



# Поиски темной материи на PandaX-4T

Шафикова Дина Рашидовна

M24-114







## История и кандидаты на роль ТМ

- Парадокс Цвикки – 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 смешивающиеся 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.



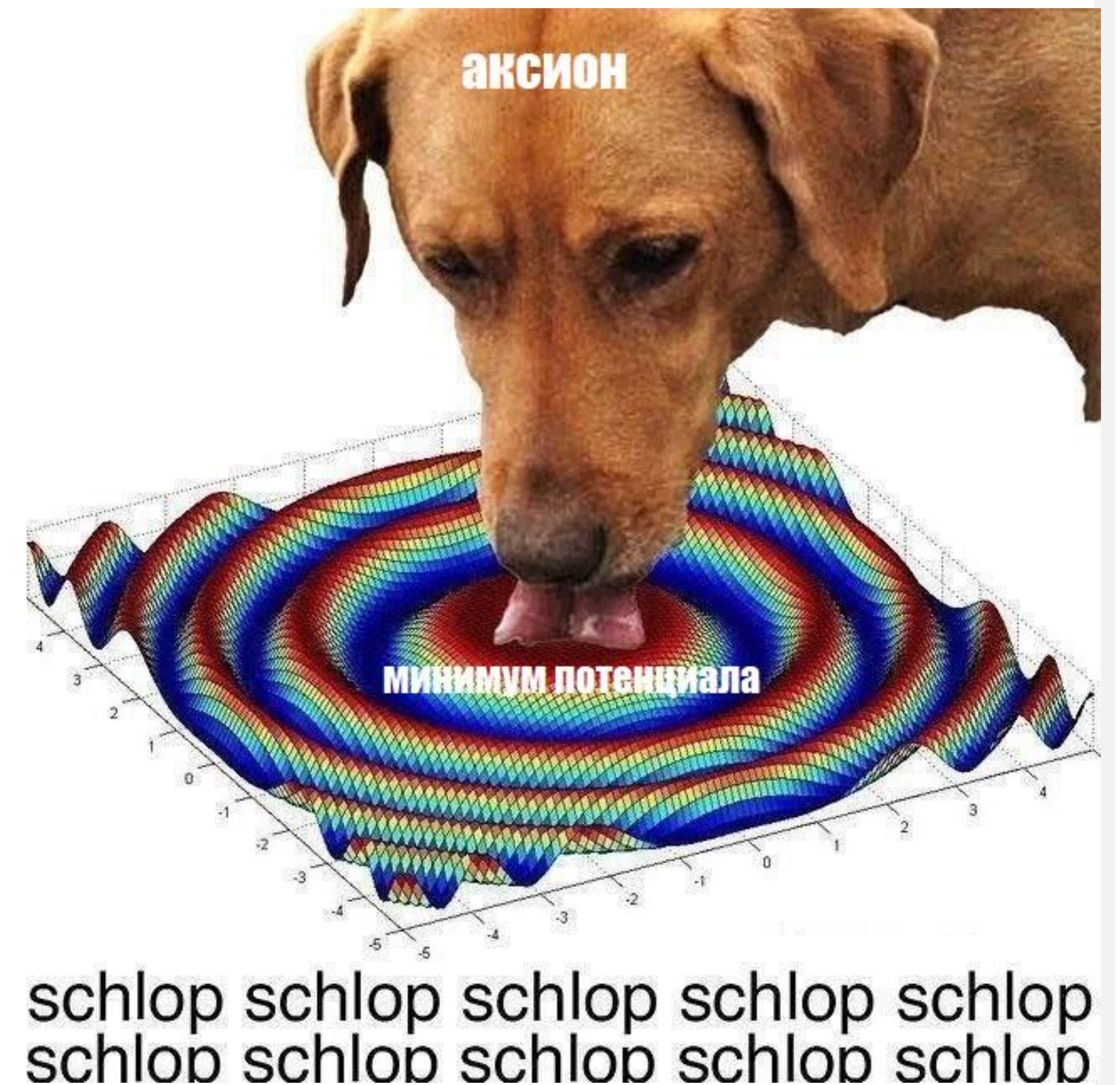
# Аксион

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

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

При спонтанном нарушении симметрии рождается псевдоскалярное поле – аксион, – которое динамически настраивает параметр  $\theta$ , 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.





