



Поиски темной материи на PandaX-4T

Шафикова Дина Рашидовна

M24-114



КЛАССИЧЕСКИЕ КАНДИДАТЫ



История и кандидаты на роль ТМ

- Парадокс Цвики – масса скопления Кома на основе скорости движения галактики больше, чем масса, определенная по светимости галактик.
- Вера Рубин показала, что скорости вращения звезд в спиральных галактиках почти не падают на периферии, а остаются постоянными.
- Масса, измеренная при помощи гравитационного линзирования, в разы превышает измерения, проводимые по светимости.
- Избыток гамма-излучения из центра галактики, который может объясняться аннигиляцией вимпов.

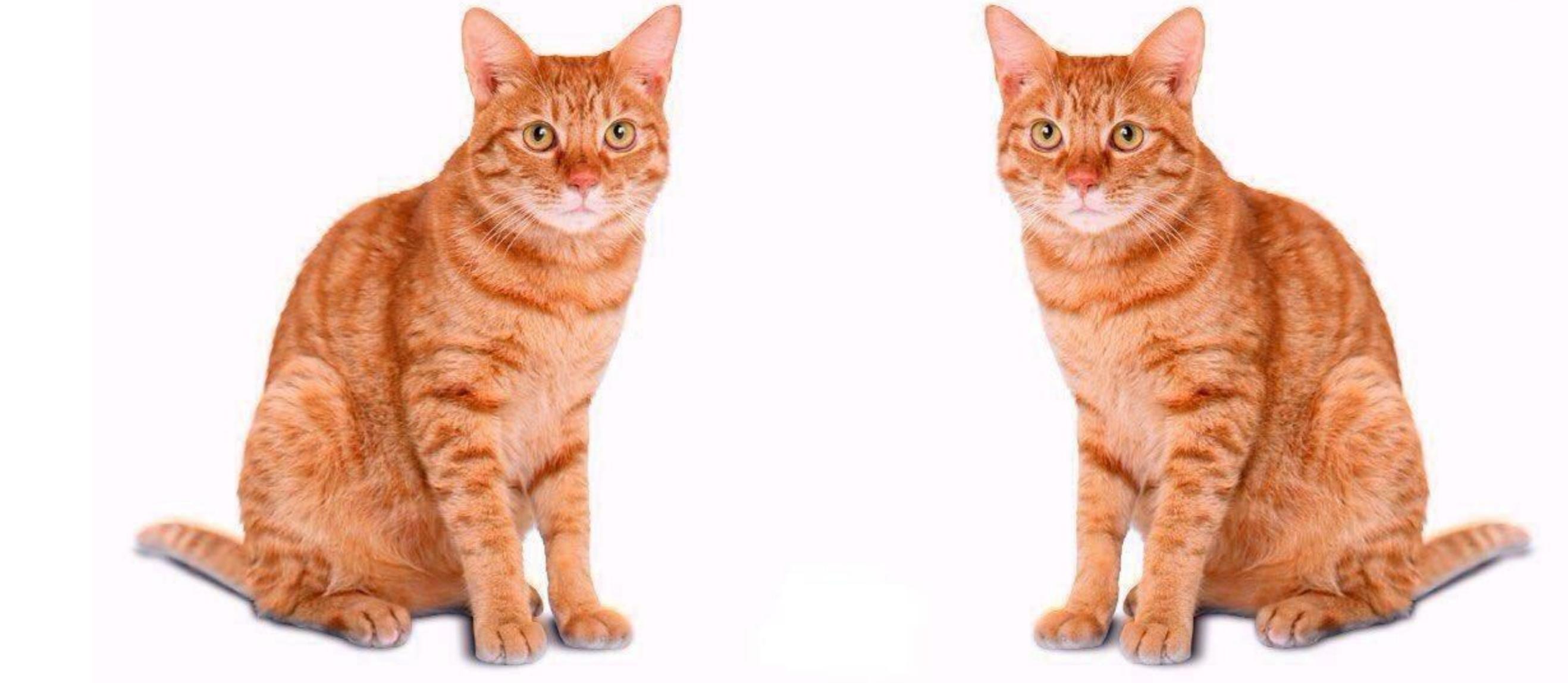
WIMP

Массивная элементарная частица, взаимодействующая через слабую ядерную силу (или более слабые взаимодействия).

В ранней Вселенной эти частицы рождались и аннигилировали, находясь в термическом равновесии с остальной материей. После падения температуры ниже массы вимпов, их рождение уменьшалось экспоненциально, а расширение Вселенной привело к снижению числа столкновений. Для слабовзаимодействующих частиц этого типа заморозка (“freeze-out”) наступила раньше, что и привело к большой процентной концентрации темной материи в составе Вселенной в настоящем времени.

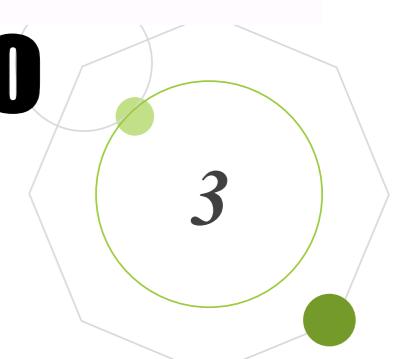
Вимпы не являются частью Стандартной Модели, но представляют собой основного кандидата на роль частицы темной материи в ее расширении – Суперсимметрии (SUSY). **это я** **а это кто**

Чудо вимпа (WIMP miracle): плотность частицы с массой 100 ГэВ и слабым взаимодействием после заморозки практически равна наблюдаемой плотности темной материи $\Omega_{DM} = 0.1 \div 0.3$



WIMP

нейтралино



ПЧД

Гипотетический объект – черная дыра, причиной возникновения которой стал не коллапс звезды, а флуктуация плотности или фазовый переход первого рода в космической плазме ранней Вселенной.

Так как ПЧД взаимодействуют в основном гравитационно, не излучают электромагнитное излучение и могут существовать в больших количествах без нарушения однородности Вселенной, их можно рассматривать как макроскопических кандидатов на роль холодной темной материи.

Стерильные нейтрино

Нейтрино, не участвующие в слабых, сильных и электромагнитных взаимодействиях, а только смещающиеся с обычными (левыми) нейтрино.

Чтобы частица являлась кандидатом на роль темной материи она должна иметь ненулевую массу и не иметь электрического заряда. Поскольку границы массы стерильных нейтрино неизвестны, возможность того, что стерильное нейтрино является темной материей, пока не исключена.

