



Моделирование дрейфа электронов в детекторе РЭД-100

Студент: Кораблев Денис Б22-102

Научный руководитель: Мачулин И.Н.

Научный консультант: к.ф.-м.н. Долганов Г.Д.



Нейтринный детектор РЭД-100

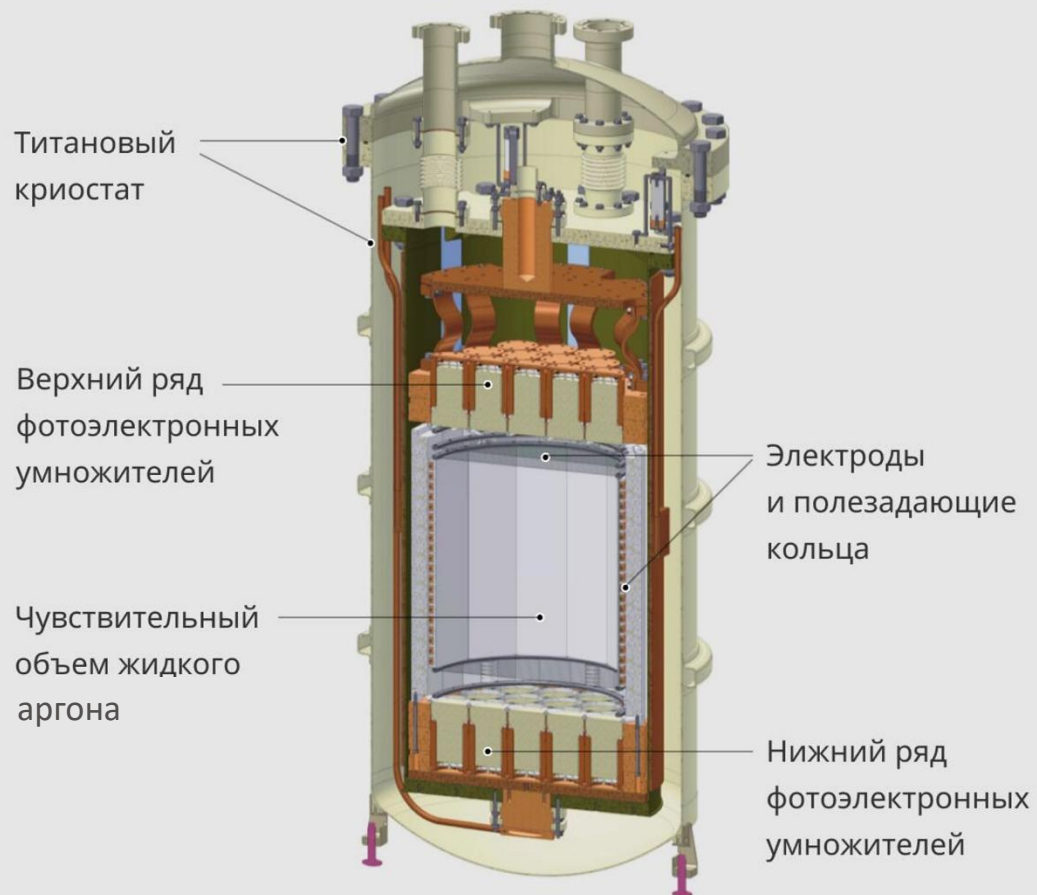


Схема детектора РЭД-100

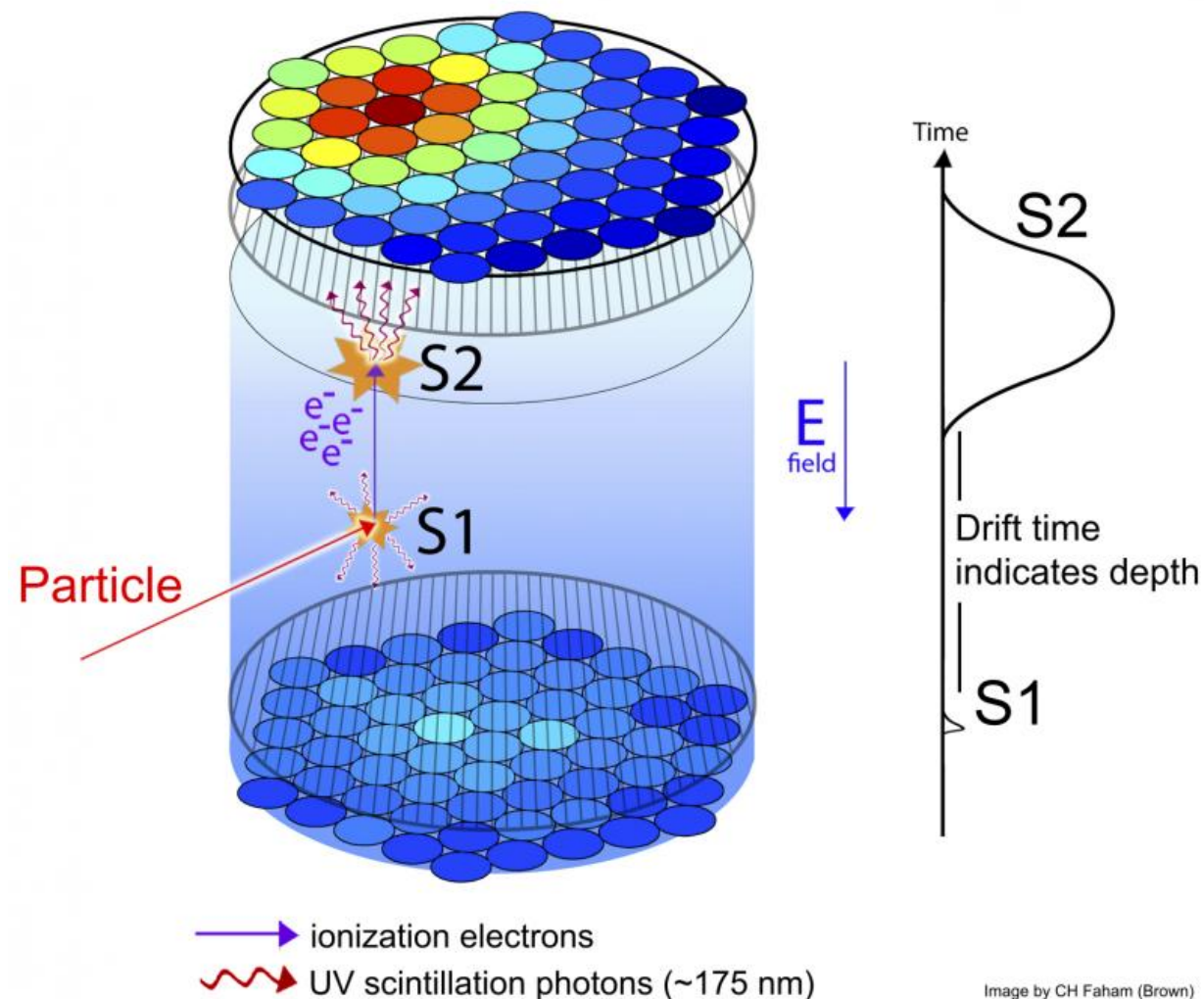


Image by CH Faham (Brown)

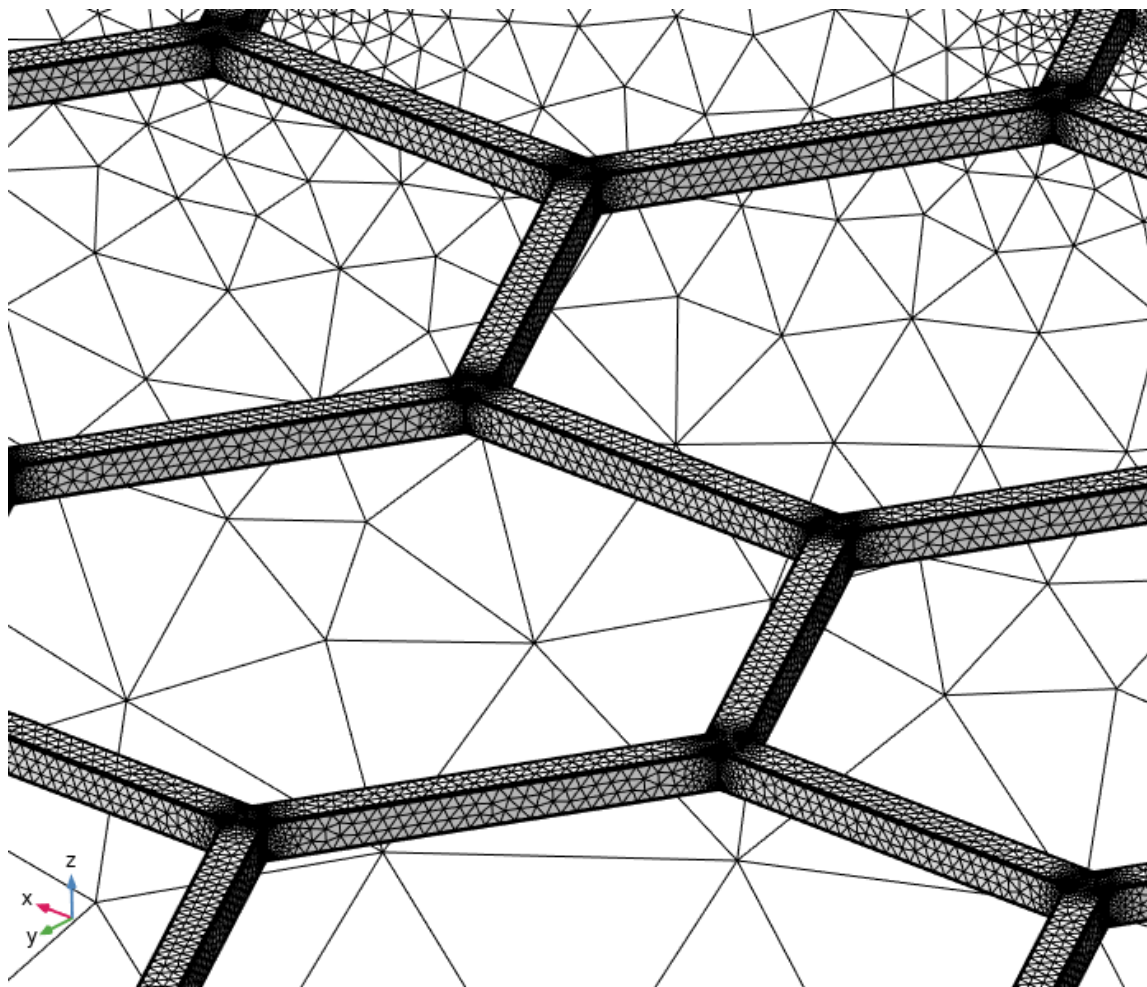
Пример регистрации событий в двухфазных эмиссионных детекторах

Цель данной работы – разработка и применение комплексной численной модели для исследования электрических полей, дрейфа электронов и световыхода электролюминесценции в детекторе РЭД-100.

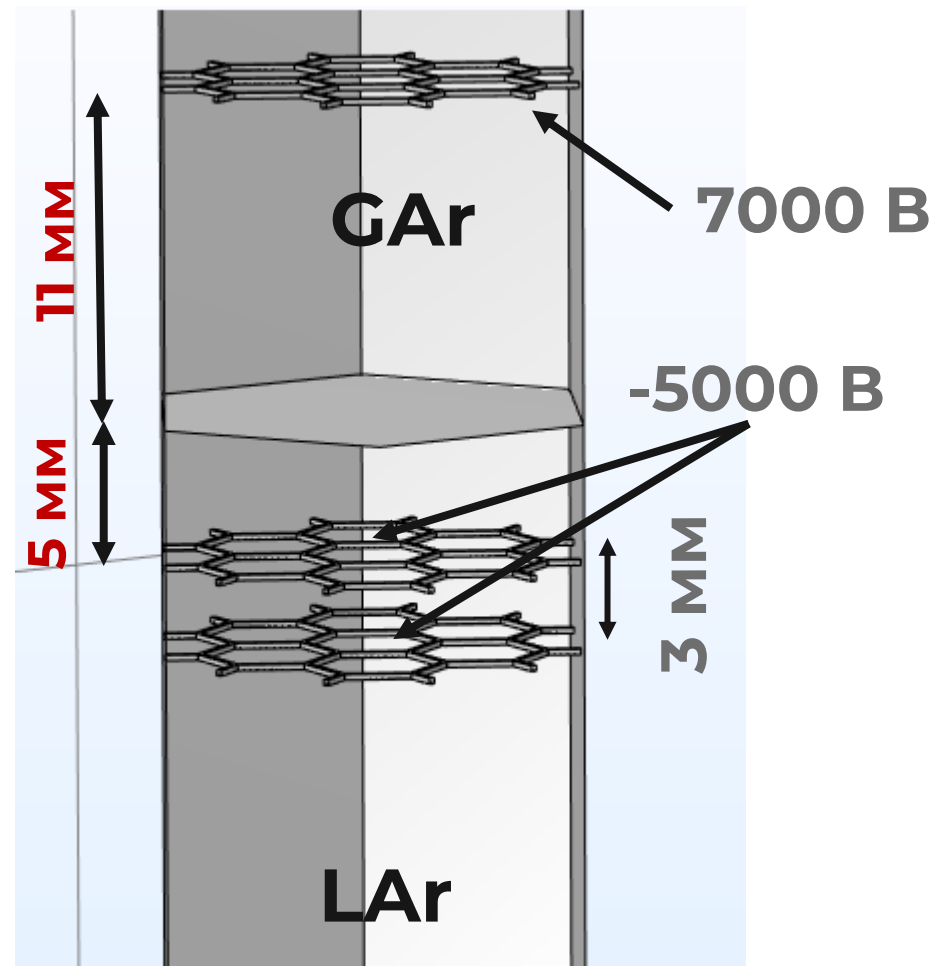
Задачи:

1. Построить трёхмерную модель электрического поля и исследовать влияние конфигурации детектора на распределение поля.
2. Провести моделирование дрейфа электронов в газовой фазе детектора.
3. Рассчитать световыход электролюминесценции для различных начальных координат электронов и уровней жидкого аргона над гейтом.
4. Оценить неоднородность сигнала S_2 и её зависимость от параметров детектора.