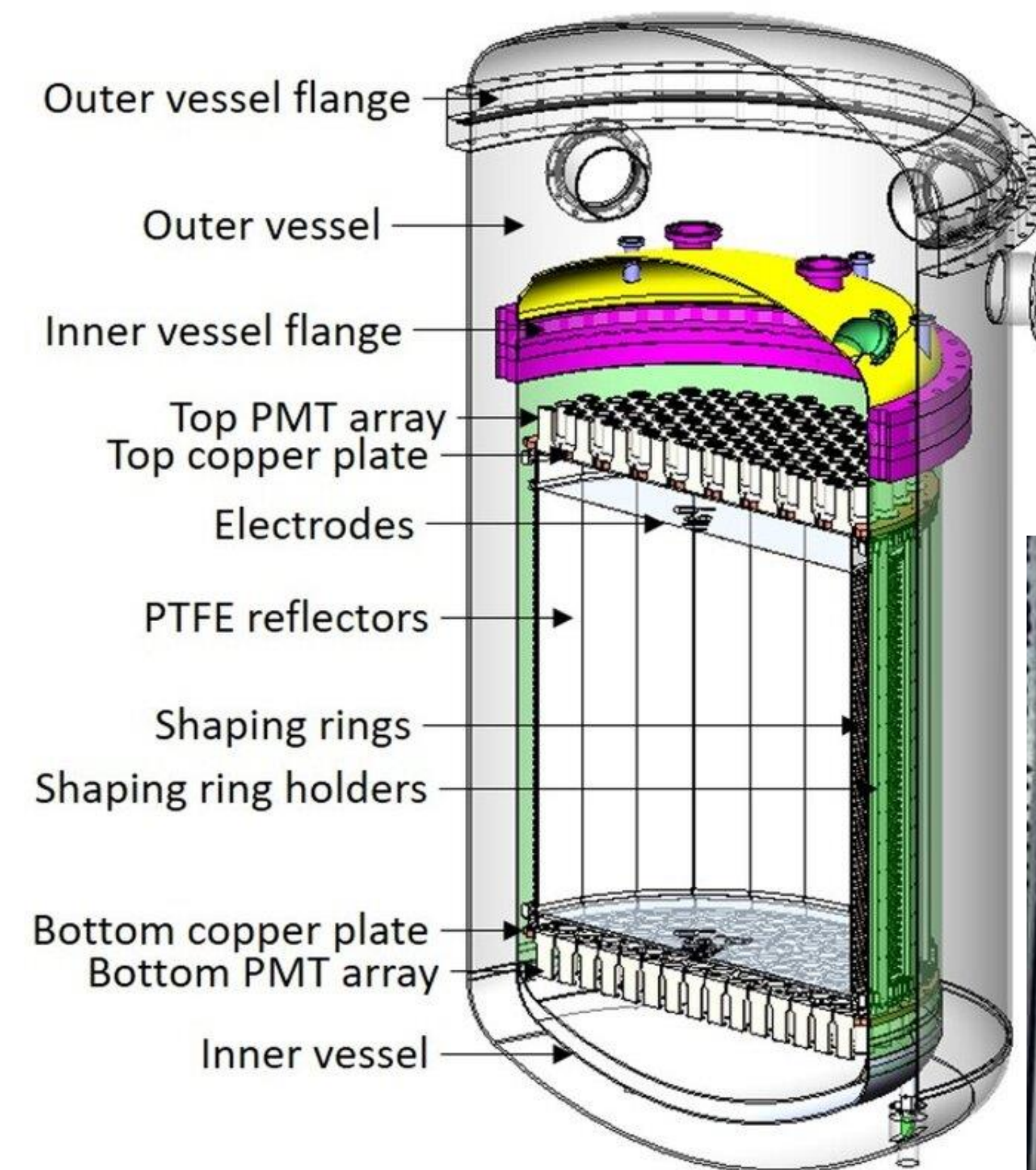
# Детекторы на основе жидкого ксенона

## ПЛЮСЫ:

- Большая масса ( $A = 131$ ) – хорошо для спин независимого взаимодействия вимпов ( $\sigma \sim A^2$ );
- Высокая плотность ( $3 \text{ г/см}^3$ ) – можно сделать довольно компактный детектор с гибкой геометрией в целом;
- Сравнительно несложная криогеника ( $-100^\circ\text{C}$ );
- Высокая скорость дрейфа электронов ( $2 \text{ мм/мкс}$ );
- 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

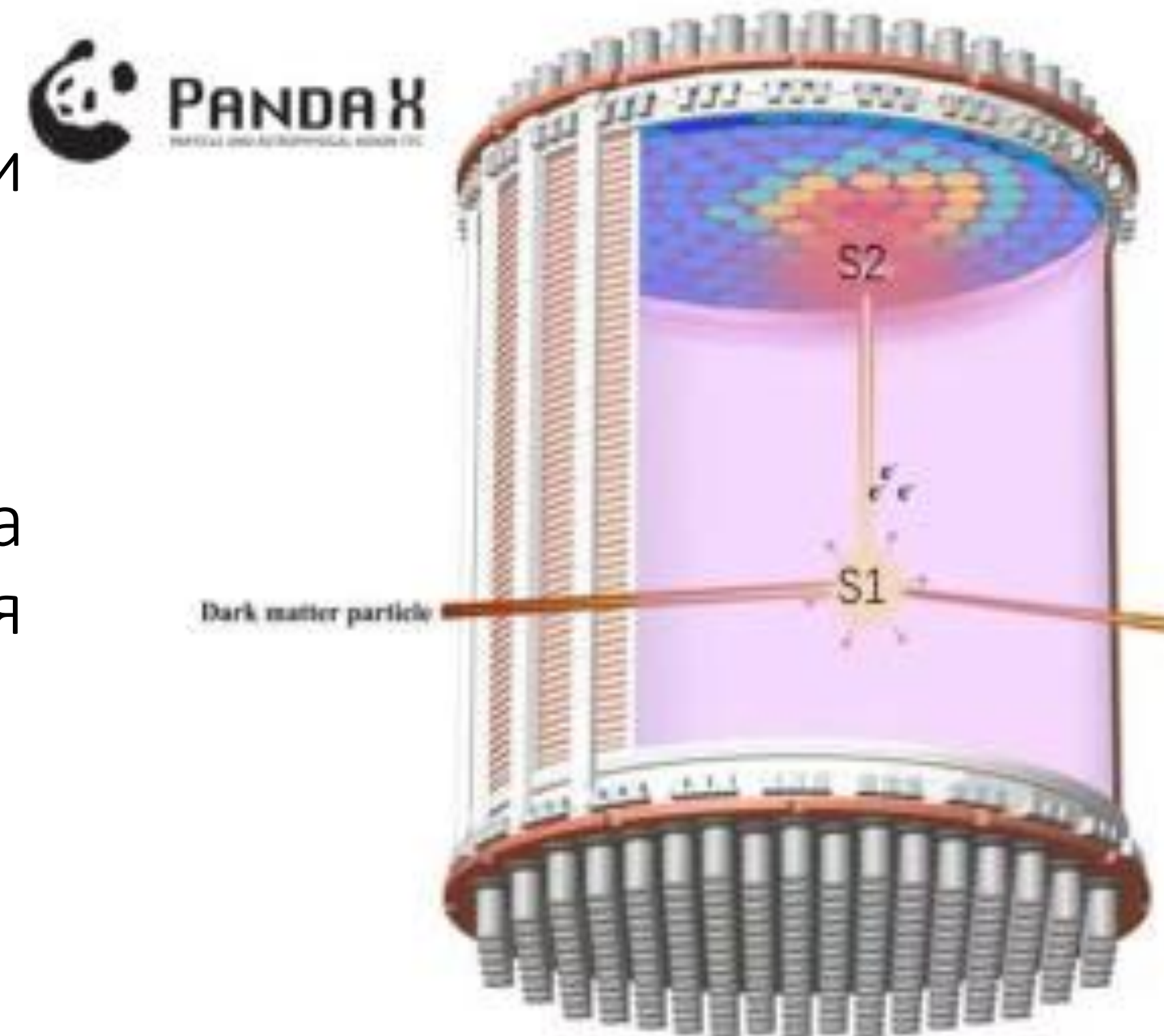
~200 фотоумножителей;

