

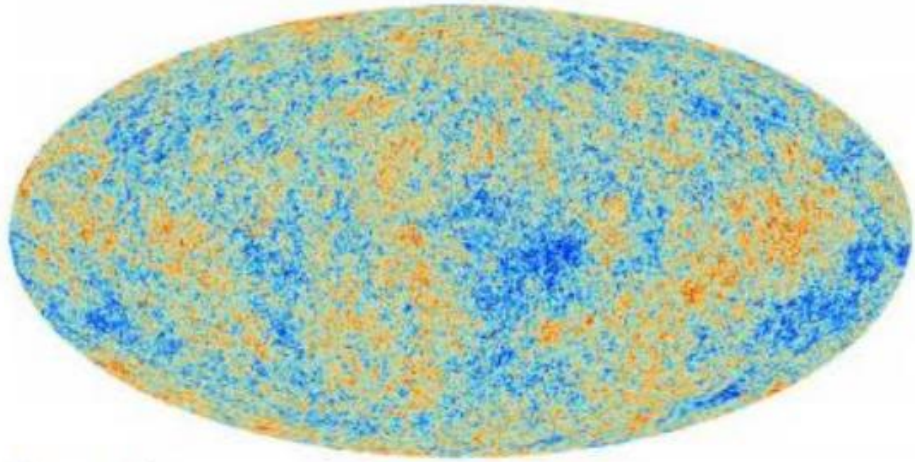


# Поиск легких частиц тёмной материи в эксперименте DarkSide-50

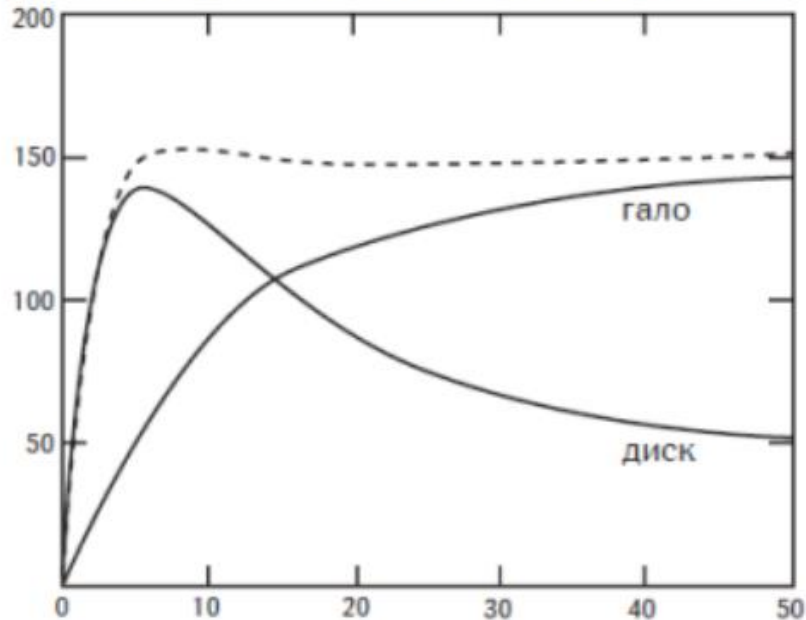
*Сергей Чашин*  
*НИИЯФ МГУ*

**Научный семинар ОЭПВАЯ, 28 сентября 2023, Москва**

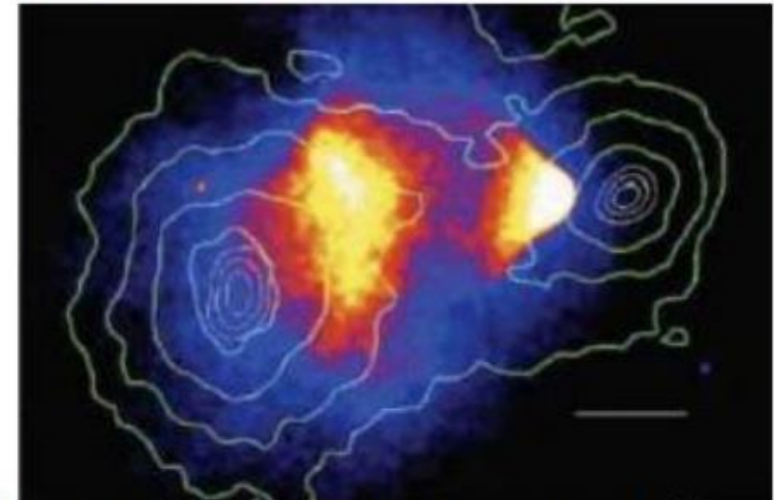
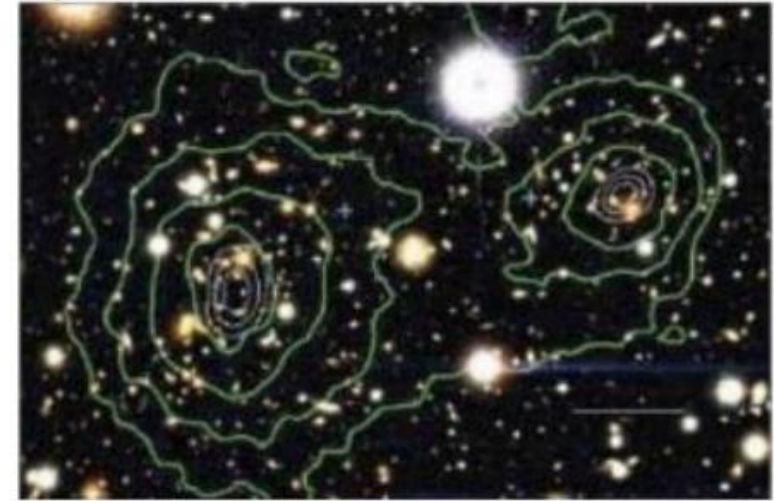
# Тёмная материя



Карта флуктуаций реликтового излучения по данным космической обсерватории «Планк»



Ротационные кривые для галактики М33



Оптическое и рентгеновское изображения кластера 1E0657 558. Кривыми показаны контуры плотности массы, восстановленные с помощью гравитационного линзирования

# Программа DarkSide

Серия экспериментов на базе аргона, направленных на прямой поиск частиц типа WIMP

- Направление поиска: частицы тёмной материи, распространенные в нашей галактике и рассеивающиеся на атомах аргона
- Детекторы: двухфазные (жидкость и газ) времяпроекционные камеры (TPC)
- Расположение: Подземные (3800 метров водного эквивалента) залы Национальной лаборатории Гран-Сассо, Италия

DarkSide-10



2010-2012

Уменьшенный прототип  
Масса мишени 10 кг

Проверка и отработка методов работы

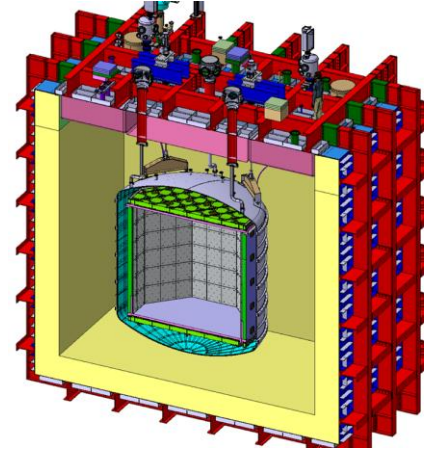
Darkside-50



2013-2019

Масса мишени 46 кг  
Получение множества физических результатов  
(PRD98,102006, PRL121,081307,..)

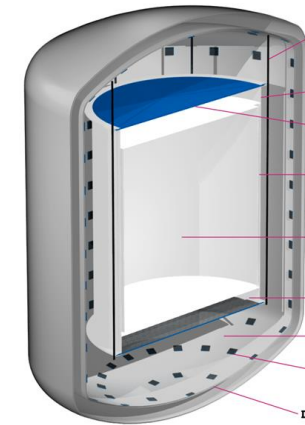
Darkside-20k



2026-...

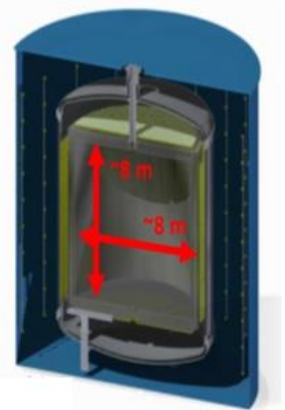
Масса мишени 20 тонн  
Внедрение ряда новых технологий и приближение к «нейтринному полу»