Использование ПО COMSOL для моделирования электрического поля

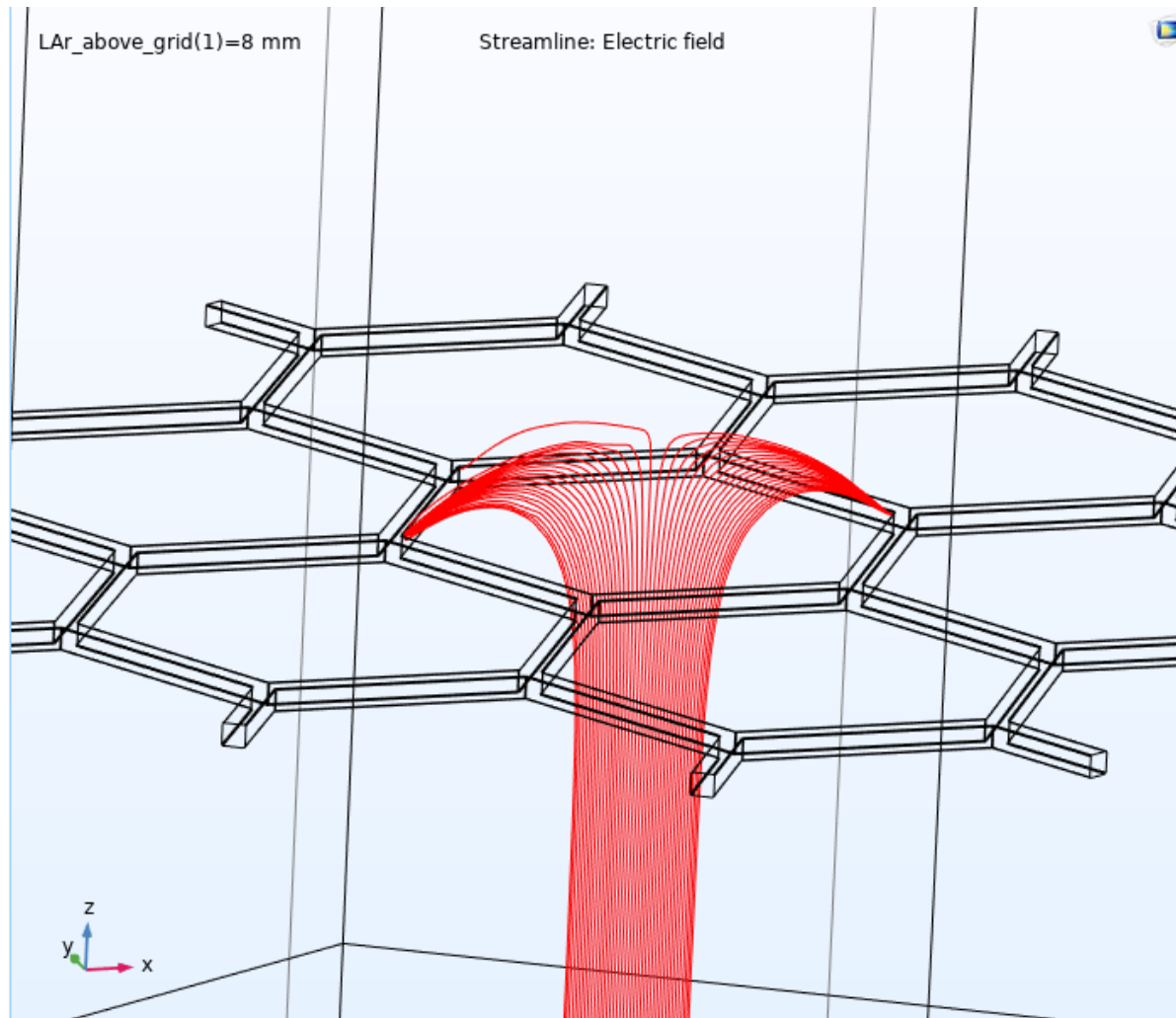


Расчетная сетка для проволоки в детекторе



Геометрия модели

Исследование влияния поля от положения заземленной сетки



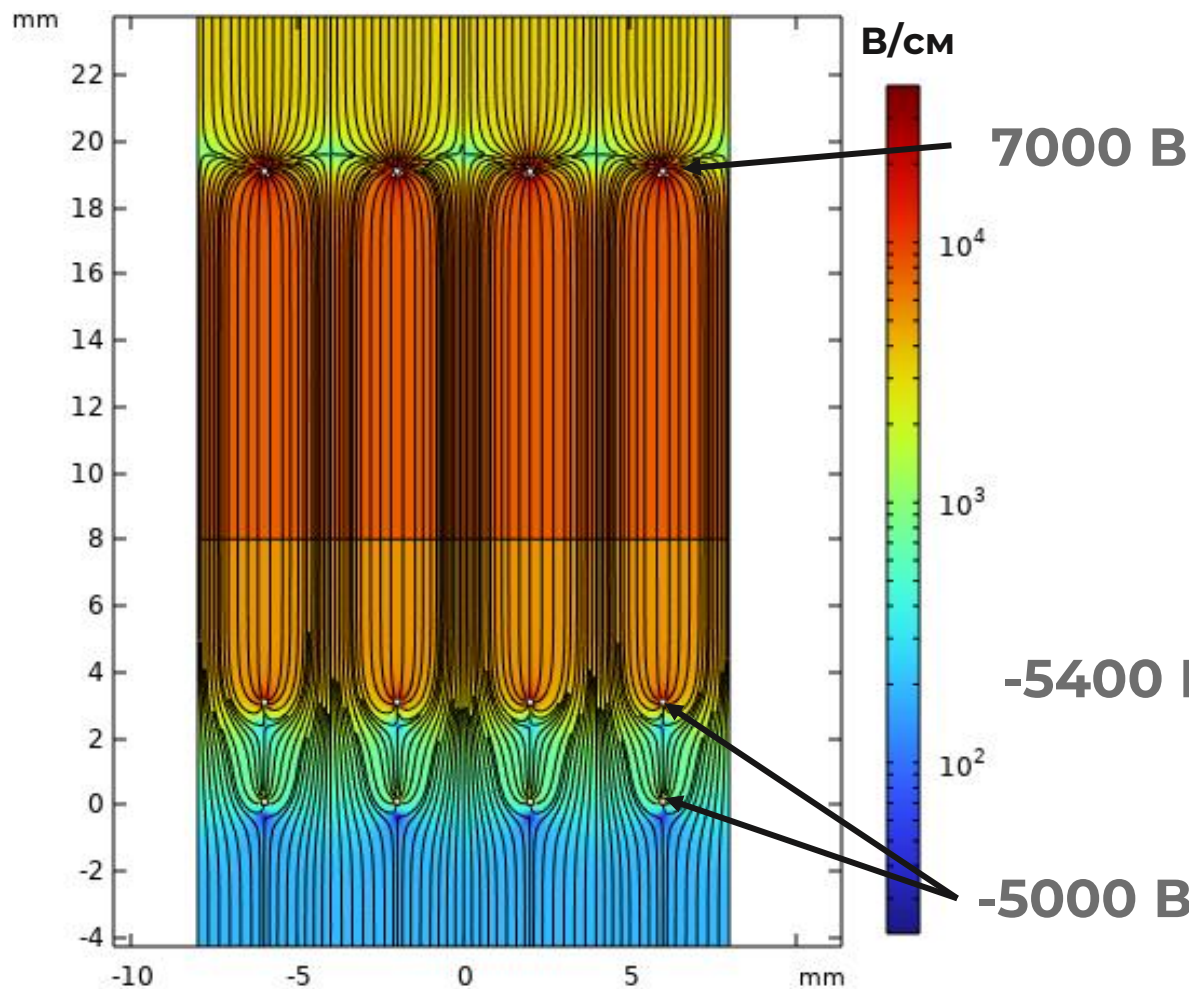
Основные проблемы:

1. Линии электрического поля имеют разную длину, что может приводить к разному световыходу для различных траекторий
2. Электрическое поле вдоль одной траектории может быть сильно неоднородным, что затрудняет расчет световыхода для отдельных электронов

Рис 5. Пример линий напряженности

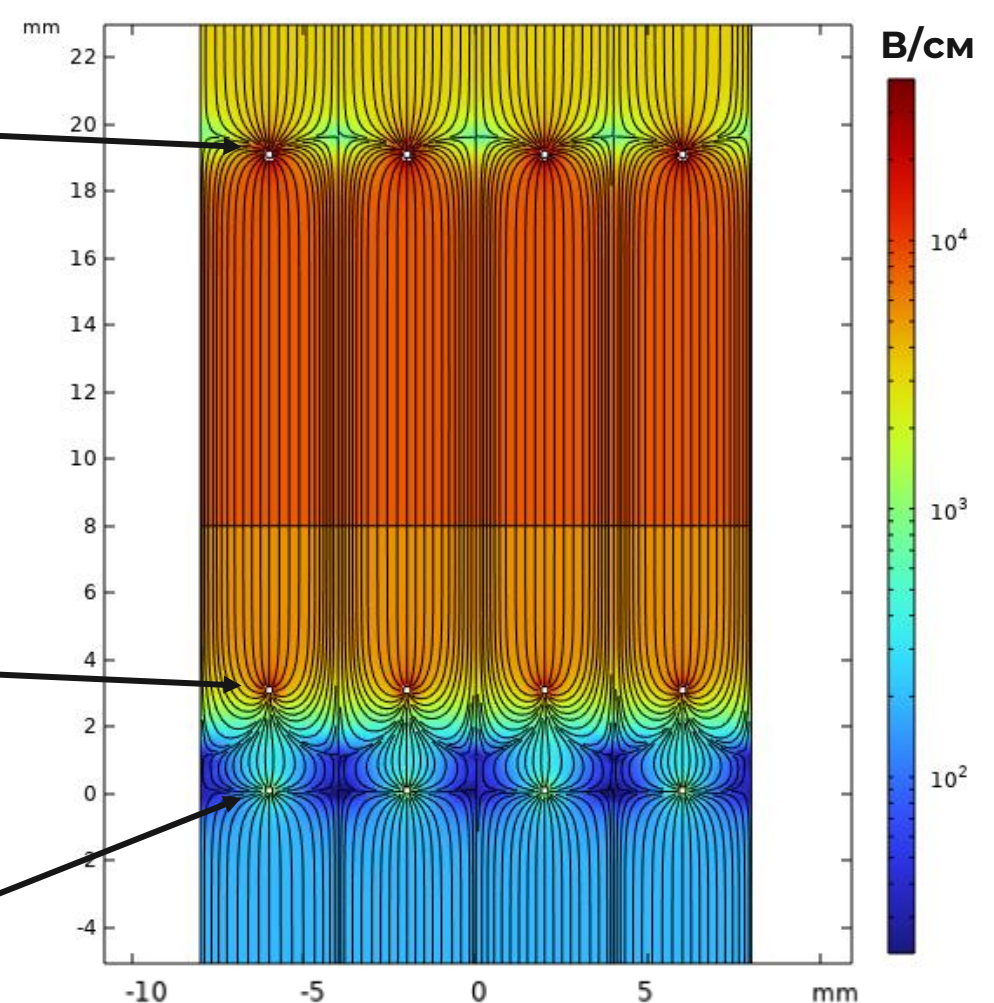
Изменение электрического поля при подаче запирающего напряжения

