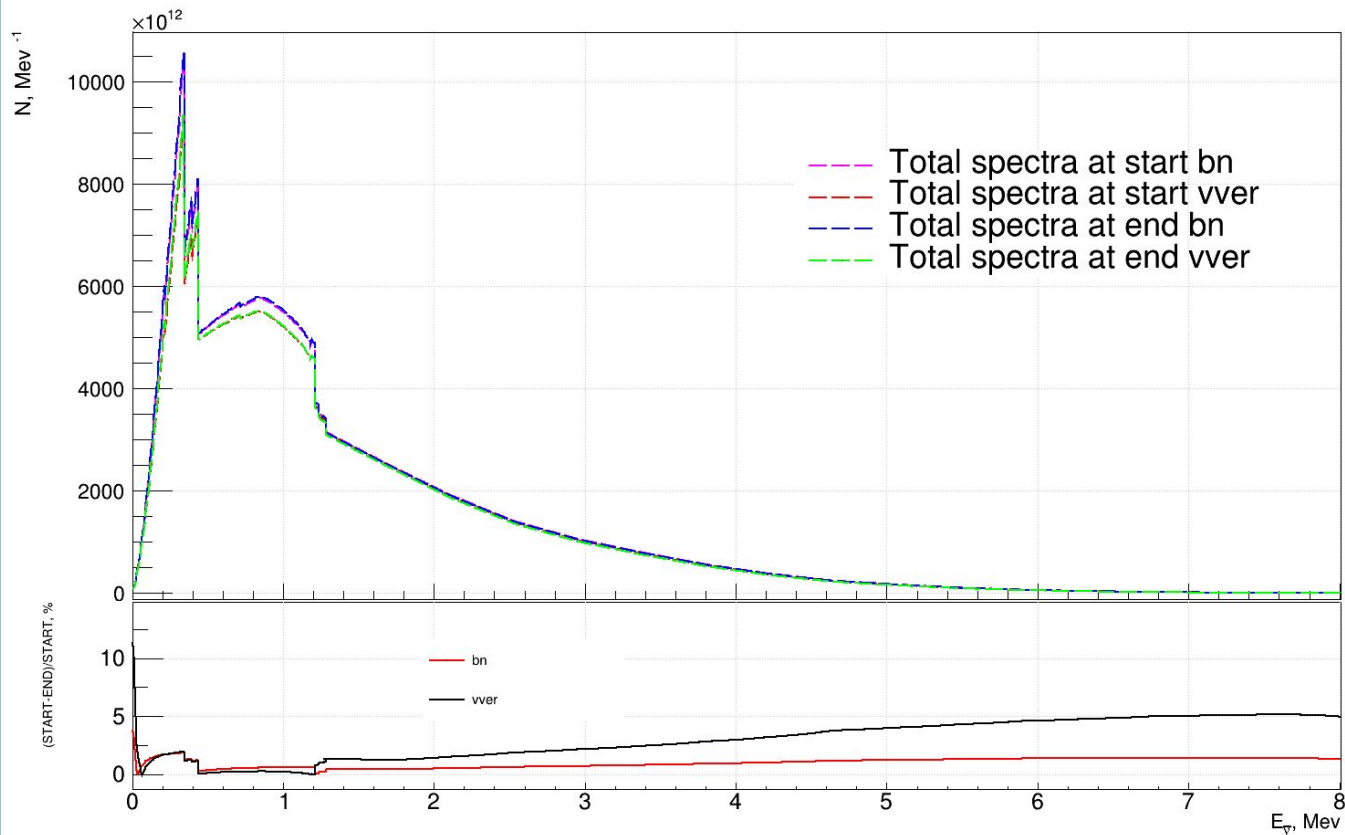


- ◆ Поток антинейтрино получился достаточно однородным относительно угла, под которым наблюдается АЗ.

Спектр антинейтрино для середины кампании с его изотопным составом



Полный спектр антинейтрино для начала и конца кампании



- ◆ В мягкой области наблюдаются наибольшие различия в спектрах. С большего же порога изменение спектра будет примерно таким же как и для ВВЭР
- ◆ Наличие захватов нейтронов на ^{239}U дает два дополнительных бета-распада, которые формируют пики при энергиях 0.5 и 1 МэВ.

