

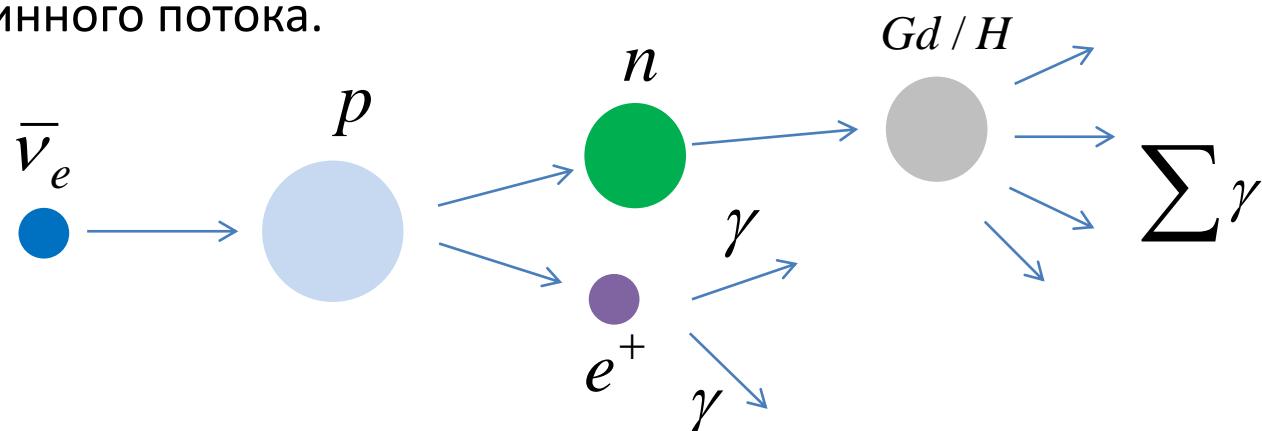
Влияние учета детальной геометрии активной зоны на поток антинейтрино от реактора ВВЭР-1000

Жутиков Иван, группа А23-121

Научный руководитель: к.ф.-м.н., Литвинович Е.А.

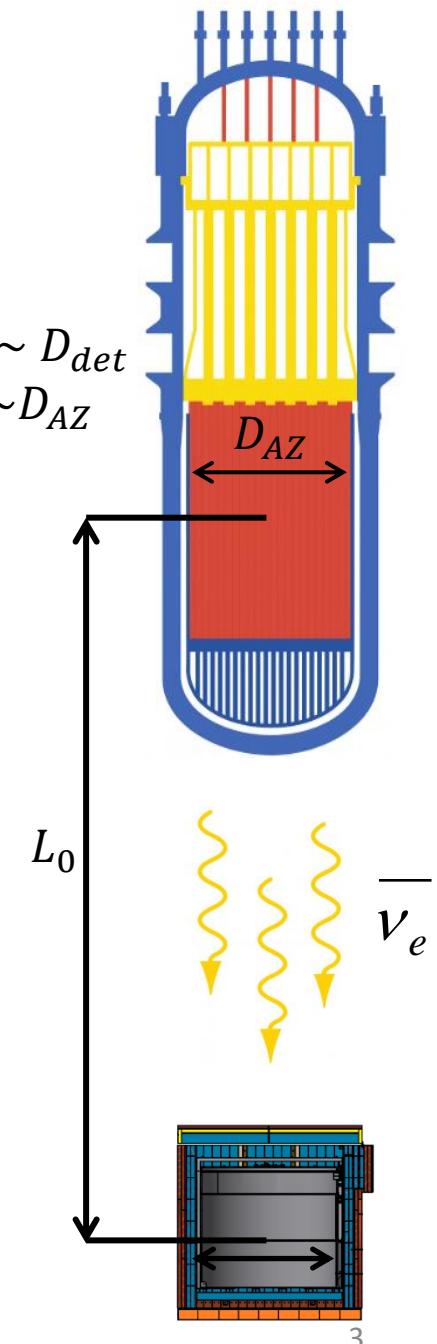
Введение

- В настоящее время проводится множество нейтринных экспериментов на АЭС (iDREAM, DANSS, PROSPECT-II, ТАО и многие другие). Высокий поток $\bar{\nu}_e$ от промышленных реакторов существенно упрощает регистрацию: используется обратный β -распад $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, позволяющий восстанавливать энергию и изучать спектр $\bar{\nu}_e$.
- Такие измерения решают как прикладные задачи (мониторинг реактора, контроль плутония) так и фундаментальные (поиск стерильных нейтрино), но требуют точной реакторной модели: поля мощности, изотопных долей и их эволюции в кампании. В работе рассматривается ВВЭР-1000 как удобная площадка для точных исследований антинейтринного потока.



Мотивация

- Современные эксперименты часто проводятся на малых расстояниях от активной зоны (АЗ), например, поиск осцилляций в стерильное состояние, основанный на сравнении с теорией спектров антинейтрино, измеренных на разных расстояниях. Современные ограничения на параметры осцилляций (Δm^2_{14} и $\sin^2 2\theta_{14}$) требуют размещения детектора на малых расстояниях от центра АЗ.
- Для реактора ВВЭР-1000 (высота 3,7 м, диаметр 3,16 м) такие расстояния (~10–20 м) сопоставимы с размерами активной зоны. Поэтому необходимо учитывать детальную геометрию, распределение мощности и изотопного состава в активной зоне.
- В работе исследуется влияние этих факторов на поток и спектр антинейтрино реактора ВВЭР-1000.



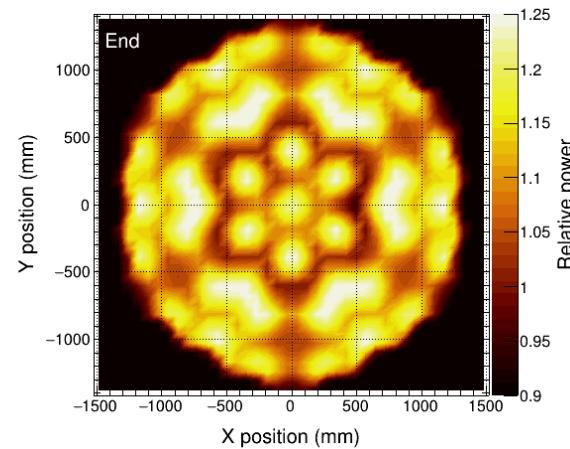
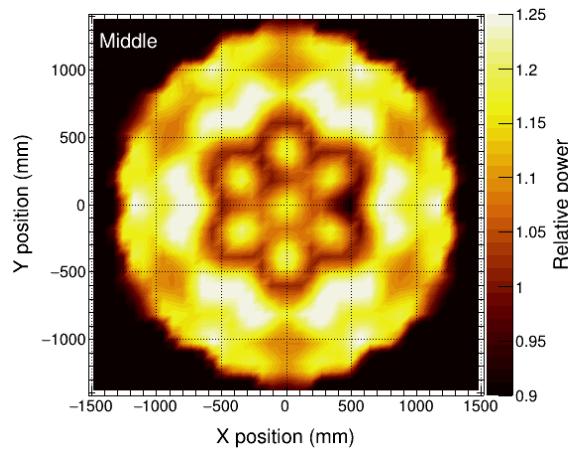
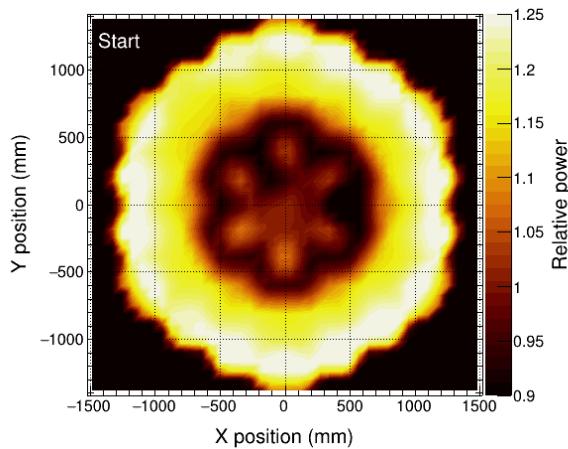
Моделирование кампаний реактора

- Для расчёта потоков антинейтрино использованы детальные симуляции 13-й и 14-й топливных кампаний 3-го блока Калининской АЭС (ВВЭР-1000 $P_{th} = 3000$ МВт).
- Моделирование было выполнено сотрудниками станции с помощью программ:
 - **БИПР-7А** — трёхмерные нейтронно-физические расчёты выгорания и распределения мощности;
 - **ТВС-М** — определение изменения изотопного состава и долей деления.
- В расчётах использованы реальные данные о тепловой мощности за полный цикл кампаний (~ 510 эффективных суток).
- Определено пространственное распределение долей деления изотопов U^{235} , U^{238} , Ru^{239} , Ru^{241} , различное для свежего и выгоревшего топлива, а также распределение мощности по объёму активной зоны.
- Среднее расхождение между расчётными и измеренными мощностями по данным внутриреакторного контроля составило $\approx 2,8\%$, а погрешность долей деления $\sim 5\%$ (по паспорту программы ТВС-М).

