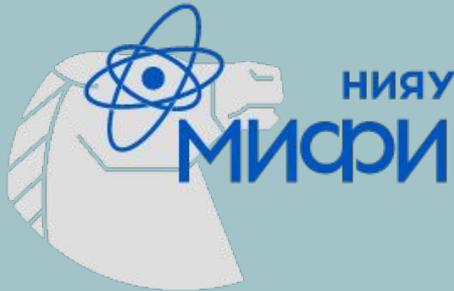


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное  
государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»

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  $^{235}\text{U}$  и продукты его деления. На быстрых реакторах деления происходят у более широкого спектра изотопов, включая  $^{238}\text{U}$ , 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 %

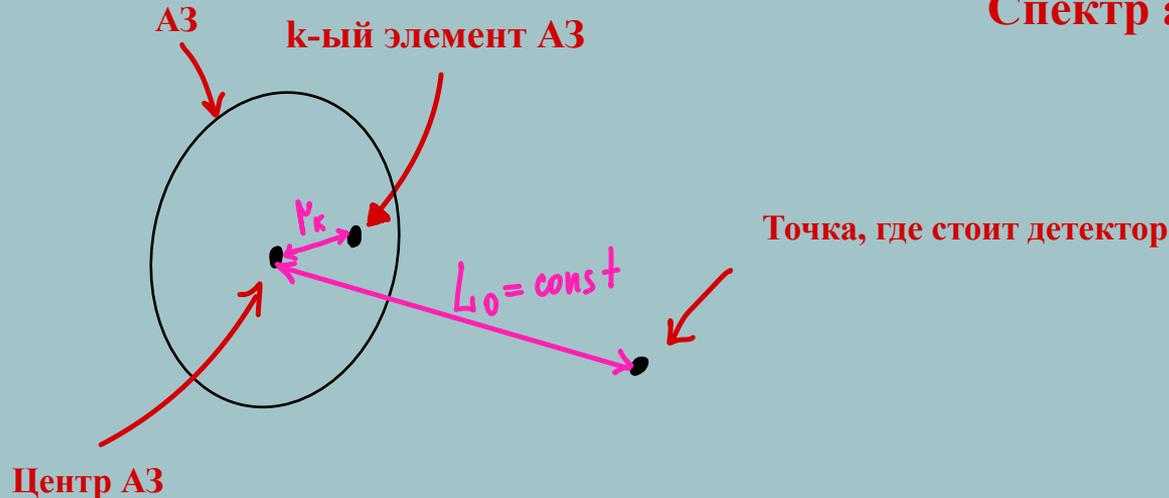
\* (Mixed Oxide Fuel, смешанное оксидное топливо) включает смесь оксидов урана и плутония

# Методика расчета потока антинейтрино от реактора БН

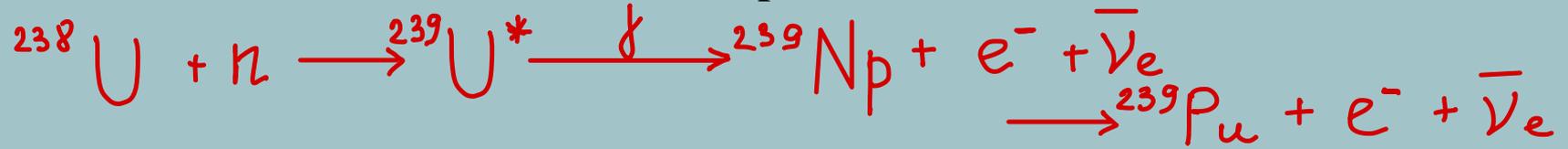
## Число делений в элементе АЗ

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

Спектр антинейтрино



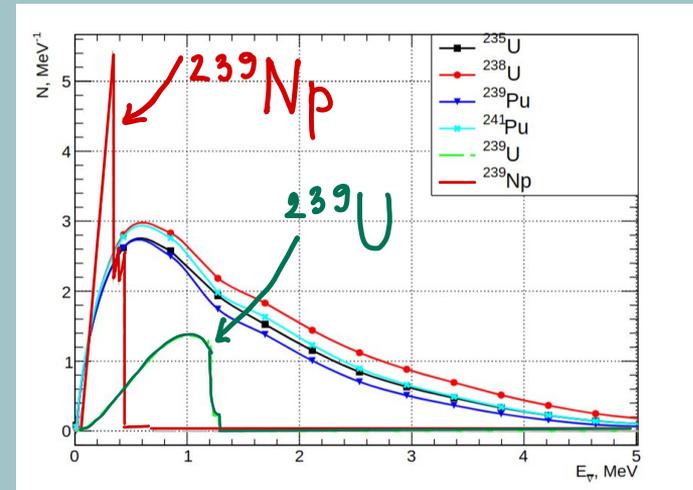
Важной особенностью реакторов типа БН является большее число захватов нейтронов на  $^{238}\text{U}$



Период полураспада  $^{239}\text{U}$ : 23.45 минуты

Период полураспада  $^{239}\text{Np}$ : 2.33 дня

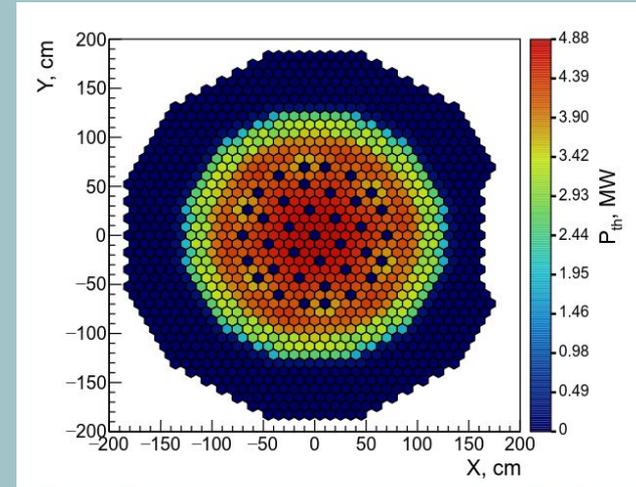
Равновесие в радиоактивных цепочках определяется наибольшим периодом полураспада, потому именно  $^{239}\text{Np}$  оказывает значительное влияние на изменение потока антинейтрино, на протяжении примерно  $\approx 7$  дней ( три периода полураспада  $^{239}\text{Np}$  от начала кампании: два пика в области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