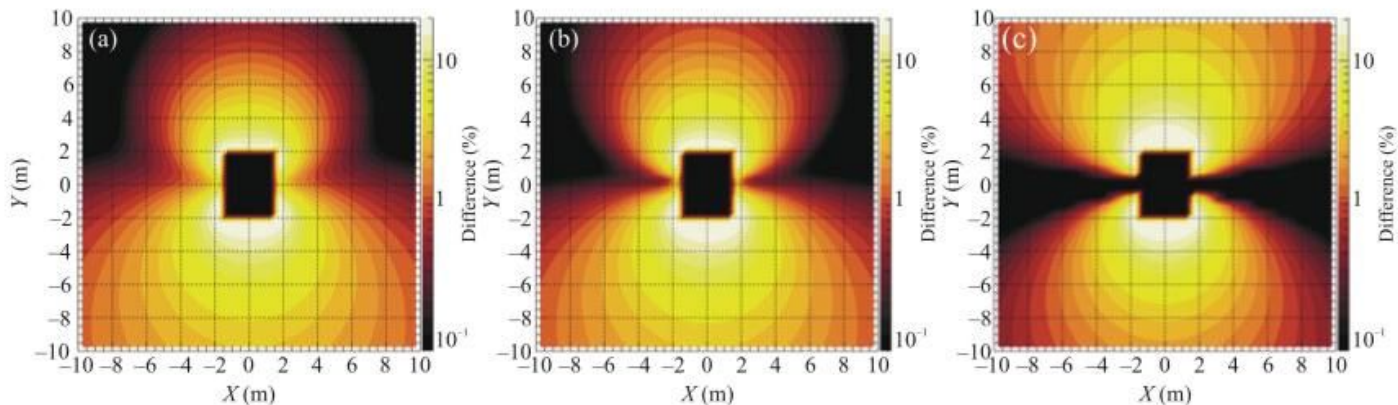
Заключение

- ❖ На основе предоставленных расчетов полей выгорания АЗ реактора БН-800 для смешанной загрузки (16% MOX) был впервые произведен расчет потока антинейтрино для быстрого реактора.
- ❖ В результате сравнения реакторов ВВЭР-1000 и БН-800 были получены следующие результаты:
 1. Положение центра энерговыделения в ходе кампании для ВВЭР-1000 изменяется сильнее (100 мм), чем для БН-800 (0.3 мм)
 2. Как следствие из 1 пункта, из-за отсутствия сильных асимметрий в распределениях энерговыделения относительно центра АЗ поток антинейтрино для нашей модели от такого типа реакторов получился достаточно однородным относительно угла, под которым наблюдается АЗ, в отличие от реактора ВВЭР-1000, где наблюдается анизотропия (см приложение).
 3. Потоки для реакторов БН-800 и ВВЭР-1000 ведут себя похожим образом.
 4. В мягкой области наблюдаются наибольшие различия в спектрах БН-800 и ВВЭР-1000. С большего же порога эти различия постепенно исчезают.
- ❖ Начиная с порога обратного бета-распада реактор БН-800, ведет себя как реактор ВВЭР-1000. Это означает, что для БН-800 могут быть применены те же методы мониторинга, что и для ВВЭР-1000.

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!