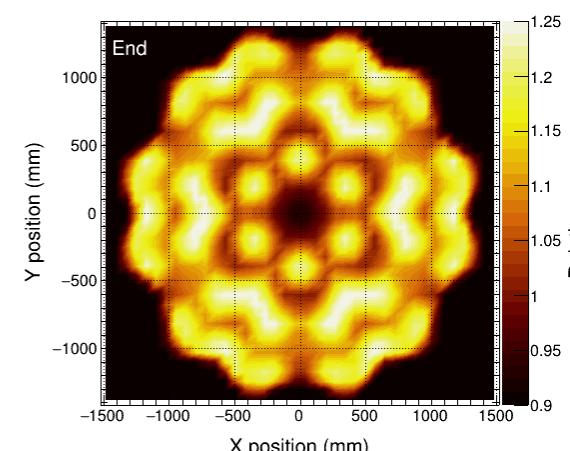
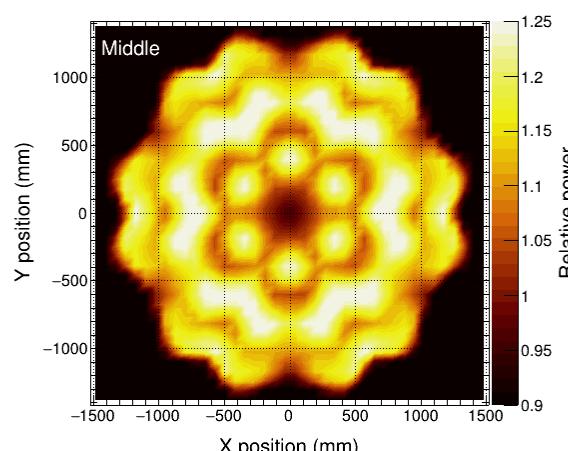
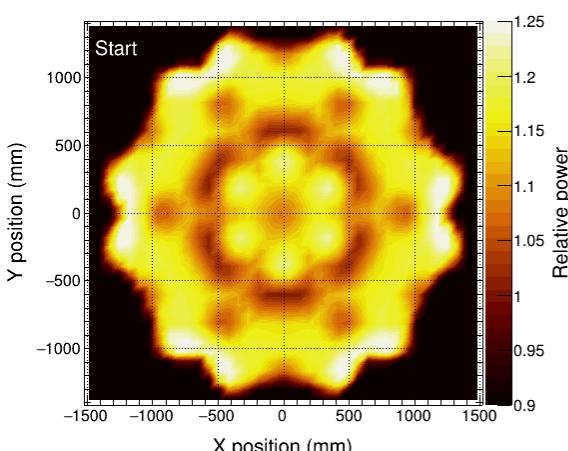
Сравнение распределений энерговыделения по активной зоне для 13-й и 14-й кампаний.

В начале кампаний распределения энерговыделения в активной зоне заметно различаются, но к их завершению эти различия существенно уменьшаются.

13-я кампания



14-я кампания

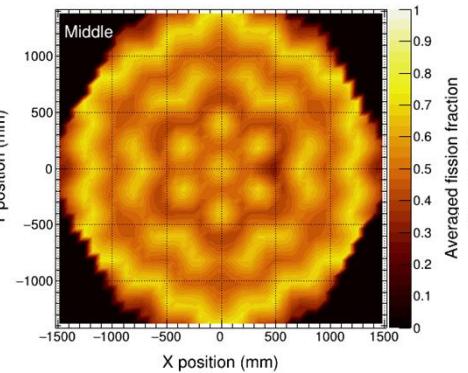


Сравнение распределений долей деления по активной зоне для 13-й и 14-й кампаний.

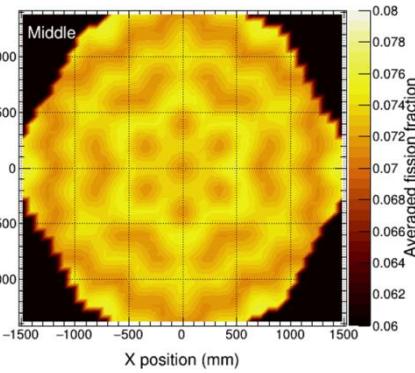
Также наблюдаются различия в распределении долей деления для основных изотопов U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Pu^{241} , однако они выражены слабее, чем различия в распределении энерговыделения.