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

## Симуляция кампании реактора БН-800: исходные данные для расчета

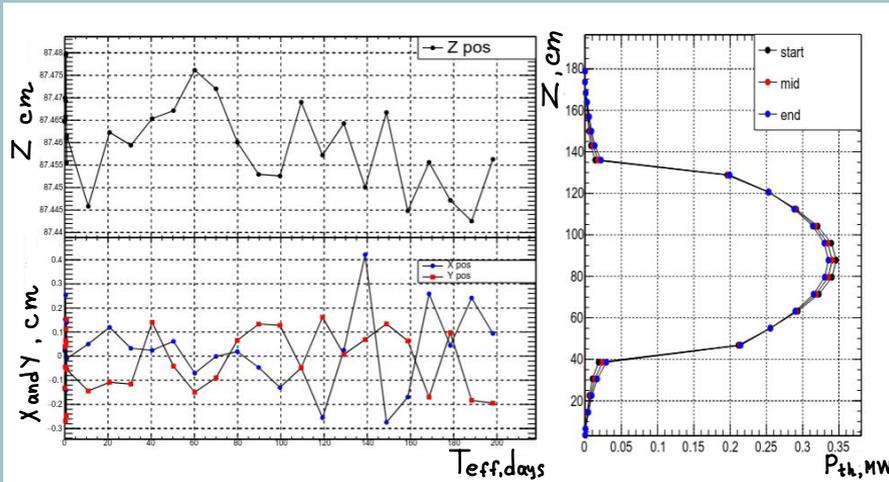
- ❖ Для расчета потока антинейтрино от активной зоны реактора БН-800 был использован программный комплекс КИР.
- ❖ Комплекс КИР (версия С) разработан для моделирования стационарных и нестационарных нейтронно-физических процессов с использованием метода Монте-Карло в системах с трёхмерной геометрией,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

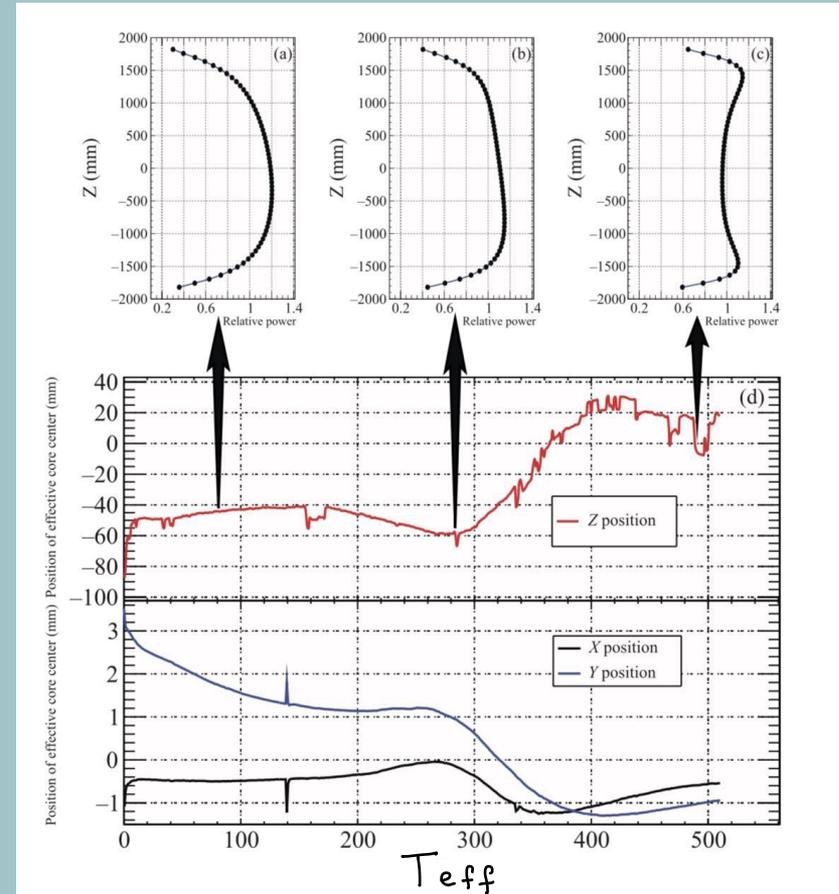
# Результаты симуляции

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

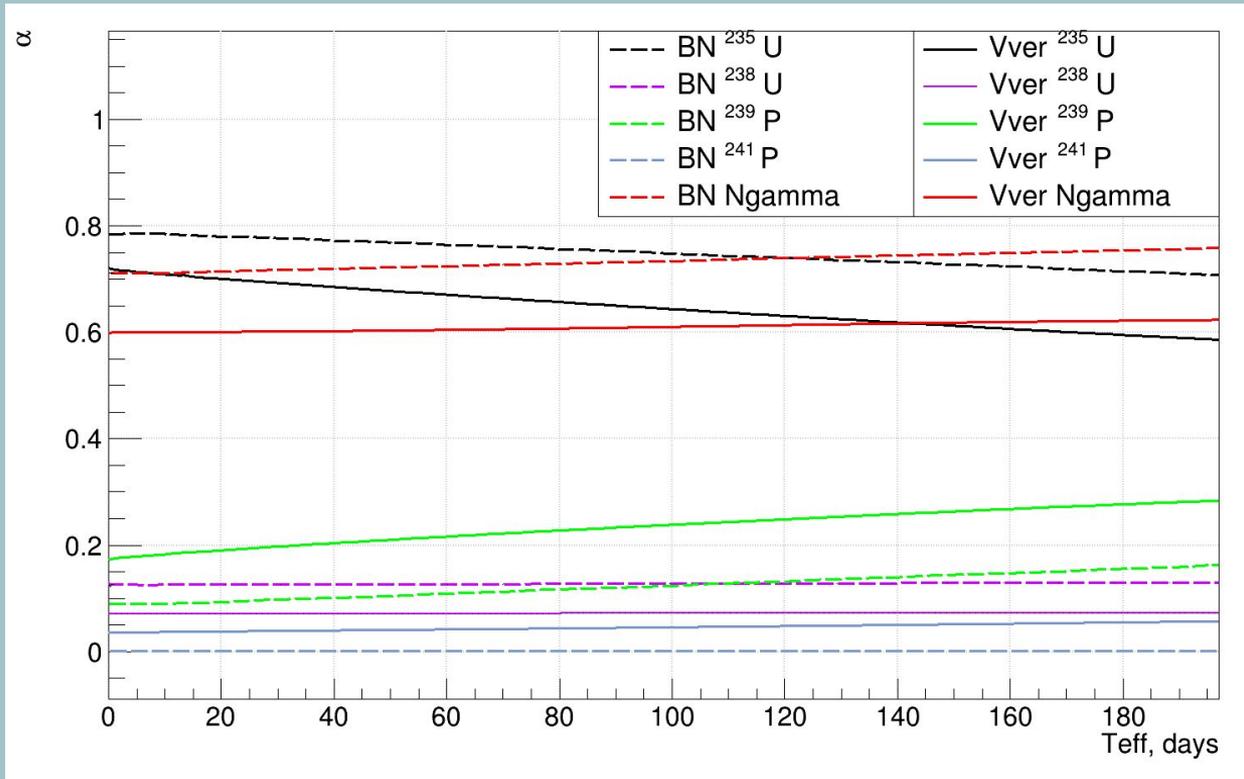


Положение центра энерговыделения для модели БН-800 (слева) и профили энерговыделения по высоте (справа)