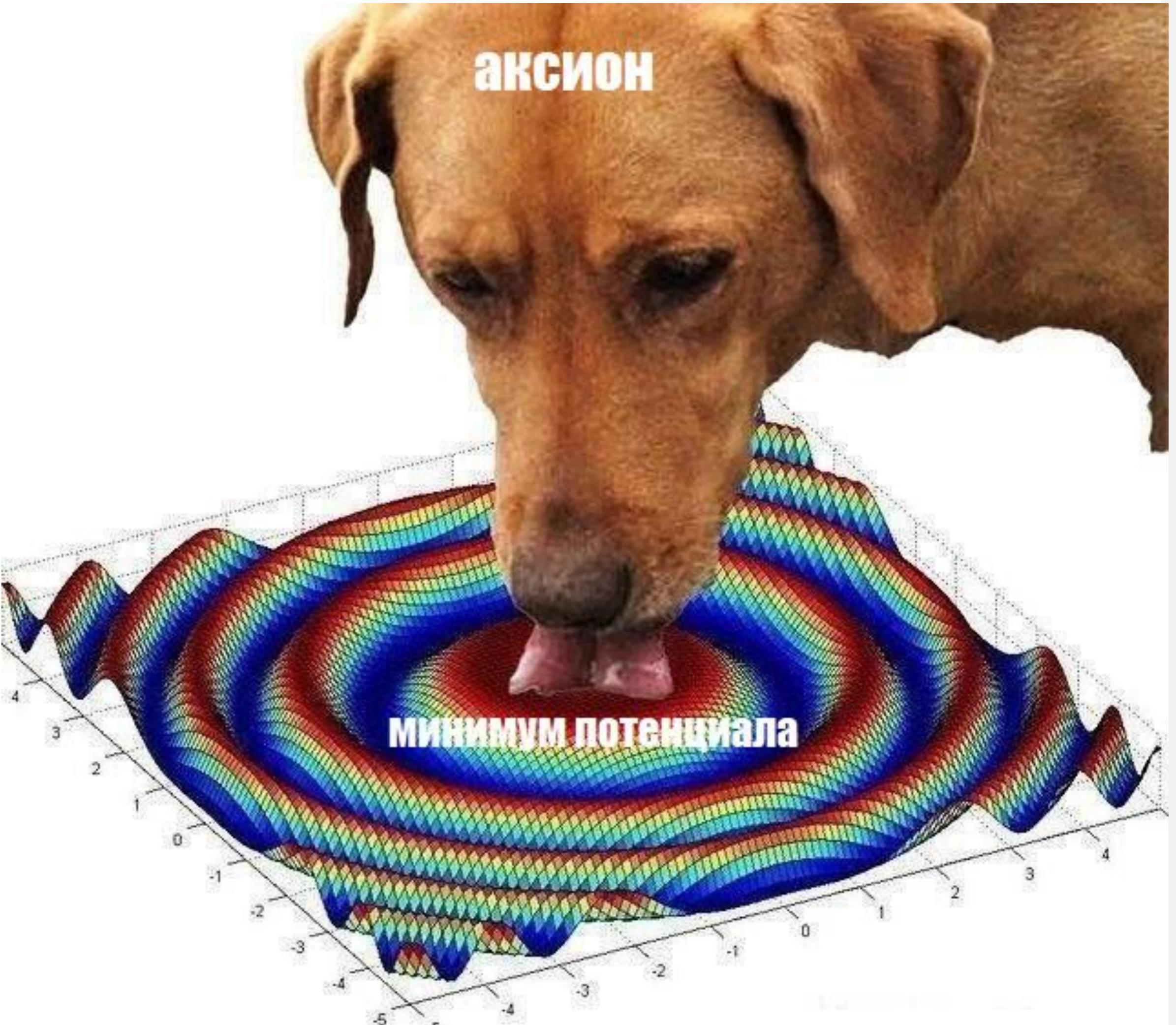
Аксион

Частица, предложенная в рамках механизма Печчеи-Куинна (PQ), с целью решения сильной СР-проблемы в КХД.

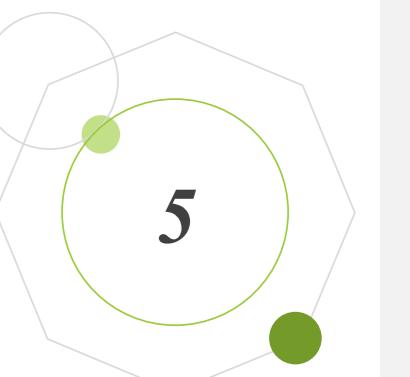
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} \text{tr } F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{n_f g^2 \theta}{32\pi^2} \text{tr } F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - me^{i\theta' \gamma_5})\psi$$

При спонтанном нарушении симметрии рождается псевдоскалярное поле – аксион, – которое динамически настраивает параметр θ , устраняя проблему.

Аксион слабо взаимодействует, нейтрален, стабилен и мог быть порожден в ранней Вселенной в большом количестве, что делает его кандидатом на роль частицы темной материи. Согласно теории PQ вблизи критической температуры поле аксиона начинает осциллировать вокруг минимума потенциала и эти осцилляции ведут себя как холодная темная материя.



schlop schlop schlop schlop schlop
schlop schlop schlop schlop schlop



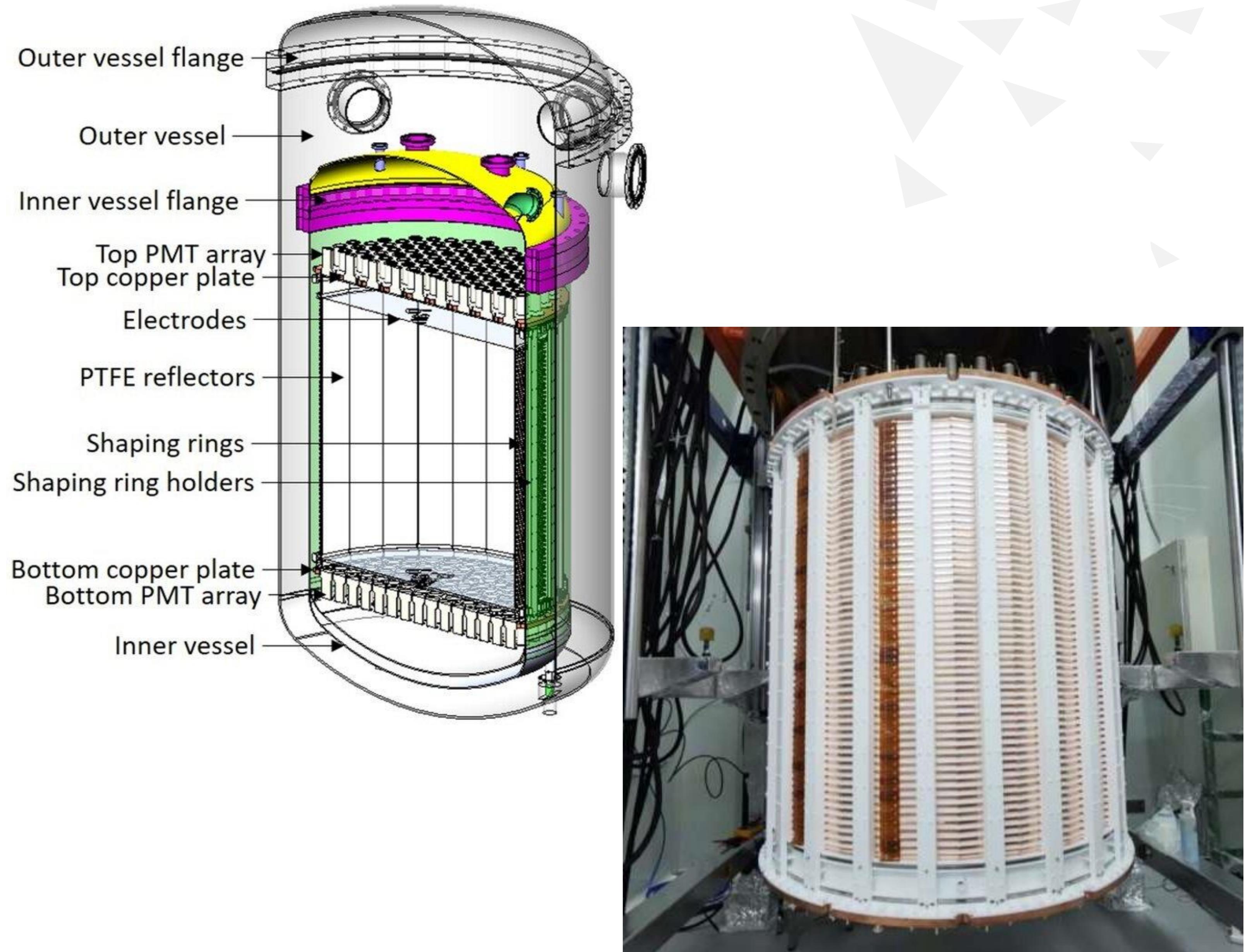
Детекторы на основе жидкого ксенона

ПЛЮСЫ:

- **Большая масса** ($A = 131$) – хорошо для спин независимого взаимодействия вимпов ($\sigma \sim A^2$);
- **Высокая плотность** (3 г/см³) – можно сделать довольно компактный детектор с гибкой геометрией в целом;
- Сравнительно несложная криогеника (-100 °C);
- Высокая скорость дрейфа электронов (2 мм/мкс);
- Сравнительно хорошо поддается очистке;
- Наибольшая конверсионная эффективность среди благородных газов.