13-я кампания

U^{235}

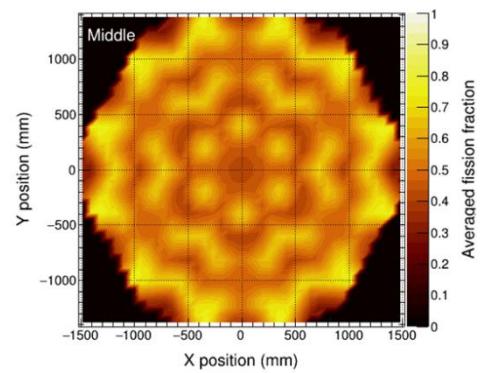


U^{238}

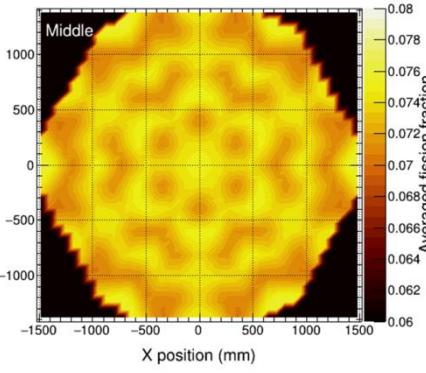


14-я кампания

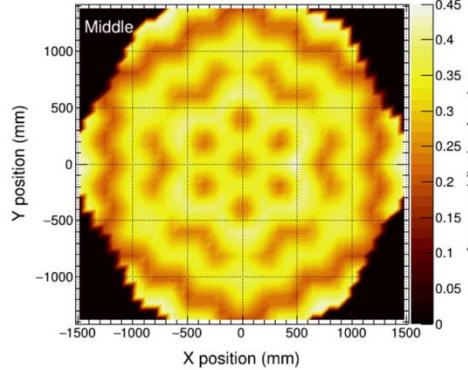
U^{235}



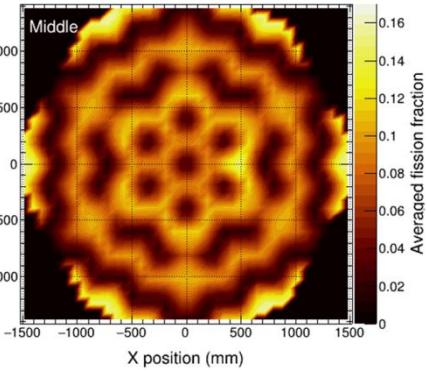
U^{238}



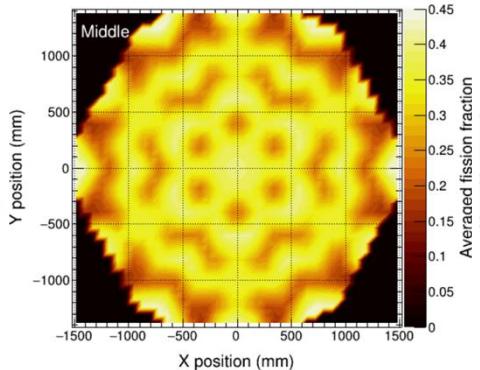
Pu^{239}



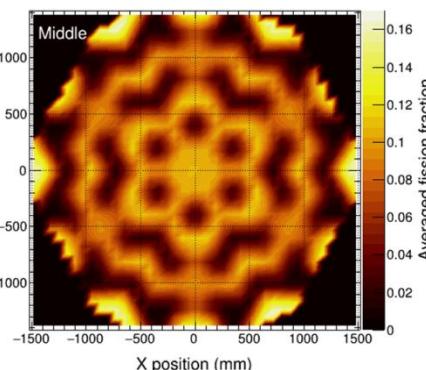
Pu^{241}



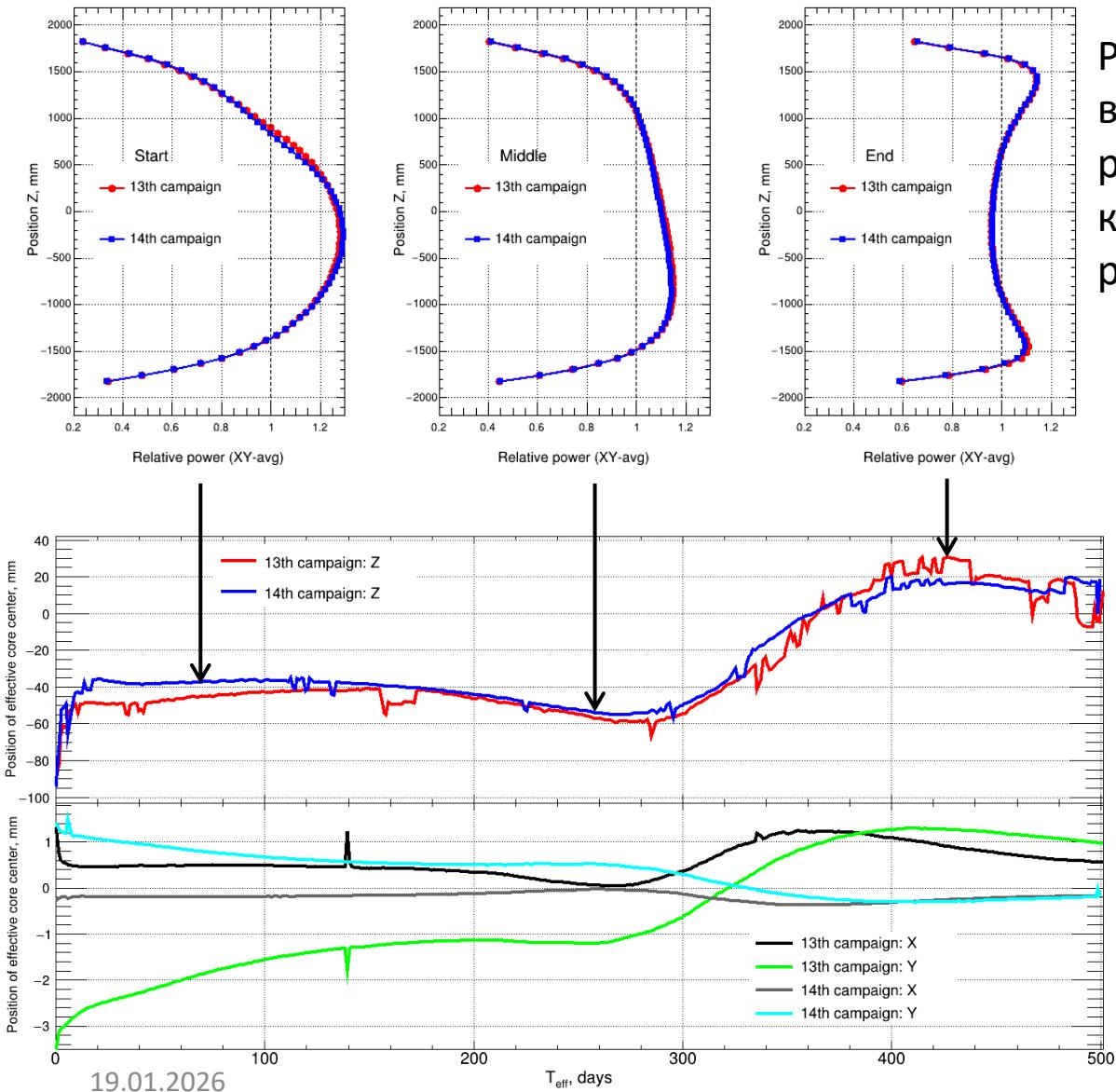
Pu^{239}



Pu^{241}



Эффективный центр энерговыделения



Распределение энерговыделения вдоль оси Z показывает меньшие различия между 13-й и 14-й кампаниями по сравнению с распределением по плоскости XY.

Эффективный центр энерговыделения — это условная точка внутри активной зоны реактора, в которой можно считать сосредоточенным всё суммарное энерговыделение реактора. Его координаты, усреднённые с учётом распределения мощности, практически совпадают для обеих кампаний.

Расчёт потока антинейтрино

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

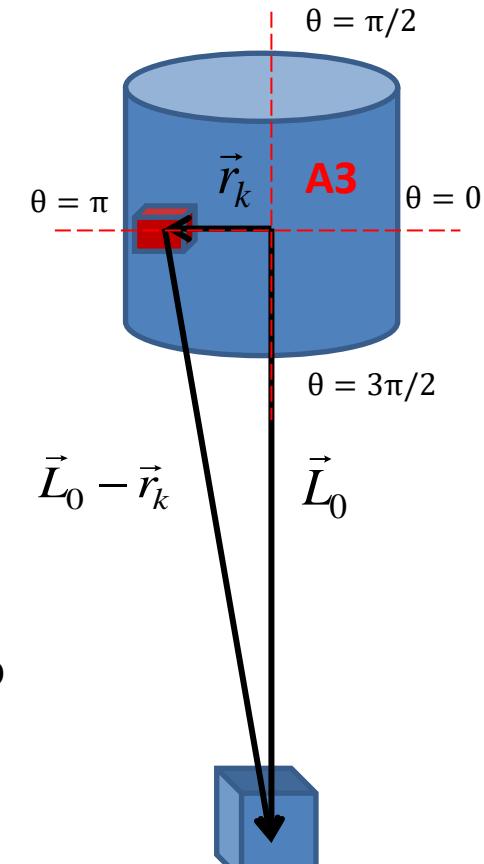
$N_f(t, \vec{r}_k) = \frac{P_{th}(t, \vec{r}_k)}{E_f(t, \vec{r}_k)}$ — число делений в элементе активной зоны;

$E_f(t, \vec{r}_k) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}_k) E_i$ — средняя энергия, приходящийся на одно деление;

$S_f(t, \vec{r}_k, E_{\bar{\nu}}) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}_k) S_i(E_{\bar{\nu}})$ — спектр антинейтрино, приходящийся на одно деление;

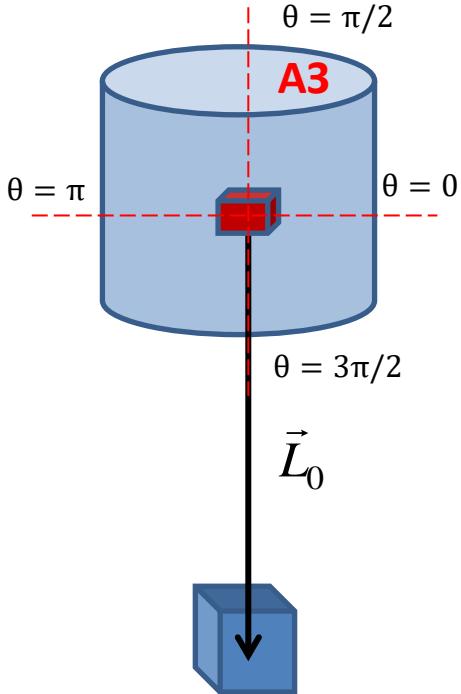
\vec{L}_0 и \vec{r}_k — расстояние до центра АЗ, и расстояние от центра АЗ до соответствующего элемента АЗ

$P_{th}(t, \vec{r}_k)$ — тепловая мощность реактора;



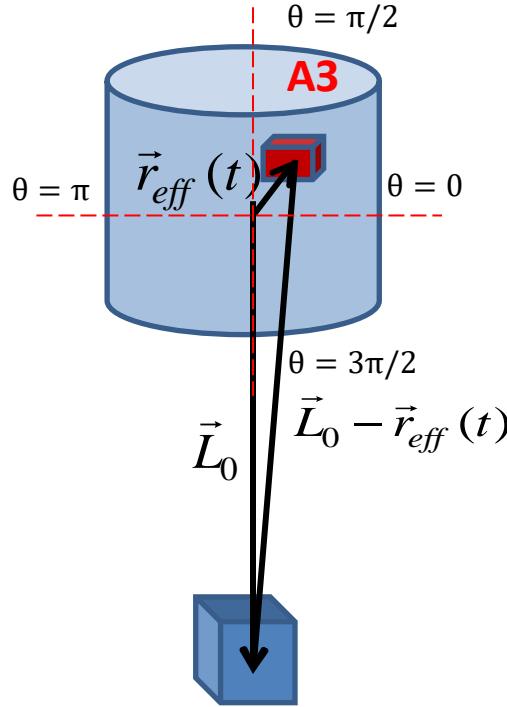
Нейтринный
детектор

Модели для расчёта потока антинейтрино



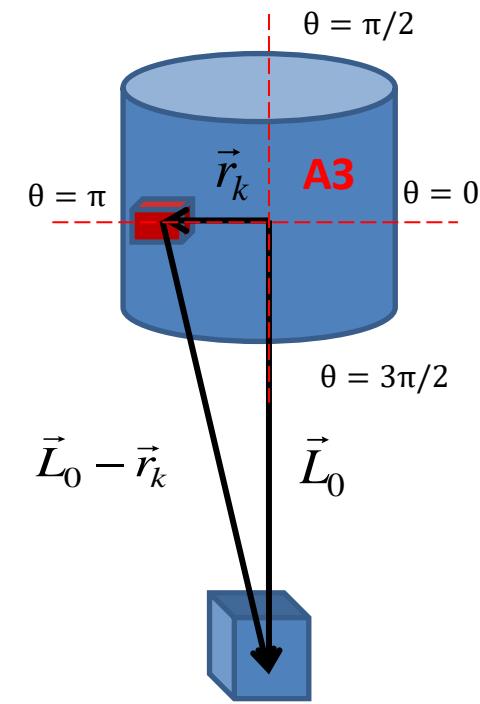
Нейтринный детектор

Стационарный точечный центр АЗ (СЦ): Вся активная зона считается точечным источником в геометрическом центре.