Darkside-LowMass



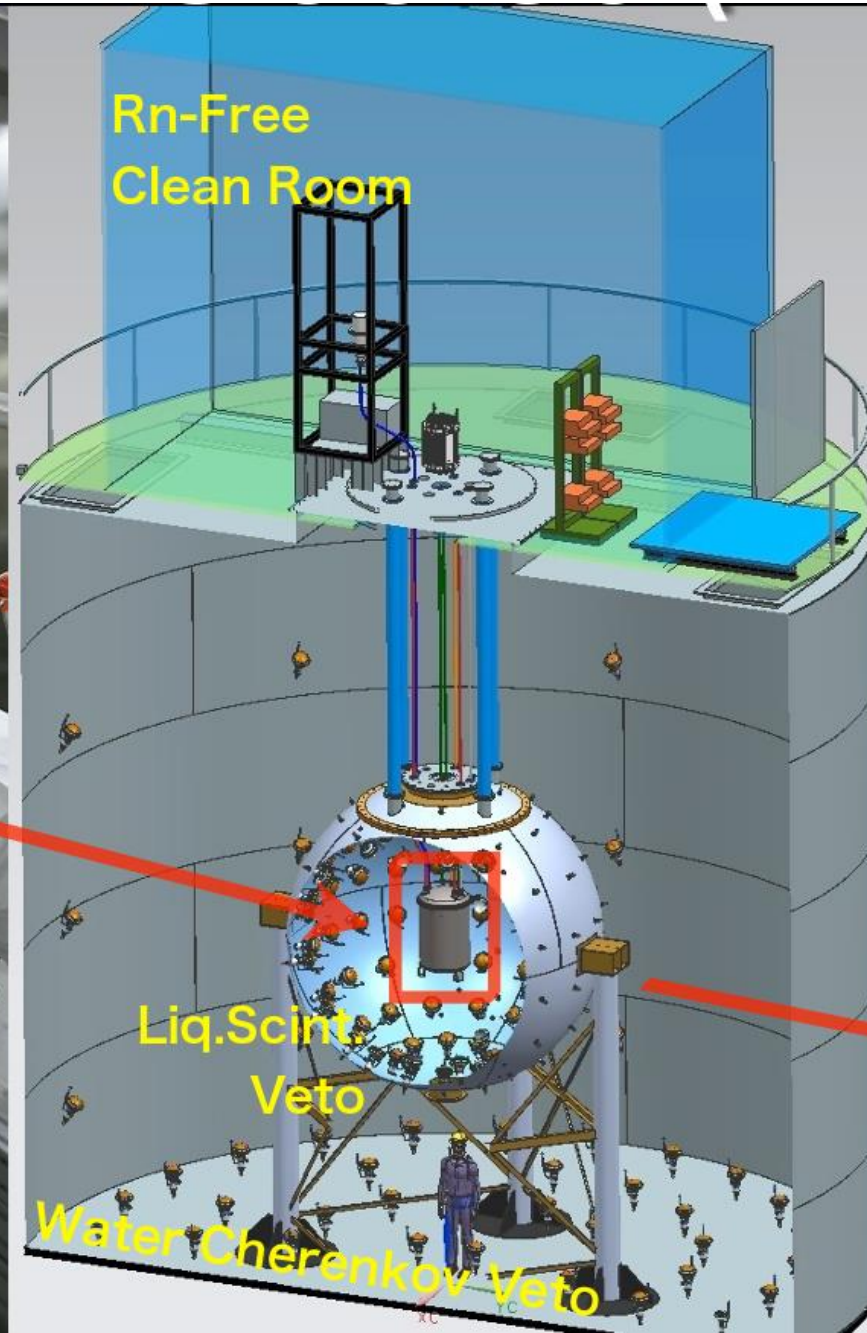
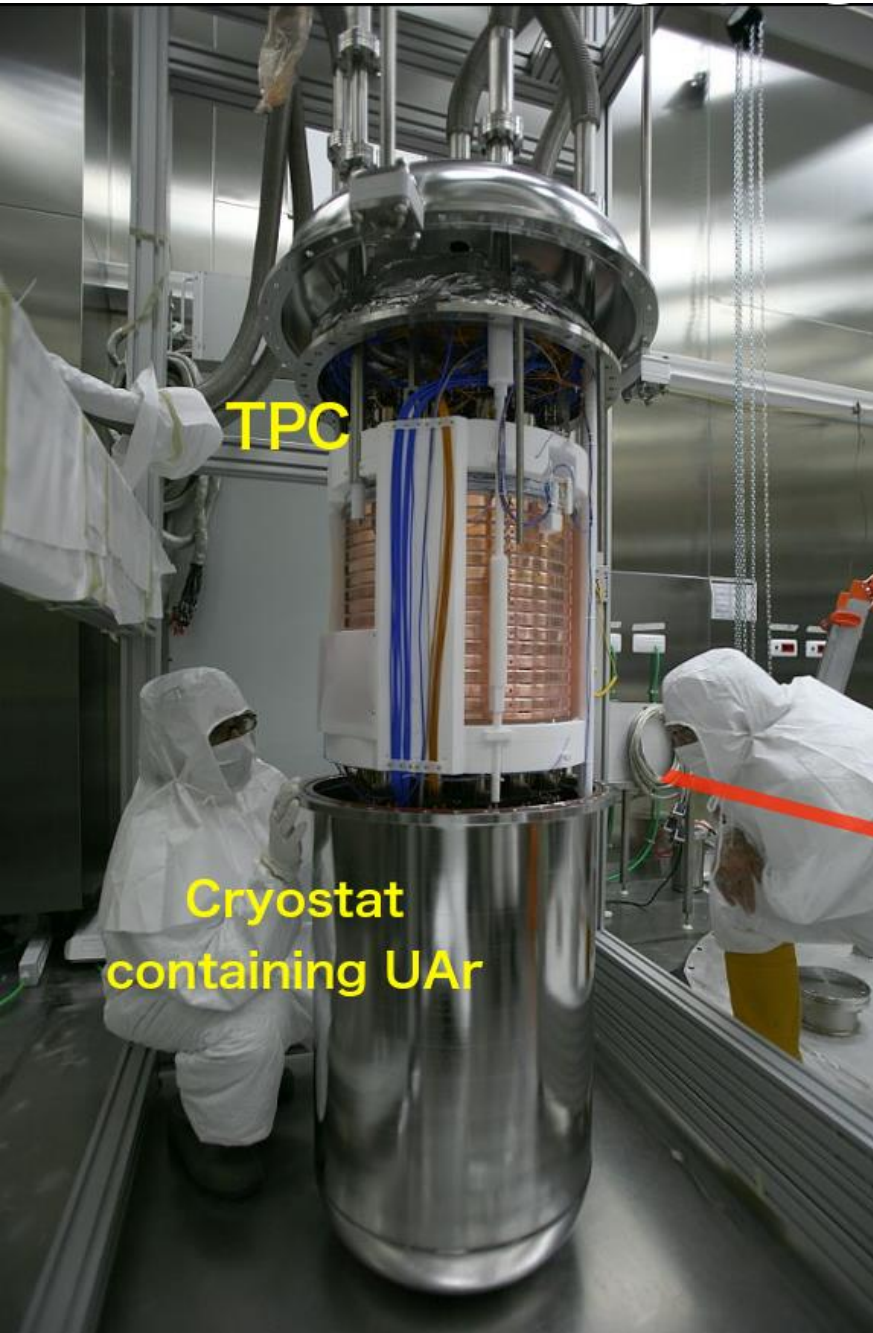
Масса мишени 1 тонна  
Поиск в области малых масс

ARGO

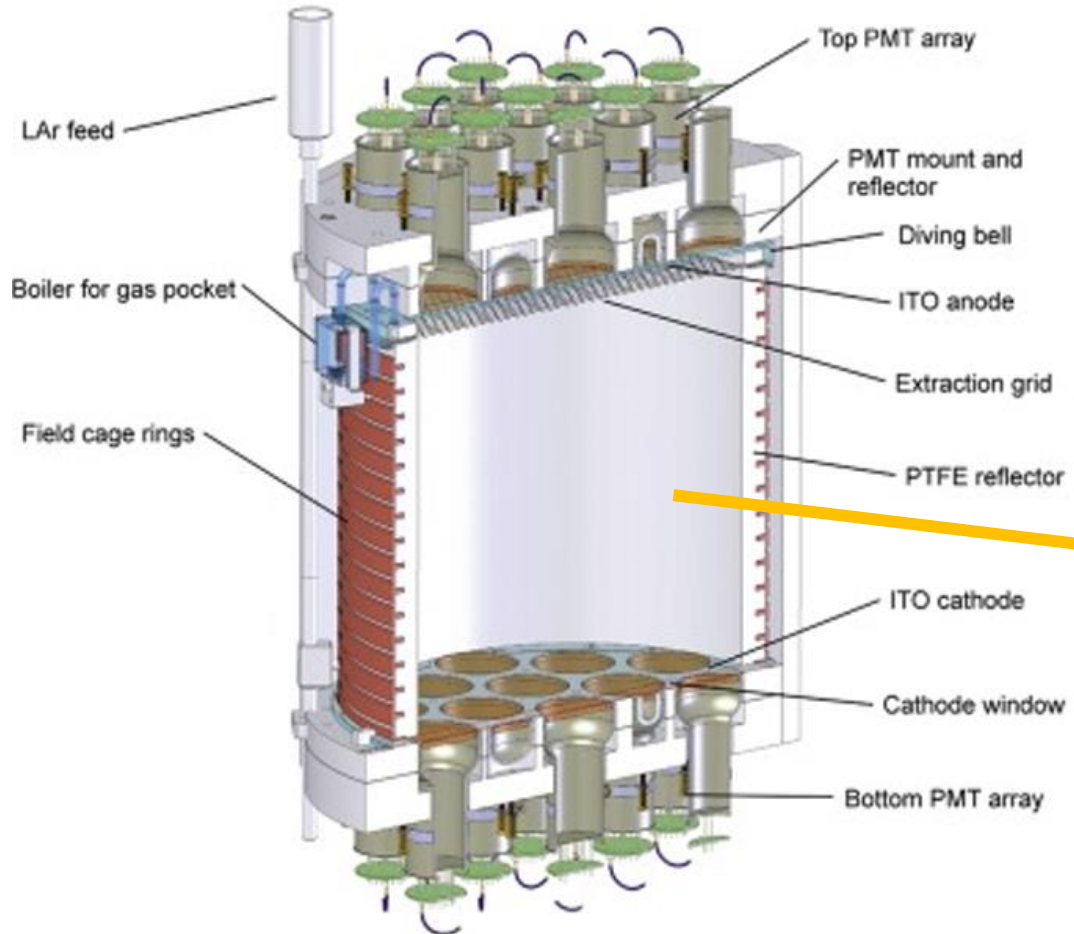


Масса мишени ~300 тонн  
Достижение «нейтринного пола»