Напряженность электрического поля (В/см)



Пример электрического поля в разрезе

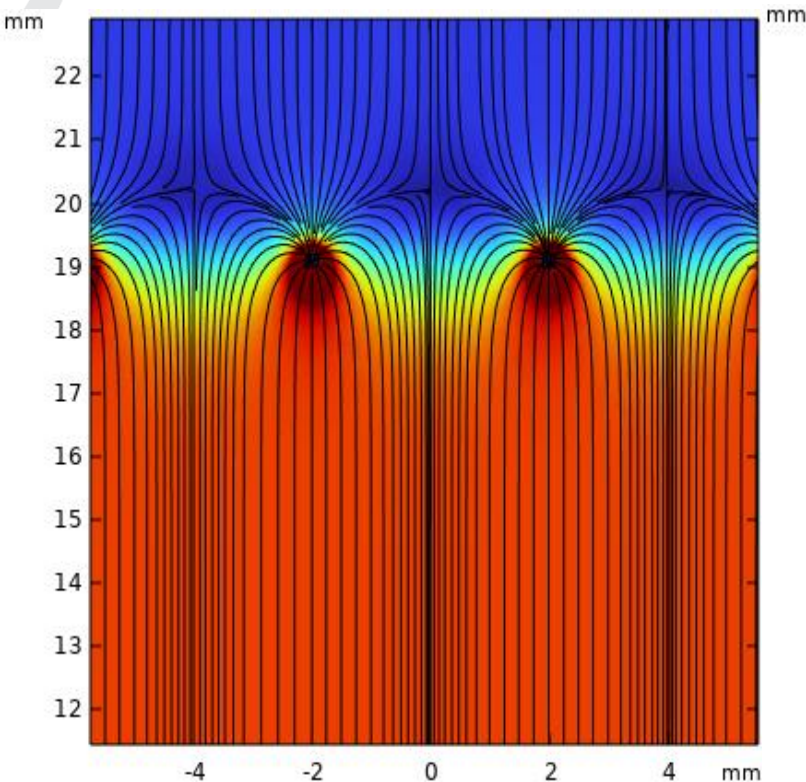
Напряженность электрического поля (В/см)



Пример электрического поля в разрезе с закрытым гейтом 6

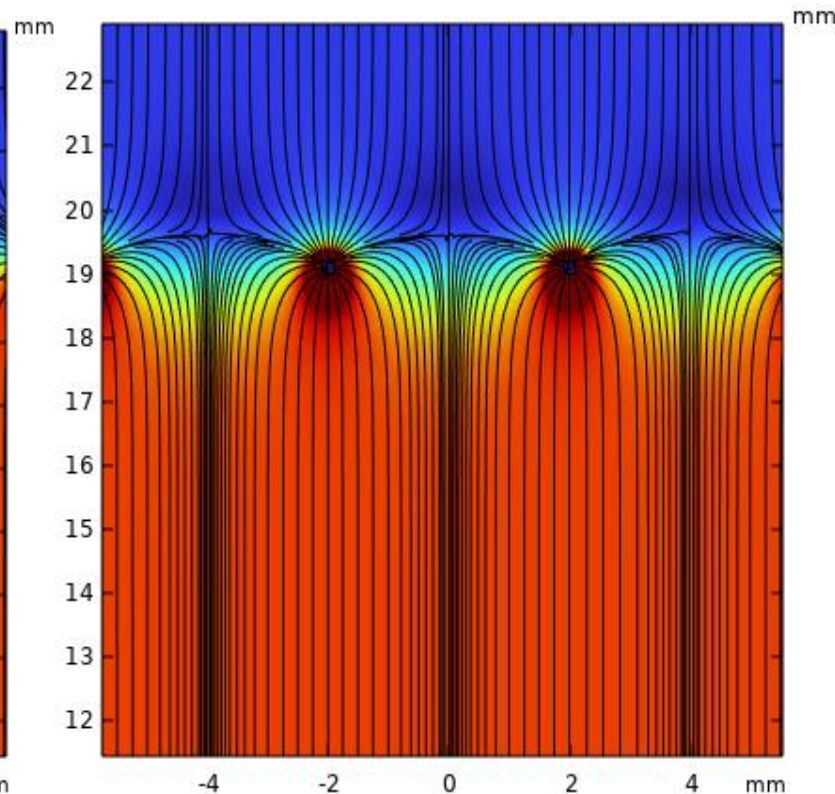
Исследование влияния поля от положения заземленной сетки

Напряженность электрического поля (В/см)



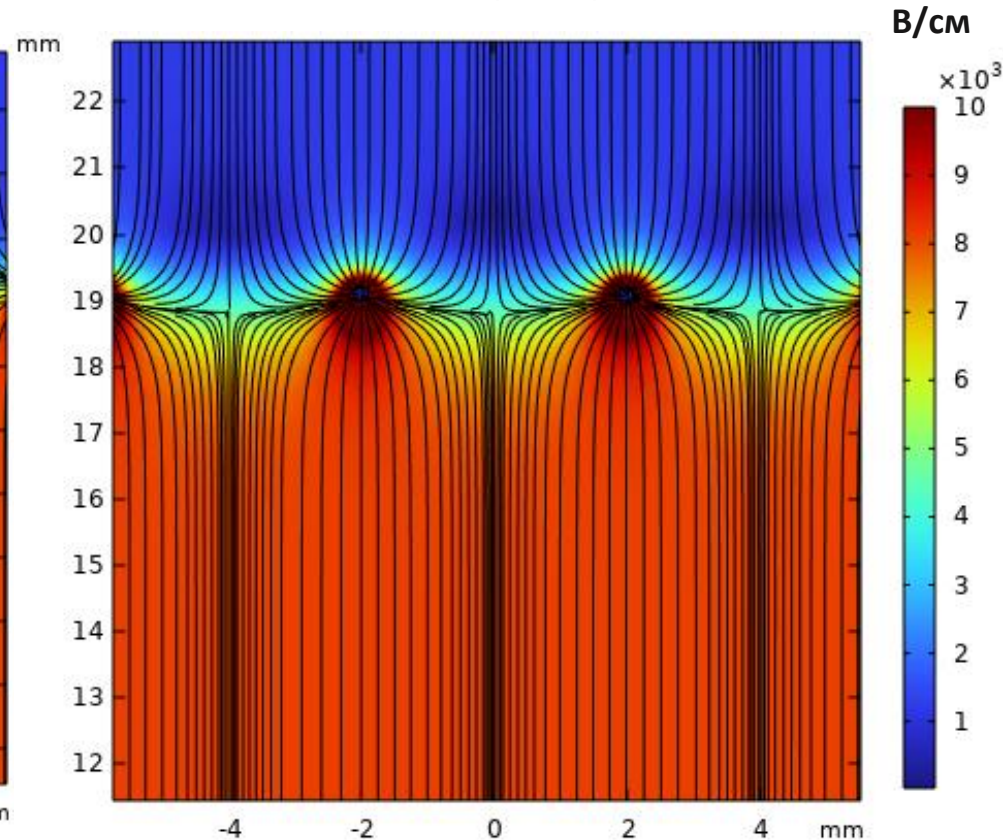
55 мм до заземлённой сетки

Напряженность электрического поля (В/см)



20 мм до заземлённой сетки

Напряженность электрического поля (В/см)

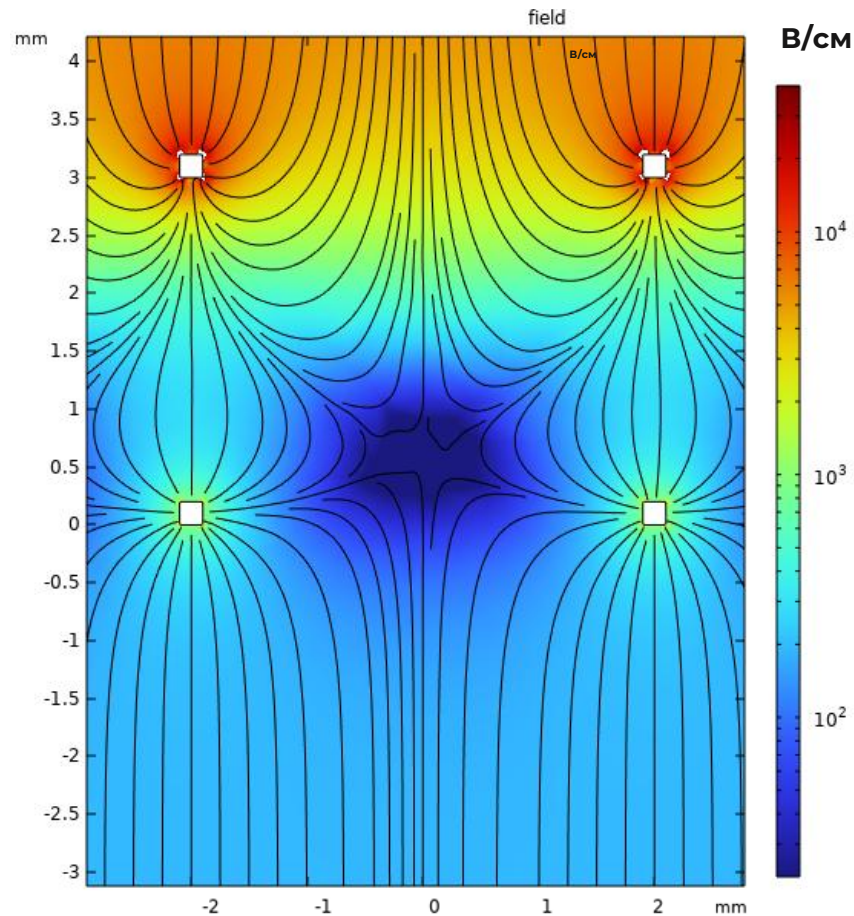


5 мм до заземлённой сетки

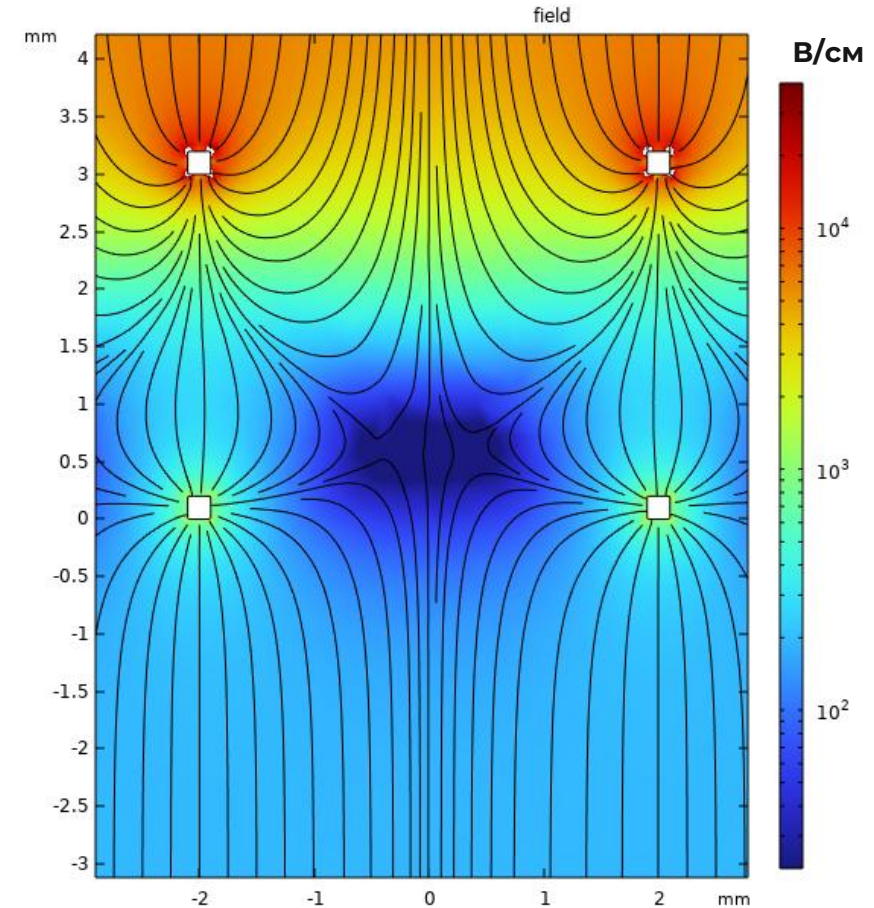
Конфигурация линий напряженности электрического поля для различных положений заземлённой сетки над анодом