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 ( $\alpha$ ) от времени

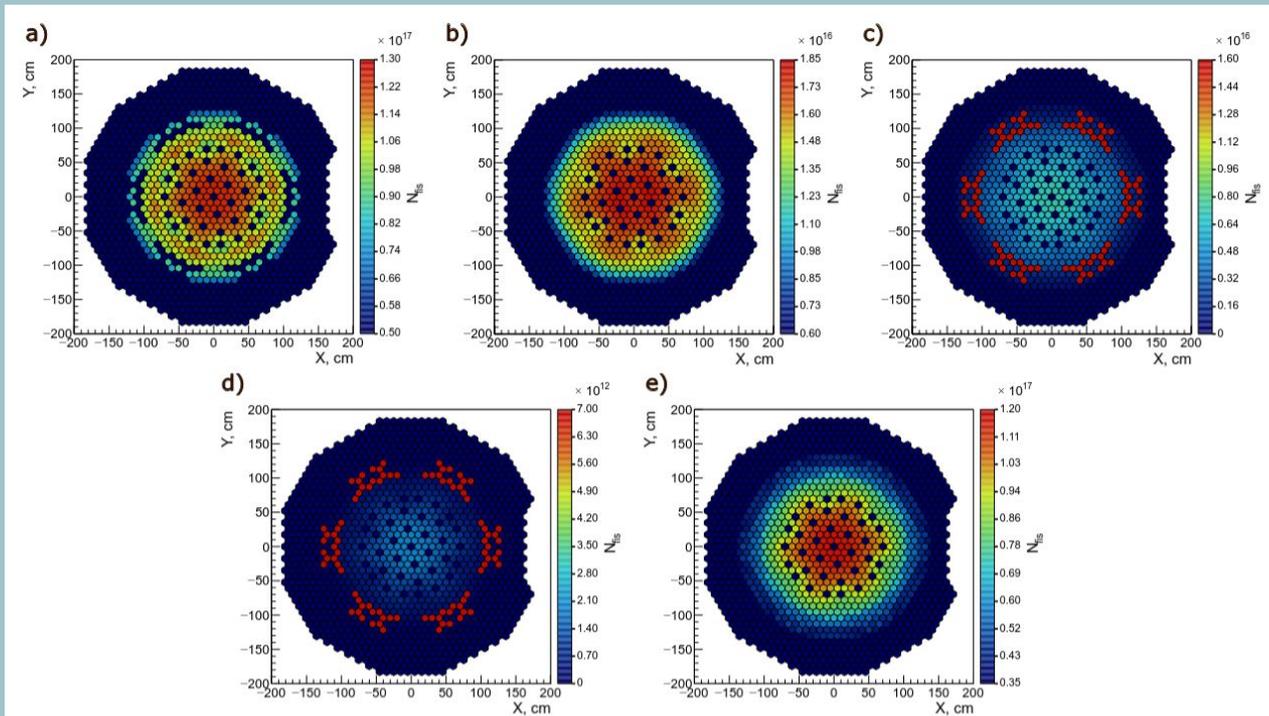


◆ Количество захватов нейтронов сравнимо с количеством делений  $^{235}\text{U}$ .

◆ 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) $(n, \gamma)$

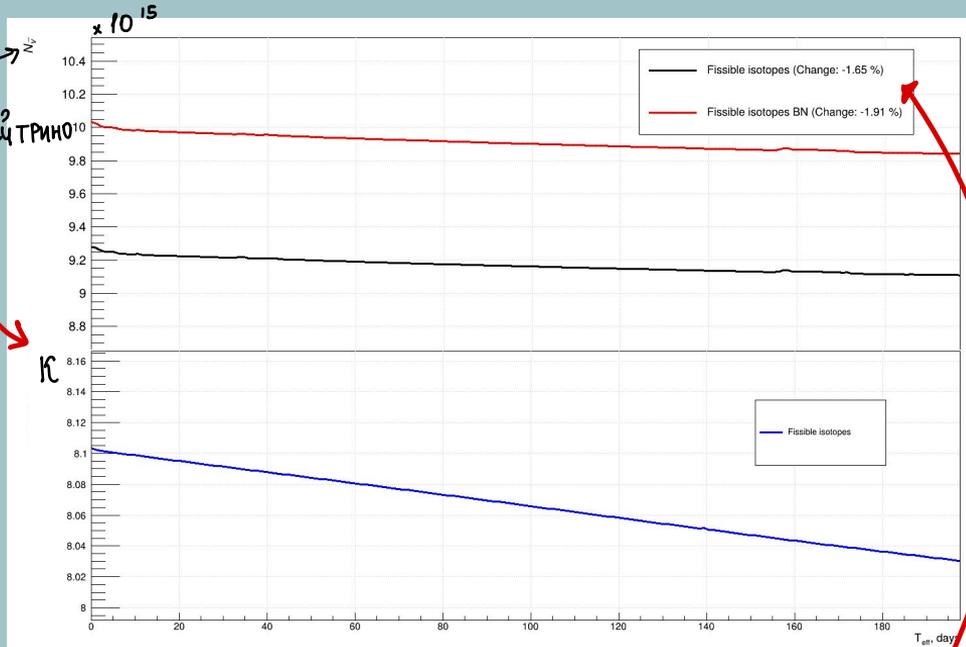
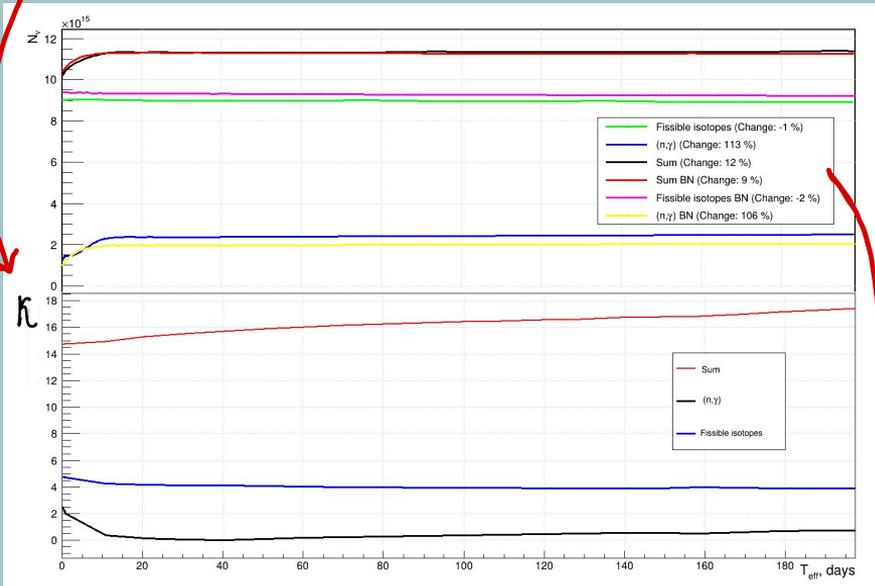
◆ Деления изотопов  
происходят неоднородно