МИНУСЫ:

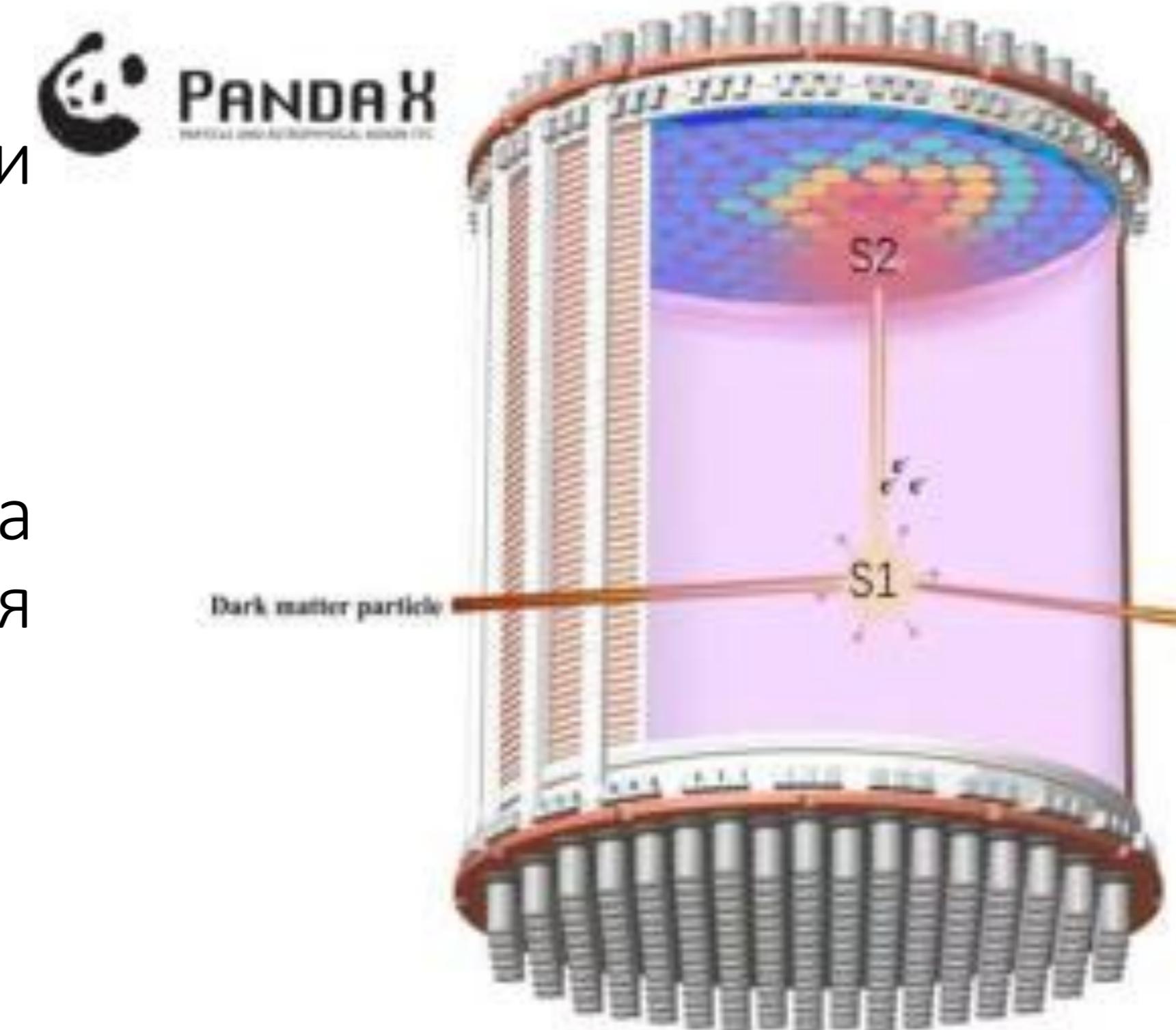
- Малое производство (50 т/год);
- Фоновая радиоактивность (Kr).



Экспериментальная установка PandaX-4T: Particle and Astrophysical Xenon Experiments

1. Вакуумный криогенный сосуд

Поддерживает постоянную температуру жидкого и газообразного ксенона;



2. Время-проекционная камера (TPC)

Состоит из катода (нижняя сетка), анода (верхняя сетка и газовый слой) и сеток для формирования равномерного поля;

3. Фотоумножители

~200 фотоумножителей;

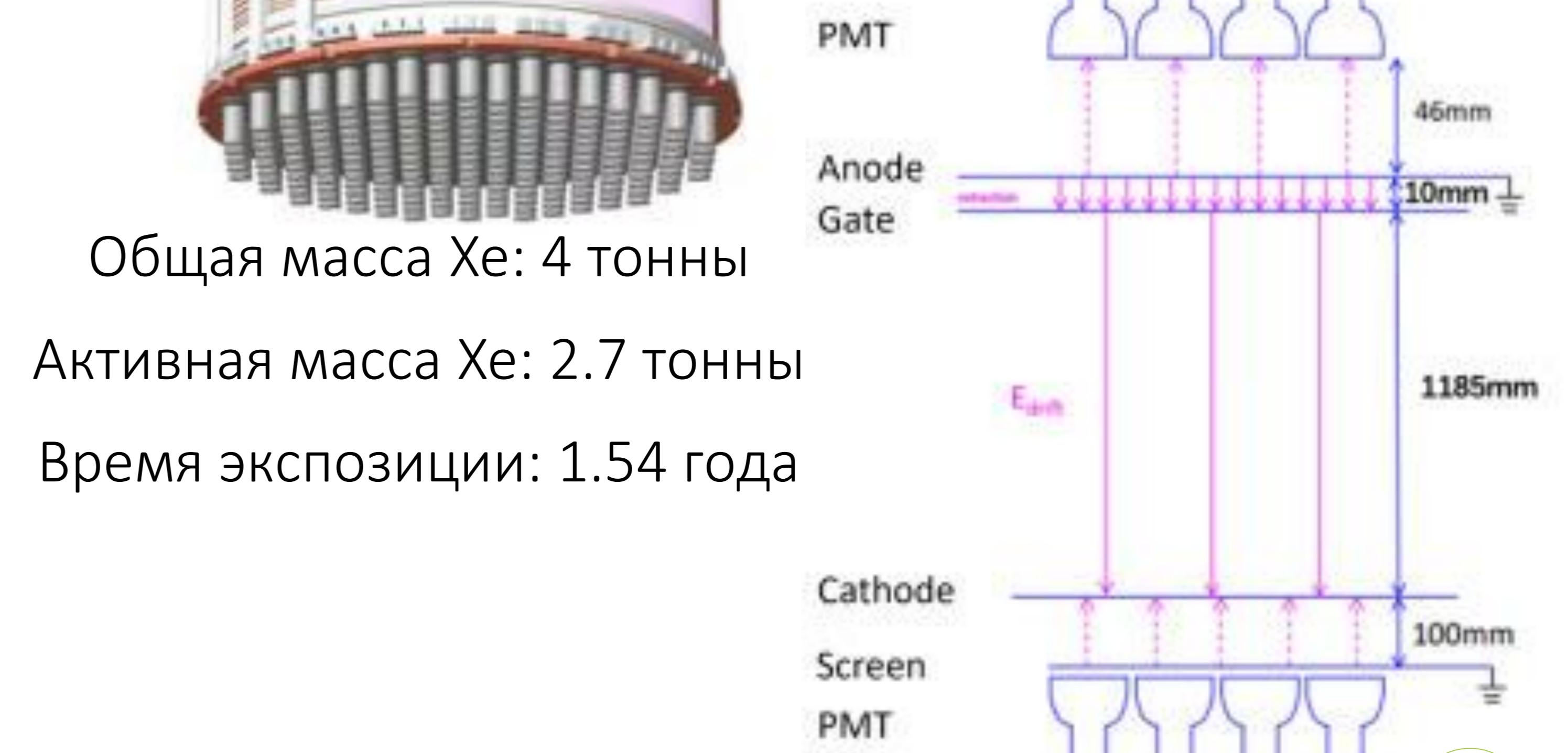
4. Система очистки ксенона

Ксенон постоянно циркулирует в замкнутом цикле и проходит очищение от O₂, H₂O и Kr;

5. Водяной черенковский детектор

Водяной слой 10x10 м, служащий в качестве дополнительного пассивного экрана.

PandaX расположен в Китайской подземной лаборатории Цзиньпина на глубине 2400 м.