## 4. Система очистки ксенона

Ксенон постоянно циркулирует в замкнутом цикле и проходит очищение от  $O_2$ ,  $H_2O$  и  $Kr$ ;

## 5. Водяной черенковский детектор

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

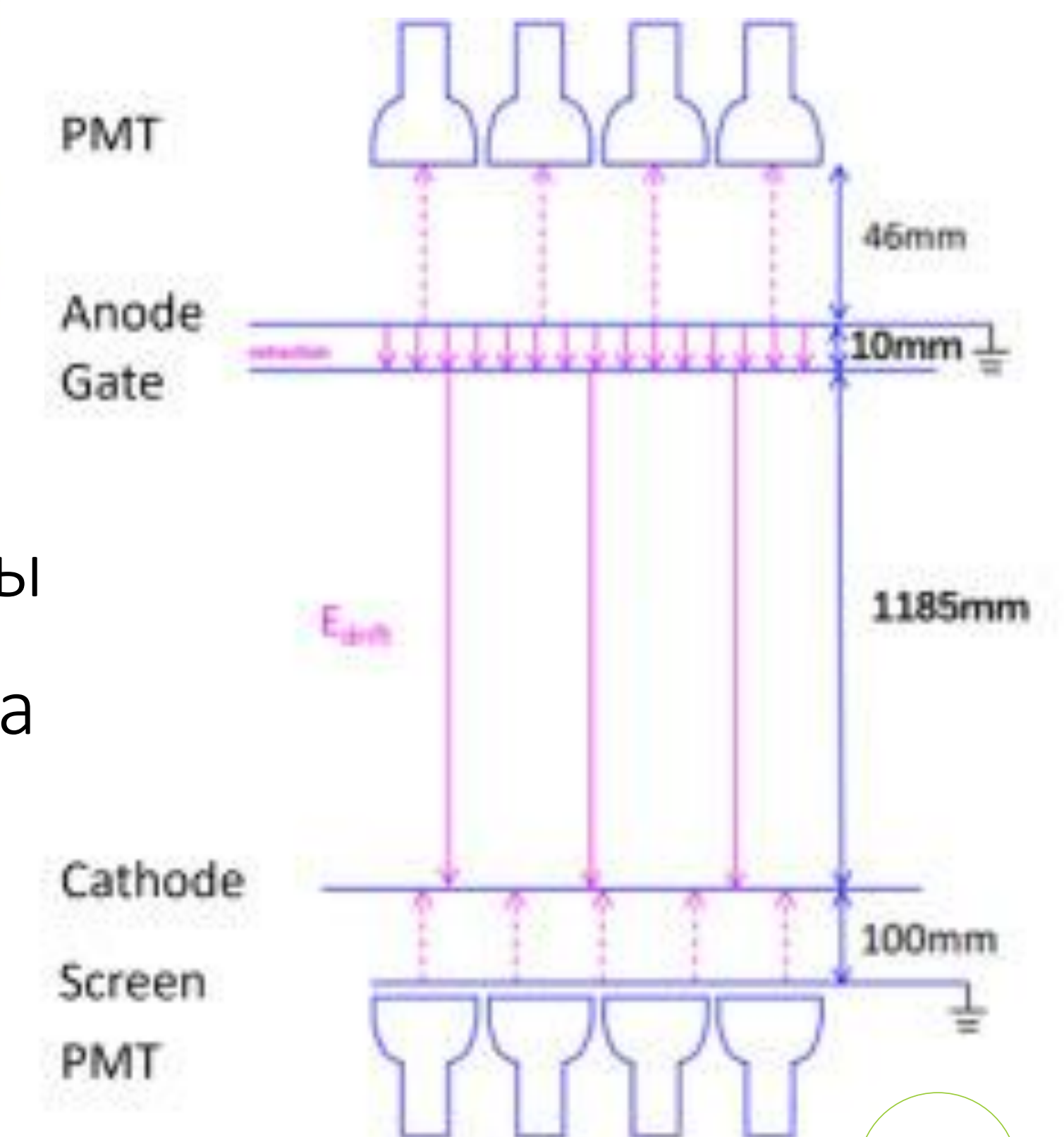


Общая масса Xe: 4 тонны

Активная масса Xe: 2.7 тонны

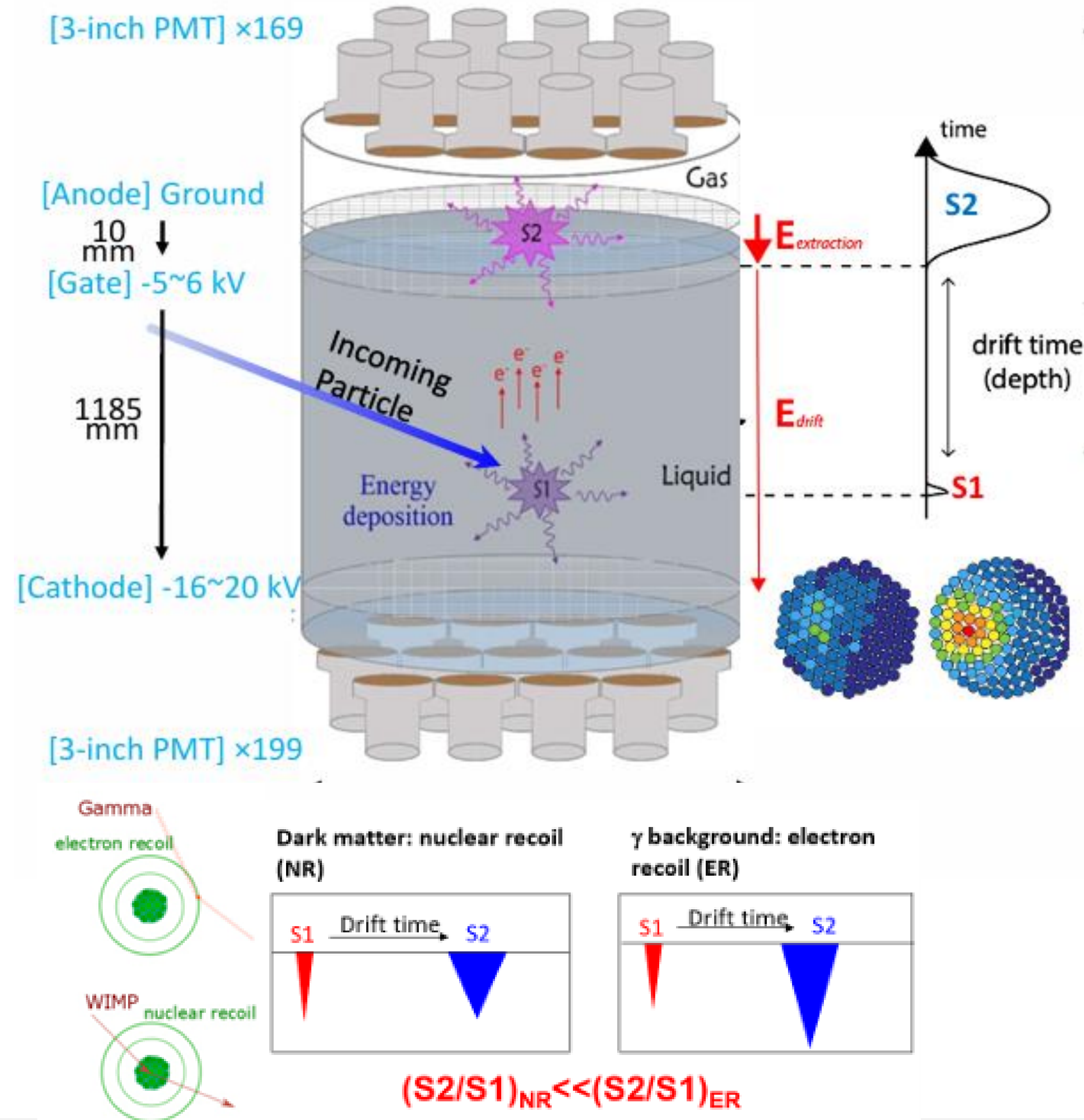