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

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

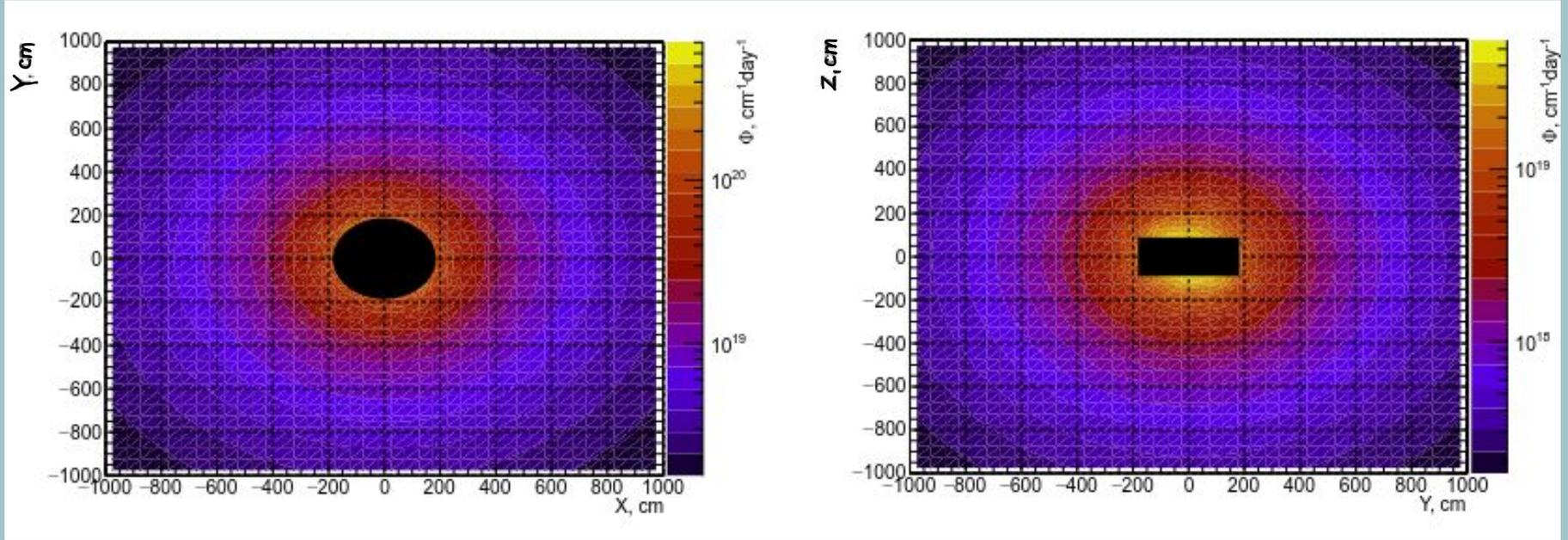
Поток  
АНТИНЕЙТРИНО



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

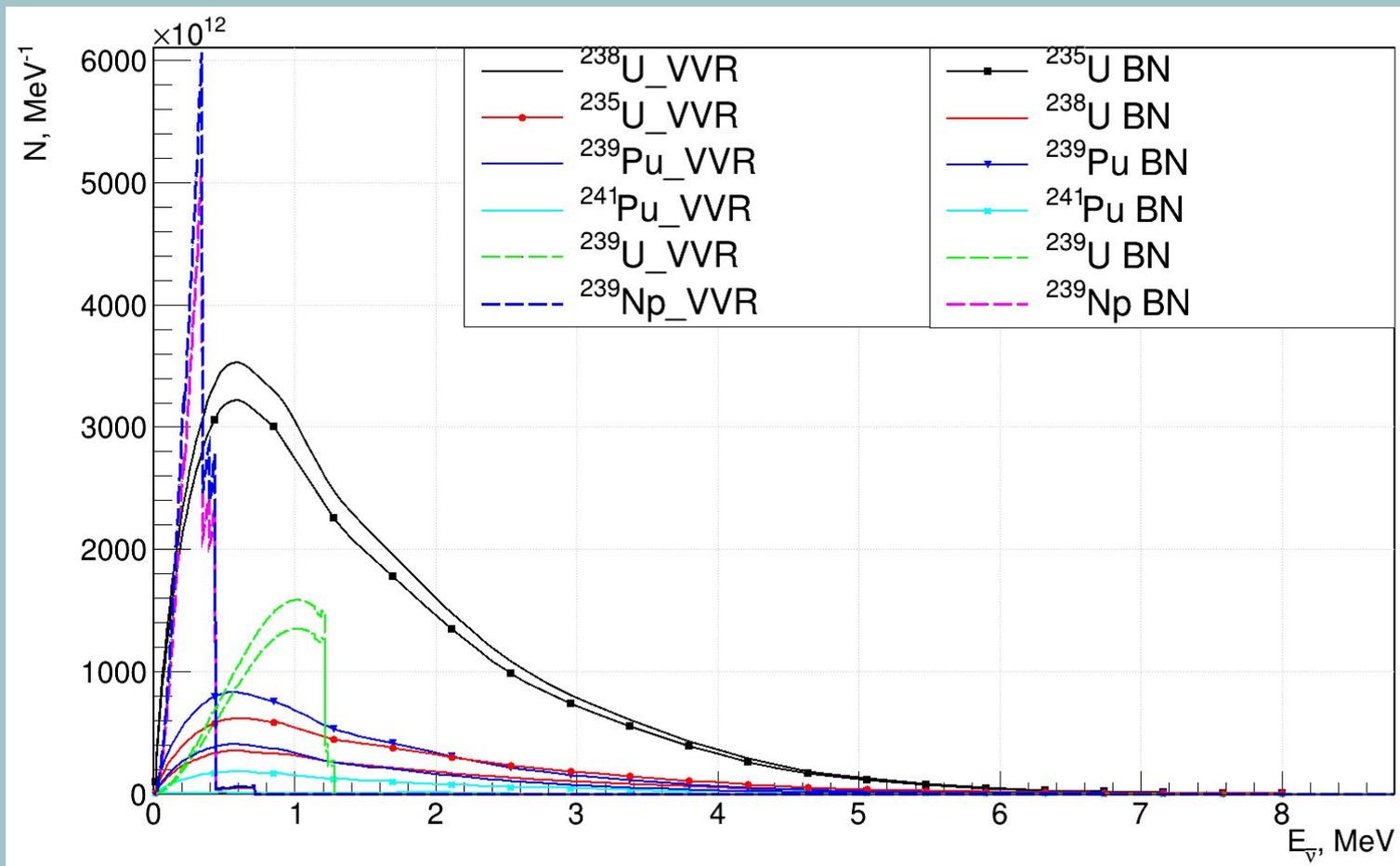
- Fissile isotopes (Change: -1.65 %)
- Fissile isotopes BN (Change: -1.91 %)