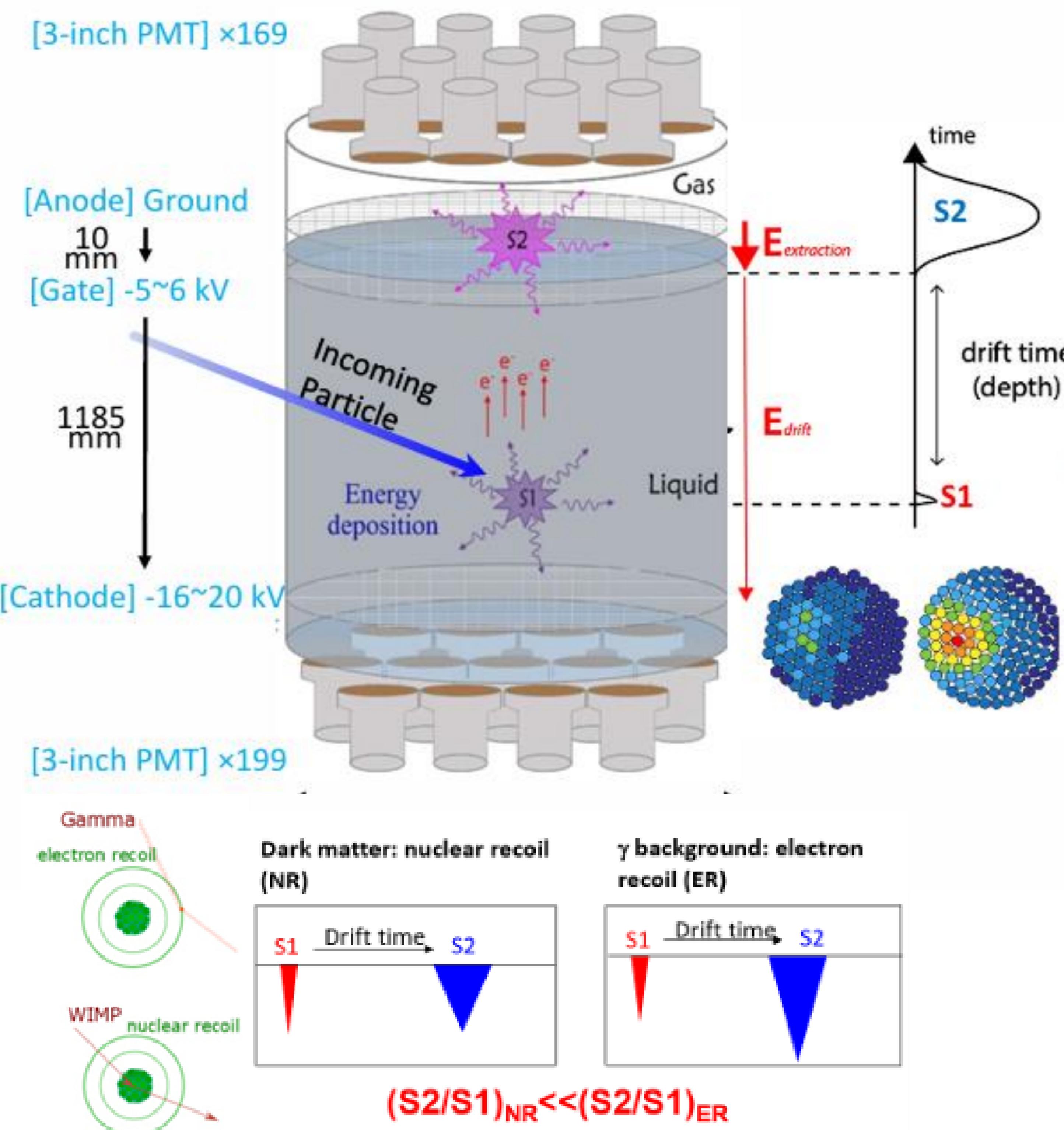


Общая масса Хe: 4 тонны

Активная масса Хe: 2.7 тонны

Время экспозиции: 1.54 года

Отбор событий в эксперименте PandaX-4T



Регистрируются два задержанных во времени сигнала.

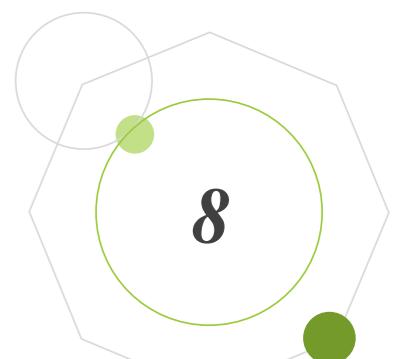
S1 – сцинтиляционный сигнал в жидкой фазе, возникающий в следствии ионизации атомов мишени с их возбуждением и последующим излучением фотона. Эти фотоны собираются ФЭУ сверху и снизу.

S2 – электролюминесцентный сигнал в газовой фазе, возникающий в следствии вытягивания носителей заряда приложенным внешним полем из жидкой в газовую среду, где они ускоряются более сильным полем, образуя превосходящий по величине S1 сигнал.

Восстановление координат:

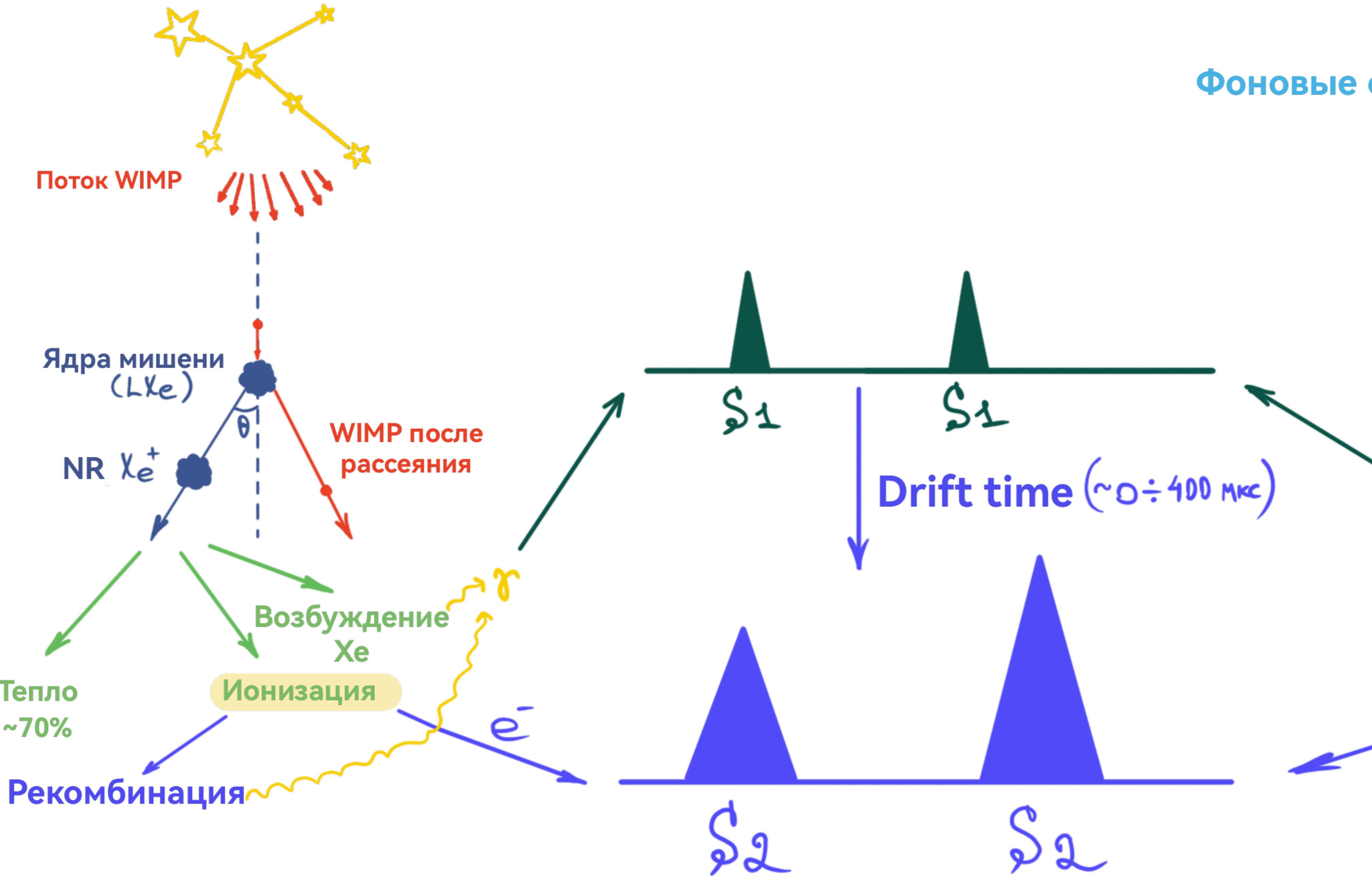
$$Z = 1.44 \cdot (t_{s2} - t_{s1});$$

X, Y восстанавливаются по распределению светового сигнала в верхнем массиве ФЭУ.