# Эксперимент DarkSide-50

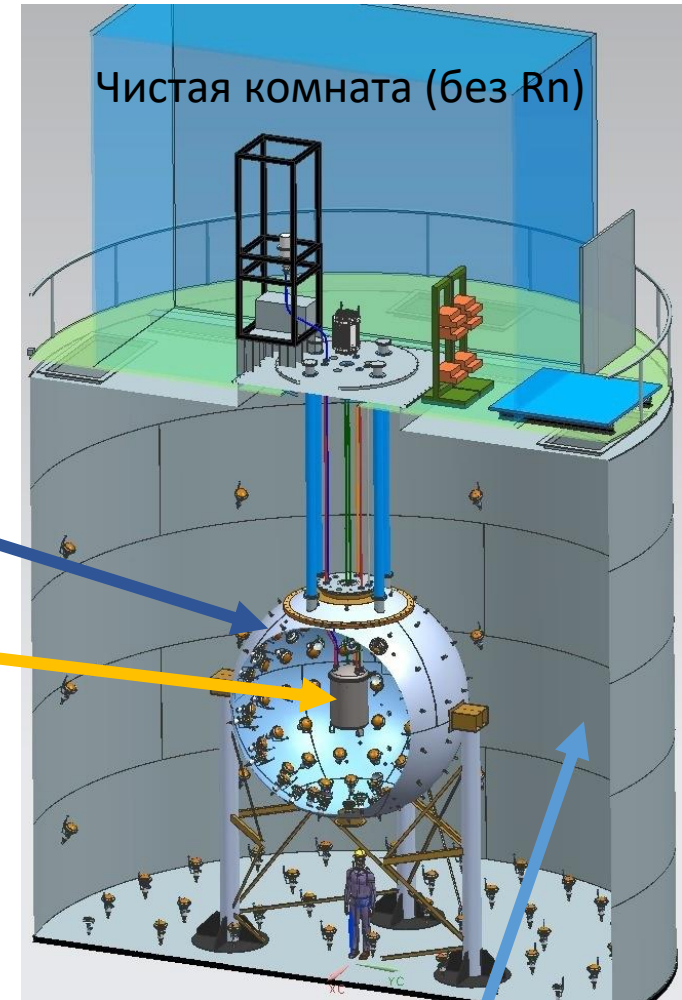


# Эксперимент DarkSide-50



Двухфазная времяпроекционная камера на базе аргона

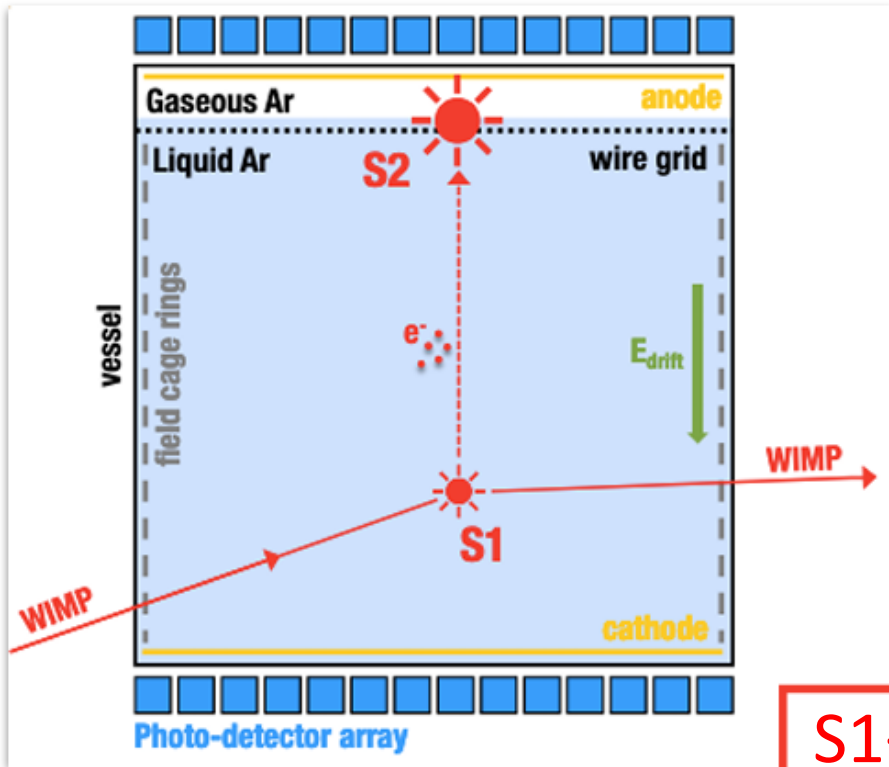
Вето с жидким сцинтиллятором



Черенковское водяное вето

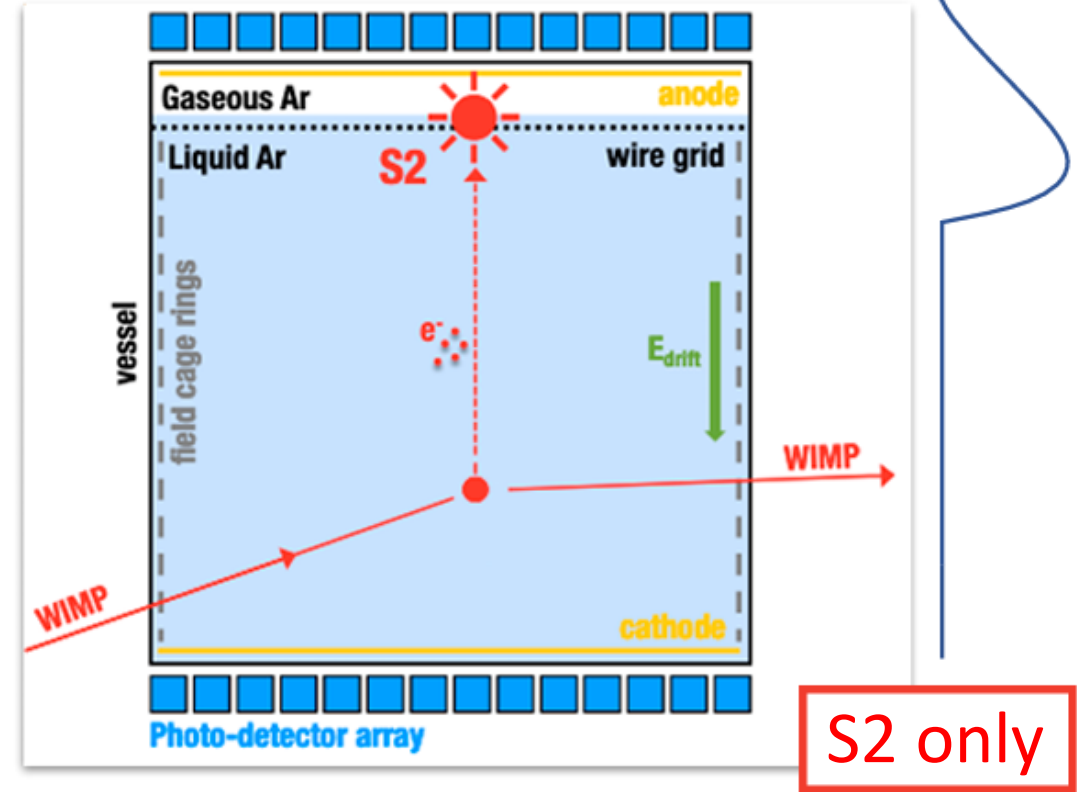
# Двухфазная времяпроекционная камера (TRC)