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

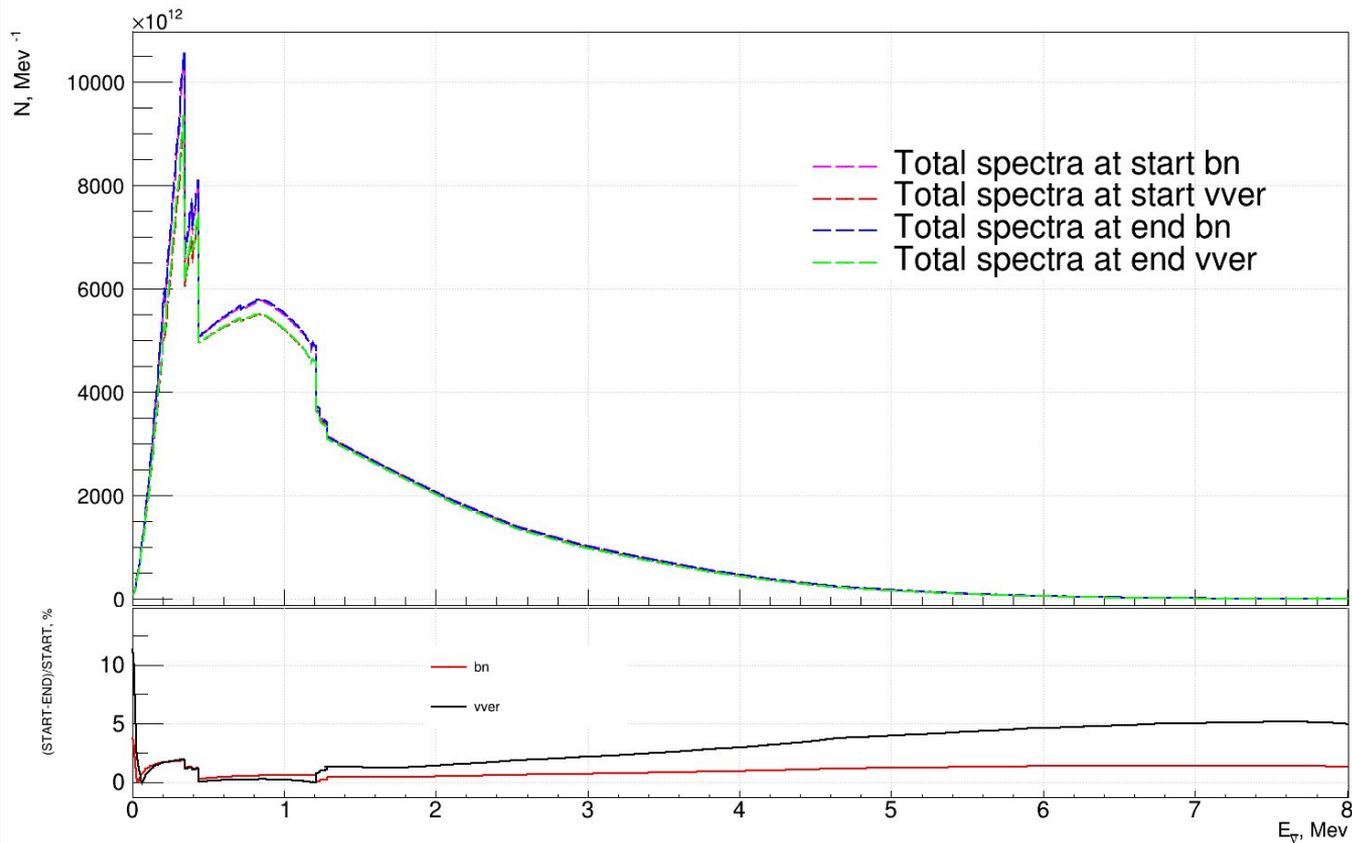


- ◆ Поток антинейтрино получился достаточно однородным относительно угла, под которым наблюдается АЗ.

# 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  $^{239}\text{U}$  дает два дополнительных бета-распада, которые формируют пики при энергиях 0.5 и 1 МэВ.