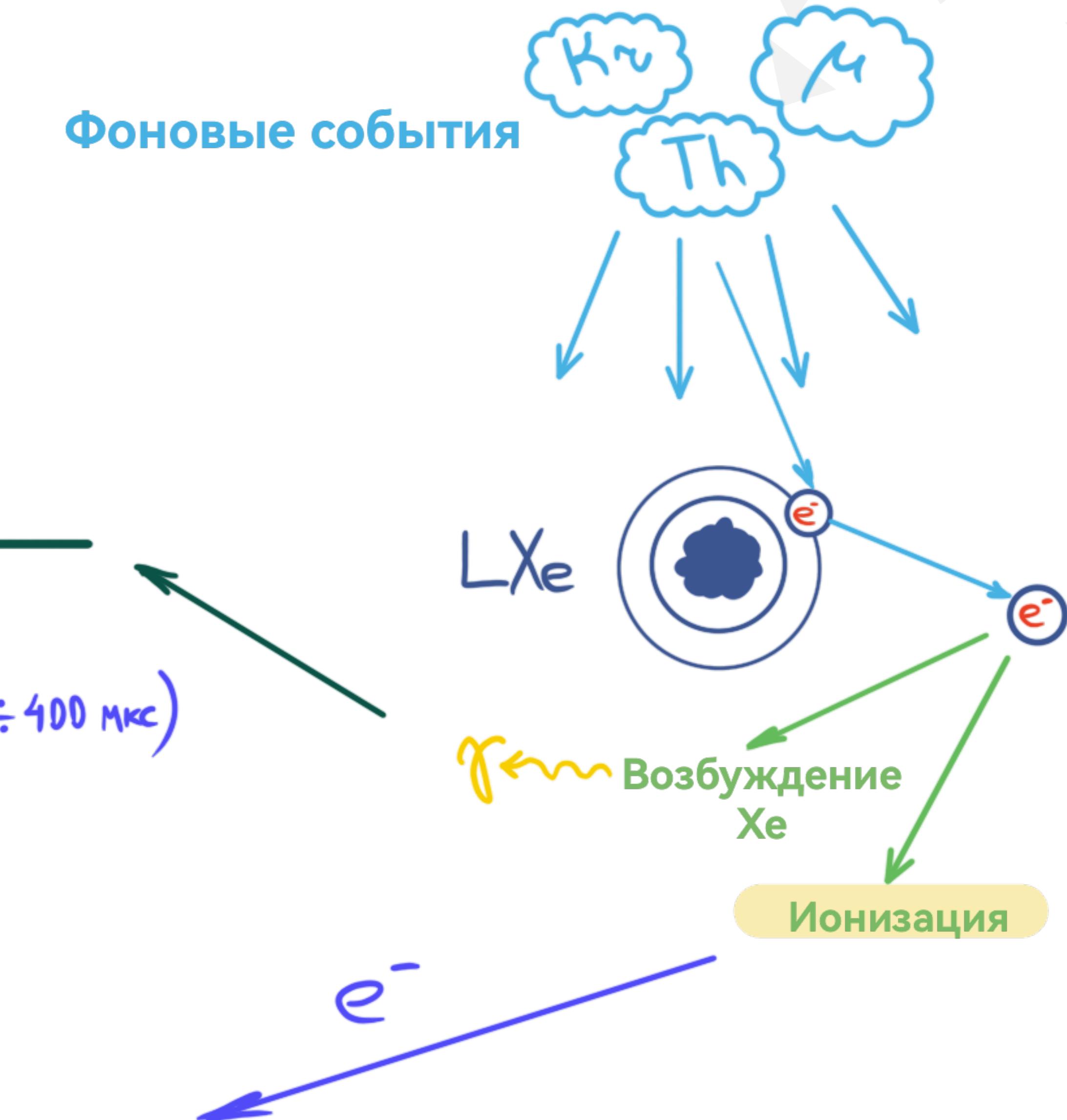


Формирование сигнала в эксперименте PandaX-4T

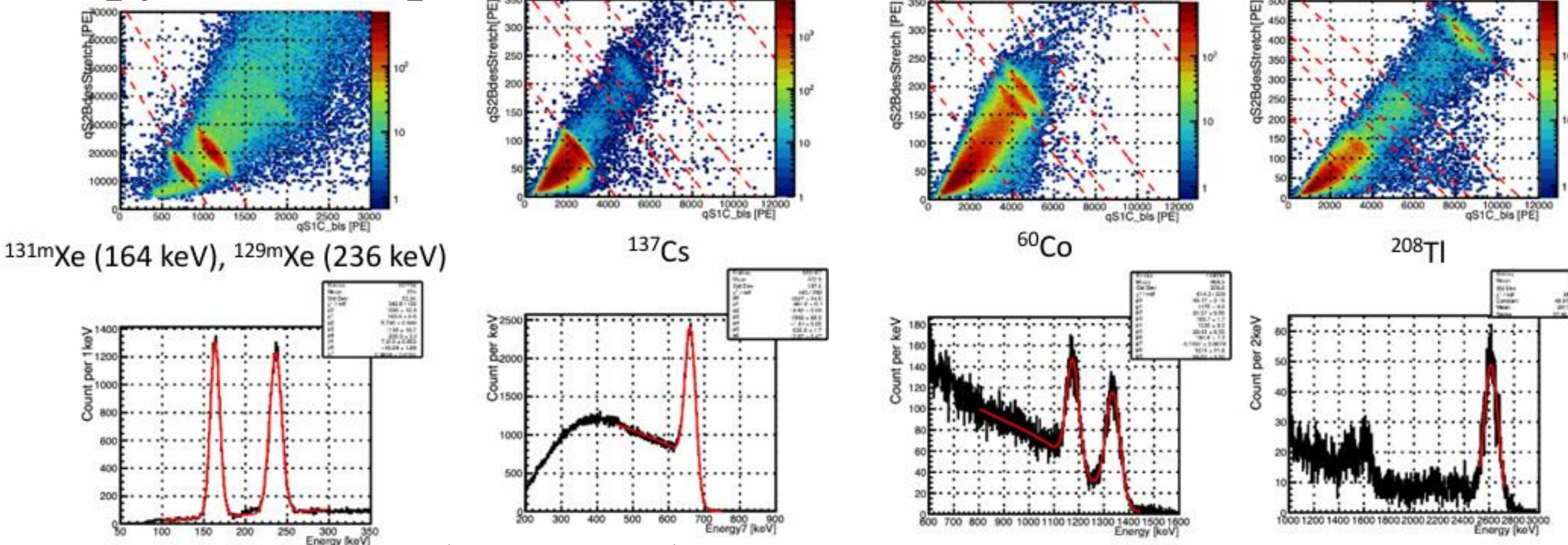
Ядро отдачи (NR)



Электрон отдачи (ER)



Реконструкция энергий в эксперименте PandaX-4T



$$E = 13.7 \text{ eV} \cdot \left(\frac{S_1}{PDE} + \frac{S_{2b}}{EEE \cdot SEG_b} \right),$$

S_1 – измеренный первичный сигнал, фотоэлектроны;

S_2 – сигнал в газовой среде, фотоэлектроны;

$PDE(\%) = 9.0 \pm 0.2$ – Photon Detection Efficiency;