Время экспозиции: 1.54 года

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





# Отбор событий в эксперименте PandaX-4T



Регистрируются два задержанных во времени сигнала.

**S1** – **сцинтилляционный 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.

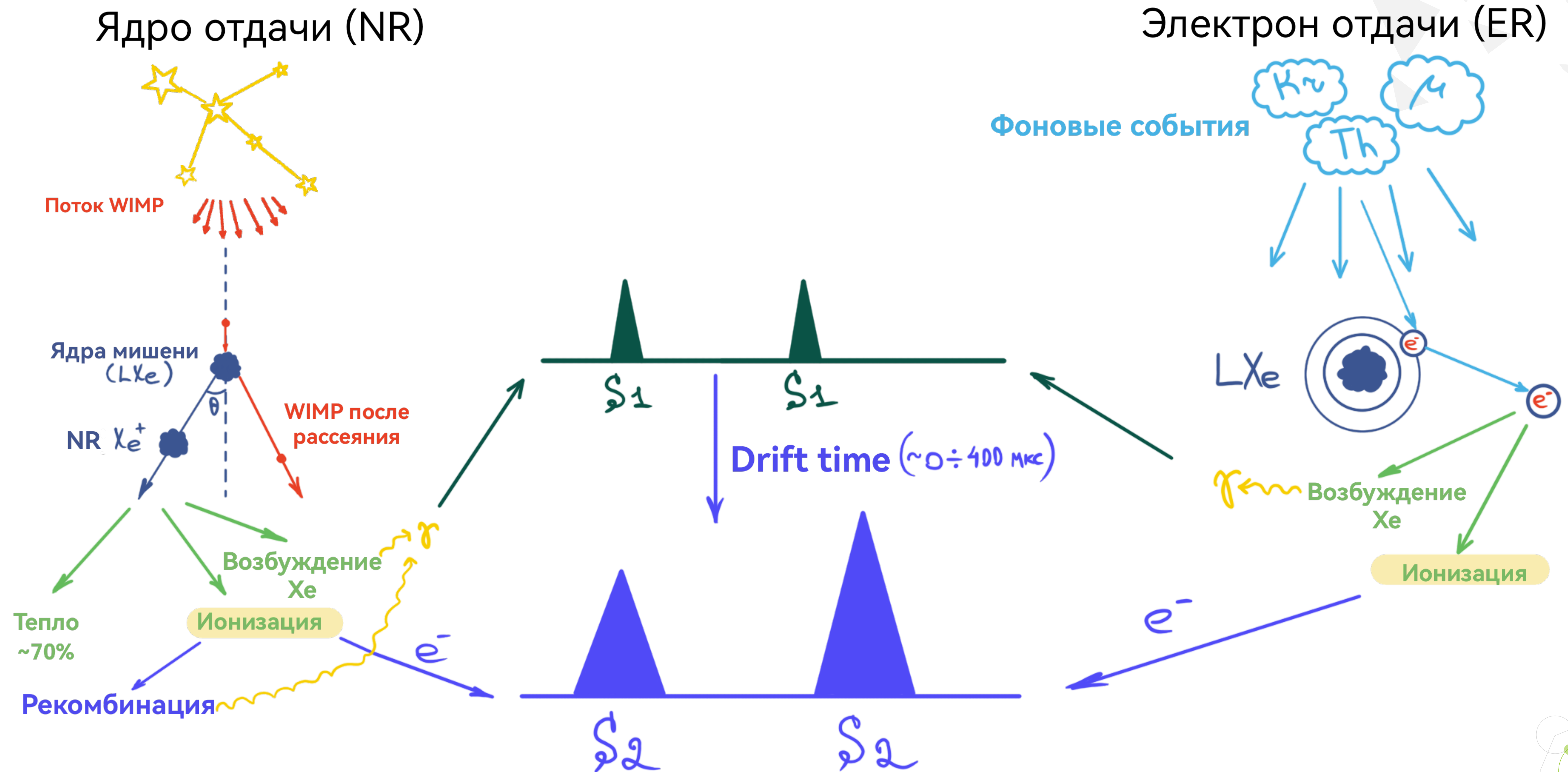
Восстановление координат:

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

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

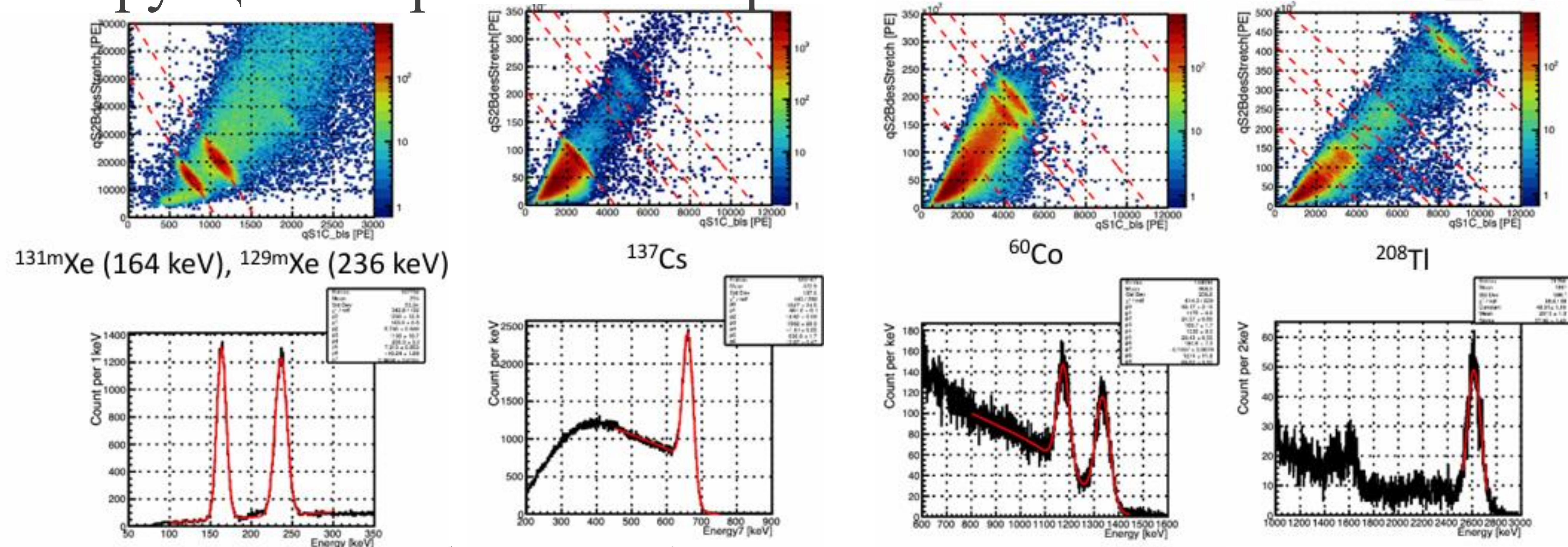


# Формирование сигнала в эксперименте PandaX-4T





# Реконструкция энергий в эксперименте PandaX-4T



$$E = 13.7 \text{ eV} \cdot \left( \frac{S1}{PDE} + \frac{S2b}{EEE \cdot SEG_b} \right),$$

$S1$  – измеренный первичный сигнал, фотоэлектроны;

$S2$  – сигнал в газовой среде, фотоэлектроны;

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

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

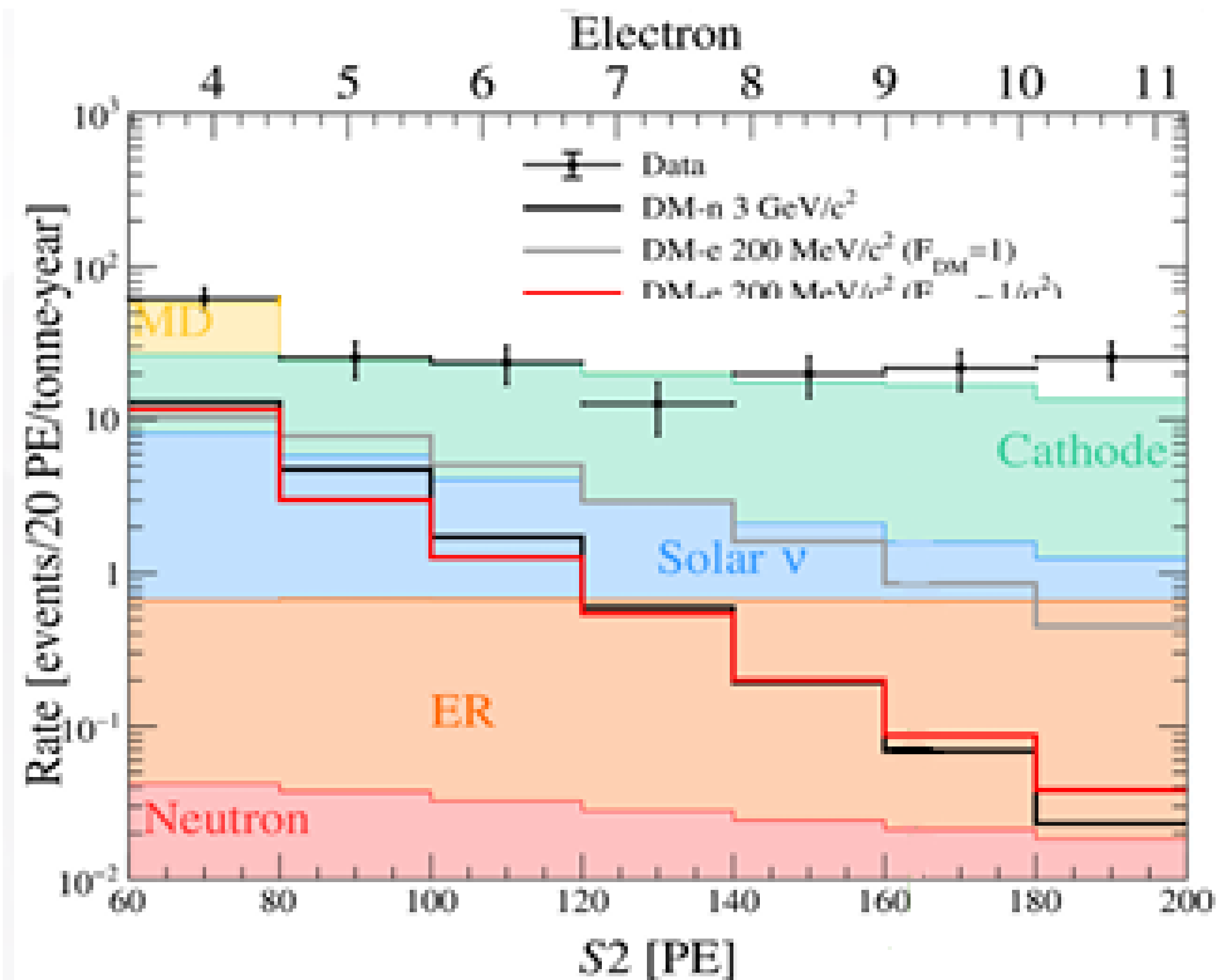
$SEG_b \left( \frac{PE}{e} \right) = 3.8 \pm 0.1$  – Single Electron Gain.