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

Модели, использующиеся для расчетов

- **Модель Хьюбера-Мюллера (НМ)**

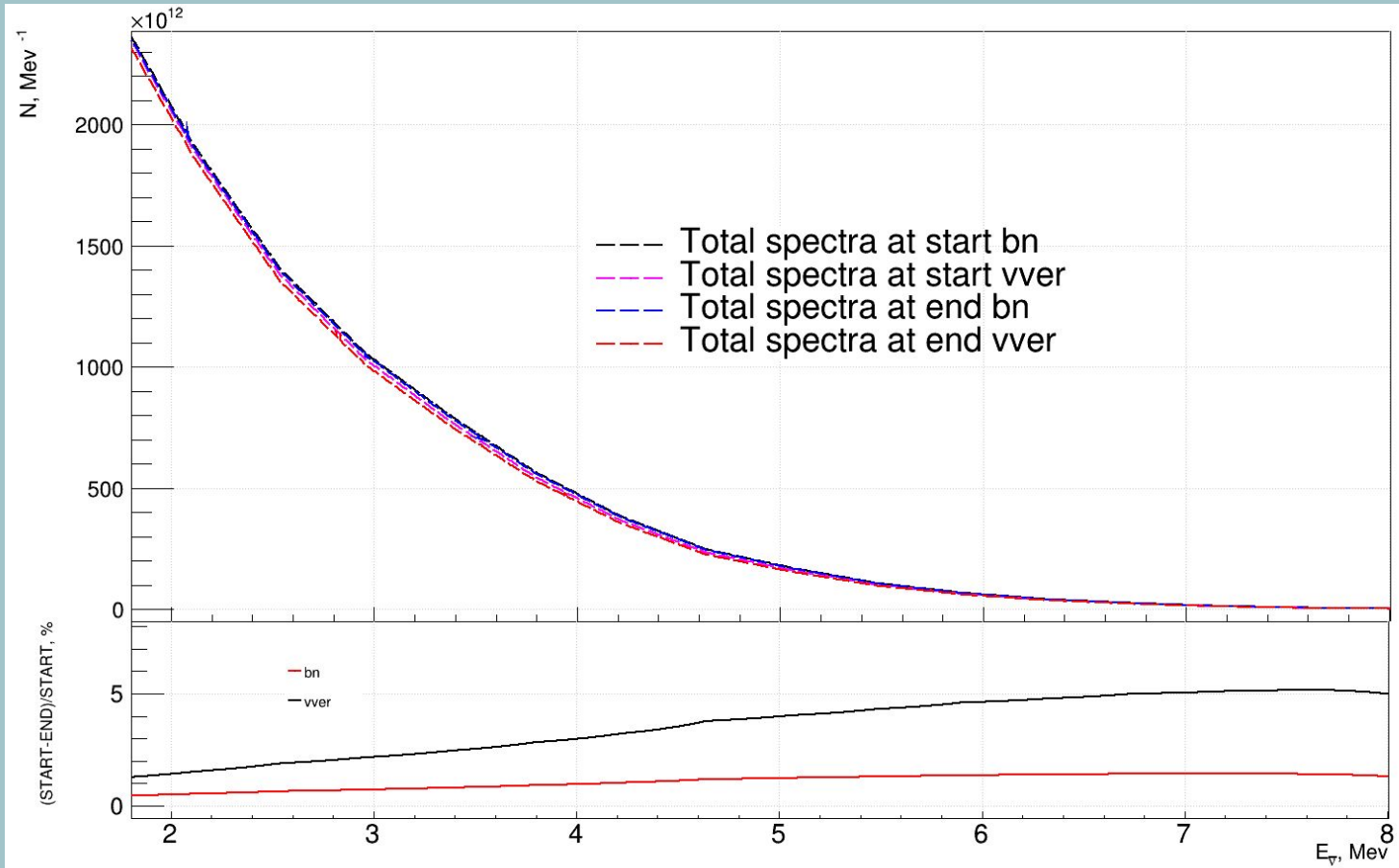
В рамках этой модели кумулятивные спектры бета-электронов от ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu и, измеренные в институте Лауэ-Ланжевена (ILL) в 1980-х гг. пересчитываются в соответствующие спектры антинейтрино. Спектр антинейтрино от ^{238}U вычисляется путем суммирования спектров от всех продуктов его деления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