Высокоэнергетичное событие



S1+S2

Низкоэнергетичное событие

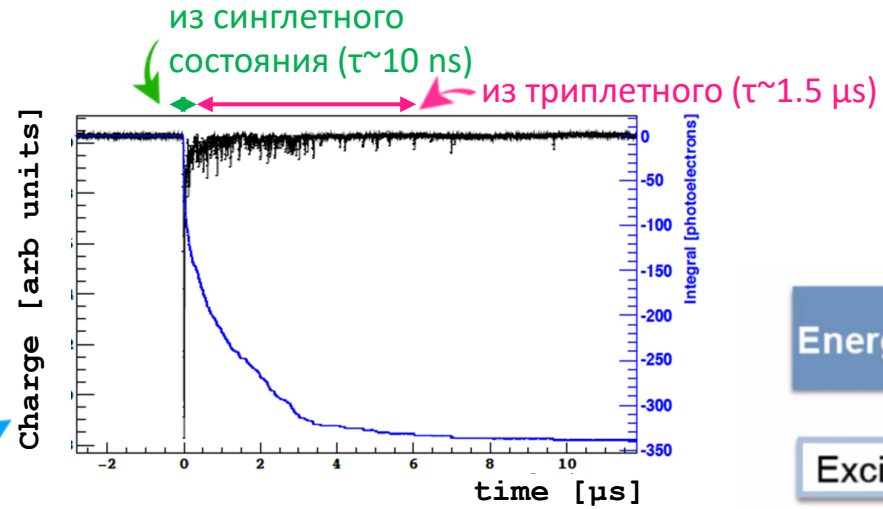
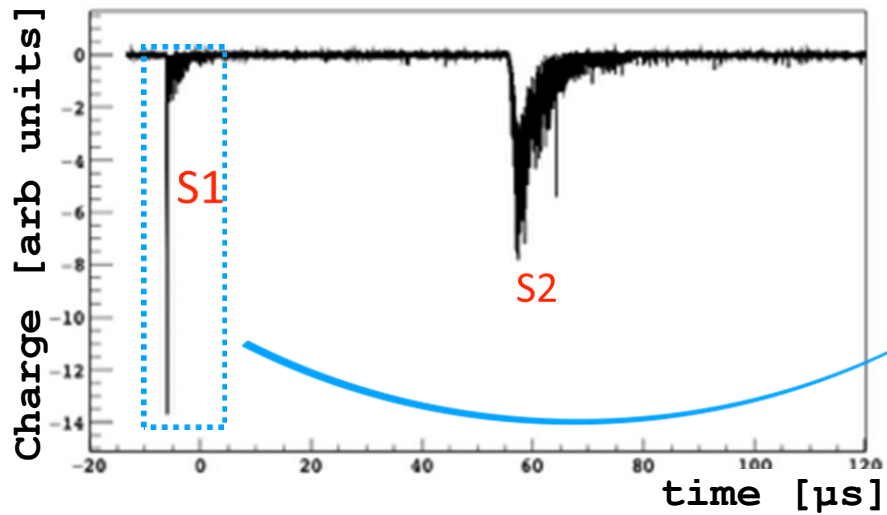


S2 only

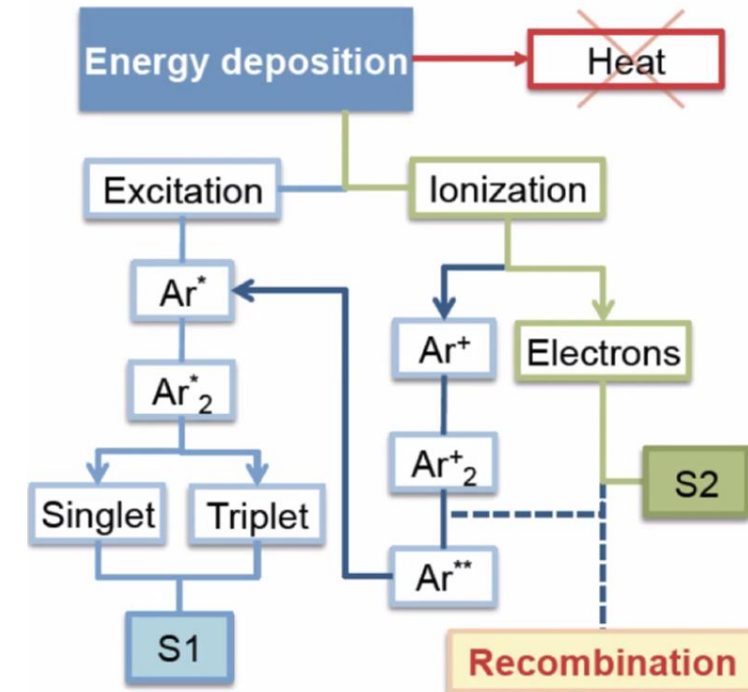
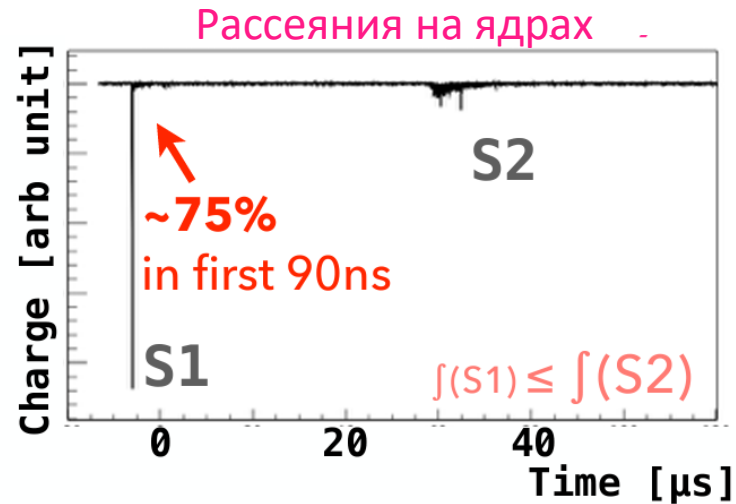
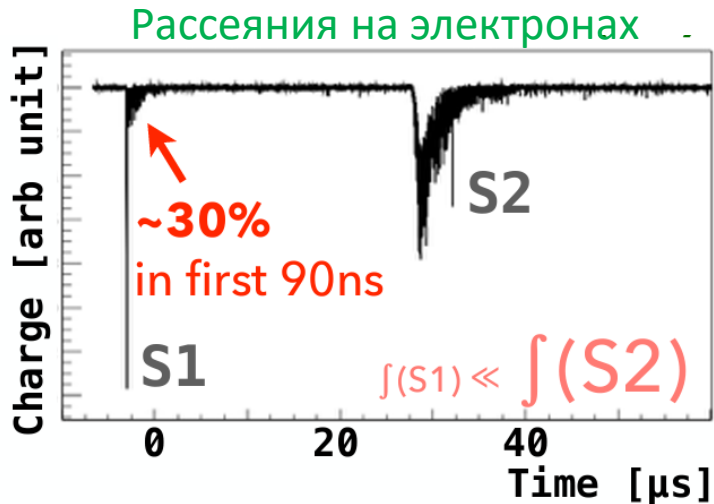
- Энергия отдачи → сцинтилляционные фотоны и ионизационные  $e^-$
- Величина S1+S2 → калориметрия
- Определение частицы с помощью отбора по форме сигнала (PSD)
- Время дрейфа (между S1 и S2) → Z координата

- Усиление в GAr позволяет фиксировать сигналы с большей эффективностью → ниже энергетический порог
- PSD и время дрейфа не доступны

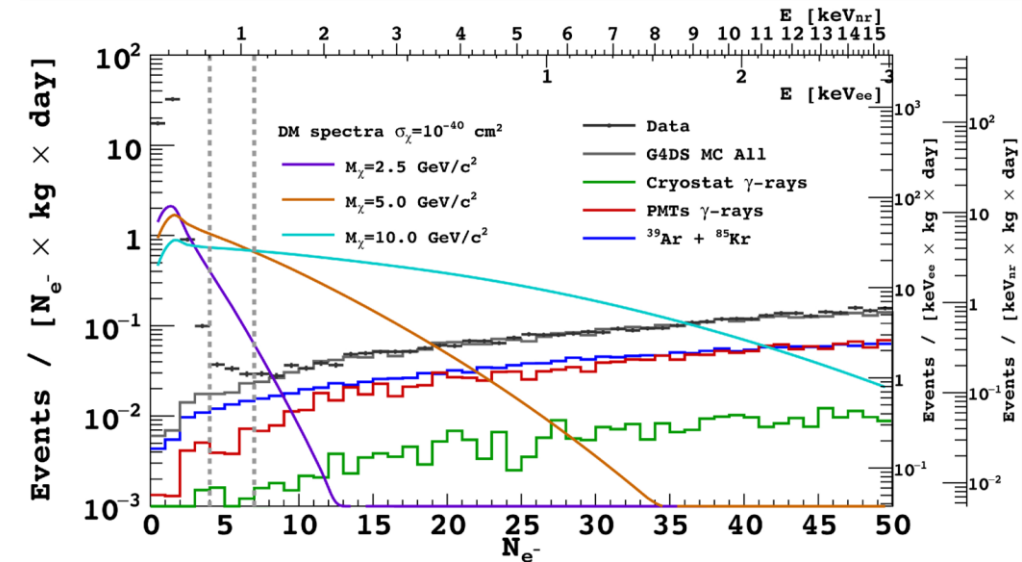
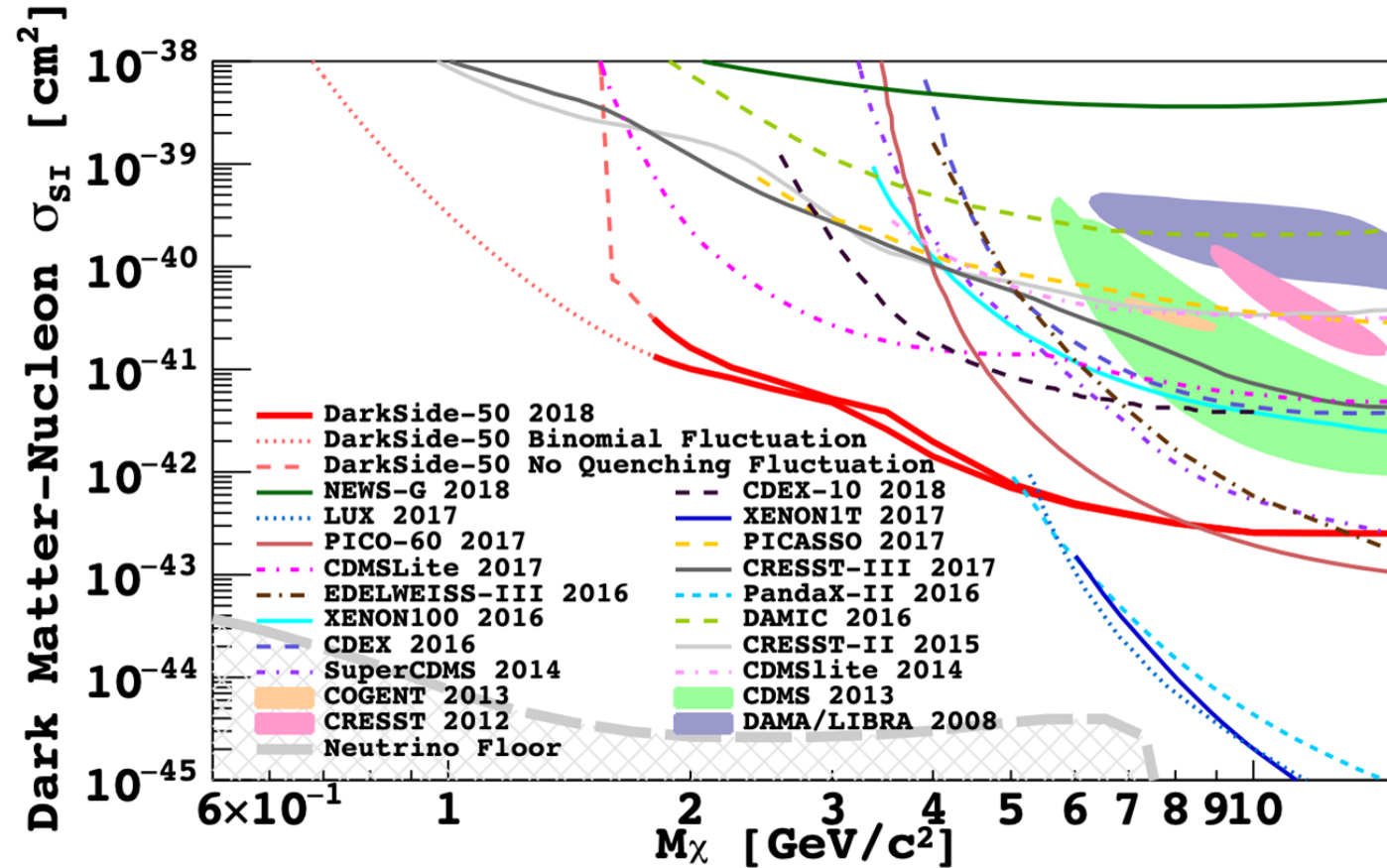
# Механизм передачи энергии