Нейтринный детектор

Динамический точечный центр АЗ (ДЦ): Активная зона рассматривается как точечный источник, положение которого во времени совпадает с эффективным центром энерговыделения.

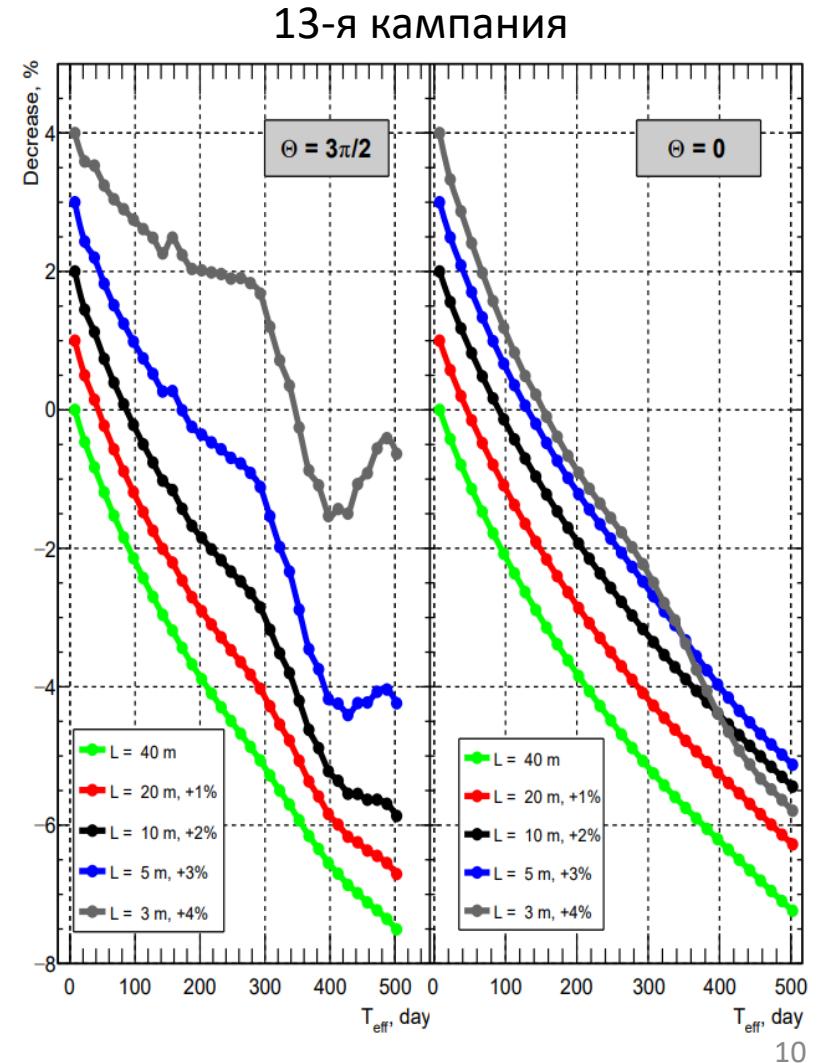
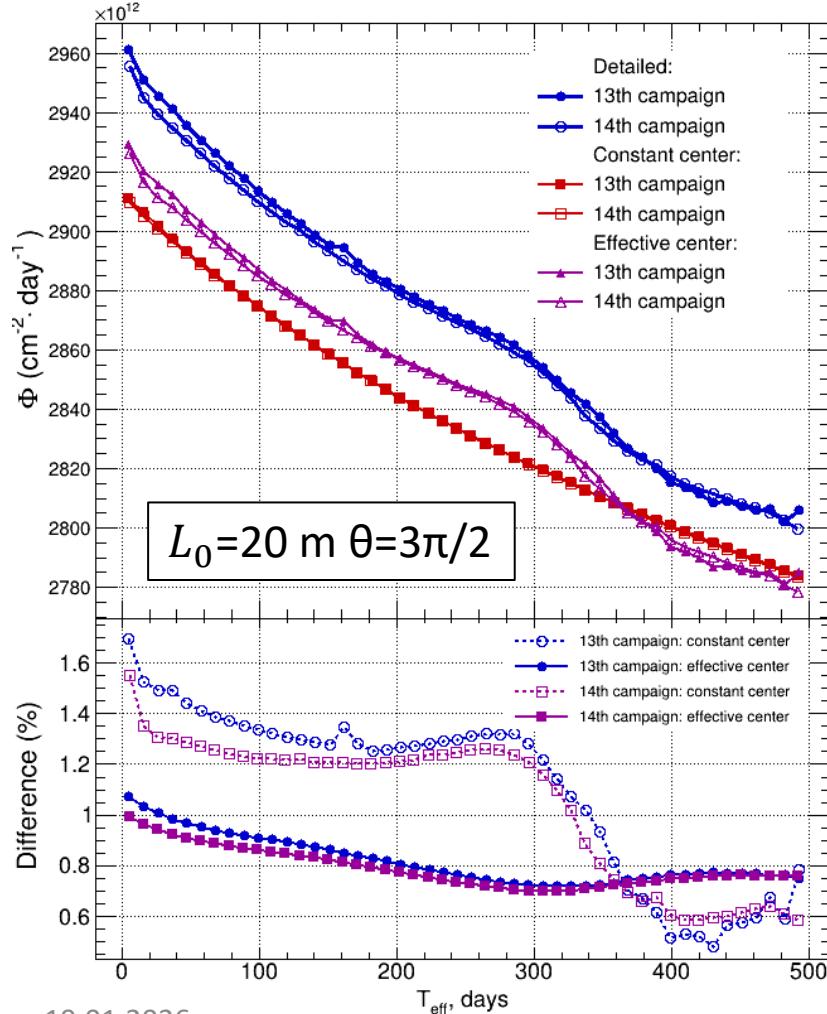


Нейтринный детектор

Детальная трёхмерная модель: активная зона рассматривается как протяжённый источник; поток антинейтрино рассчитывается от каждого элемента с учётом его индивидуальных характеристик.