- **Модель ЕСТЬЕН-ФАЛЛО (ЕФ)**

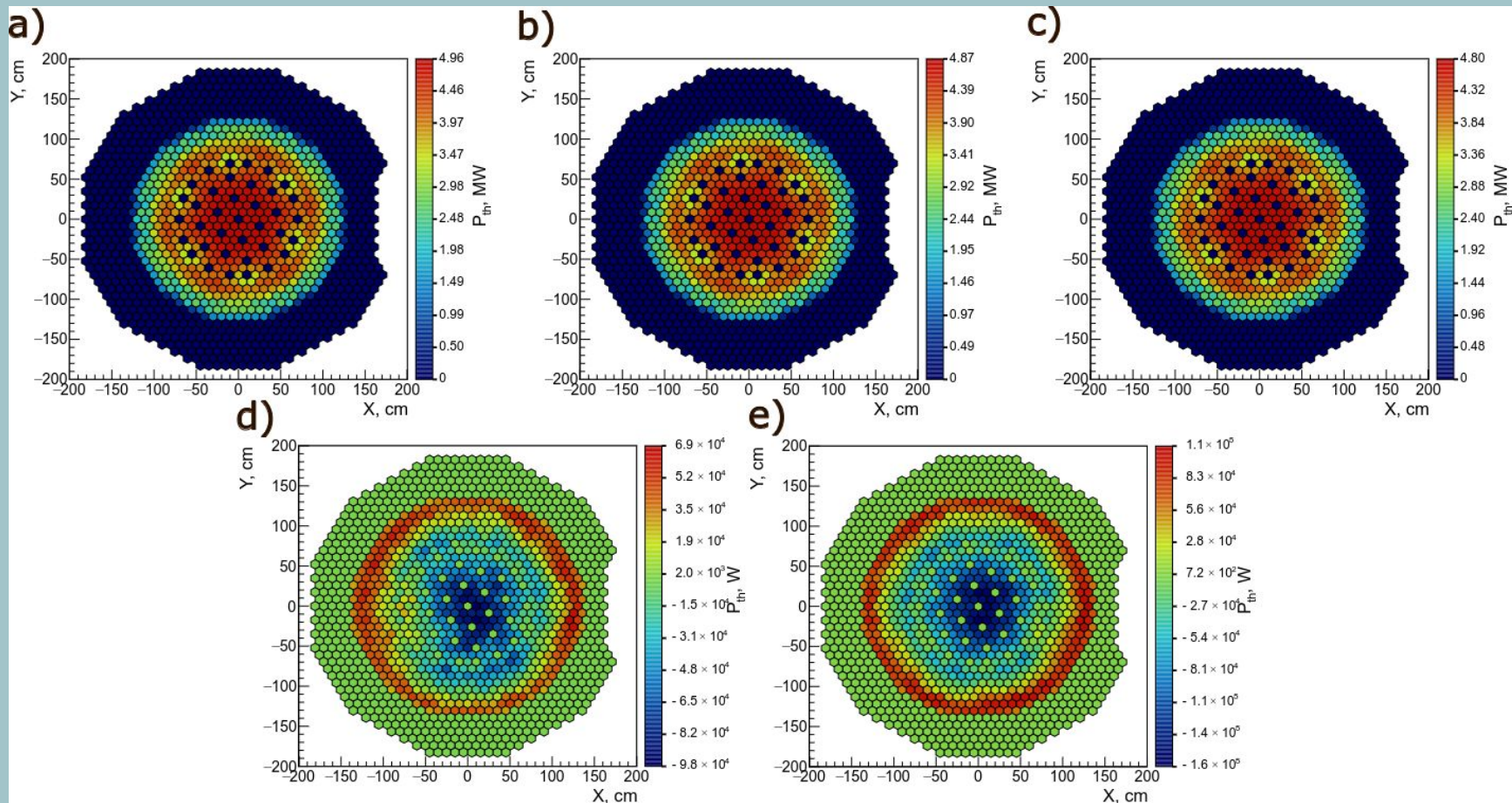
Спектры антинейтрино от всех четырех делящихся изотопов вычисляются посредством суммирования спектров от всех продуктов его деления с учетом их активностей и схем распада.