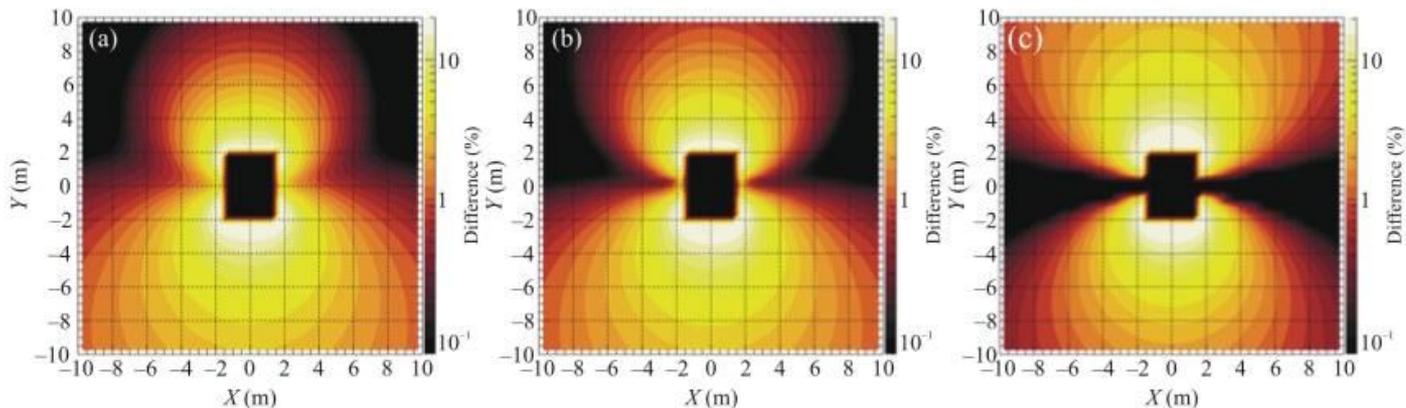
# Заключение

- ❖ 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)**

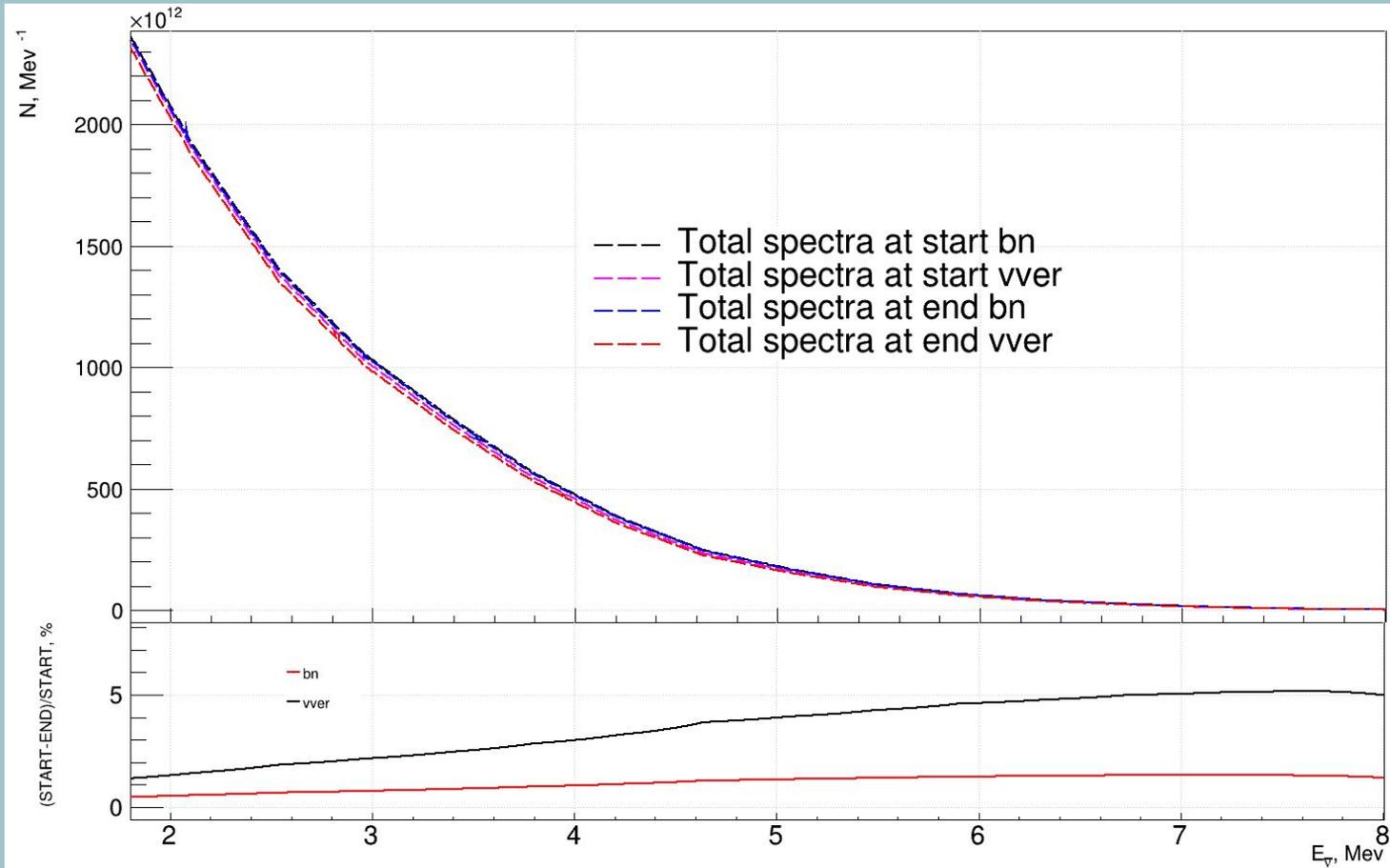
В рамках этой модели кумулятивные спектры бета-электронов от  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$  и, измеренные в институте Лауэ-Ланжевена (ILL) в 1980-х гг. пересчитываются в соответствующие спектры антинейтрино. Спектр антинейтрино от  $^{238}\text{U}$  вычисляется путем суммирования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

- **Модель Естьян-Фалло (ЕФ)**

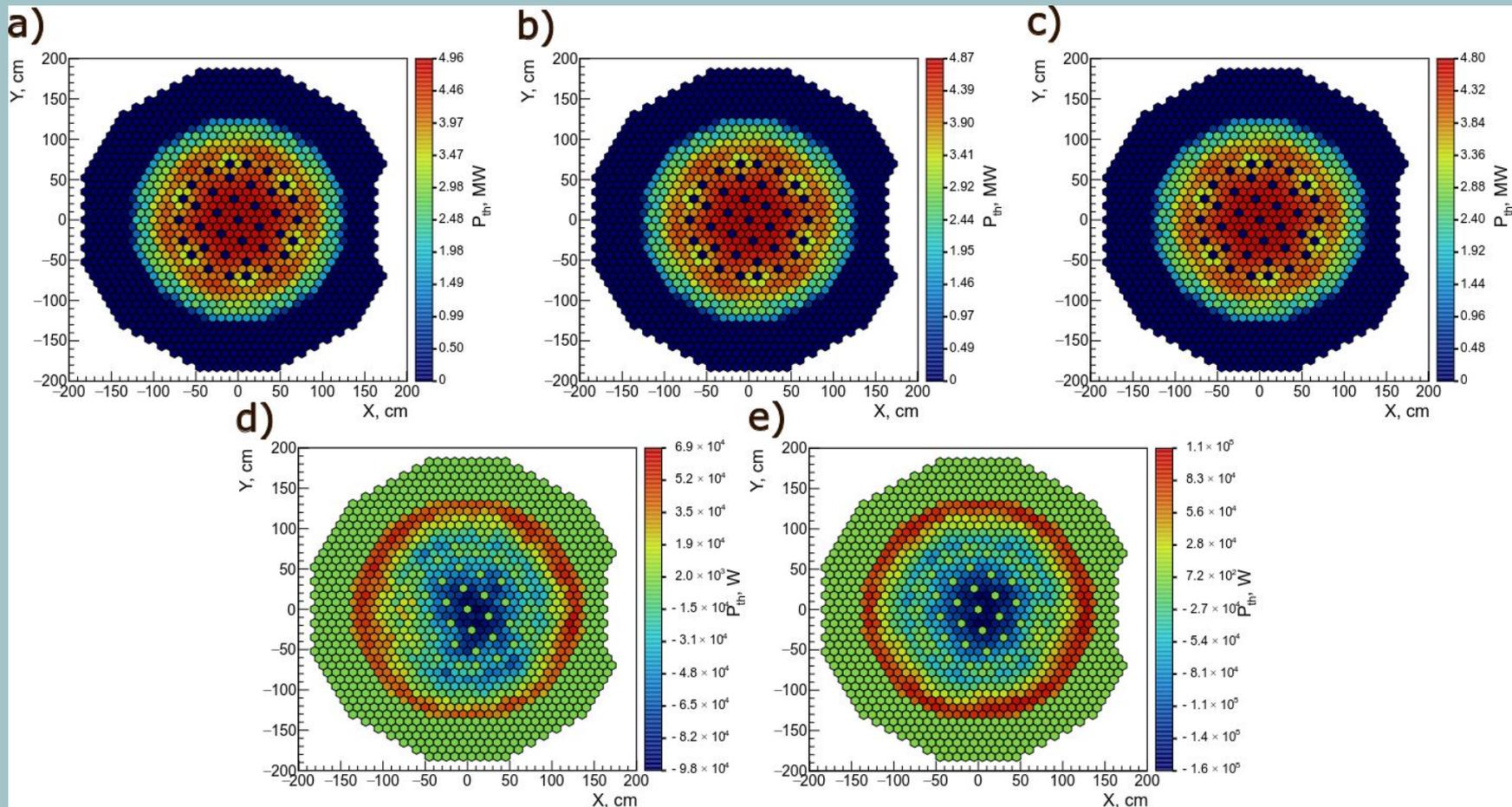
Спектры антинейтрино от всех четырех делящихся изотопов вычисляются посредством суммирования спектров от всех продуктов его деления с учетом их активностей и схем распада.