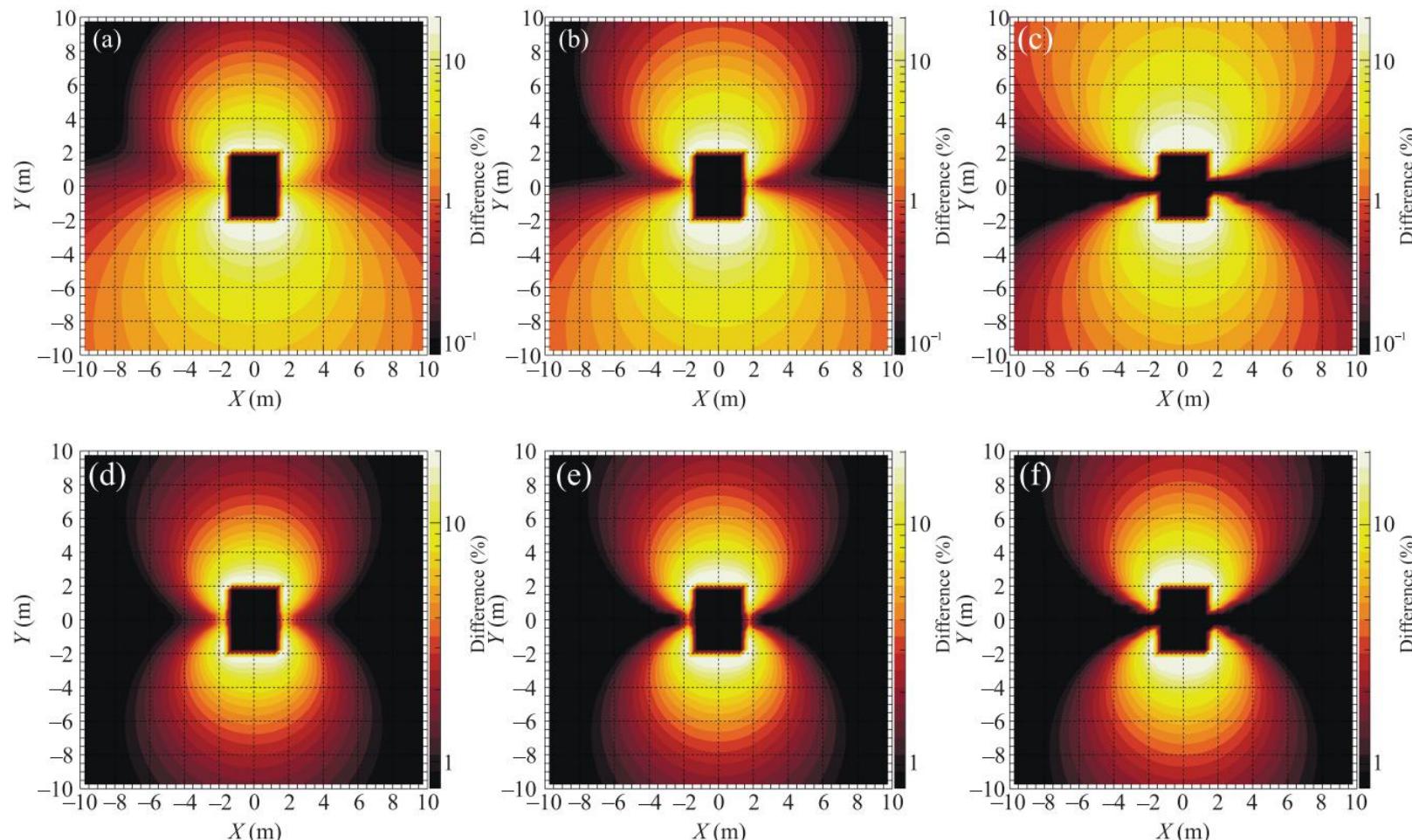
Результат расчёта потока антинейтрино

Потоки антинейтрино для двух топливных кампаний оказываются практически совпадающими, несмотря на различия в распределении изотопов и мощности по объёму активной зоны. Разница между детальной и упрощёнными моделями составляет $\sim 1,5\%$.



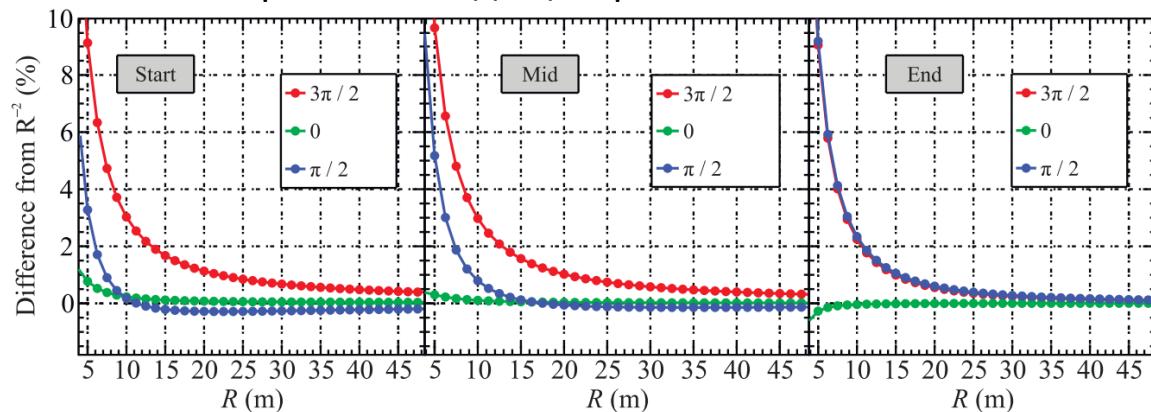
Отклонение потока антинейтрино от модели точечного источника на близких расстояниях к АЗ

Вблизи активной зоны наблюдается выраженная анизотропия потока антинейтрино. На графиках показана разность между детальным расчётом и упрощёнными моделями (СЦ, ДЦ) в зависимости от координаты в вертикальной плоскости XOZ для различных стадий кампании: (а, д) — начало, (б, е) — середина, (с, ф) — конец.

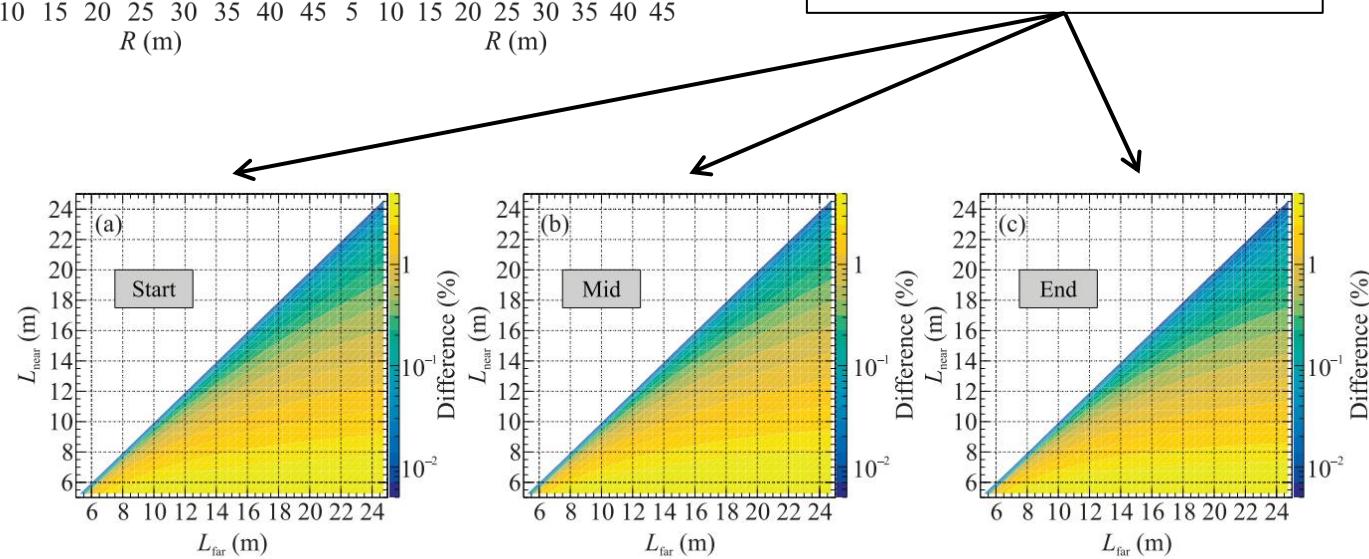
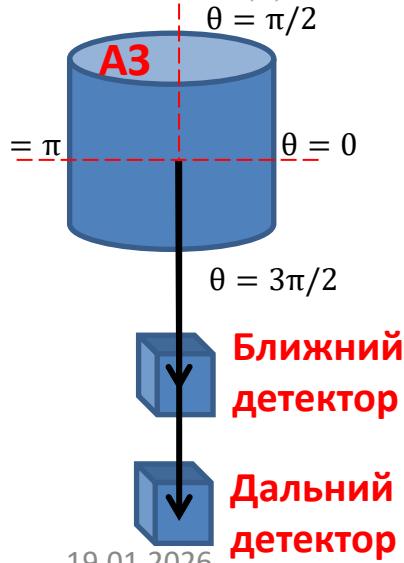


Отклонение потока антинейтрино от модели точечного источника на близких расстояниях к АЗ

Конечные размеры активной зоны приводят к заметным отклонениям потока антинейтрино и отношения скоростей счёта на разных расстояниях. На графиках показана разница между детальной моделью и упрощенной моделью с постоянным центром АЗ для различных направлений в зависимости от расстояния до центра АЗ.



Если рассматривать осцилляции, то это также изменяет отношения потоков в ближнем и дальнем детекторе.

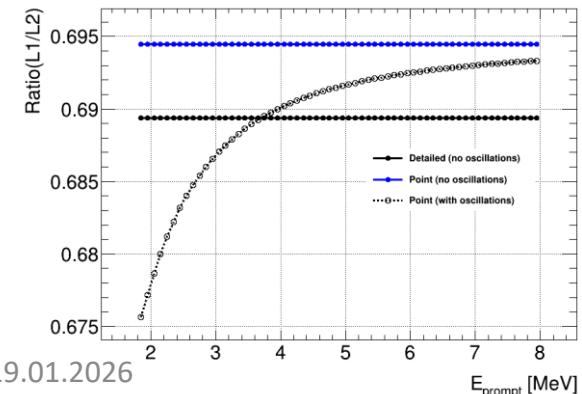
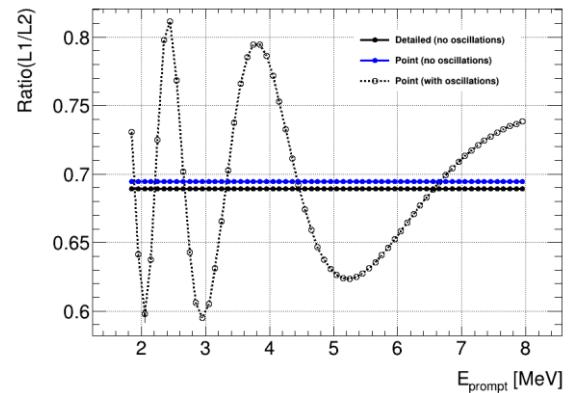