- **Модель Курчатовского института (КИ)**

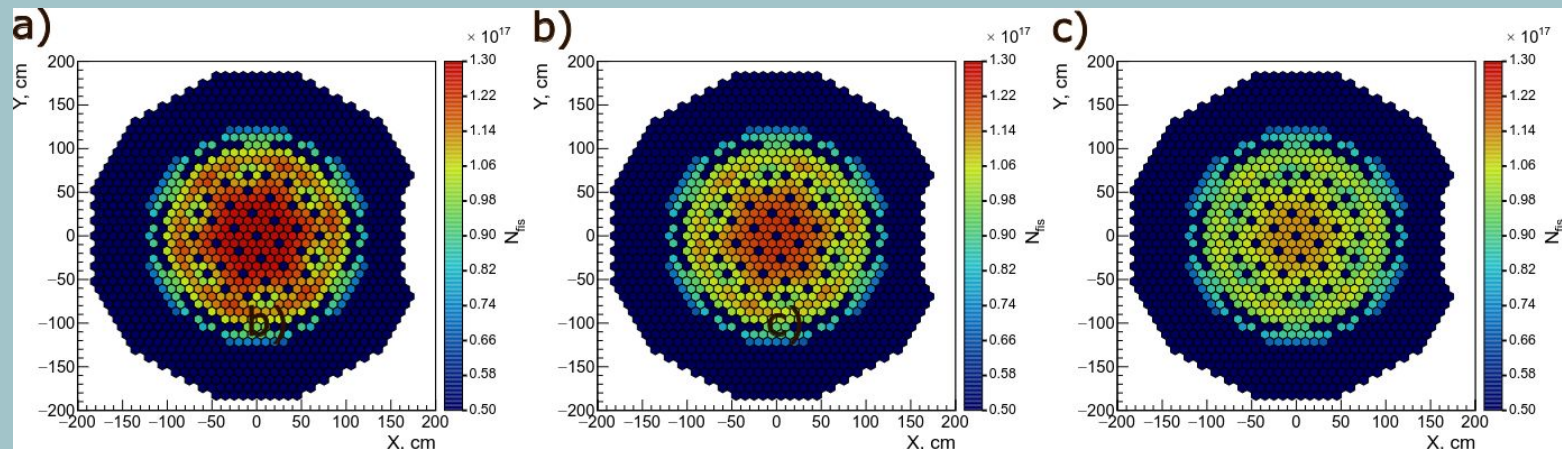
В модели производится пересчет кумулятивных спектров бета-электронов от трёх делящихся изотопов, измеренных в работах ILL (использовался последний пере выпуск их работ). При этом, с учетом результатов измерений отношения бетаспектров ^{235}U и ^{239}Pu , выполненных в НИЦ КИ, кумулятивные бетаспектры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



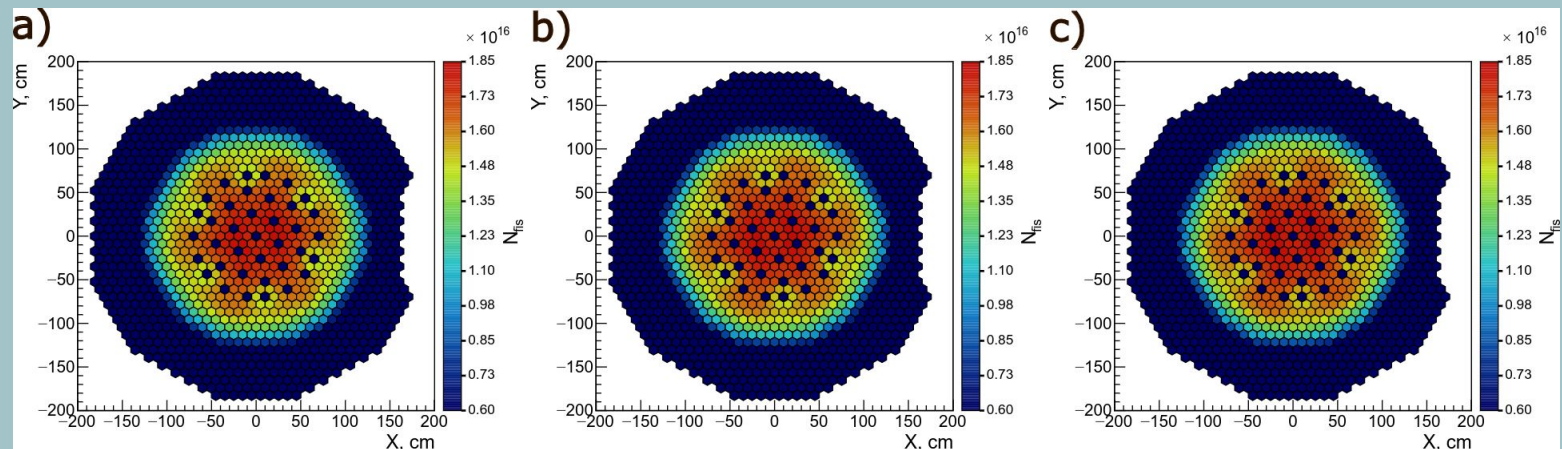
Полный спектр в начале и конце кампании с порога обратного бета распада 1.806 Мэв