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

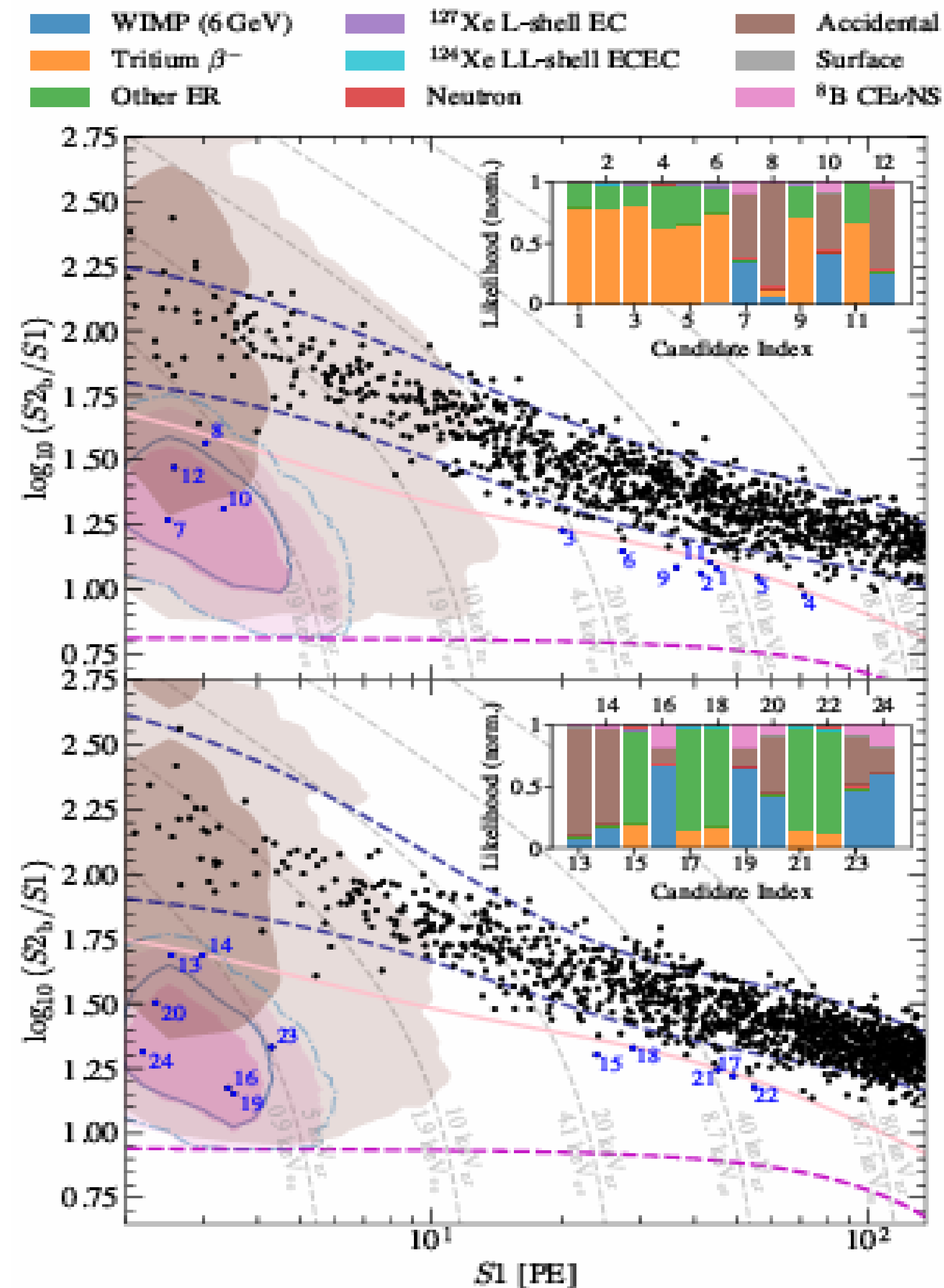


Разложение сигнала по источникам фона в области малых S2

- Ядерные отдачи от **нейтронов** (космогенных или индуцированных из конструкционных материалов);
- **ER** (электронные рассеяния) —  $\beta$ ,  $\gamma$  от конструкционных материалов, радона и криптона;
- **Солнечные нейтрино** — когерентное упругое рассеяние нейтрино на ядрах ксенона, формирующее neutrino floor;
- **События  $\gamma$  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.