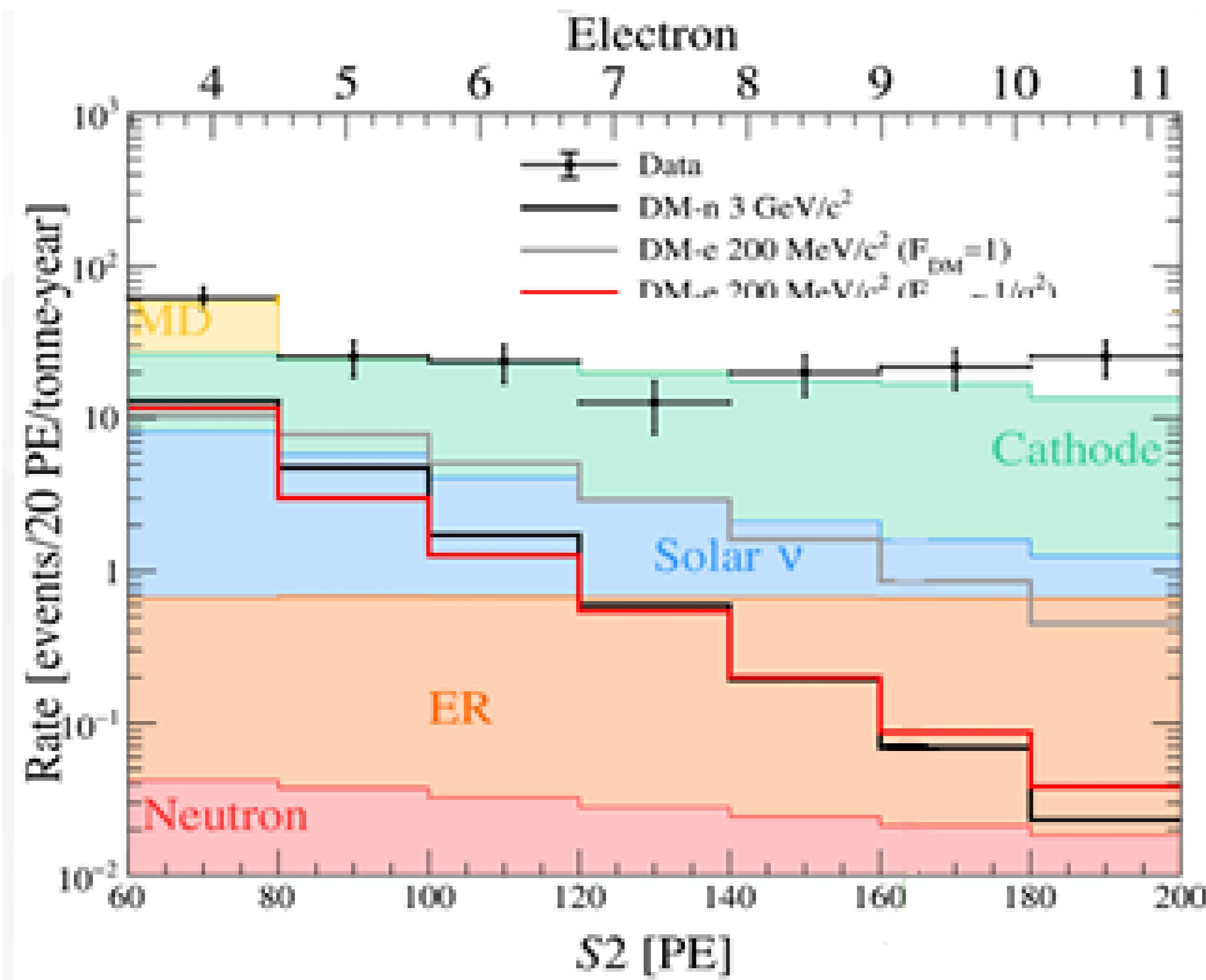
$EEE(\%) = 90.2 \pm 5.4$ – Electron Extraction Efficiency;

$SEG_b \left(\frac{PE}{e} \right) = 3.8 \pm 0.1$ – Single Electron Gain.

Калибровка внутренними источниками (изотопы ксенона) нужна для построения карты отклика, которая демонстрирует поглощение электронов в различных областях детектора;

Внешние источники используются для калибровки энергетической шкалы.

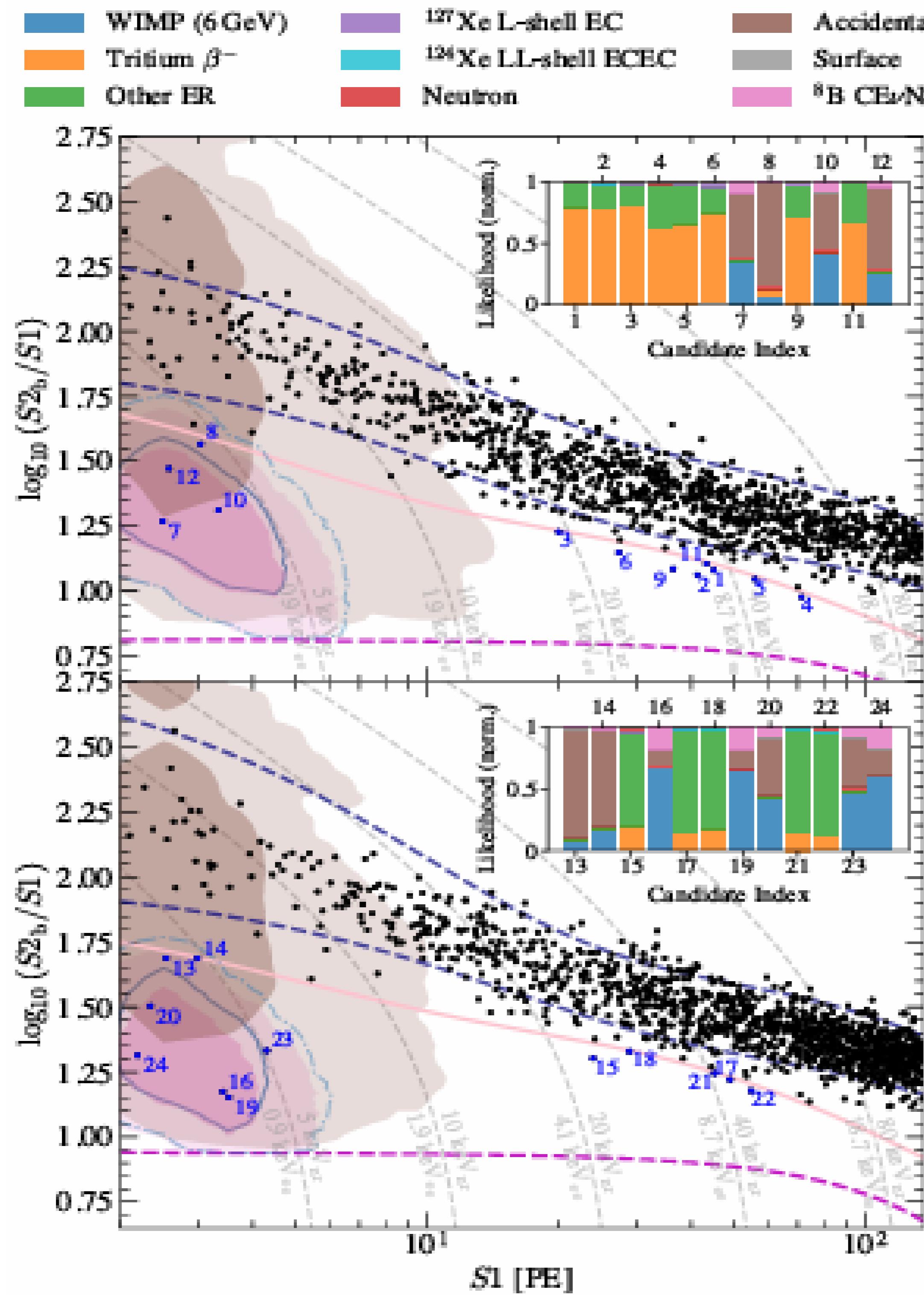
Оценка фоновых событий в эксперименте PandaX-4T



Разложение сигнала по источникам фона в
области малых S2

- Ядерные отдачи от **нейтронов** (космогенных или индуцированных из конструкционных материалов);
- **ER** (электронные рассеяния) – β , γ от конструкционных материалов, радона и криптона;
- **Солнечные нейтрино** – когерентное упругое рассеяние нейтрино на ядрах ксенона, формирующее neutrino floor;
- **События у катода**, сформированные нестабильностью внешнего поля и фотоэффектом;
- **Электронная задержка** после больших сигналов S2.

Распределение событий



Распределение кандидатов в события ТМ для Run 0 и Run 1: по оси x – сигнал S1, по оси y – логарифм S2/S1.

Темно-синие пунктирные линии показывают границы фоновых событий.