Отбор по форме сигнала позволяет крайне эффективно отделять **рассеяния на электронах** (ER, фоновые взаимодействия с заряженными частицами) от **рассеяний на ядрах**



# Предыдущие результаты поиска

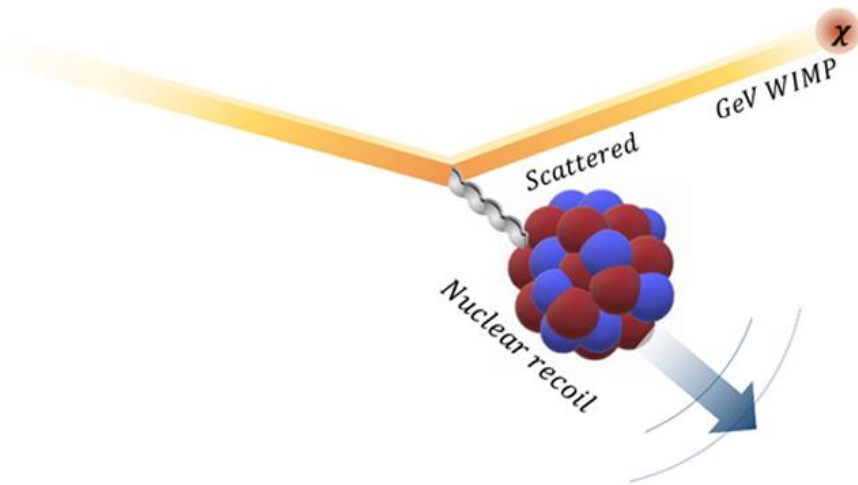


Верхний предел на сечение взаимодействия тёмной материи с веществом по результатам эксперимента DarkSide-50 был опубликован в 2018 году



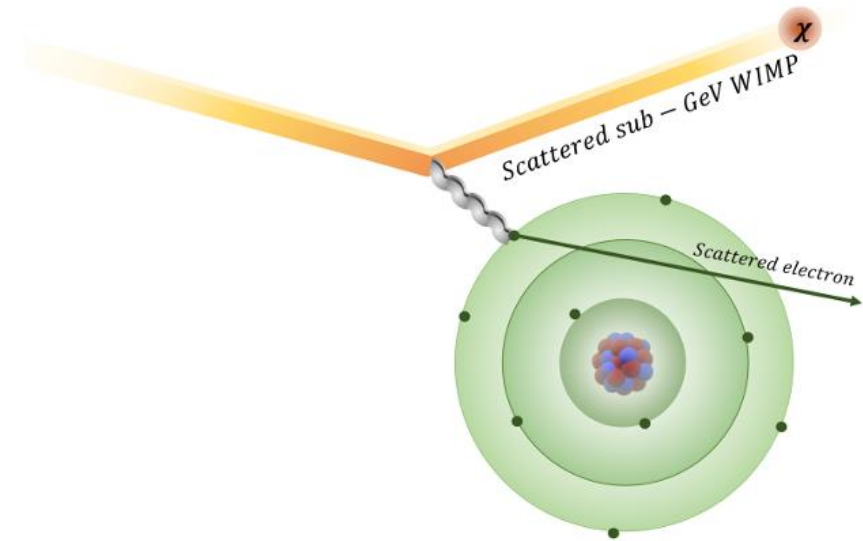
# Каналы поиска: упругое рассеяние

Рассеяние на ядре (NR)



Область высоких масс DM:  
 $\sim 5 \text{ ГэВ}/c^2$  до  $10 \text{ ТэВ}/c^2$

Рассеяние на электроне (ER)

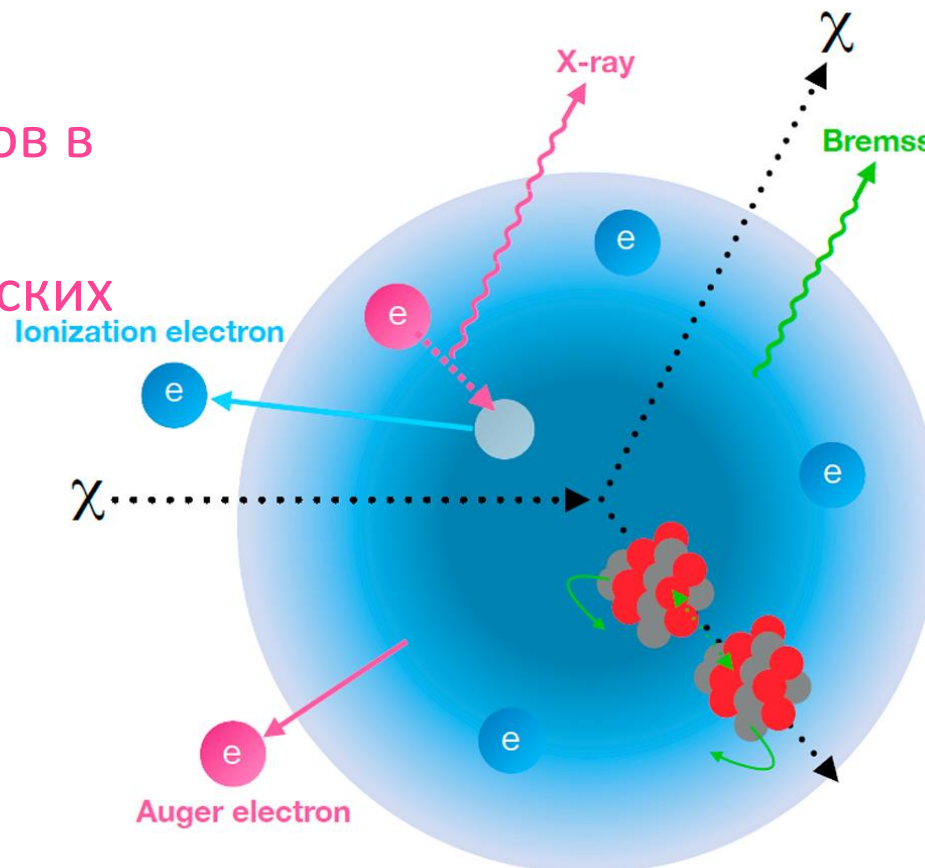


Область низких масс DM:  
 $\sim 30 \text{ МэВ}/c^2$  до  $5 \text{ ГэВ}/c^2$

# Каналы поиска: неупругое рассеяние

Электронная оболочка следует за ядром рассеяния с запаздыванием, поэтому атом после взаимодействия DM с ядром может поляризоваться, что может привести к следующим эффектам:

**Эффект Мигдала:**  
Испускание электронов в кэВ-диапазоне  
Испускание рентгеновских фотонов



**Тормозное излучение:**  
Испускание рентгеновских фотонов  
(слабый эффект, низкая чувствительность)

Область низких масс DM:  $\sim 30 \text{ МэВ}/c^2$  до  $5 \text{ ГэВ}/c^2$

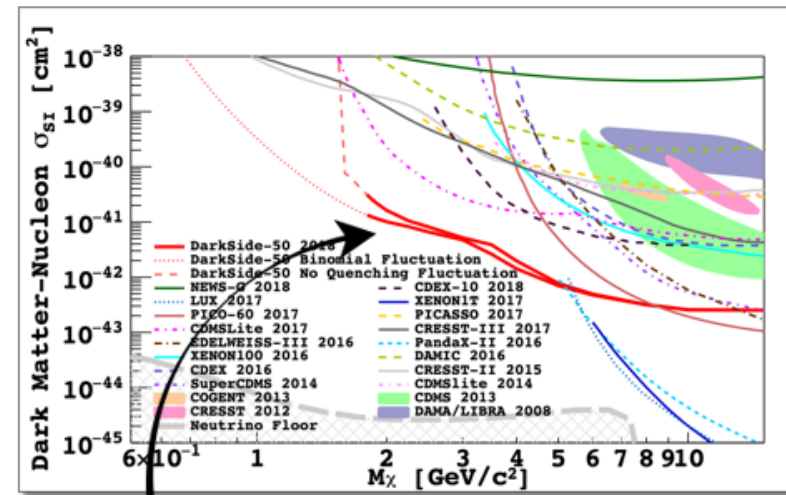
(источник: XENON1T collaboration)

# Данные DarkSide-50

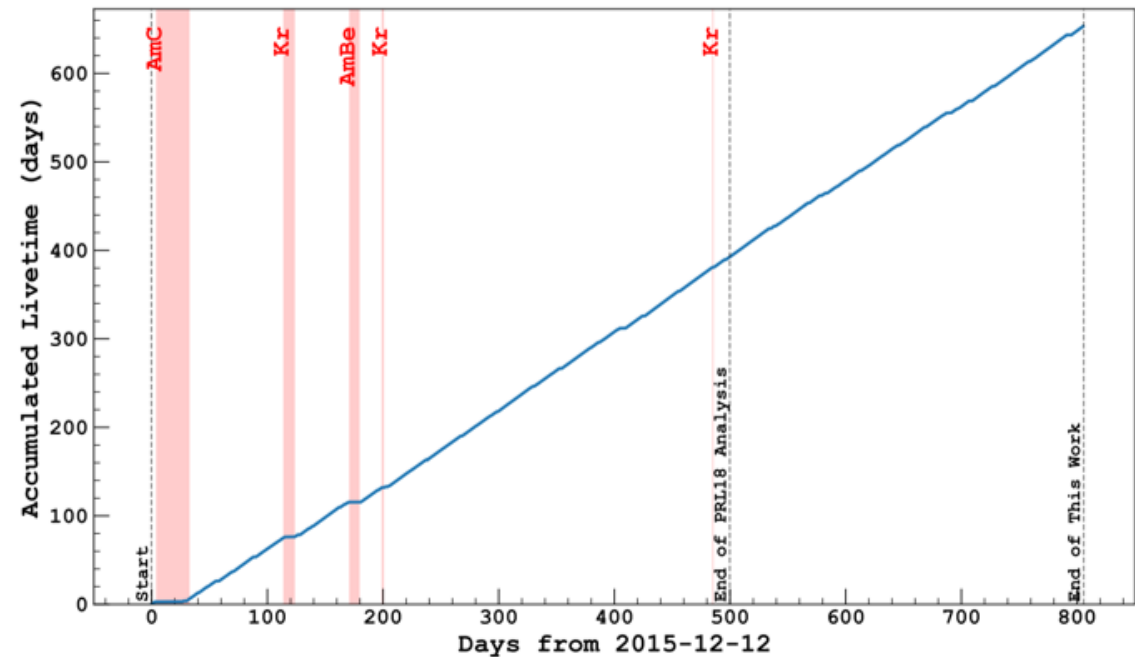
- Измерения за первые 9 месяцев не использовались, за это время распадался космогенный изотоп  $^{37}\text{Ar}$
- Набор данных состоит из измерений за **653.1 активных дней** (12 тонн-дней) с UAr, набранных с 12.12.2015 по 24.02.2018 со средней частотой 1.54 Гц (примерно в 1.8 раз большая экспозиция относительно предыдущего анализа)

В течение всего 26-месячного периода детектор продемонстрировал высокую стабильность:

- $\delta T = \pm 0.02 \text{ K}$ ,  $\delta P < \pm 0.005 \text{ psi}$ ,
- $\delta(S1) \sim 0.4\%$ ,  $\delta(S2) < 1\%$
- Отсутствие значимых поломок и остановок (за исключением нескольких калибровочных кампаний)



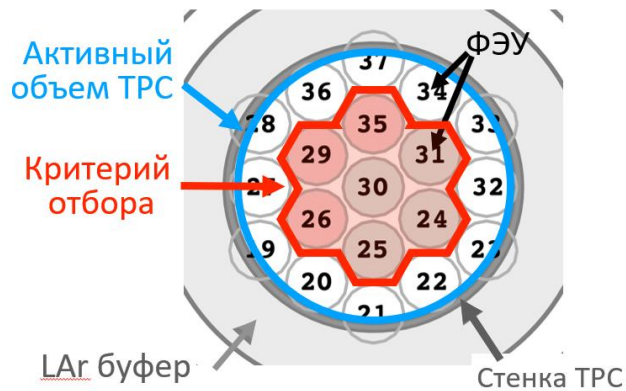
С примесью  $^{37}\text{Ar}$



# Критерии отбора

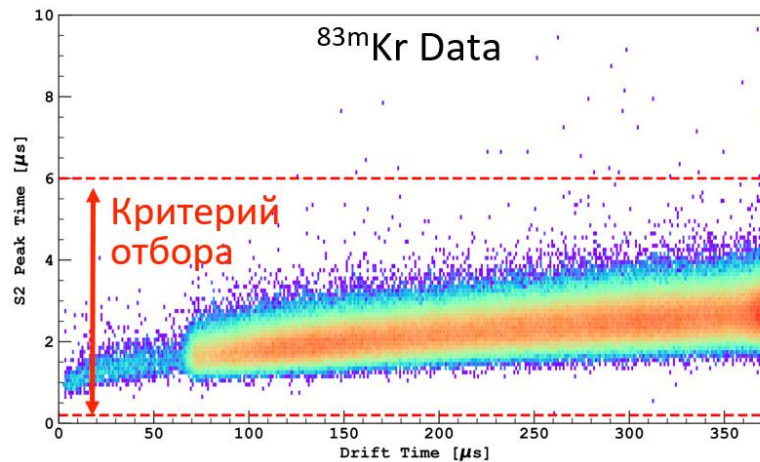
## Геометрия:

- Исключаются события вне 7 центральных ФЭУ для уменьшения влияния фонов от материалов камеры
- Учитывается влияние термического сжатия ( $\sim 1\%$ )



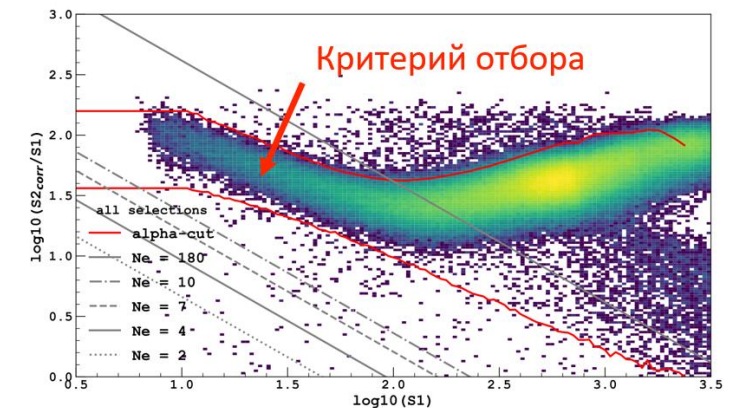
## Множественные события:

- Используются данные о ширине и времени роста импульса для исключения возможности регистрации нескольких низкоэнергетических импульсов как одного импульса
- При энергиях выше  $4e^-$  эффективность более 95%



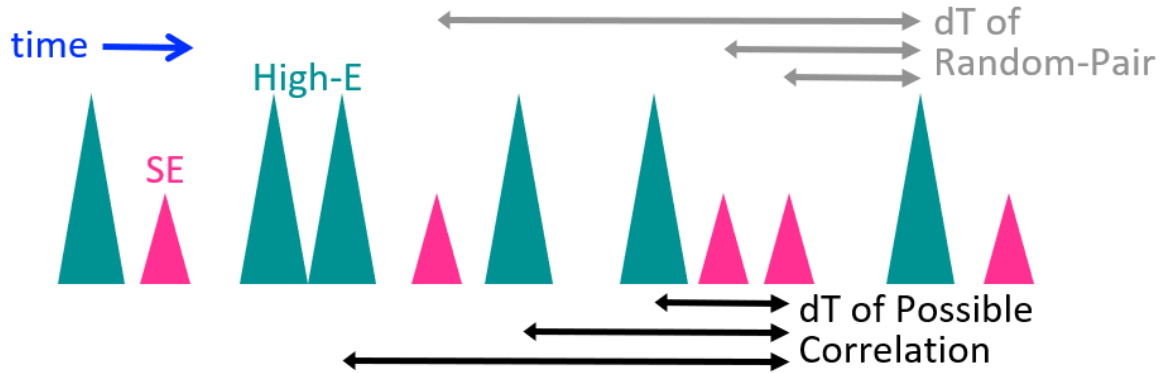
## Фоновые $\alpha$ -частицы:

- Используется отношение  $S2/S1$  для отделения сигналов от  $\alpha$ -частиц, схожих с сигналами от взаимодействий с низкой энергией
- Данные сигналы характеризуются большой величиной  $S1$  относительно  $S2$

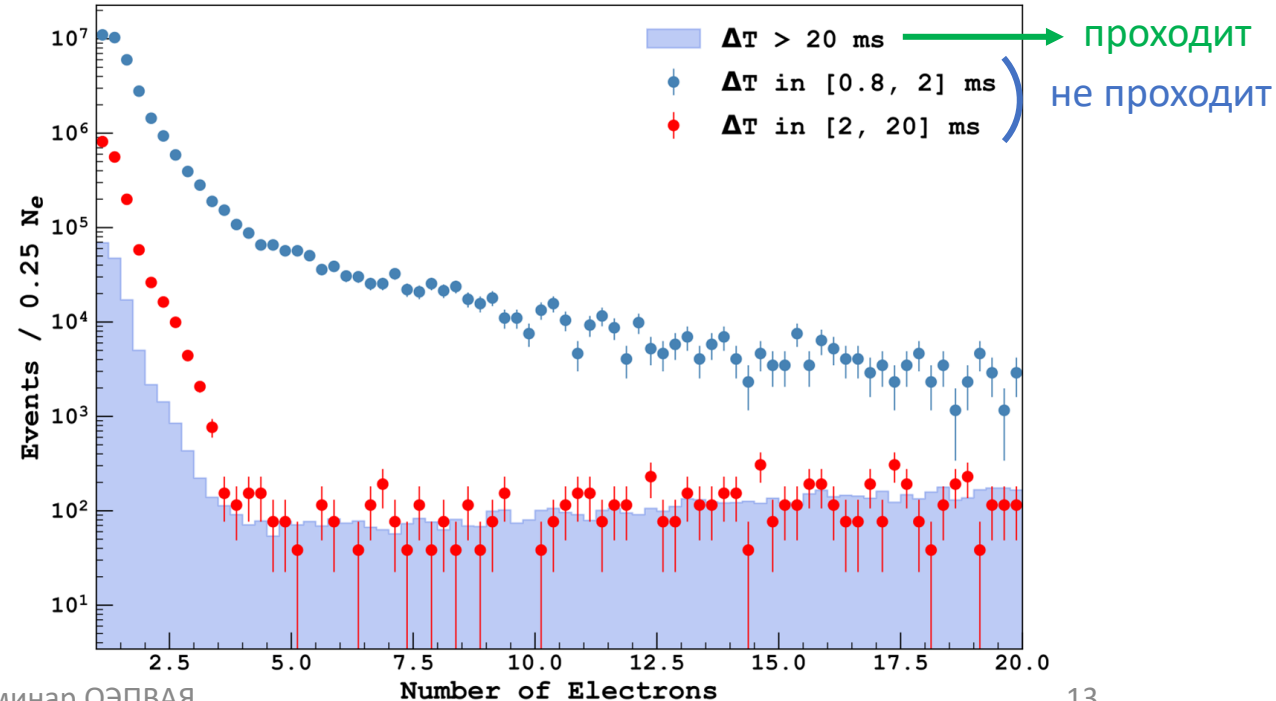
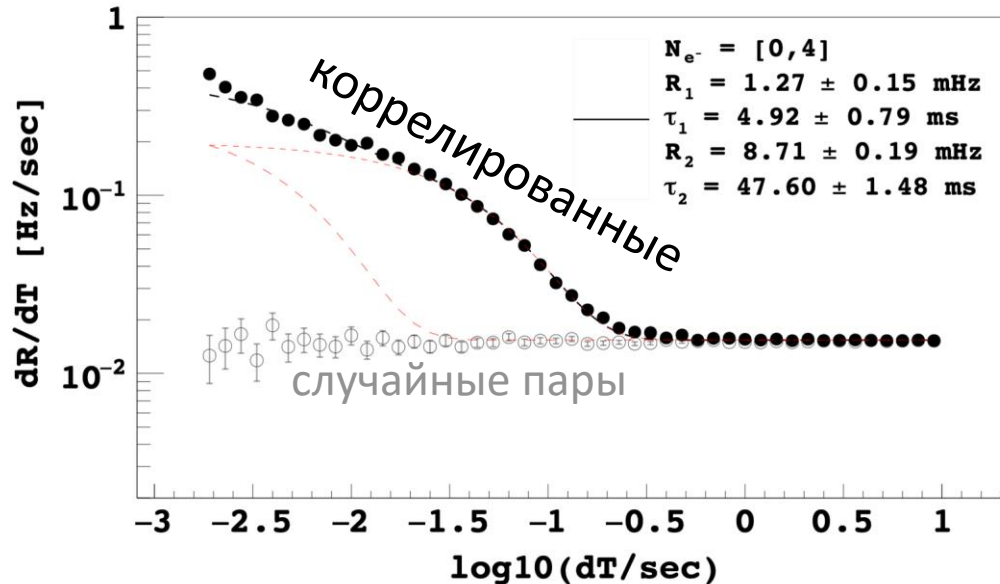


# Критерии отбора

## Запаздывающие электроны



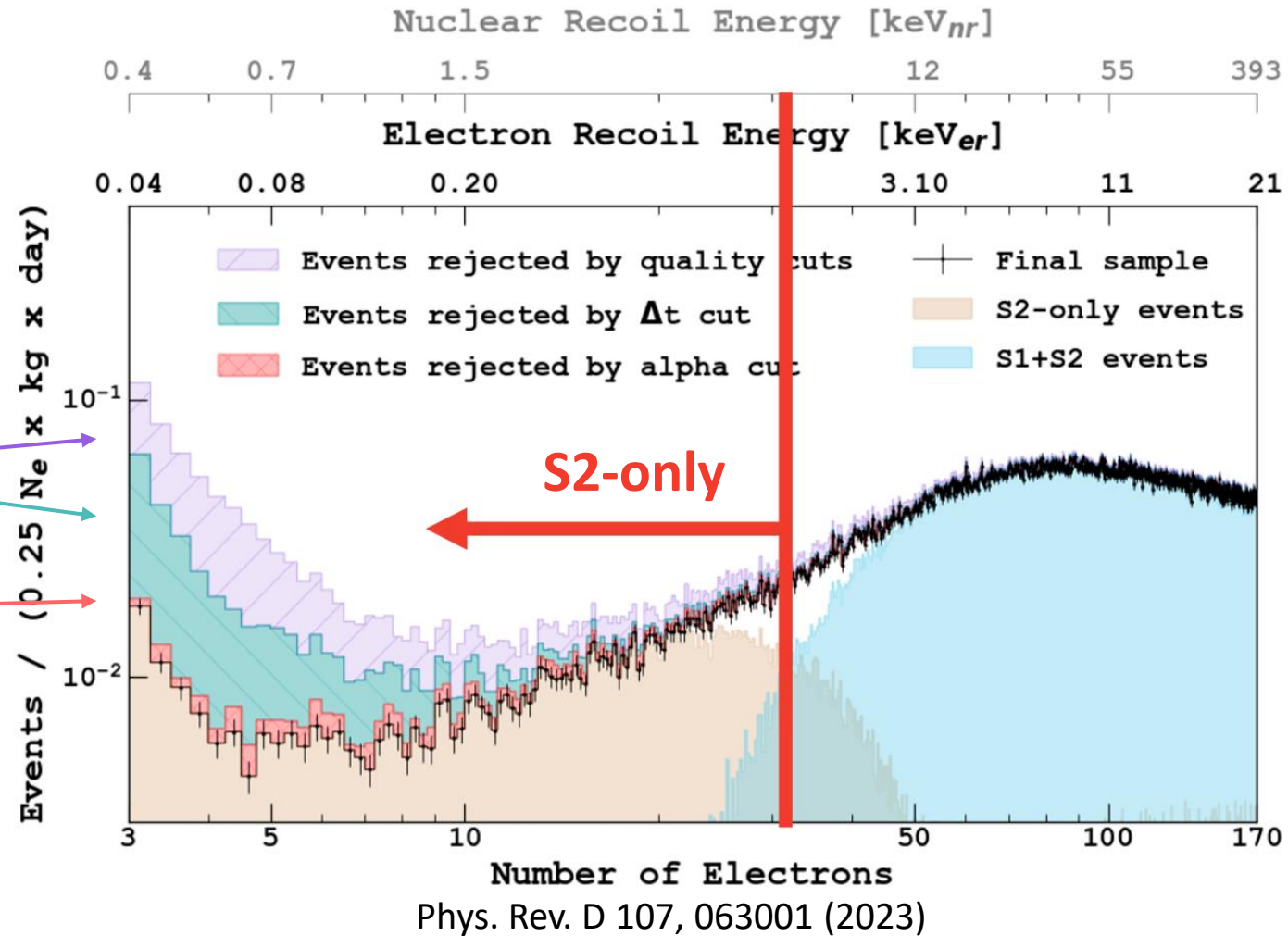
- После некоторых событий может быть зафиксировано несколько запаздывающих электронов: “Spurious Electrons (SE)”
- В случае DS-50 было установлено, что количество SE экспоненциально убывает в области между 5 мс и 50 мс
- Для обеспечения оптимального соотношения между сигналом и фоном ко всем событиям применяется следующий критерий отбора:  $\Delta T > 20$  мс