Влияние на параметры осцилляций (если известна только скорость счёта)

$$\chi^2 = \frac{(R_{\text{det}} - R_p^{\text{osc}})^2}{R_{\text{det}}}$$

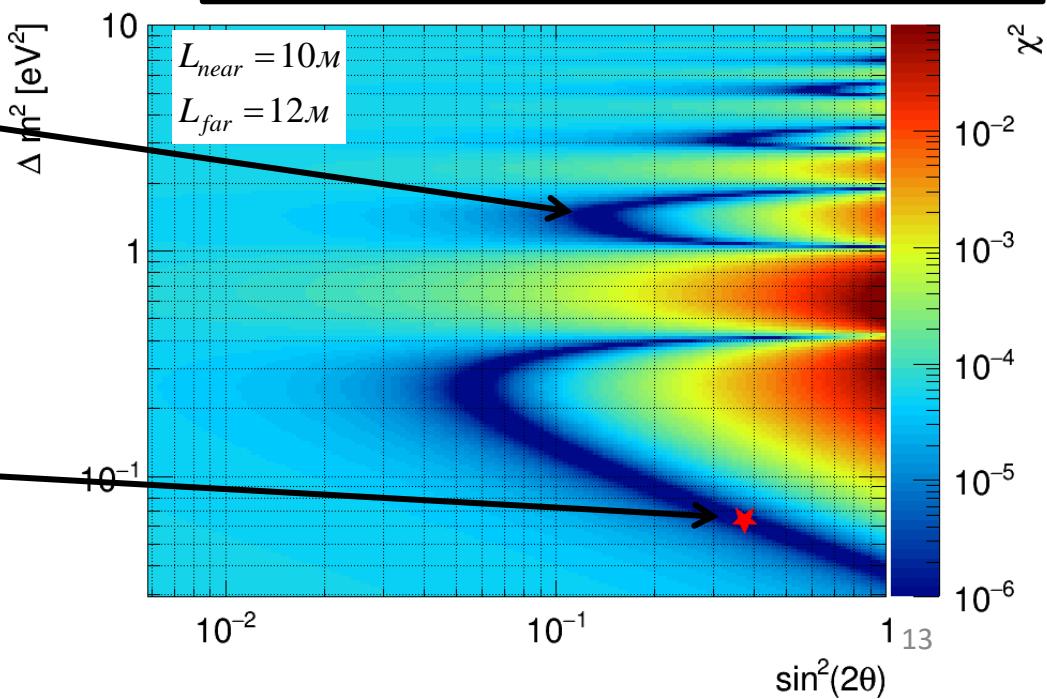
R_{det} - отношение скоростей счёта в ближнем и дальнем детекторах для детального расчёта

R_p^{osc} - отношение скоростей счёта в ближнем и дальнем детекторах для СЦ с учётом осцилляций



Если детектор фиксирует только полную скорость счёта, без энергетического спектра, возможны ложные соответствия параметров осцилляций.

В некоторых областях параметров осцилляции (Δm^2_{14} и $\sin^2 2\theta_{14}$) отношение скоростей счёта в ближнем и дальнем детекторах может совпадать, хотя спектральное распределение потоков при этом существенно различается.



Влияние на параметры осцилляций при известном спектре антинейтрино

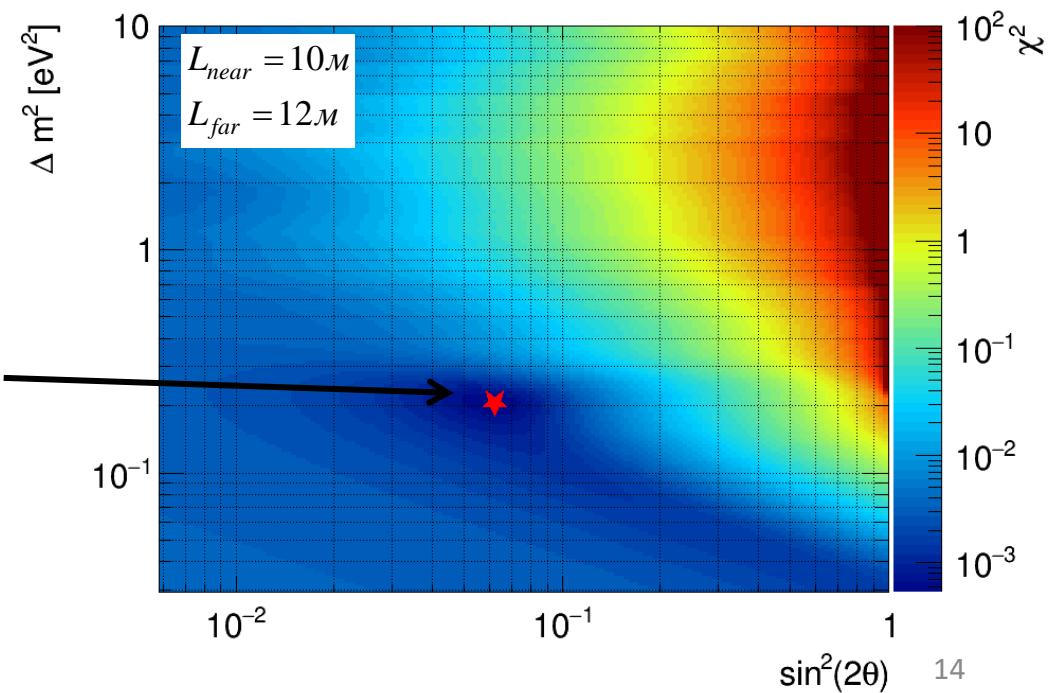
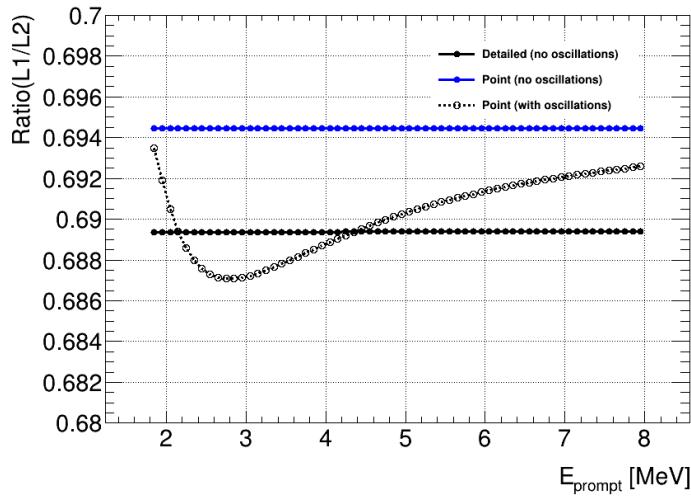
$$\chi^2 = \sum_i \frac{(R_{\text{det}}(E_{\bar{\nu}_e}) - R_p^{\text{osc}}(E_{\bar{\nu}_e}))^2}{R_{\text{det}}(E_{\bar{\nu}_e})}$$

Где сумма берется по всем энергетическим диапазонам i

R_{det} - отношение скоростей счёта в ближнем и дальнем детекторах для детального расчёта для заданной $E_{\bar{\nu}_e}$

R_p^{osc} - отношение скоростей счёта в ближнем и дальнем детекторах для СЦ с учётом осцилляций для заданной $E_{\bar{\nu}_e}$

При не учёте детальной геометрии активной зоны отношение спектров антинейтрино в ближнем и дальнем детекторах может быть смещено, имитируя осцилляции с некоторыми параметрами. Эффект не способен полностью воспроизвести осцилляционную картину, но может смещать оценку параметров осцилляций или усиливать наблюдаемый сигнал, изменяя значение статистического критерия χ^2 .



Заключение

- Потоки антинейтрино для 13-й и 14-й кампаний показывают близкое совпадение, несмотря на различия в распределениях изотопов и энерговыделения по АЗ.
- На малых расстояниях поток заметно отклоняется от точечной модели, а также показывает различие с динамической моделью, учитывающей энерговыделение вдоль оси Z.
- При детальном учёте геометрии активной зоны зависимость потока от расстояния отличается от R^{-2} , что может приводить к смещению оценок параметров осцилляций, хотя сам эффект недостаточен для их полной имитации.

Апробация работы

Публикации:

- Zhutikov I., Litvinovich E., Khvatov V. Effect of the inclusion of the detailed geometry of the reactor core on the calculated antineutrino flux from a VVER-1000 reactor // *JETP Letters*. — 2024. — Vol. 119, No. 3. — P. 158–165.
- Abramov A. *et al.* Antineutrino Signal in the iDREAM Detector at Kalinin NPP // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2023. — Vol. 86, No. 6. — P. 1389–1393.

Конференции:

- Жутиков И. Сигнал от антинейтрино в детекторе iDREAM на Калининской АЭС // Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа: материалы школы. — 2023. — С. 298.
- Жутиков И. Влияние учёта детальной геометрии активной зоны на поток антинейтрино от реактора ВВЭР-1000 // XII Всероссийский молодёжный научный форум с международным участием «Open Science 2025»: материалы (тезисы докладов). — 2025.