Исследование явления пробоя затвора

Напряженность электрического поля
вблизи гейта (В/см) (Анод = 8000 В)



Напряженность электрического поля
вблизи гейта (В/см) (Анод = 8250 В)



(Пробитие затвора)

Конфигурация линий напряженности для различных напряжений на аноде

Исследование влияния вытягивающего поля от уровня жидкого аргона

Зависимость значения напряженности на границе раздела от уровня жидкого аргона

Положение верхней сетки затвора

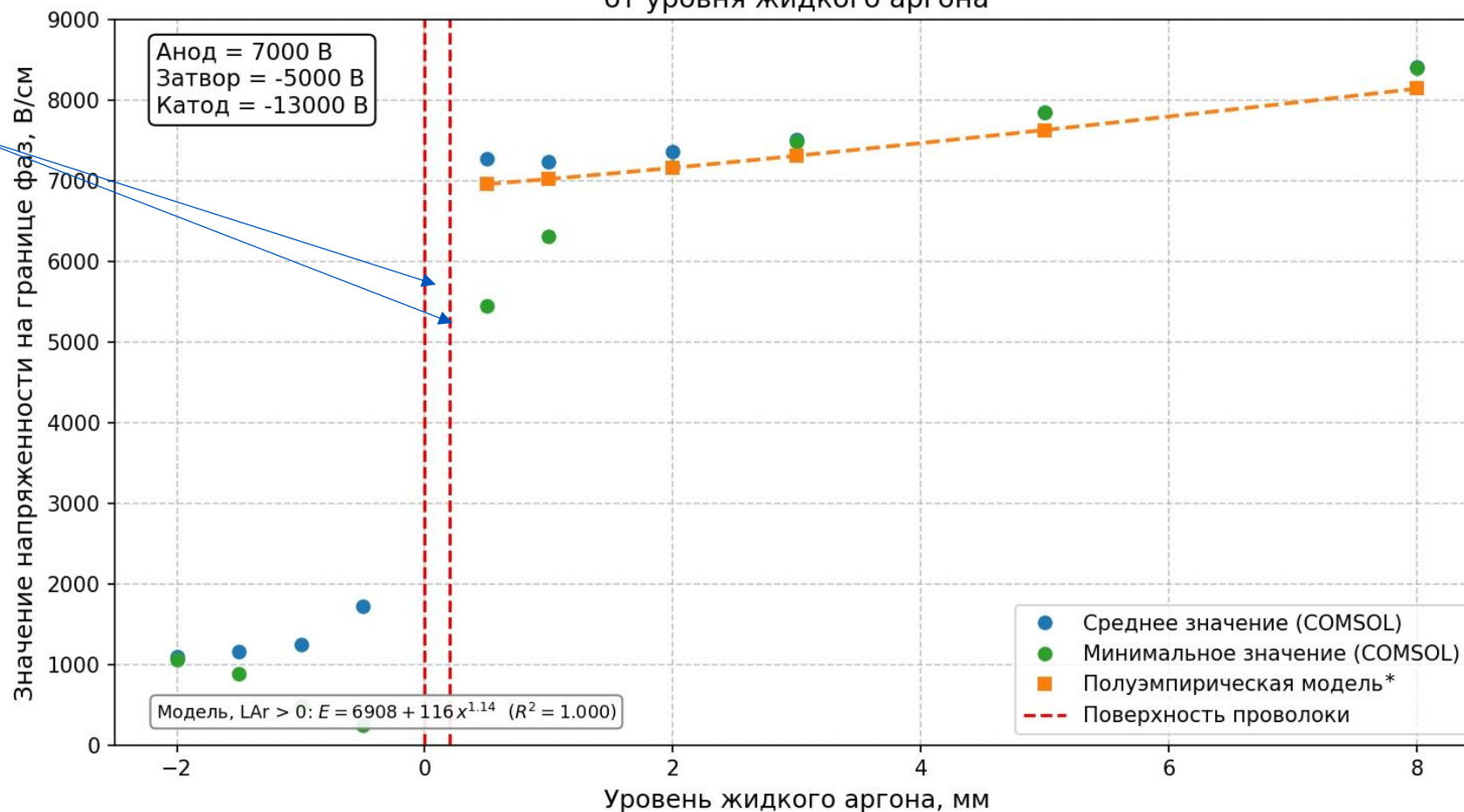
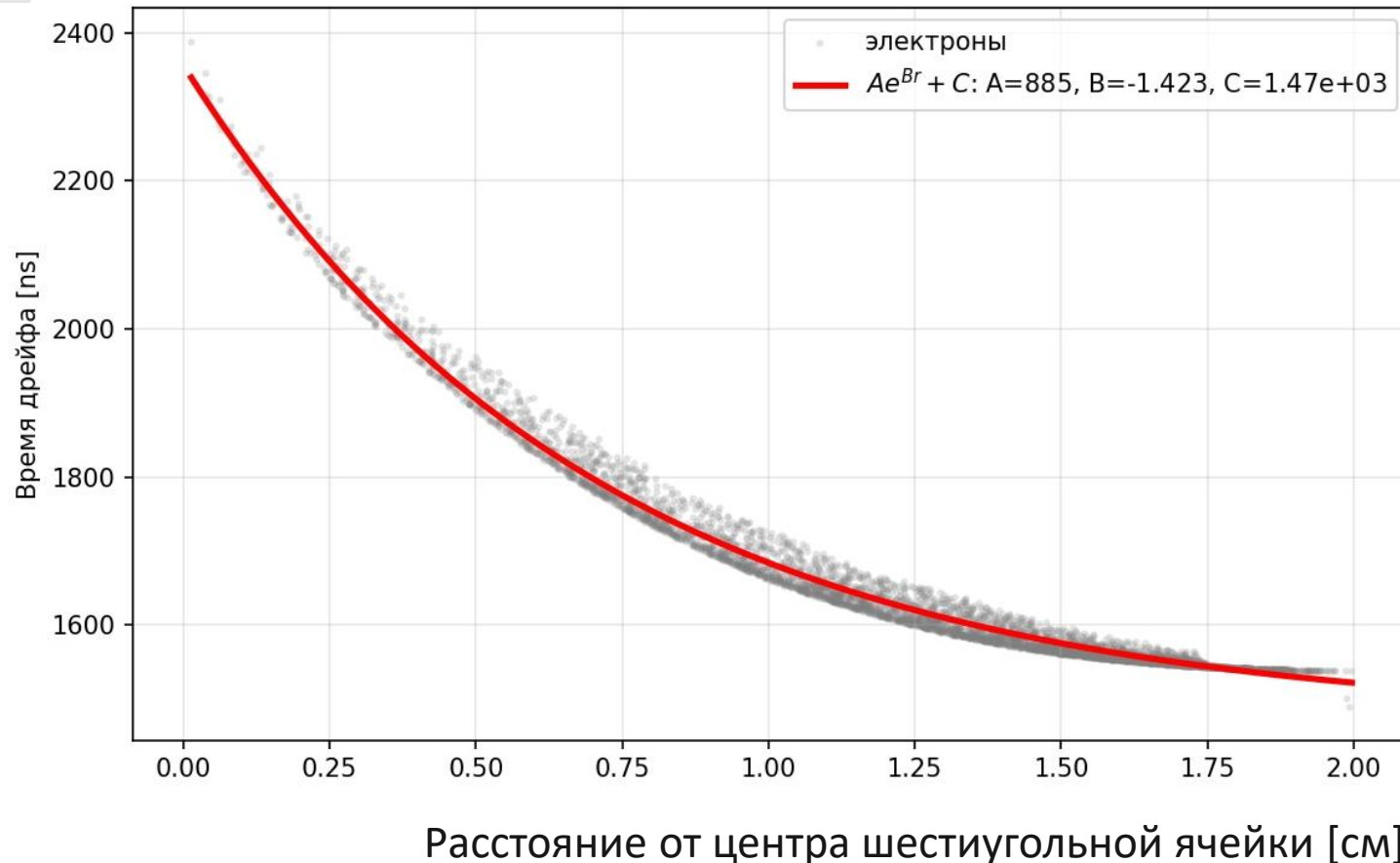


График зависимости напряженности на границе раздела фаз

* Read F. H. et al. Short-and long-range penetration of fields and potentials through meshes, grids or gauzes //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1999. – Т. 427. – №. 1-2. – С. 363-367. / F. H. Read

Распределение времен дрейфов

Распределение времени дрейфа от расстояния до центра ячейки сетки



Наибольший интерес представляют электроны с малым расстоянием до центра ячейки, т.к., при прохождении через гейт, электроны фокусируются электрическим полем и проходят преимущественно через центр.

Вывод формулы для расчета световыхода

Формула из С.М.В. Monteiro “Secondary scintillation yield in pure argon”:

$$\frac{Y}{N} = \alpha \frac{E}{N} - 0,19 \text{ (В единицах } 10^{-17} \text{ cm}^2\text{)}$$

Где Y – количество ЭЛ-фотонов на 1 см пути, N – концентрация атомов. $\alpha = 0.081 \frac{N_{ph}}{\text{cm}}$.

$$N = \frac{P}{kT} \approx 1.05 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$$

P – давление жидкого аргона (1.25 атм), T – температура жидкого аргона (87 К).

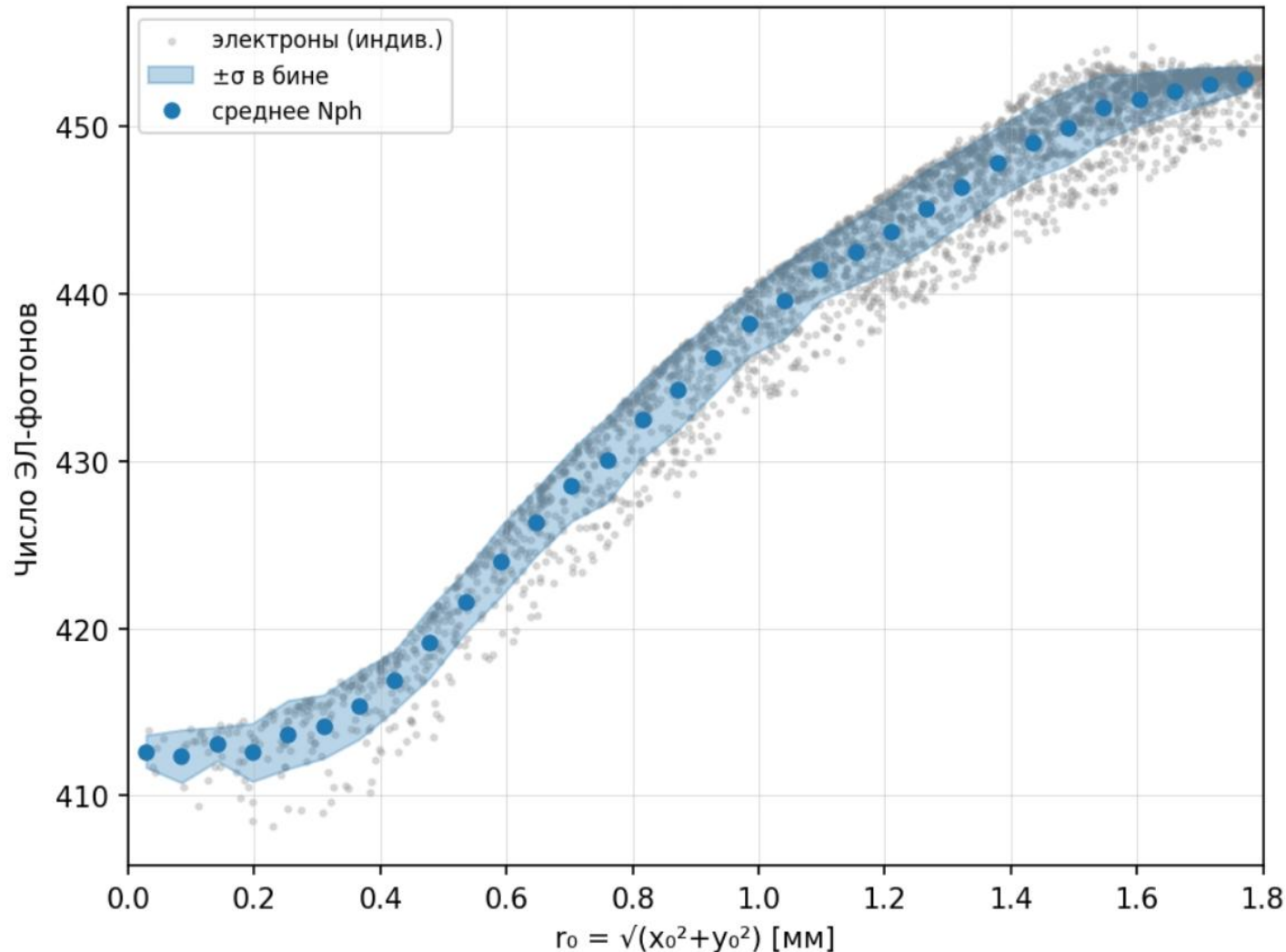
Тогда финальная формула для моделирования:

$$\frac{dN_{ph}}{dl} = \alpha \cdot \max(E - E_{th}, 0)$$

$$E_{th} = \frac{0.19 \cdot 10^{-17}}{0.081} \cdot N = 2473 \frac{V}{\text{cm}}$$