- **Модель Курчатовского института (КИ)**

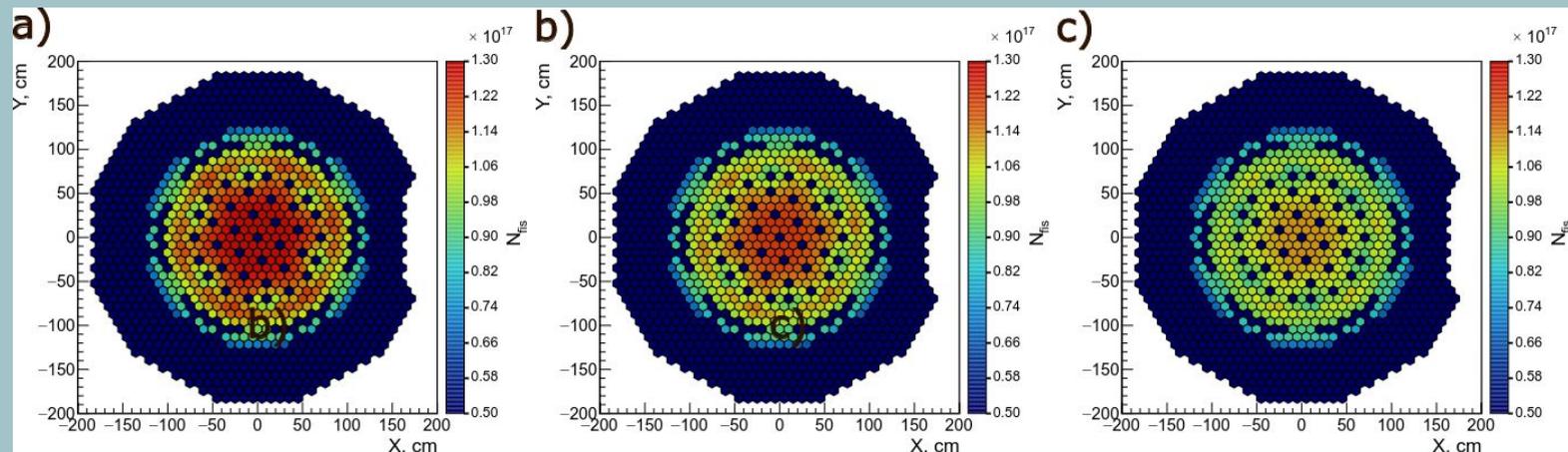
В модели производится пересчет кумулятивных спектров бета-электронов от трёх делящихся изотопов, измеренных в работах ILL (использовался последний пере выпуск их работ ). При этом, с учетом результатов измерений отношения бетаспектров  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  , выполненных в НИЦ КИ, кумулятивные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



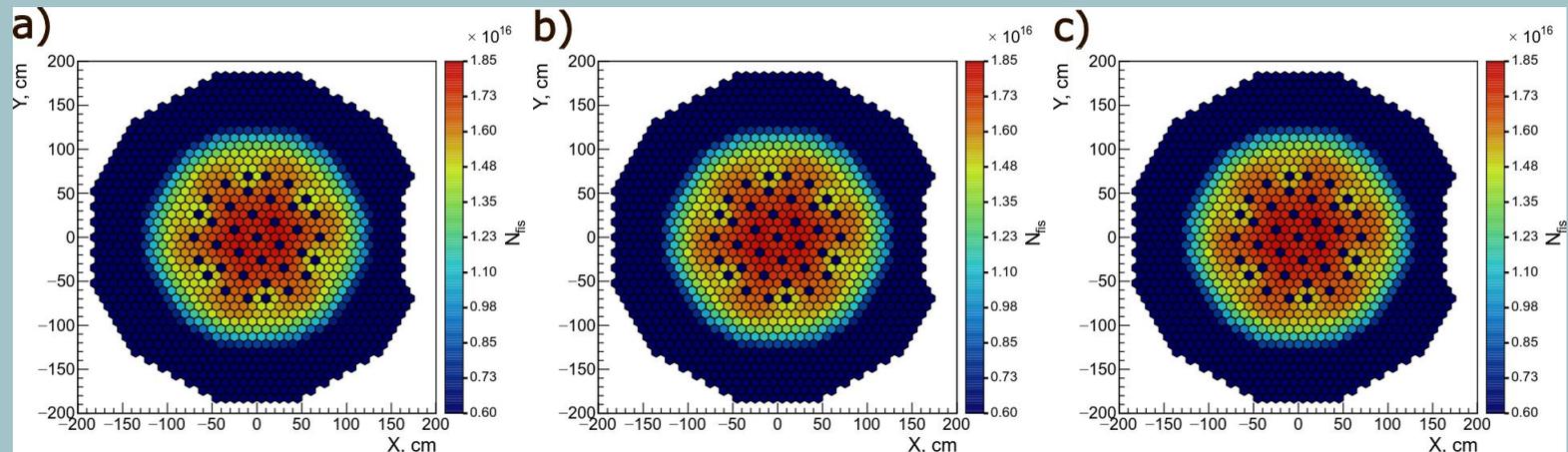
Полный спектр в начале и конце кампании с порога обратного бета распада 1.806 Мэв