Back up

Расчёт погрешностей

В итоговую погрешность потока антинейтрино вносят вклады:

- Погрешности спектров антинейтрино приходящихся на одно деление $\sigma_s = 1.2\%$
- Погрешности энергий выделяющихся при делении одного изотопа $\sigma_E = 0.1\%$
- Погрешность тепловой мощности реактора $\sigma_P = 1.8\%$
- Погрешность расчётов изотопного состава АЗ, погрешности волях деления данных изотопов $\sigma_f = 0.4\%$

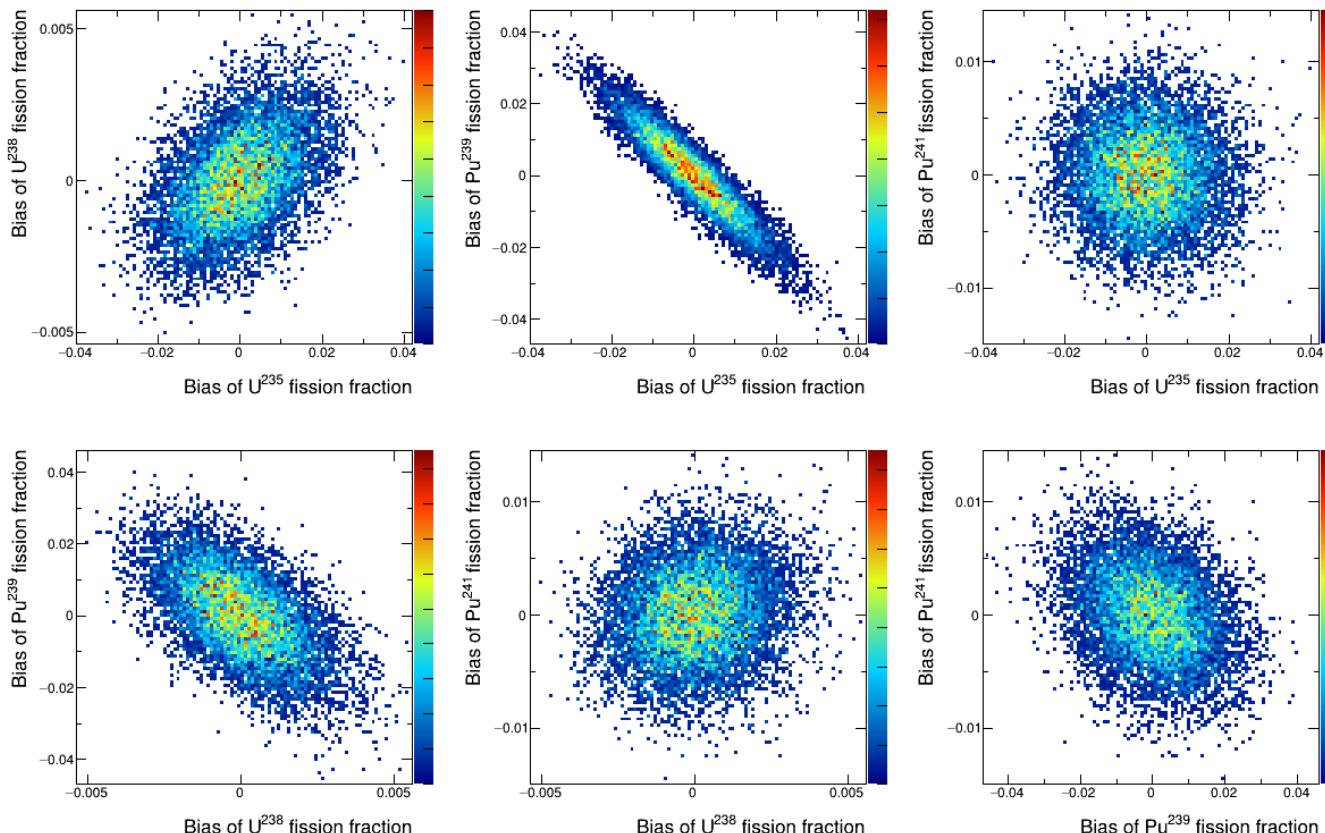
$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_E^2 + \sigma_P^2 + \sigma_f^2} = 2.2\%$$

Расчёт погрешностей

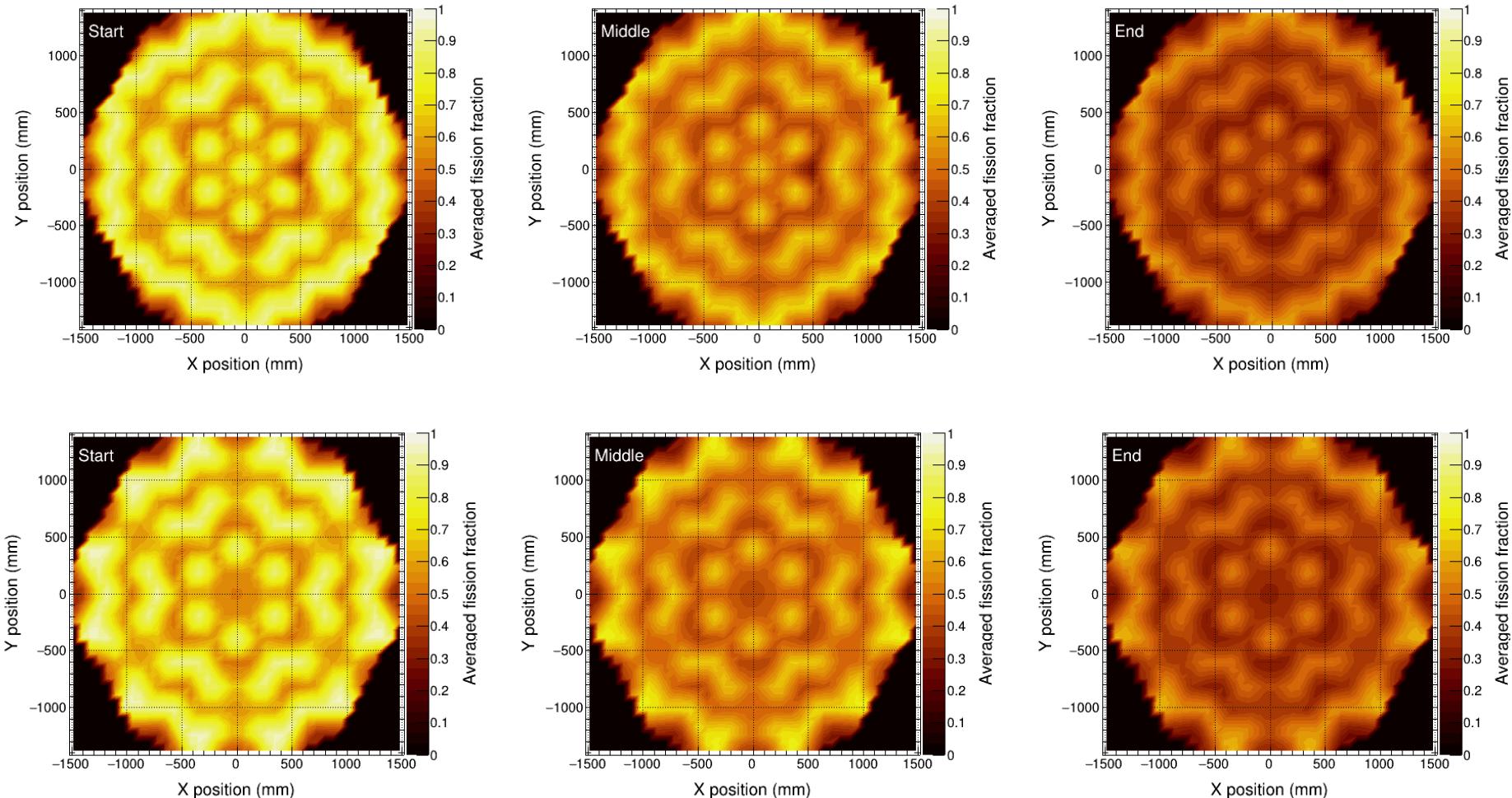
Учет погрешностей вносимых долями деления в общую погрешность производился с учётом их корреляций друг с другом по общим формулам

$$\frac{\delta S}{S} = \frac{1}{S} \sqrt{\sum_{i,j} \frac{\partial S}{\partial f_i} \frac{\partial S}{\partial f_j} \delta f_i \delta f_j \rho_{i,j}}$$