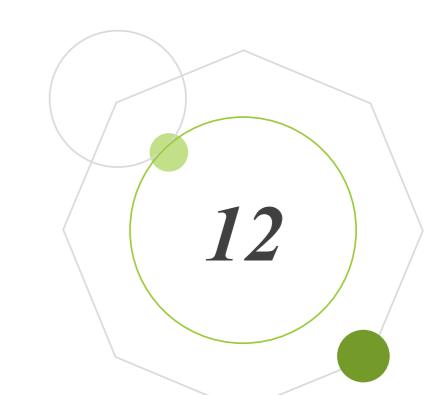
Розовая сплошная – ожидаемое распределение ядерных отдач (медиана).

Фиолетовый пунктир – 99.5% граница для событий ядерных отдач.

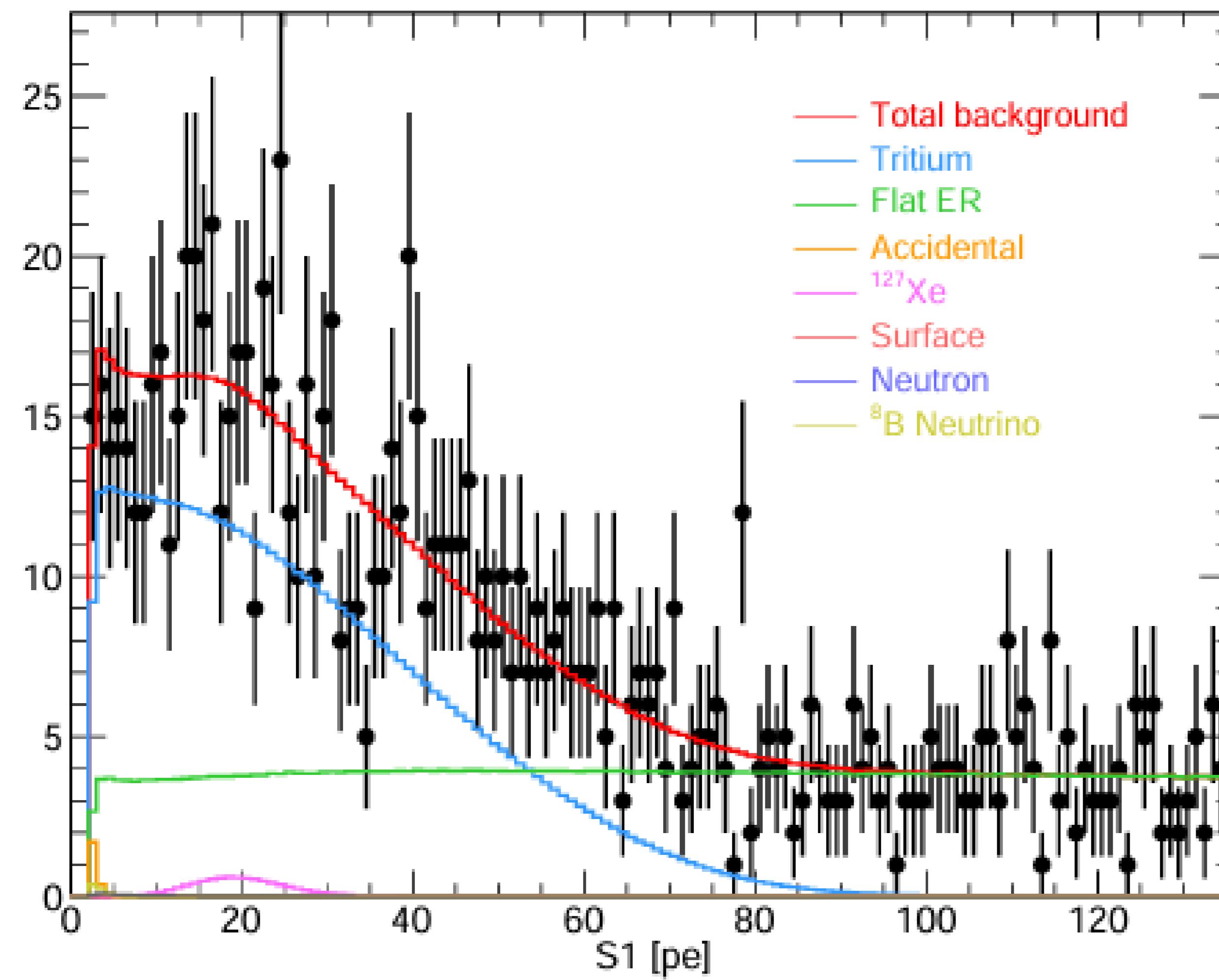
Синие точки – кандидаты в ТМ.

Гистограммные вставки показывают вероятностный вклад сигнала или фона.

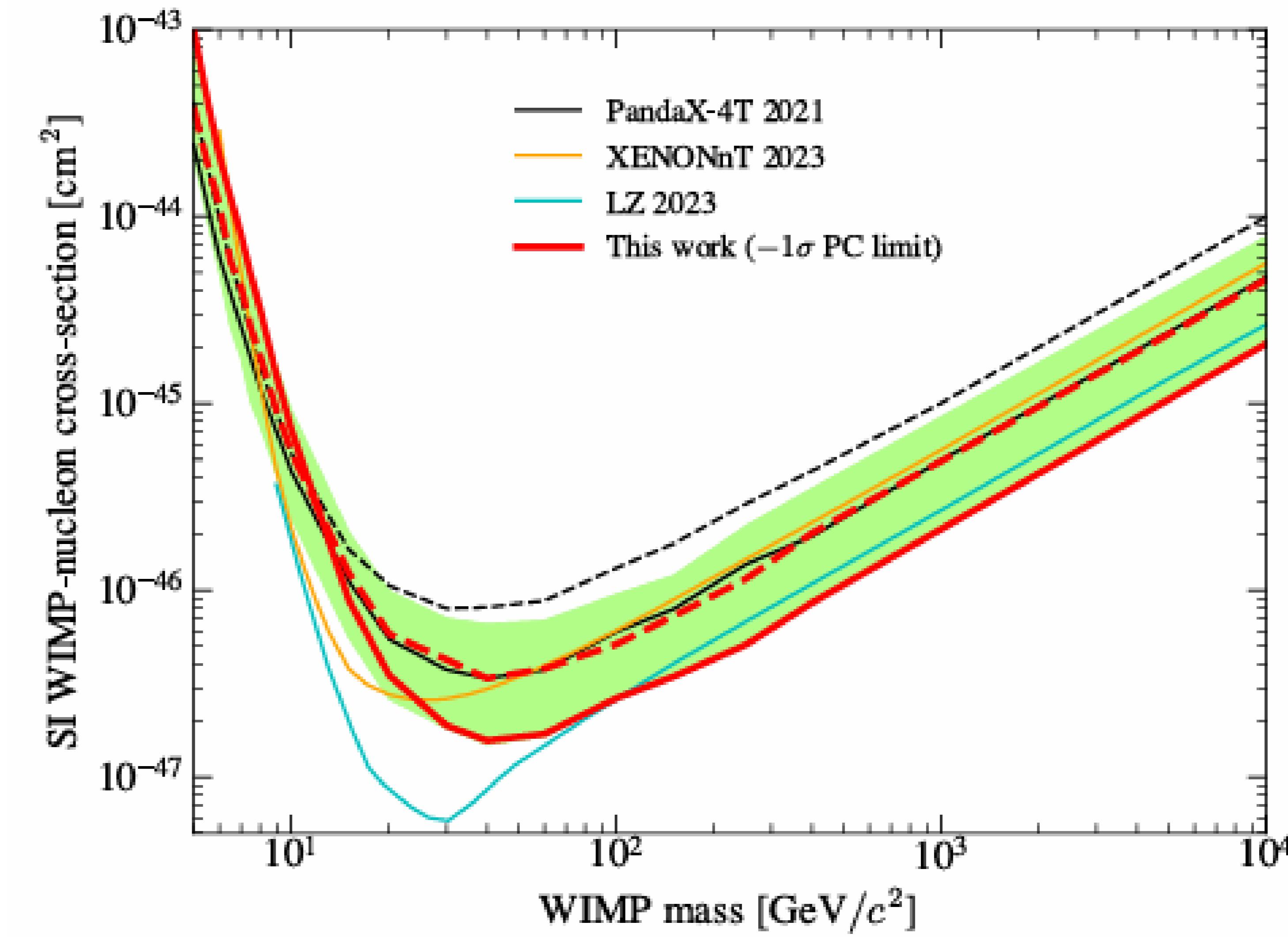
Розовая область – Region Of Interest, область, в которой ожидается обнаружение событий от WIMP.