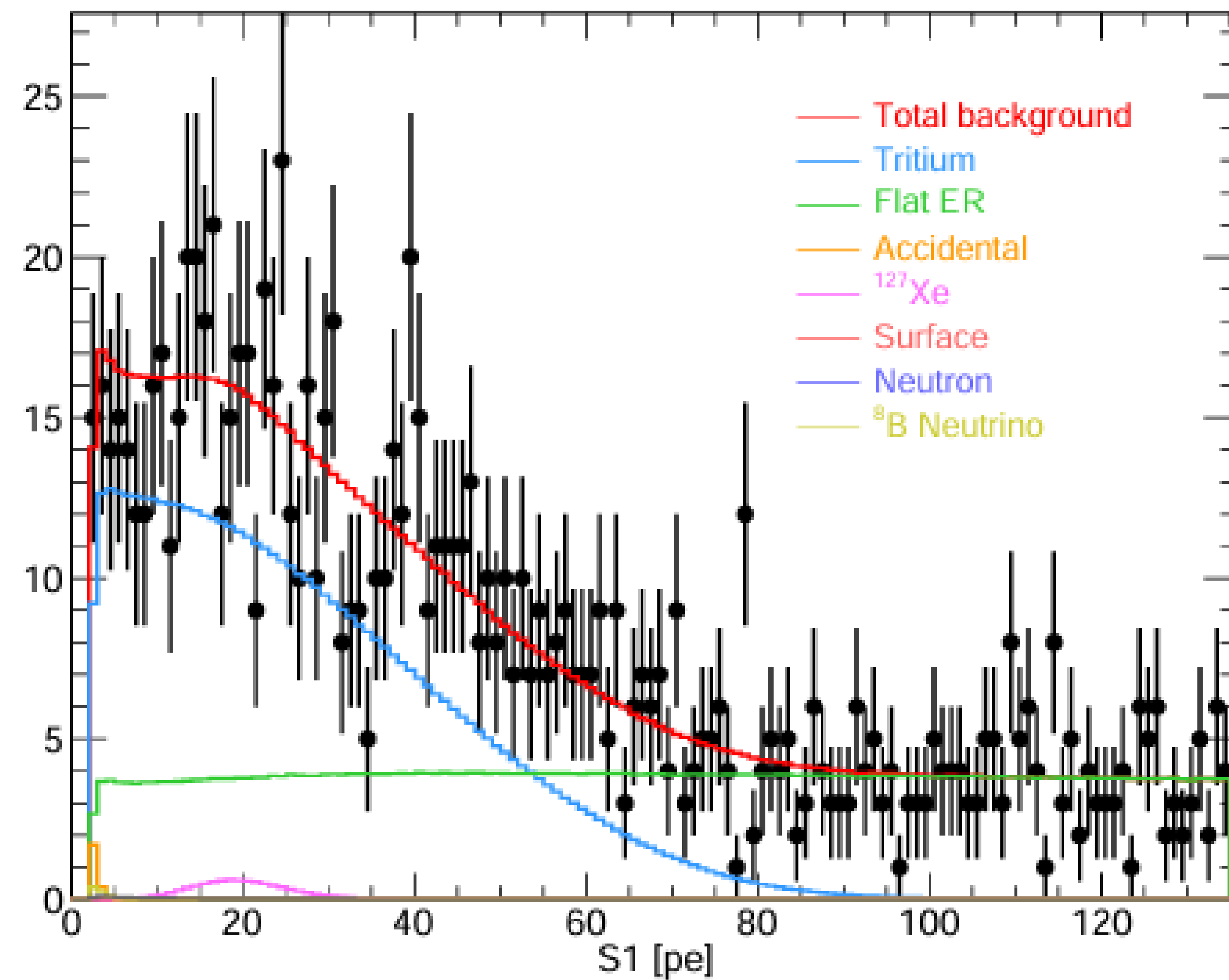
Синие точки – кандидаты в ТМ.

Гистограммные вставки показывают вероятностный вклад сигнала или фона.