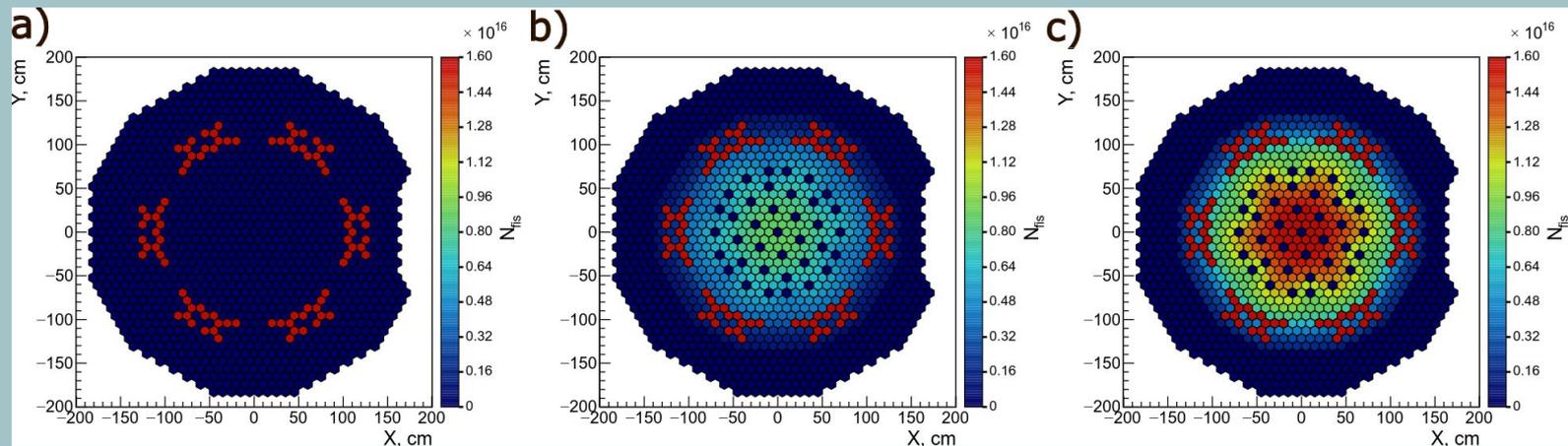
Распределение мощности в плоскости XOY в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, с)– конец кампании, д)– разница между началом и серединой кампании, е)– разница между началом и концом кампании 200– 150– 100– 50– 0



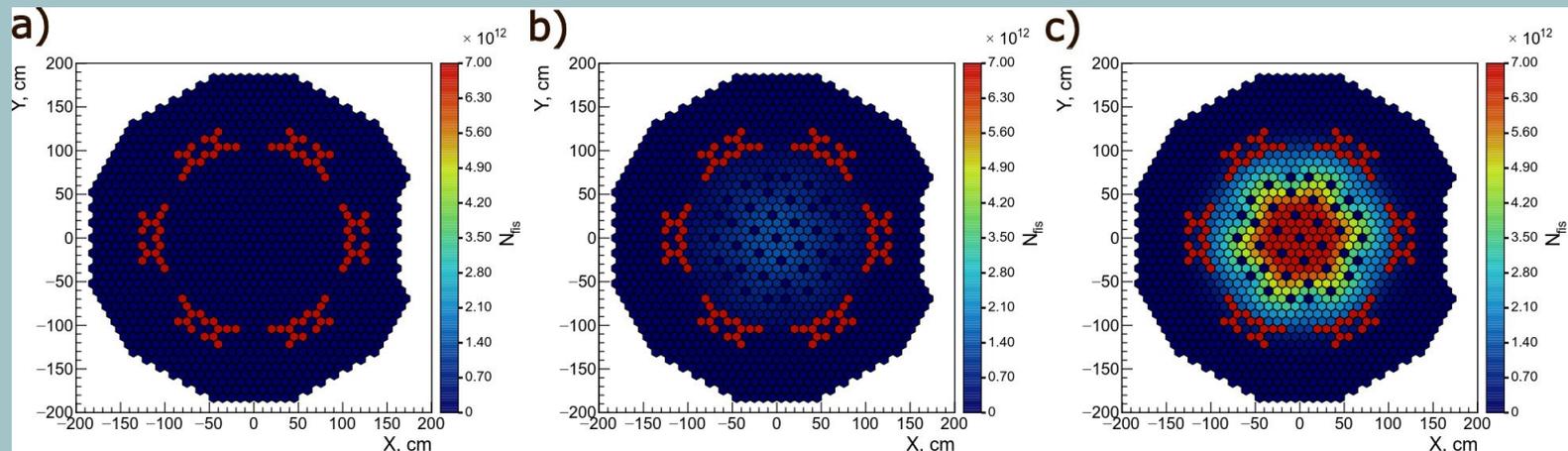
Распределение количества делений  $^{235}\text{U}$  в плоскости  $XY$  в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, с)– конец кампании



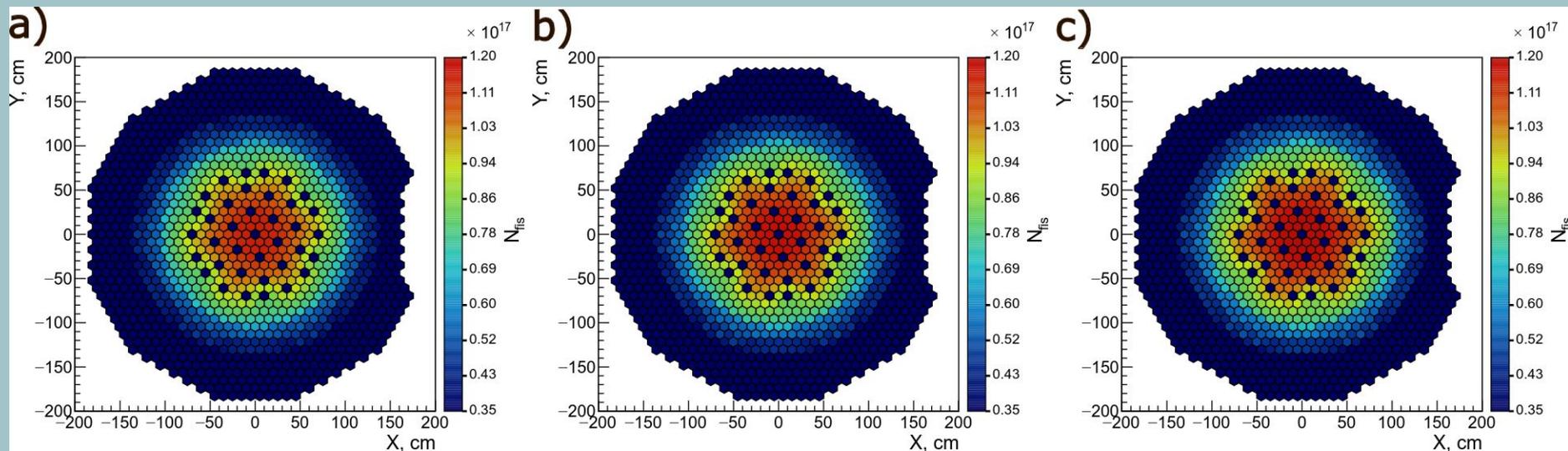
Распределение количества делений  $^{238}\text{U}$  в плоскости  $XY$  в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, с)– конец кампании



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



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



**Распределение количества реакций ( $n, \gamma$ ) в плоскости  $XOY$  в разные моменты кампании а)– начало кампании, б)– середина кампании, с)– 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  $i$ .