Результат

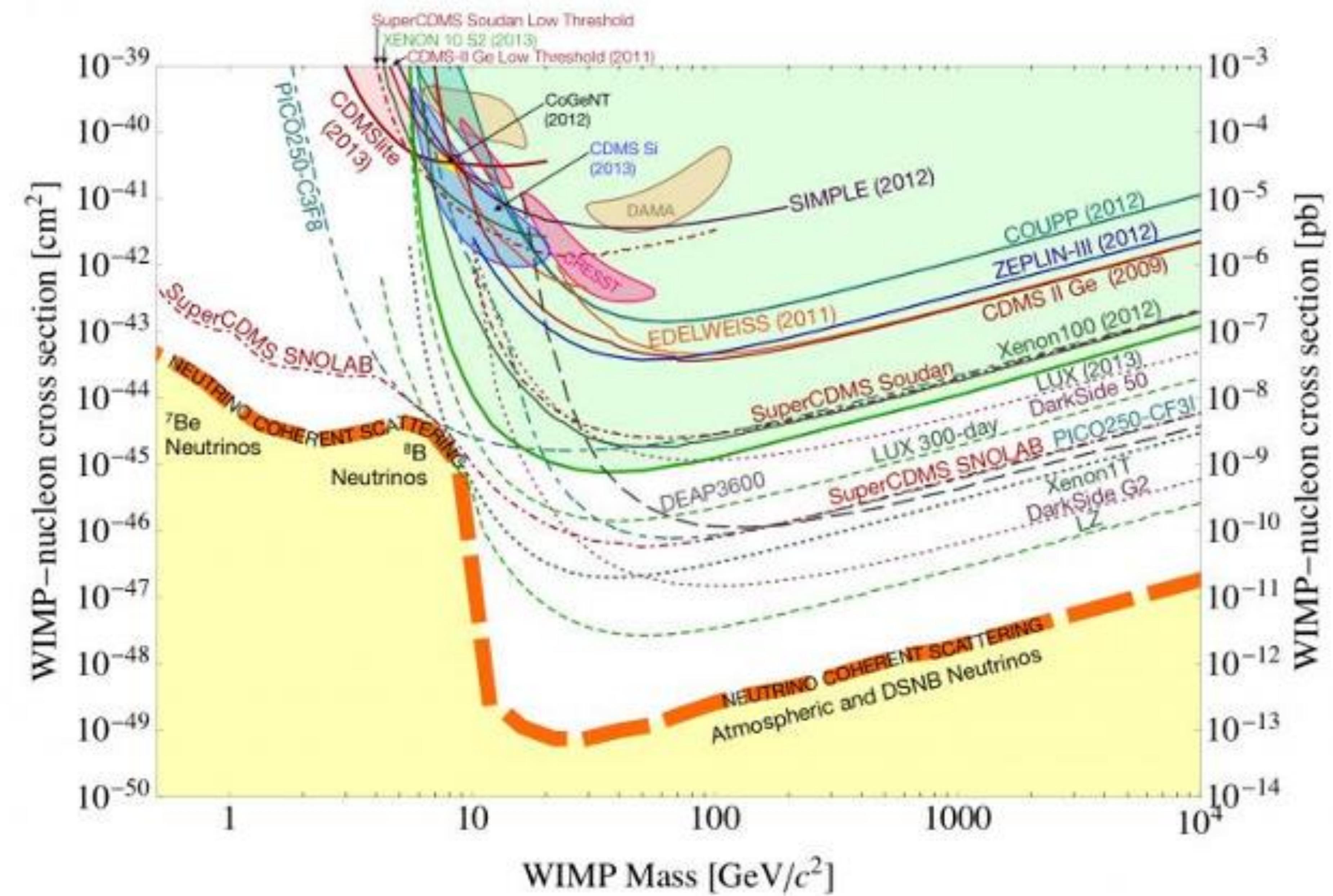


Сигнал от WIMPов не
зарегистрирован



Верхний предел на сечение WIMP
 $1.6 \times 10^{-47} \text{ см}^2$ при массе $\sim 40 \text{ ГэВ}/c^2$

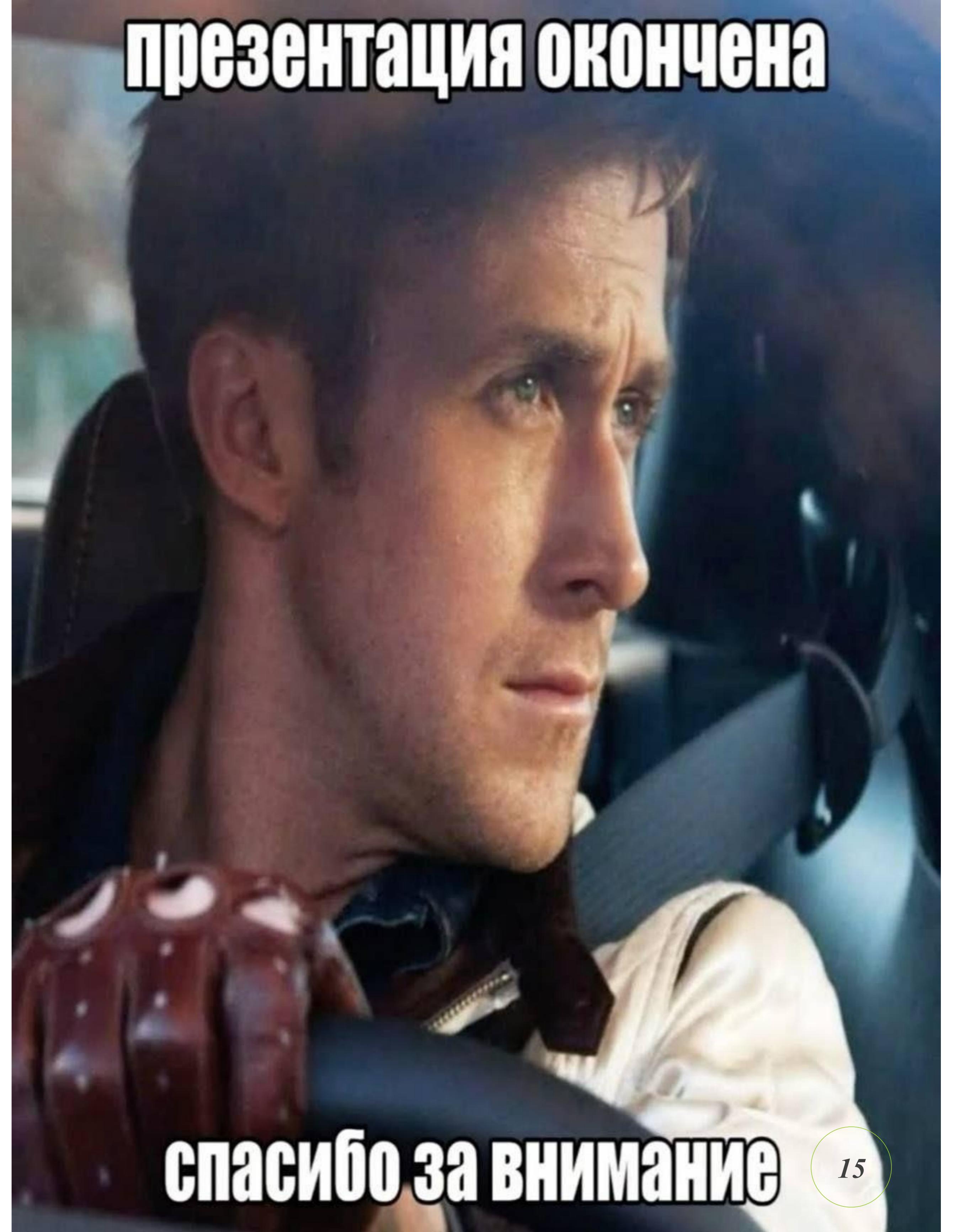
Вместо заключения



Экспериментально полученные ограничения на сечения
взаимодействия частиц ТМ от их массы

Спасибо за внимание

презентация окончена



спасибо за внимание