Исследование зависимости световыхода от расстояния до центра ячейки

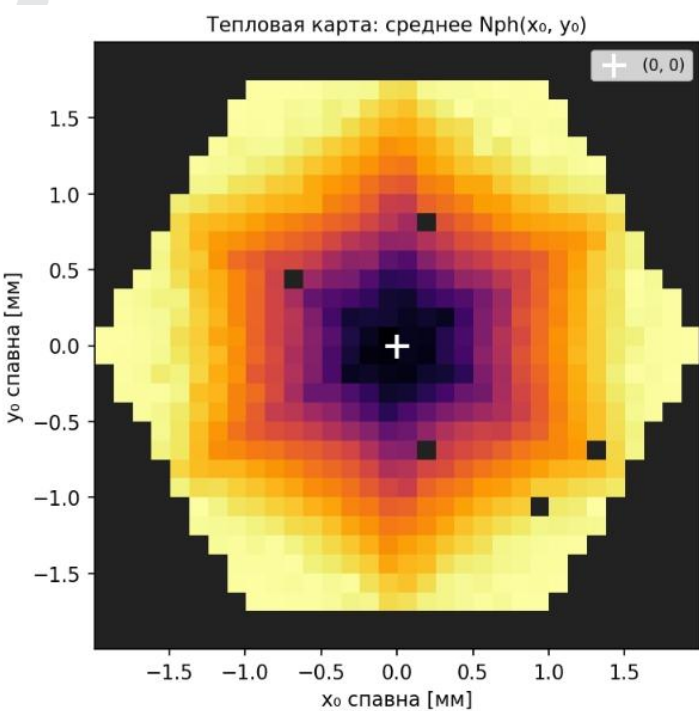
Зависимость числа ЭЛ-фотонов от расстояния до центра



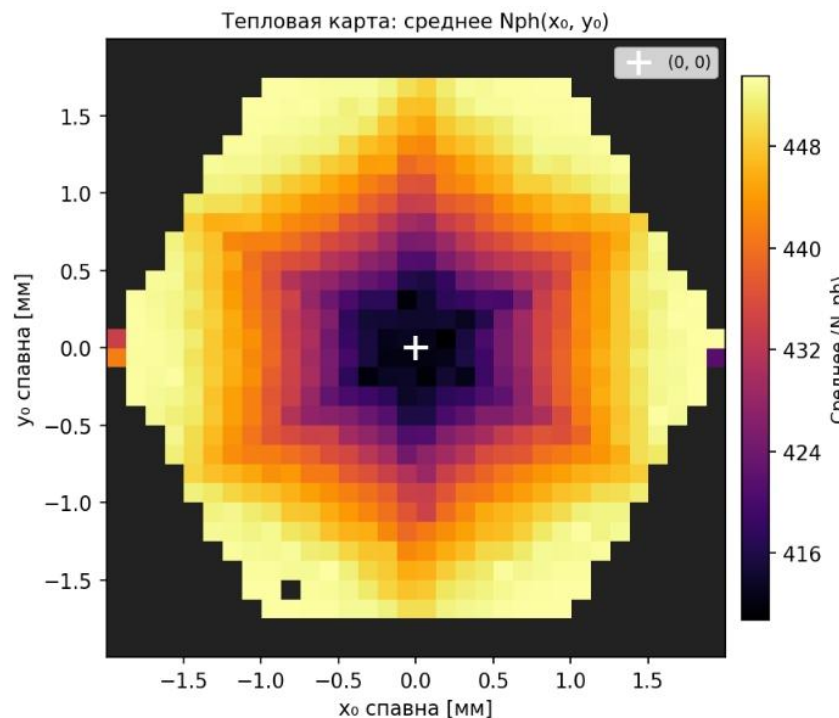
Моделировалось:
10000 электронов,
распределенных по всей
площади ячейки

Результаты:
Разброс числа ЭЛ-фотонов
составляет примерно 10% от
среднего.

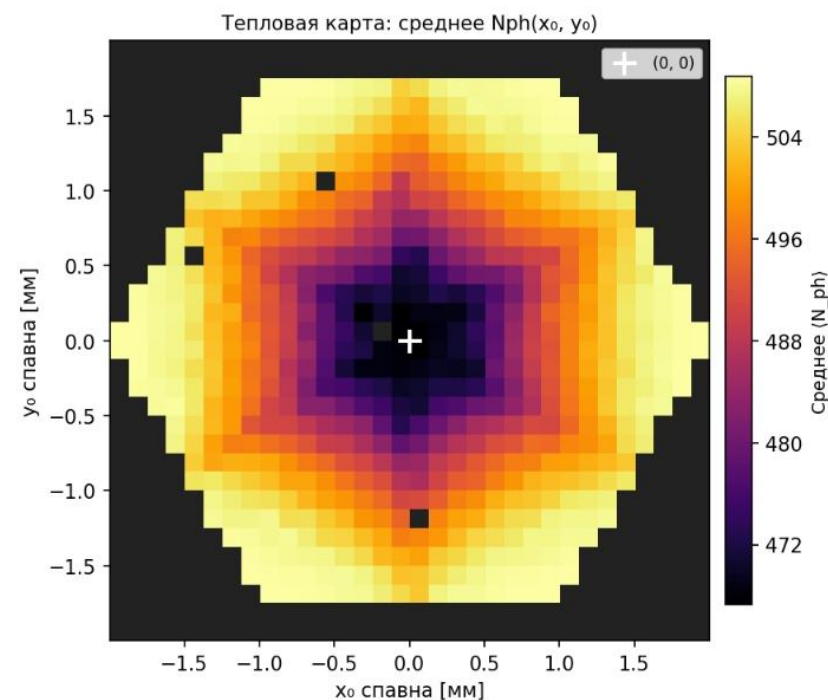
Сравнение неоднородностей световыхода для различных уровней жидкого аргона