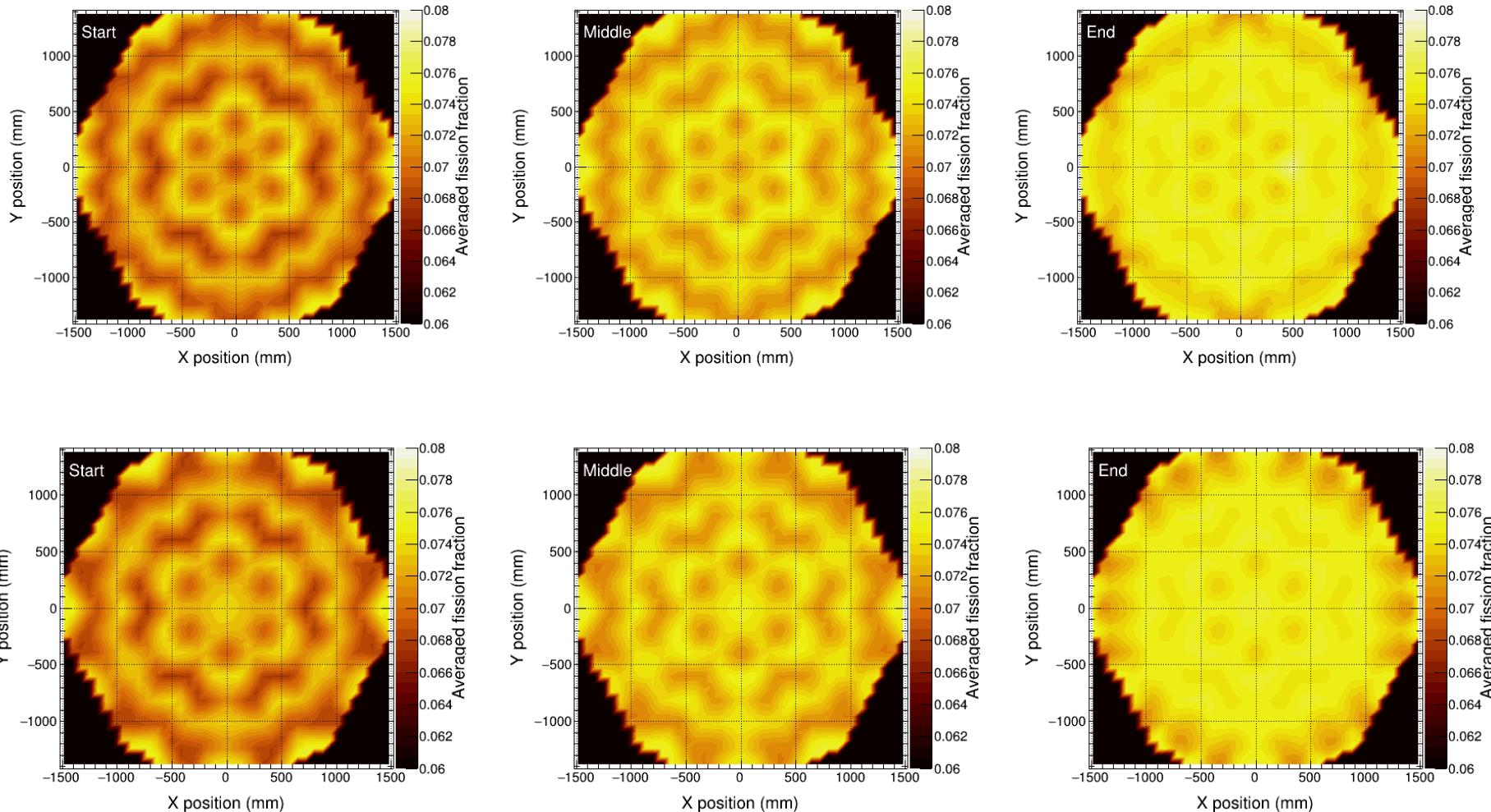
$$\rho_{i,j}(B) = \frac{1}{N-1} \sum_{m=1}^N \left(\frac{f_i^m - \bar{f}_i}{\sigma_i} \right) \left(\frac{f_j^m - \bar{f}_j}{\sigma_j} \right)$$



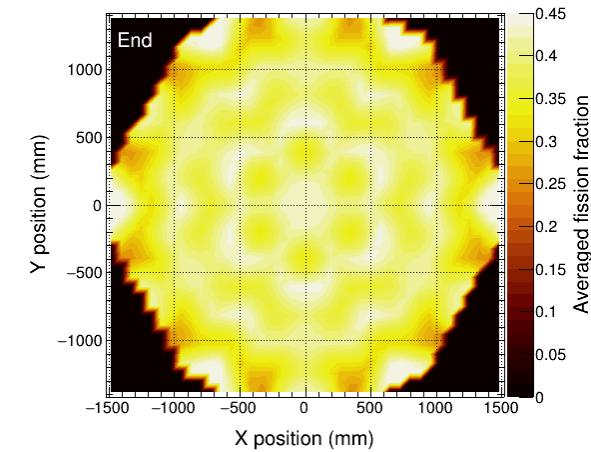
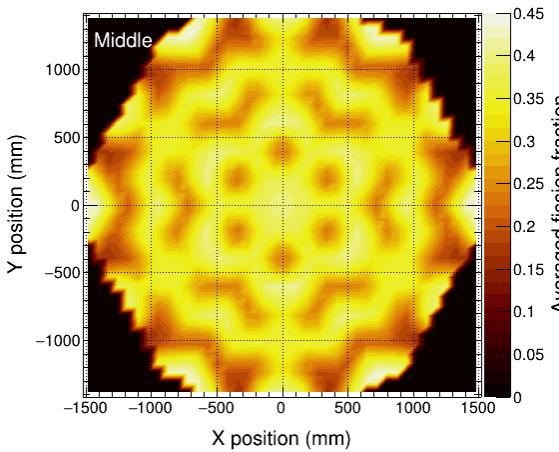
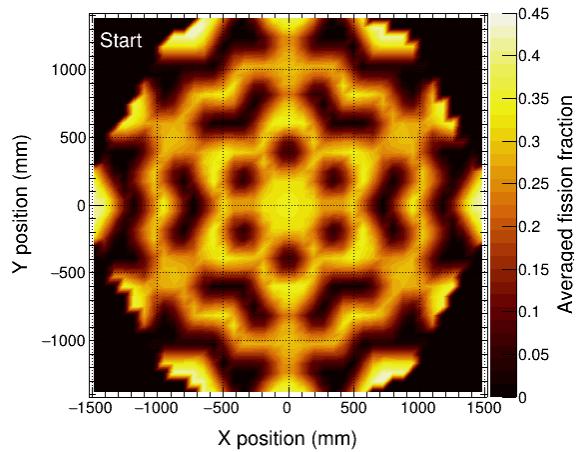
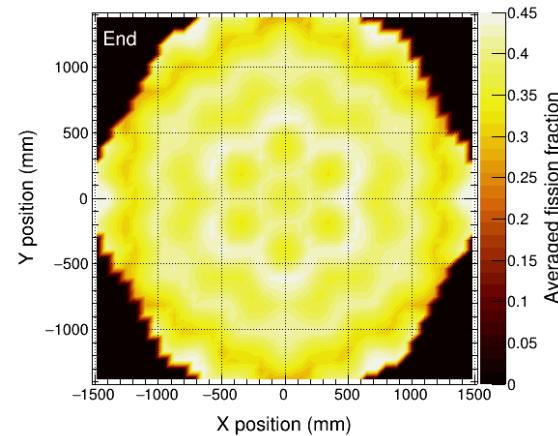
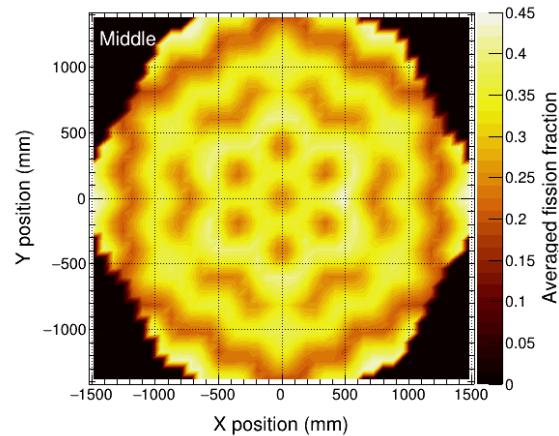
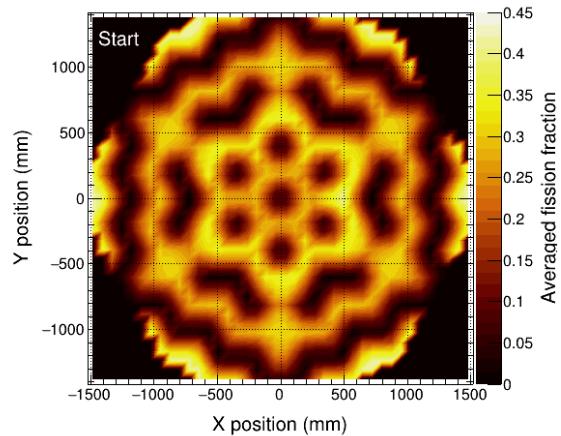
Распределение долей деления для U^{235} для начала середины и конца кампании



Распределение долей деления для U^{238} для начала середины и конца кампании



Распределение долей деления для Ru^{239} для начала середины и конца кампании



Распределение долей деления для Ru^{241} для начала середины и конца кампании