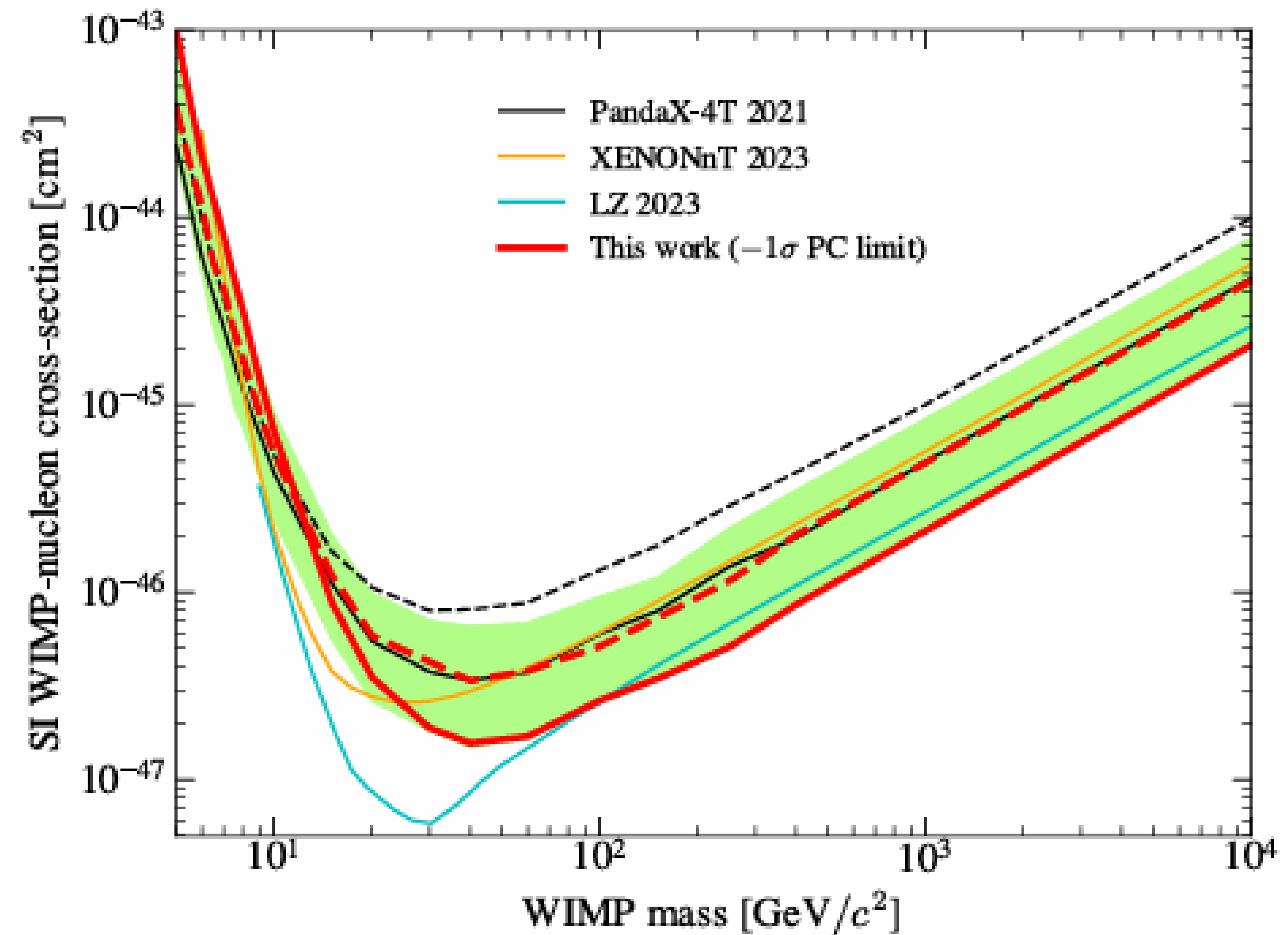
Розовая область – Region Of Interest, область, в которой ожидается обнаружение событий от WIMP.



# Результат



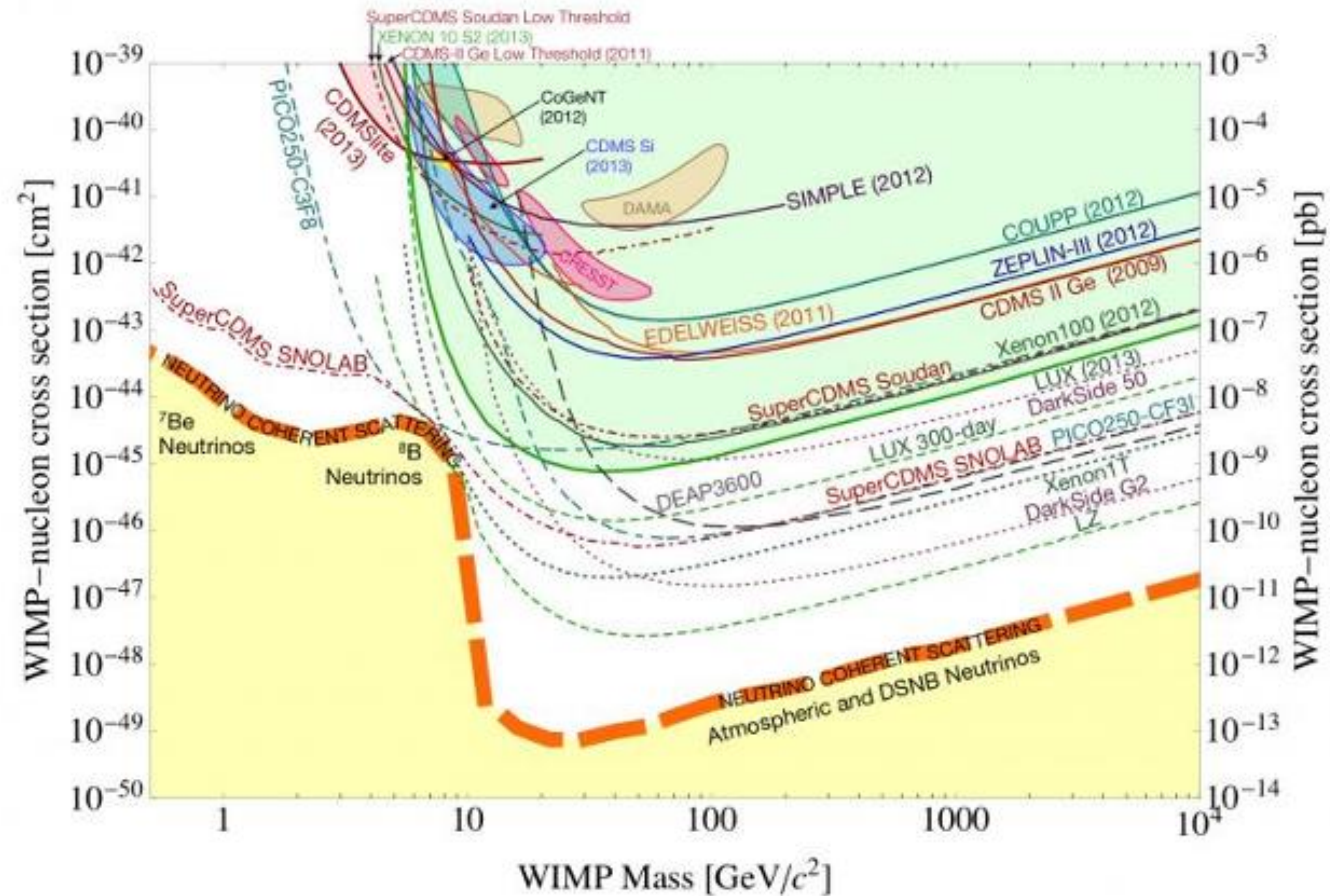
Сигнал от вимпов не  
зарегистрирован



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



# Вместо заключения



Экспериментально полученные ограничения на сечения взаимодействия частиц ТМ от их массы



Спасибо за внимание