12 мм над гейтом



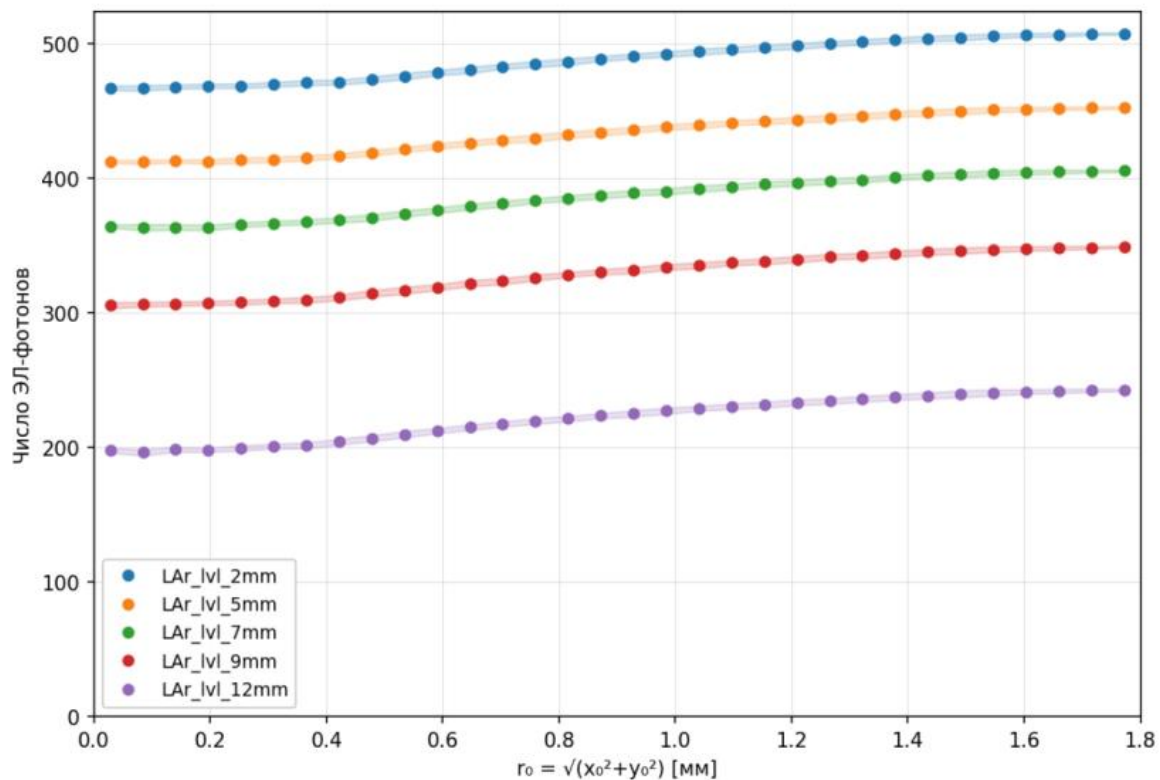
5 мм над гейтом



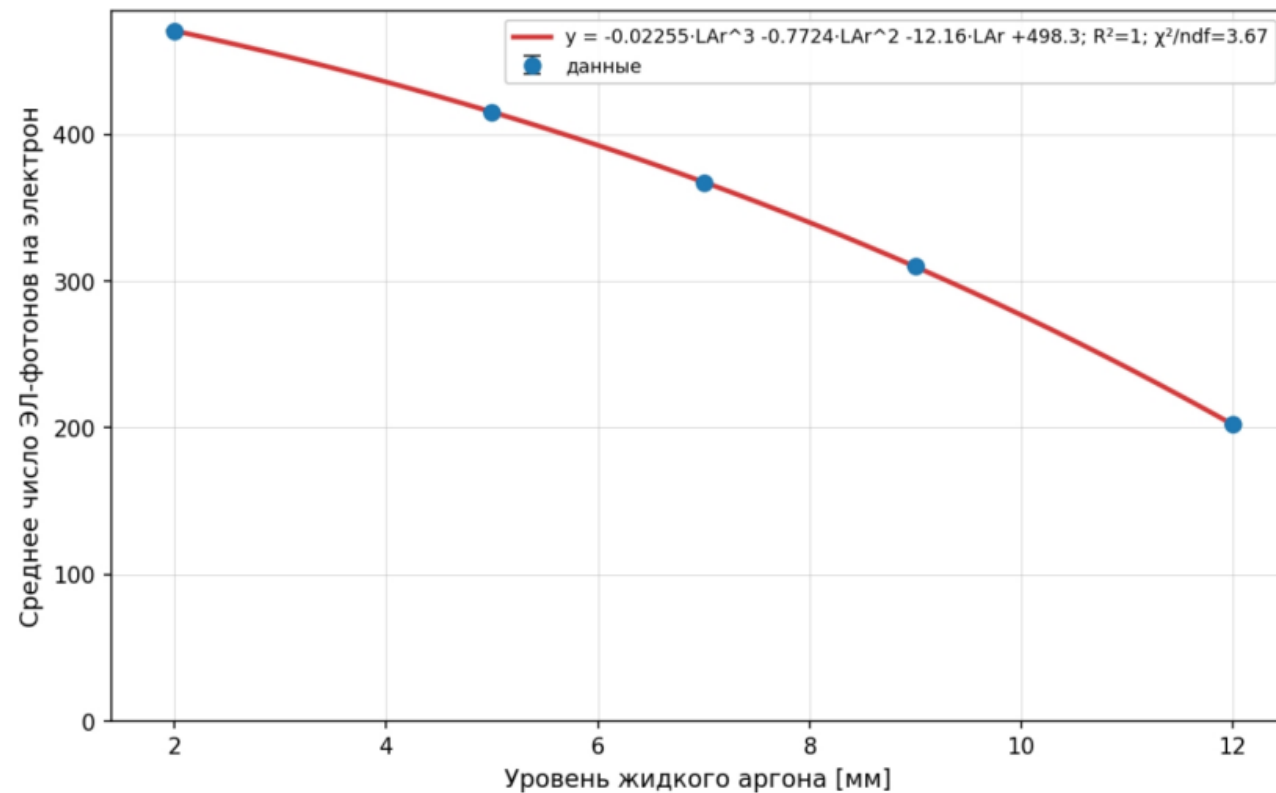
2 мм над гейтом

Тепловые карты для различных уровней LAr

Сравнение числа фотонов для различных уровней LAr



(а) Зависимость N_{ph} от r_0

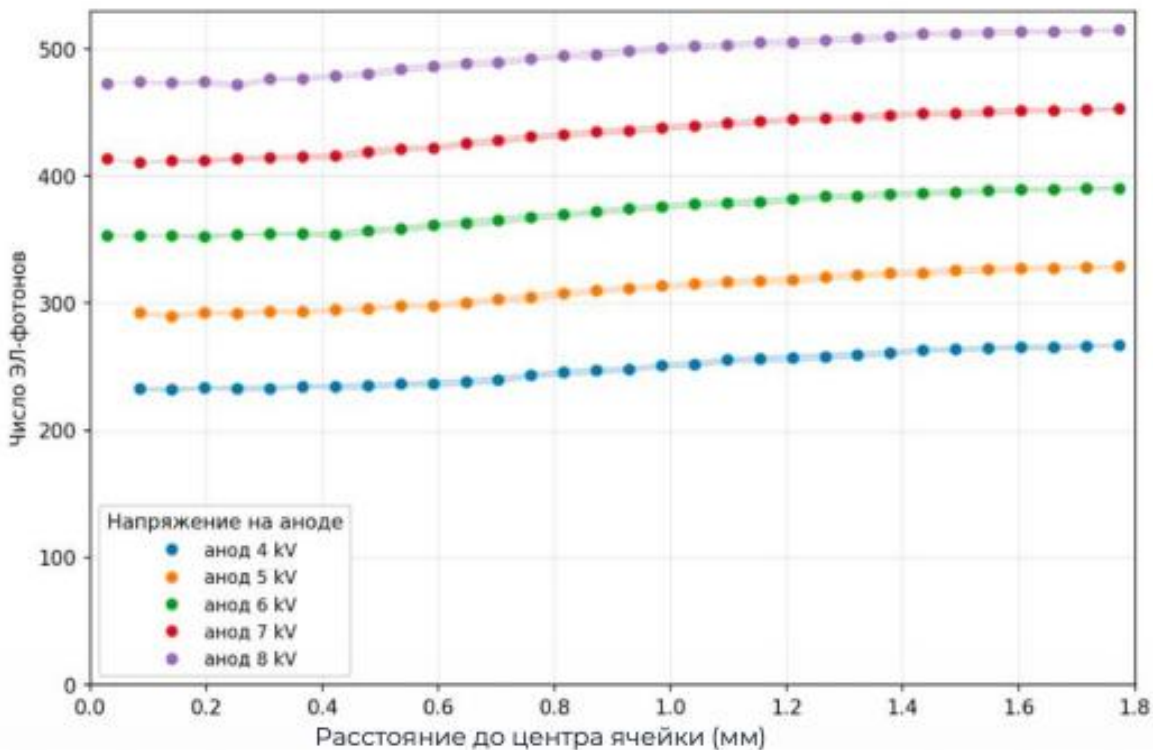


(б) Усреднение при $r_0 < 0,5$ мм

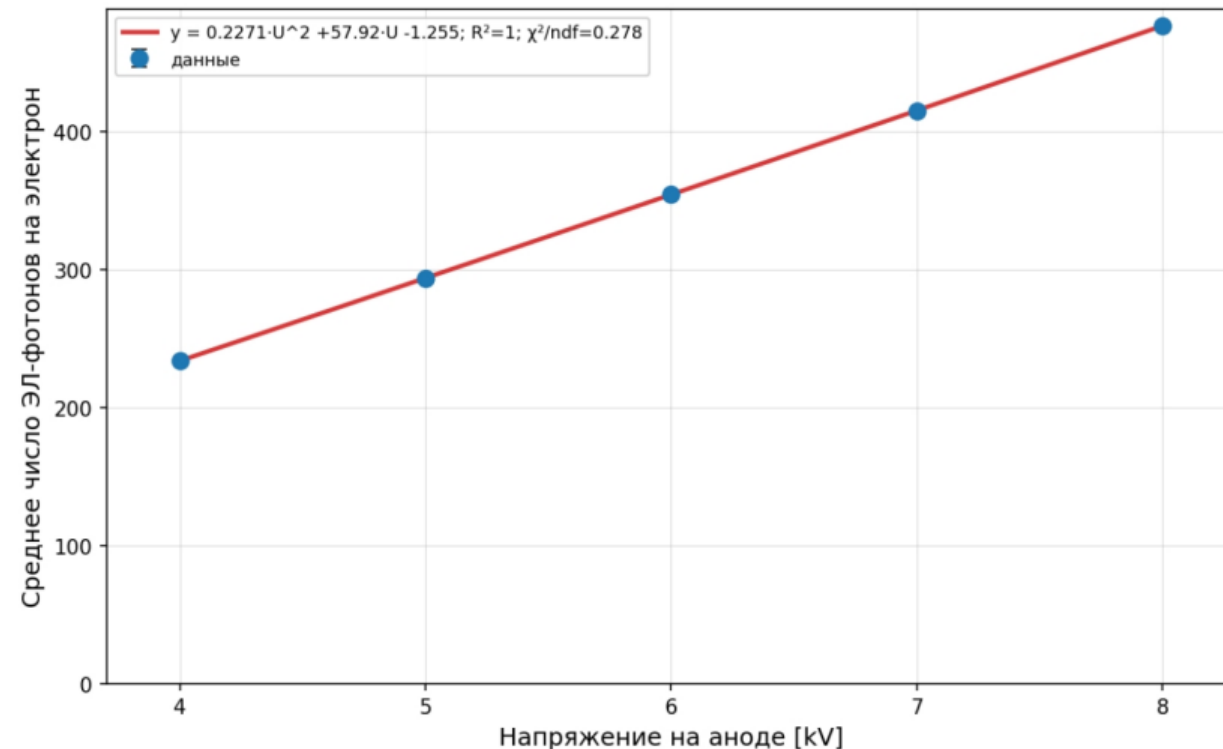
Зависимость ожидаемого числа ЭЛ-фотонов (Y , фотоны) от уровня жидкого аргона над гейтом (L , мм):

$$Y = -0.02L^3 - 0.77L^2 - 12.12L + 498.30$$

Сравнение числа фотонов для различных напряжений на аноде



(а) Зависимость N_{ph} от r_0



(б) Усреднение при $r_0 < 0,5$ мм

Зависимость ожидаемого числа ЭЛ-фотонов (Y , фотоны) от от напряжения на аноде (U , кВ):

$$Y = 0.23U^2 + 57.92U - 1.26$$

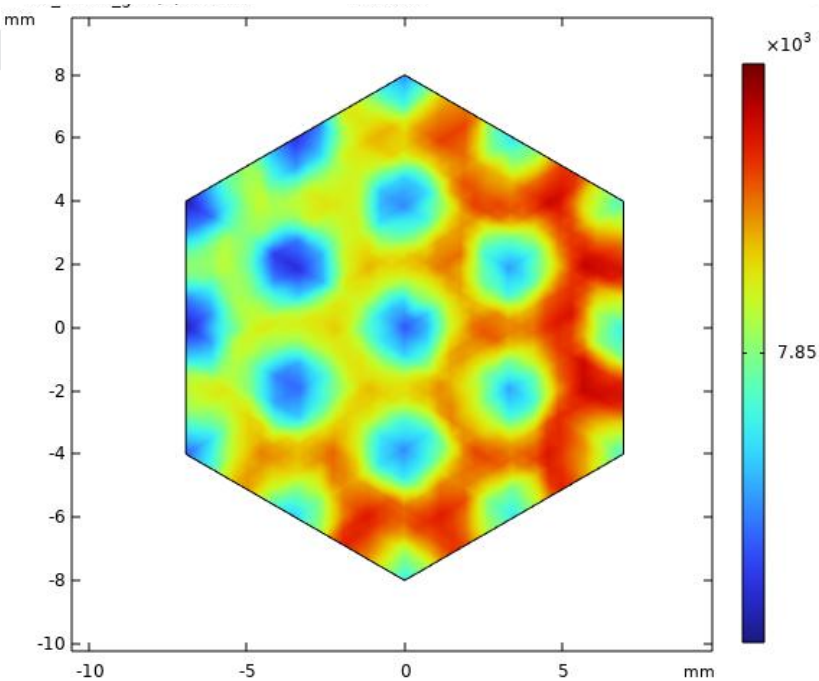
1. Получена параметризованная модель, позволяющая гибко менять параметры моделирования
2. Получено распределение времени дрейфа электронов в газовом кармане. Среднее время дрейфа (для электронов испущенных равномерно по всей площади ячейки) составляет 1663 нс
3. Оценена неоднородность световыхода от начальной точки траектории электрона. Разброс ожидаемого числа ЭЛ-фотонов составляет приблизительно 10% (40 фотонов) от среднего для стандартной конфигурации детектора.
4. Определена зависимость числа ЭЛ-фотонов от уровня LAr над верхней сеткой гейта.
5. Определена зависимость числа ЭЛ-фотонов от напряжений на аноде.



Спасибо за внимание

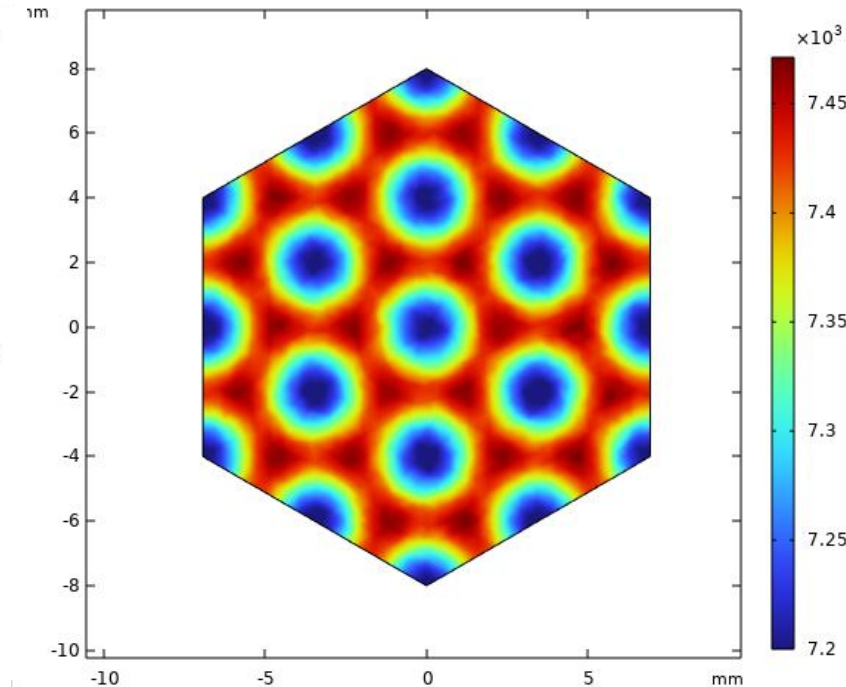
Москва, 2026

Напряженность электрического поля (В/см)



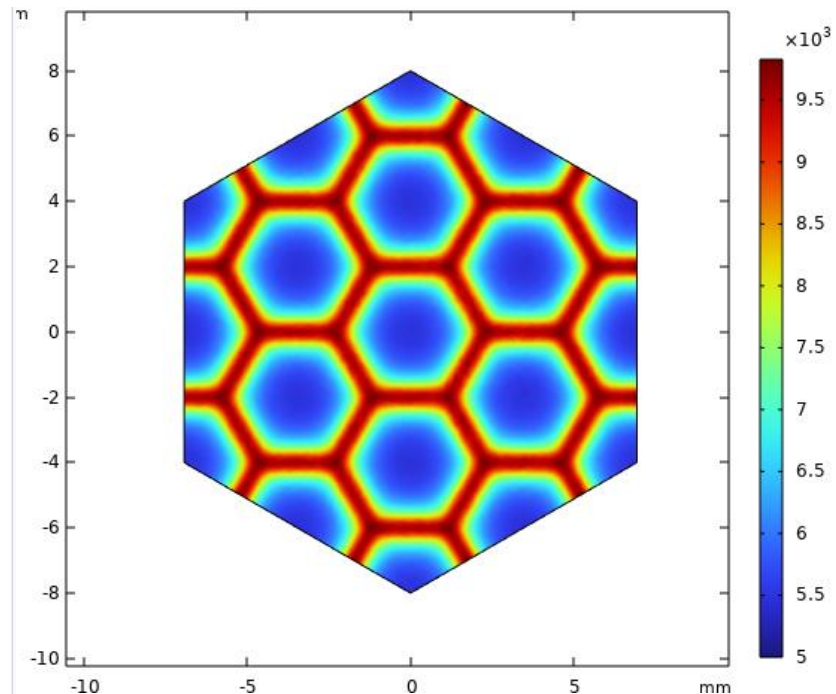
5 мм. Над гейтом
(Неоднородность поля 1 В/см)