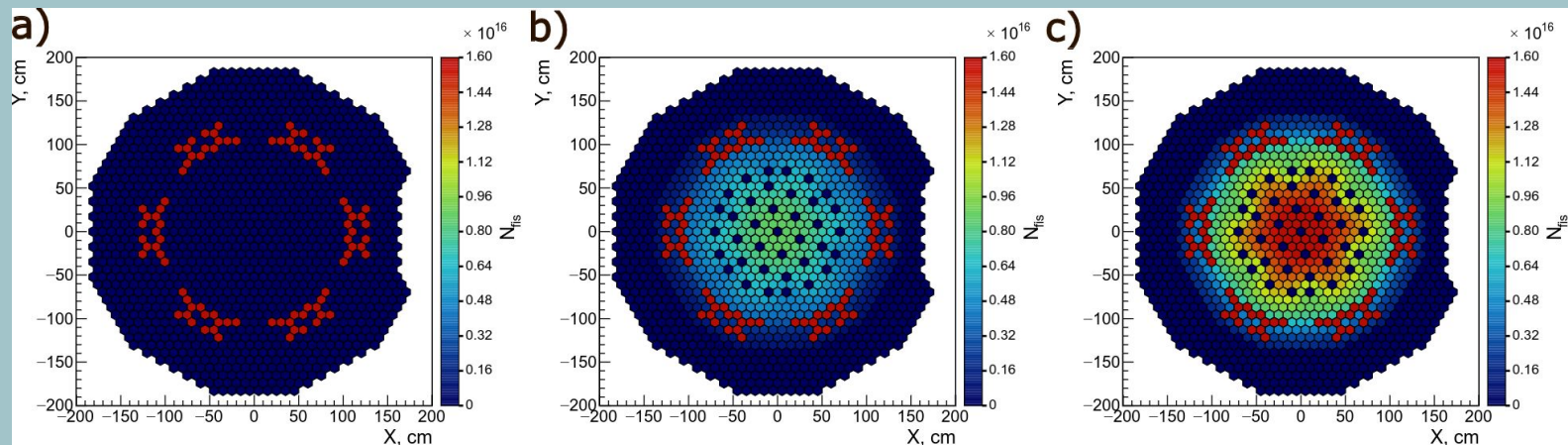
Распределение мощности в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, с)– конец кампании, д)– разница между началом и серединой кампании, е)– разница между началом и концом кампании 200– 150– 100– 50– 0



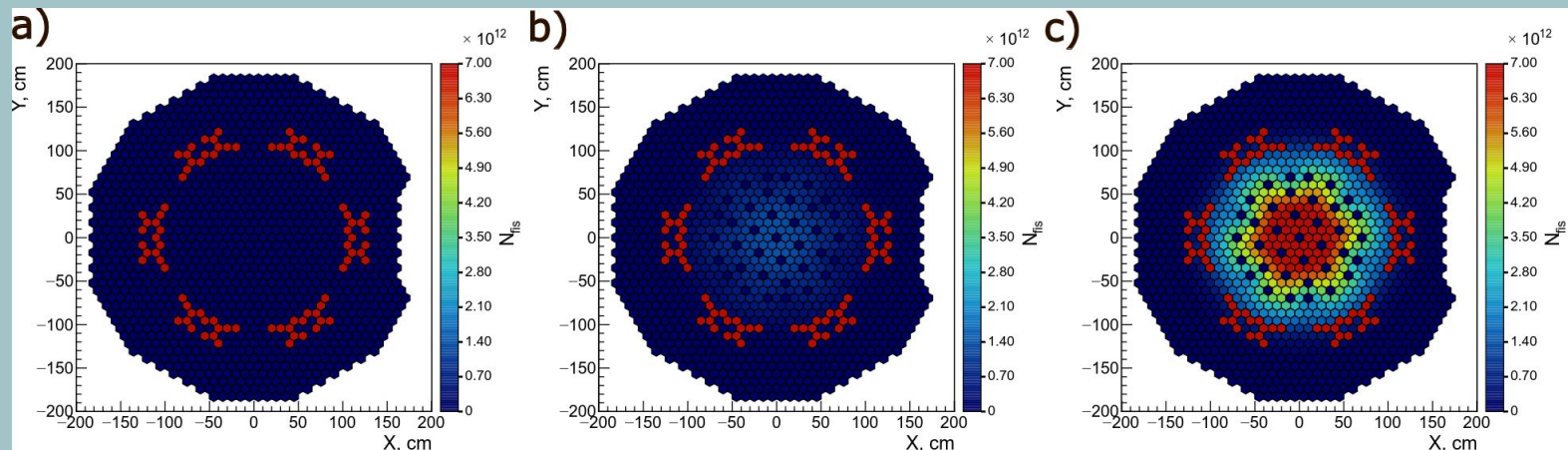
Распределение количества делений ^{235}U в плоскости XY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании



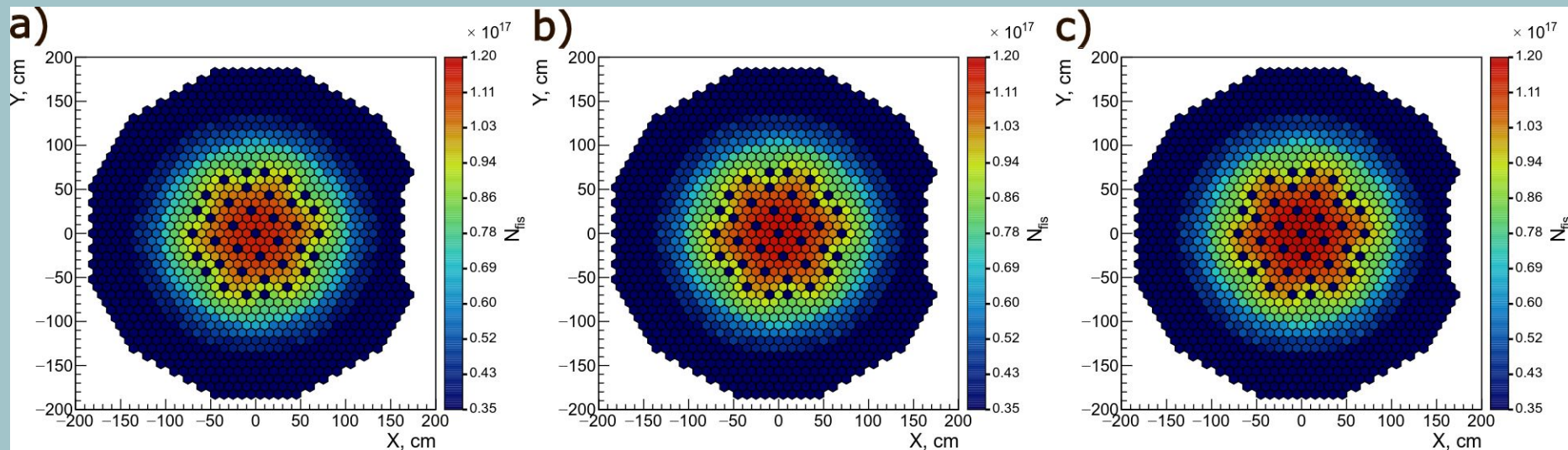
Распределение количества делений ^{238}U в плоскости XY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, в)– конец кампании



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

Методика расчета потока антинейтрино от реактора БН

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

Спектр антинейтрино:

$$S_f(t, \mathbf{r}_k, E_{\bar{\nu}_e}) = \sum_i \alpha_i(t, \mathbf{r}_k) S_i(E_{\bar{\nu}_e}),$$

где $S_i(E_{\bar{\nu}_e})$: кумулятивный спектр антинейтрино для изотопа i .

Число делений в элементе АЗ:

$$N_f(t, \mathbf{r}_k) = \frac{P_{\text{th}}(t, \mathbf{r}_k)}{E_f(t, \mathbf{r}_k)},$$

где $P_{\text{th}}(t, \mathbf{r}_k)$ — тепловая мощность элемента, а $E_f(t, \mathbf{r}_k)$ — средняя энергия на одно деление.

- \mathbf{L}_0 : расстояние между точкой, где рассчитывается поток антинейтрино, и центром активной зоны (АЗ).
- \mathbf{r}_k : радиус-вектор от центра АЗ до k -го элемента активной зоны.

Средняя тепловая энергия на деление:

$$E_f(t, \mathbf{r}_k) = \sum_i \alpha_i(t, \mathbf{r}_k) E_i,$$

где $\alpha_i(t, \mathbf{r}_k)$: доля делений для изотопа i , а E_i : энергия деления изотопа i .