Напряженность электрического поля (В/см)



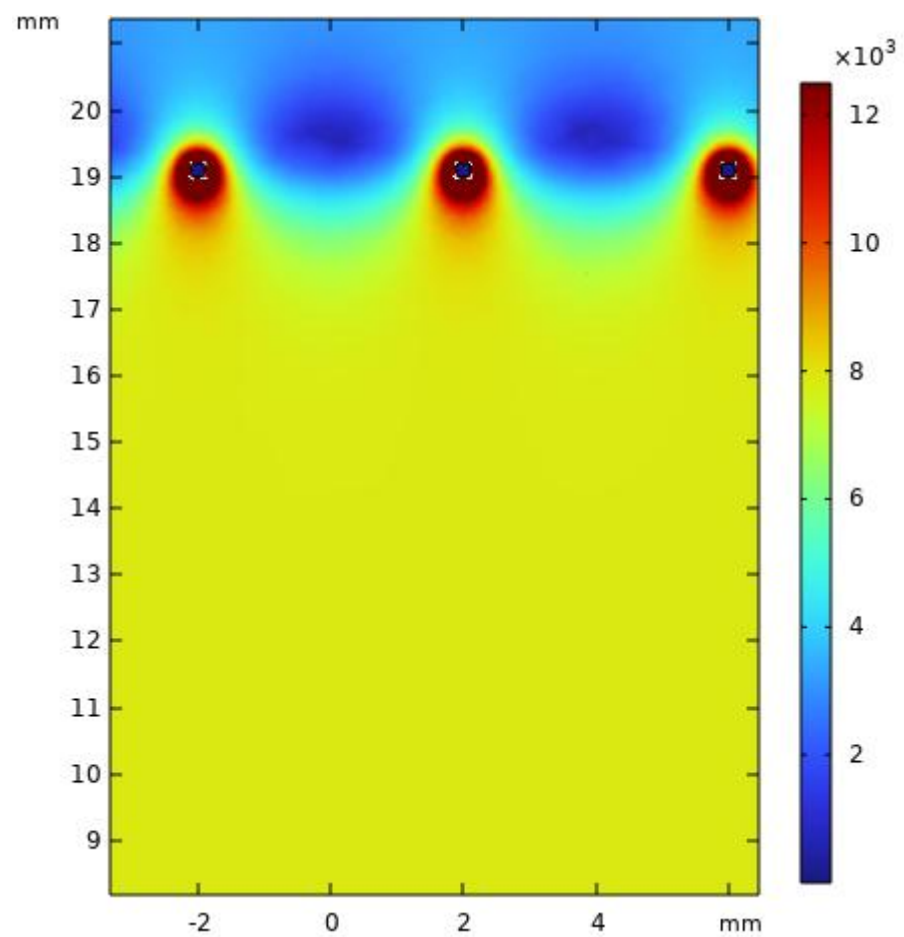
2 мм. Над гейтом
(Неоднородность поля 250 В/см)

Напряженность электрического поля (В/см)

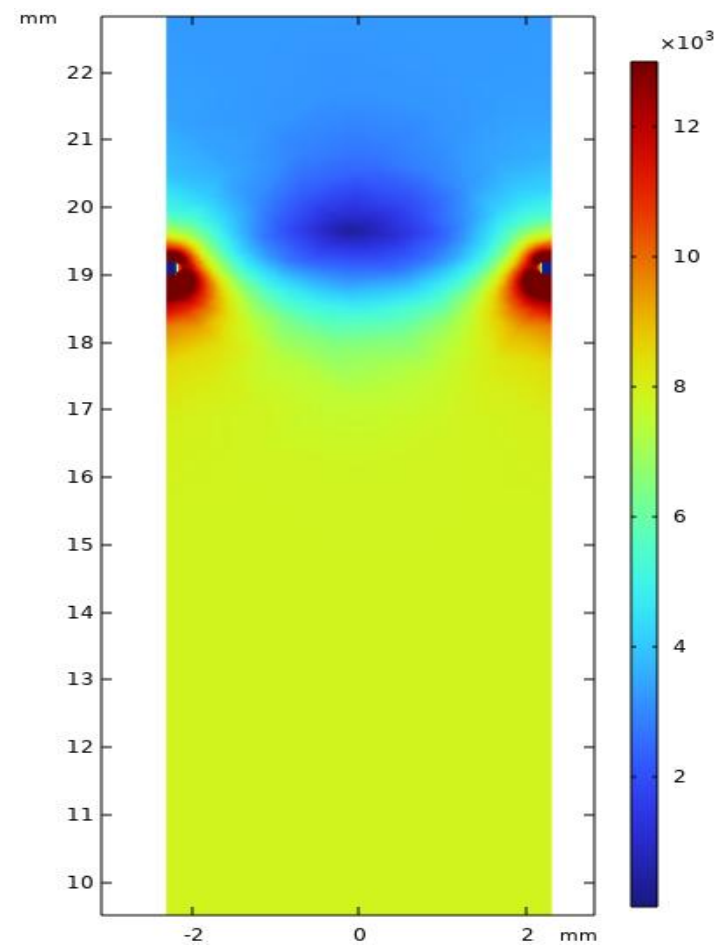


0.5 мм. Над гейтом
(Неоднородность поля 4 кВ/см)

Напряжённость электрического поля на границе раздела фаз

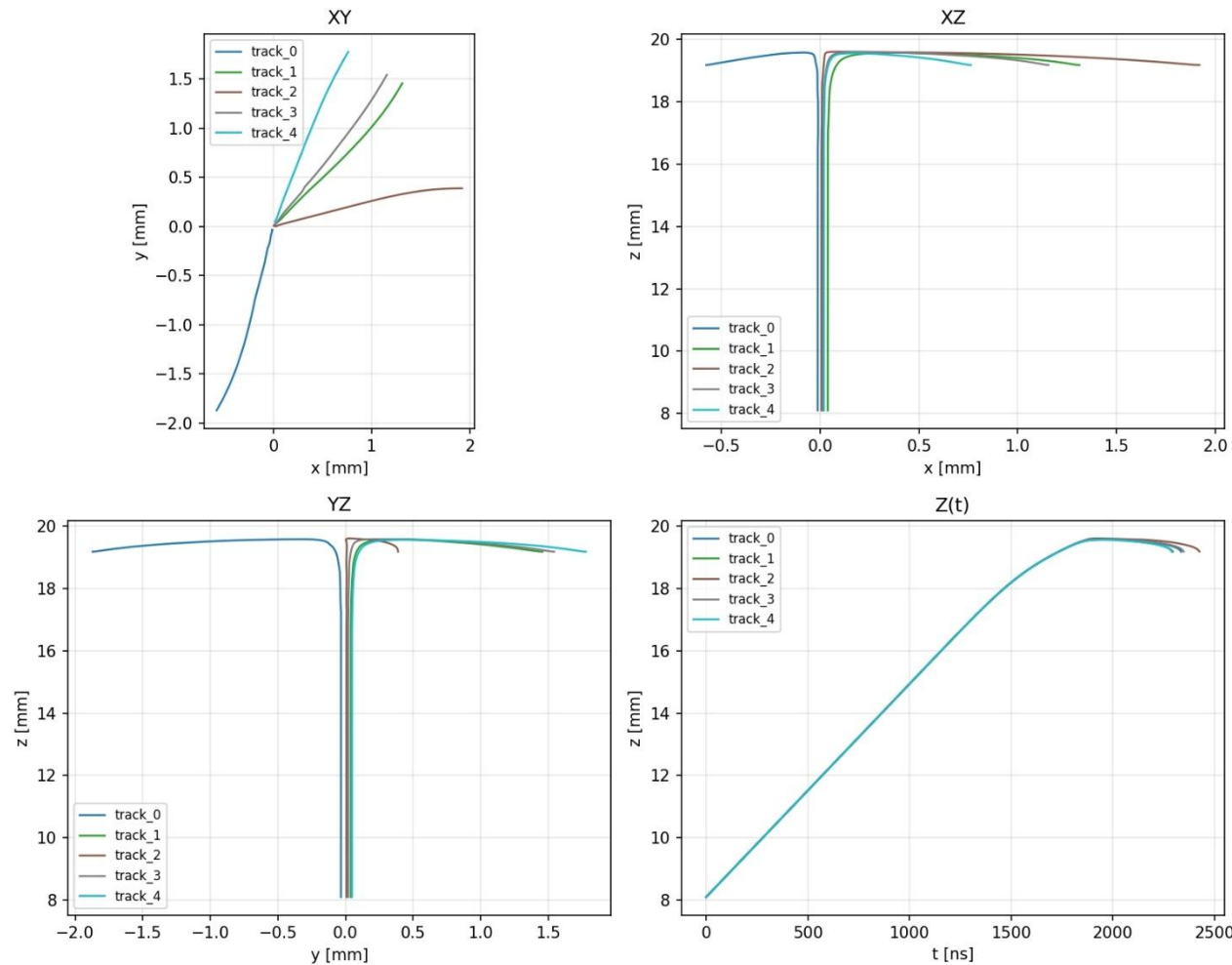


Изначальная модель



Оптимизированная модель

5 траекторий из центра — LAr_IvI_5mm



Треки дрейфов в различных проекциях

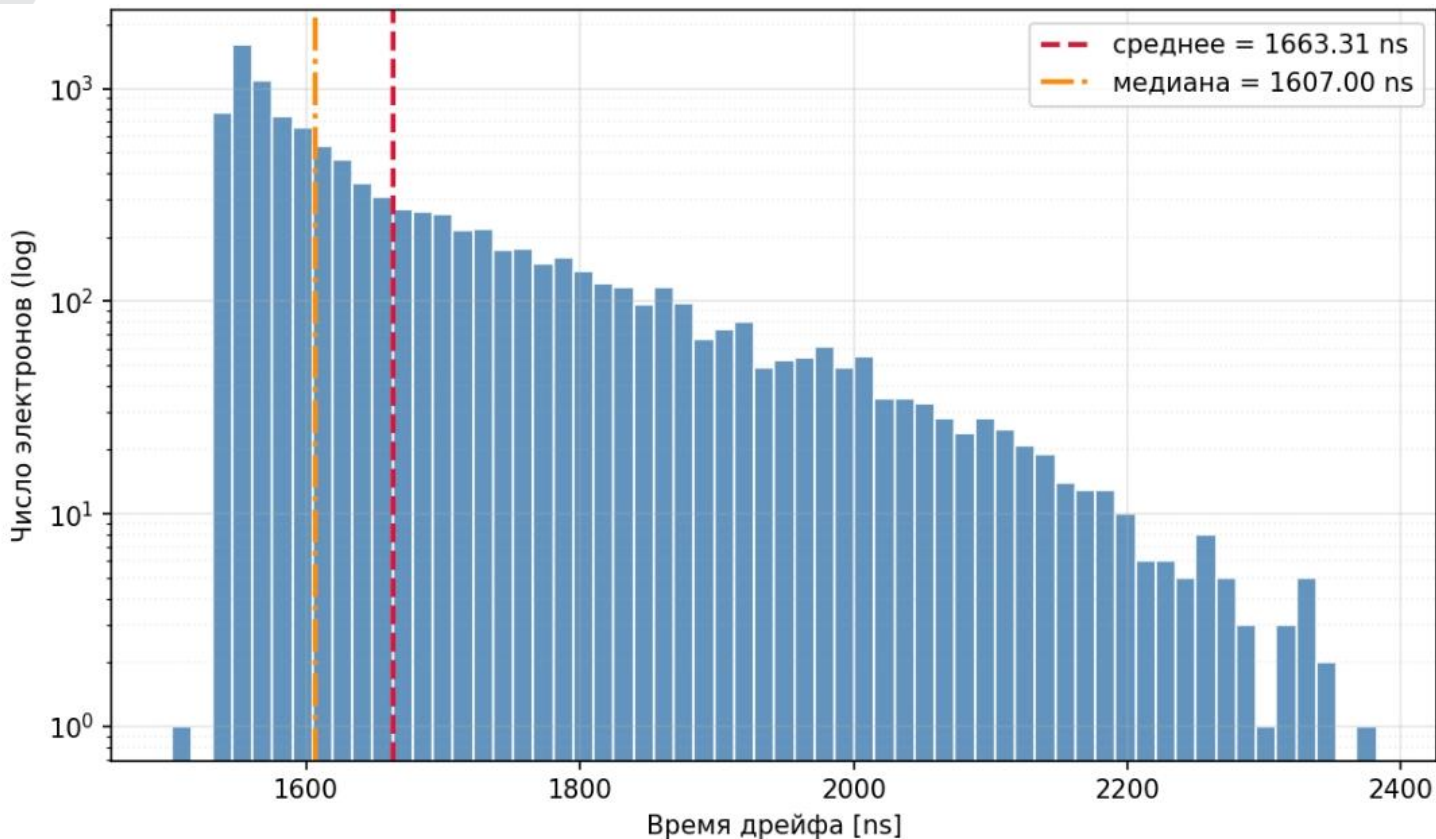
Моделировалось:

5 электронов были запущены случайно из центра шестиугольной сетки на уровне границы раздела фаз

Результаты:

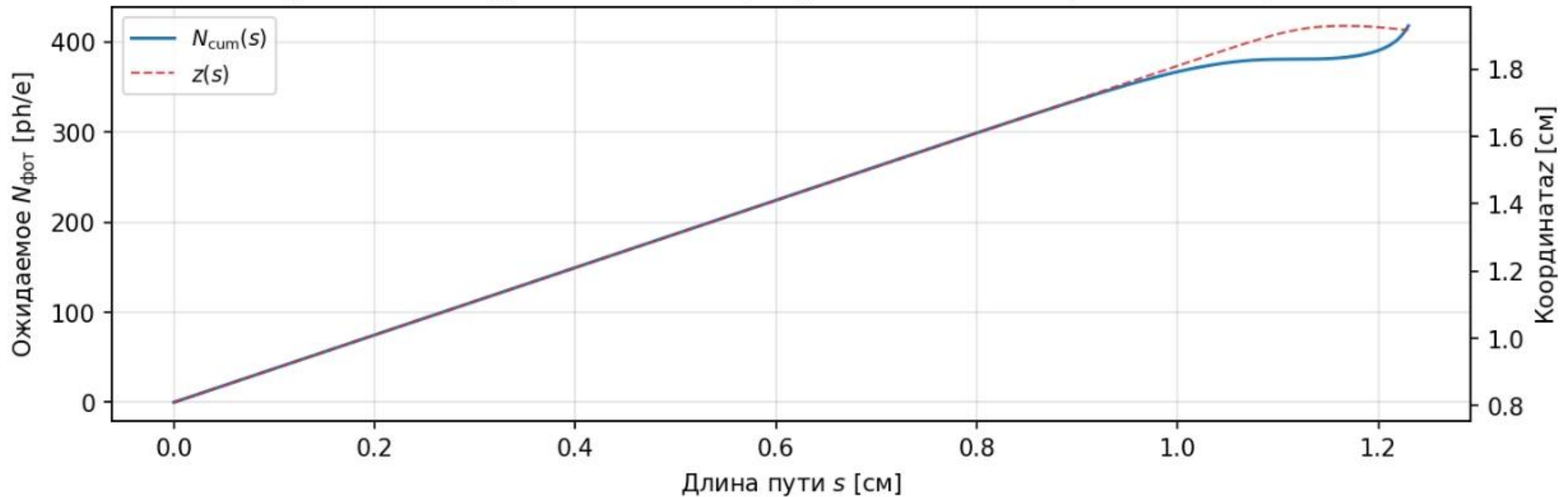
Траектории имеют зонтообразную форму и замыкаются на аноде, что соответствует ожиданием.

Распределение времени дрейфа



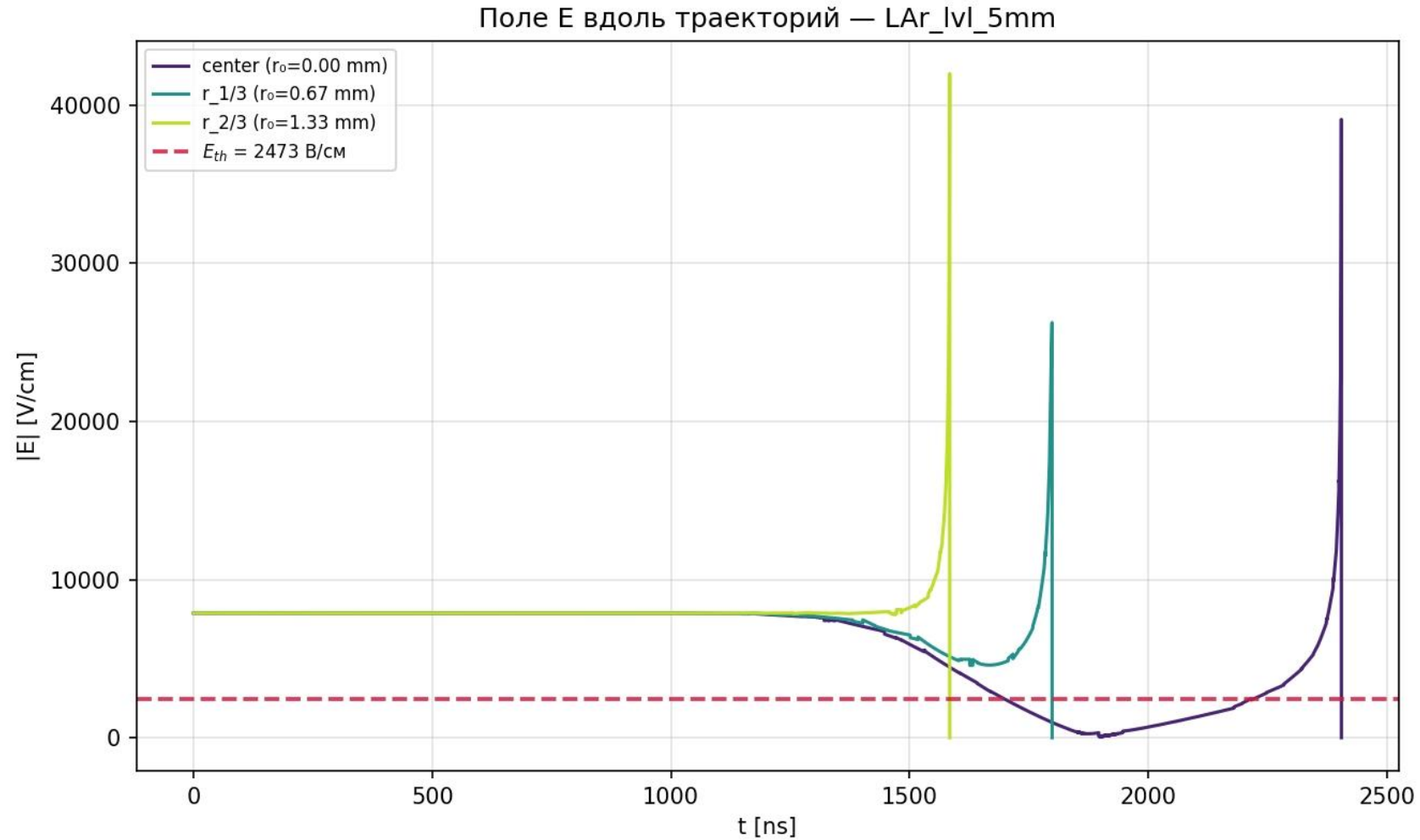
Для получения гистограммы было равномерно разыграно 10000 электронов по всей площади шестиугольного звена сетки.

Правый хвост распределения отвечает электронам, запущенным из центра звена проволоки.



Кумулятивное число фотонов от длины пути
Lar 5 мм над гейтом

Моделировалось 10000
электронов, испущенных из
центра ячейки.



Профиль Электрического поля вдоль трека дрейфа

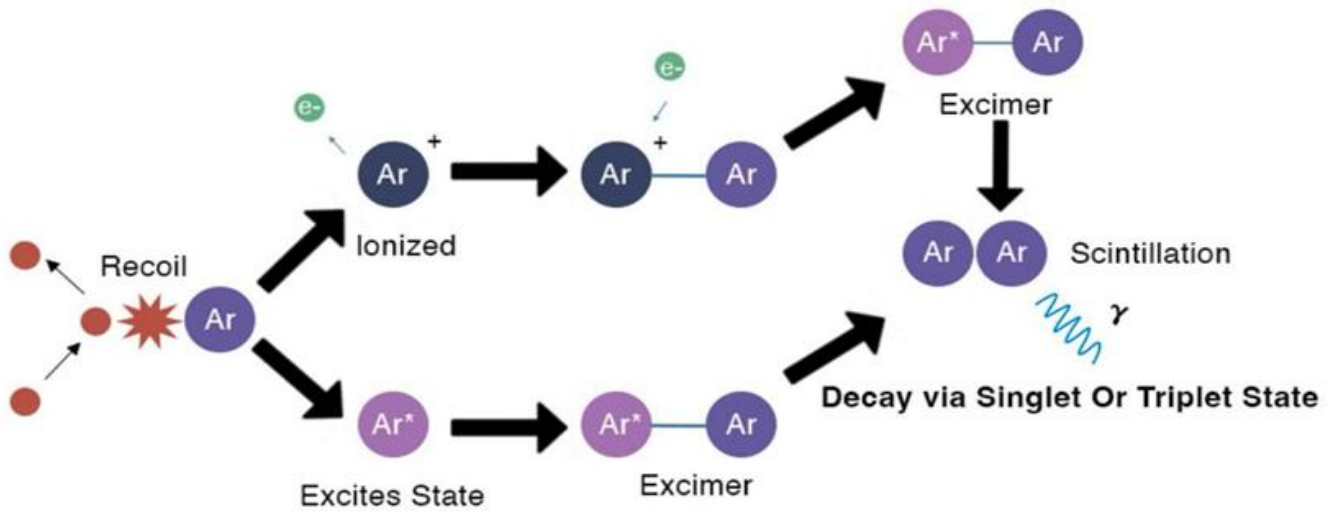


Схема взаимодействия аргона в детекторе

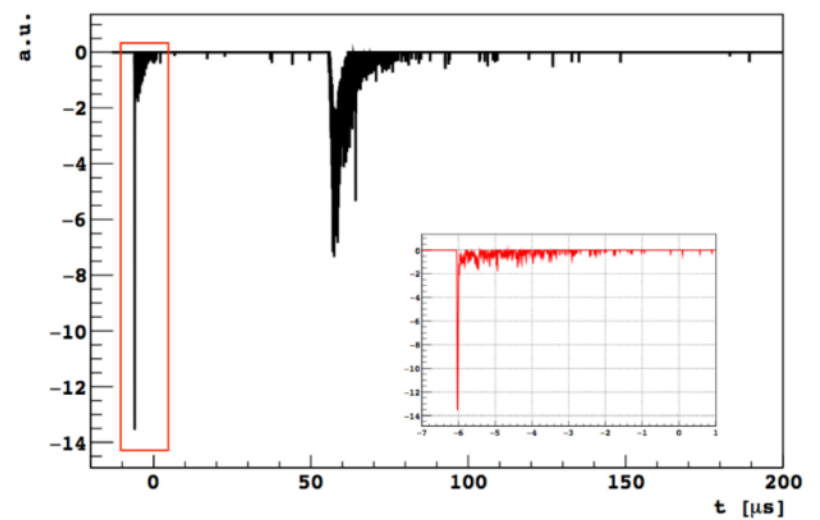
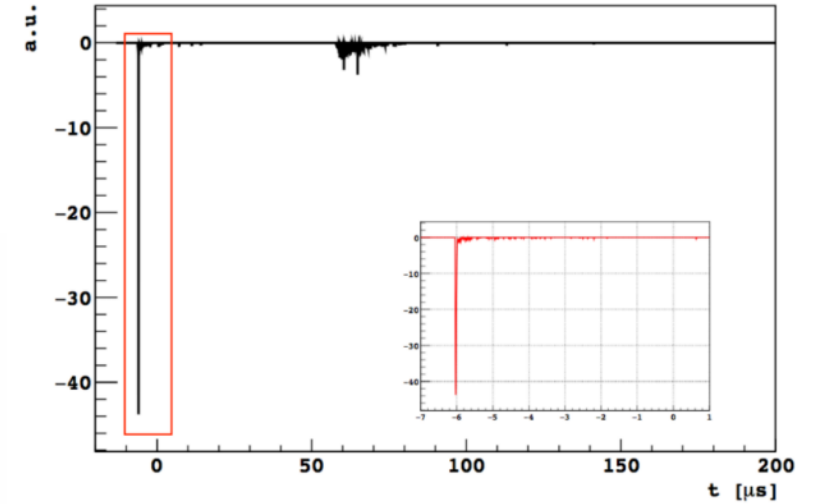


Схема классификации событий