# Применение критериев отбора

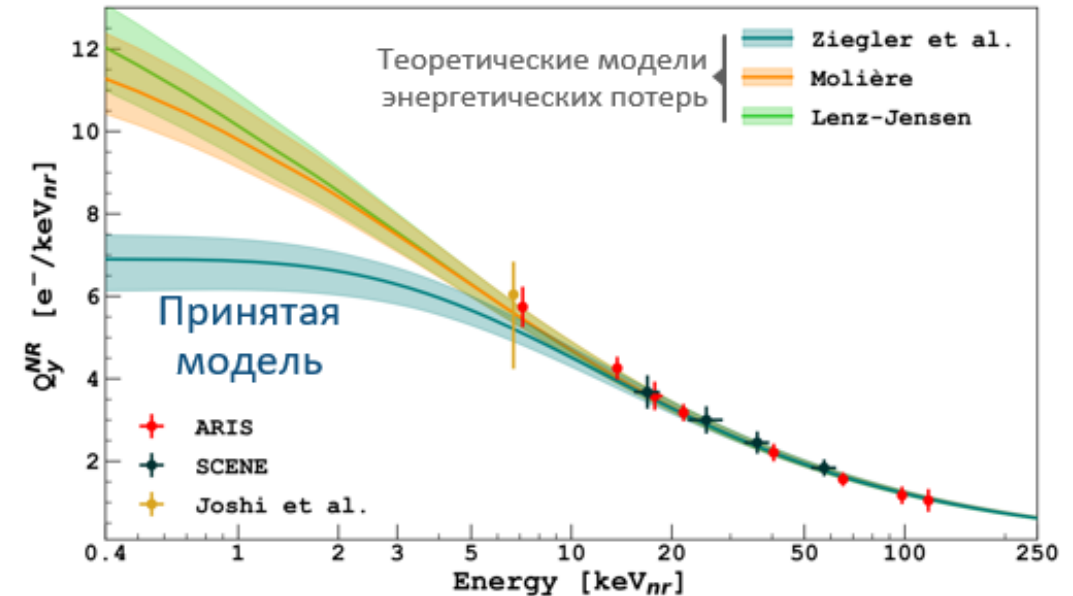
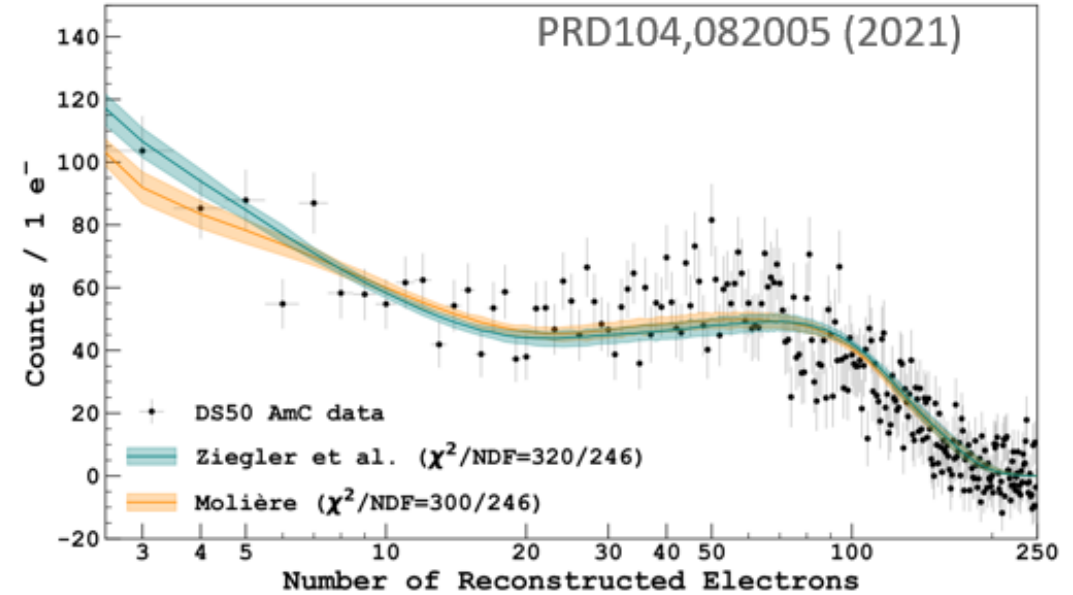
Эффективность >95% в области поиска  
(нижний порог энергии равен 4 Ne)

Множественные и наложенные события  
Неправильно зафиксированные события  
и SE события (сигналы от запаздывающих электронов)  
Взаимодействия с  $\alpha$ -частицами



# Калибровка

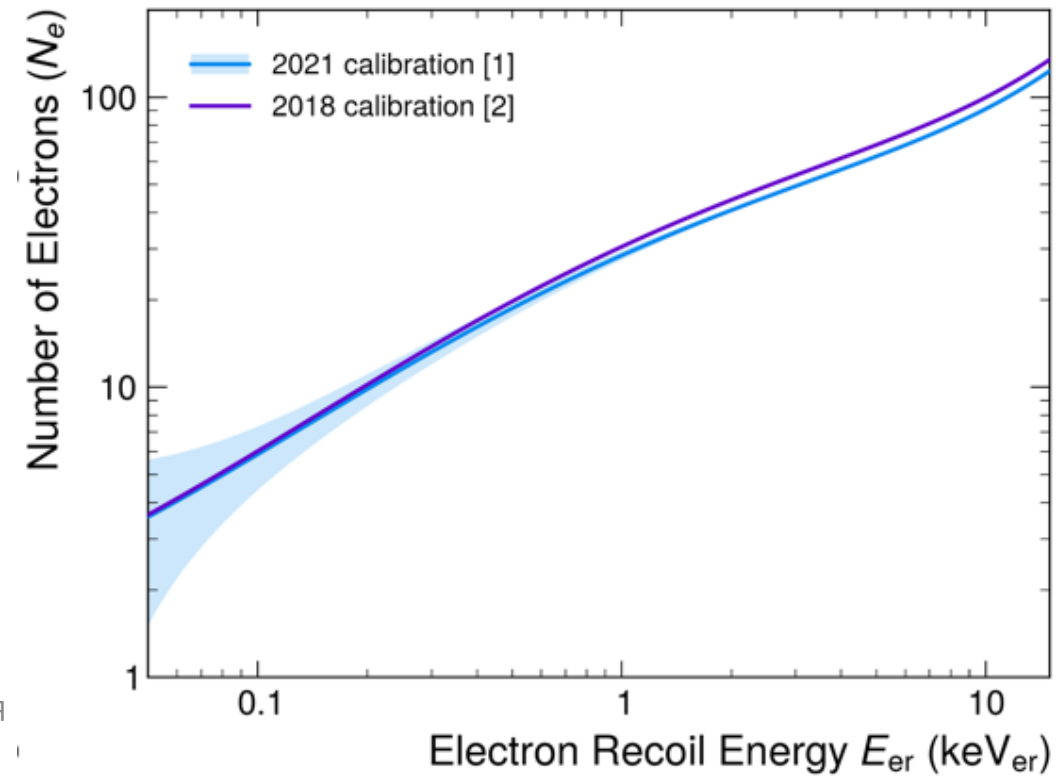
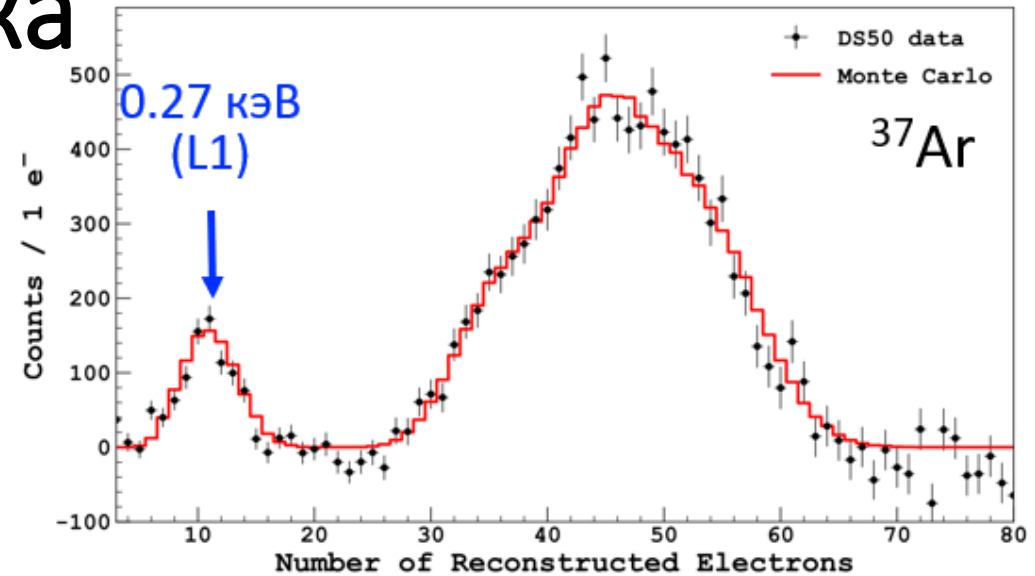
- Для определения соотношения между энергией отдачи ядра и числом образованных ионизационных электронов ( $Q_y$ ) использовались данные нейтронных калибровок (AmC и AmBe), а также данные экспериментов SCENE и ARIS
- Рассматривалось несколько теоретических моделей потери энергии ядра отдачи в веществе с сопутствующей ионизацией и рекомбинацией
- Была принята наиболее «консервативная» модель



# Калибровка

PRD104,082005

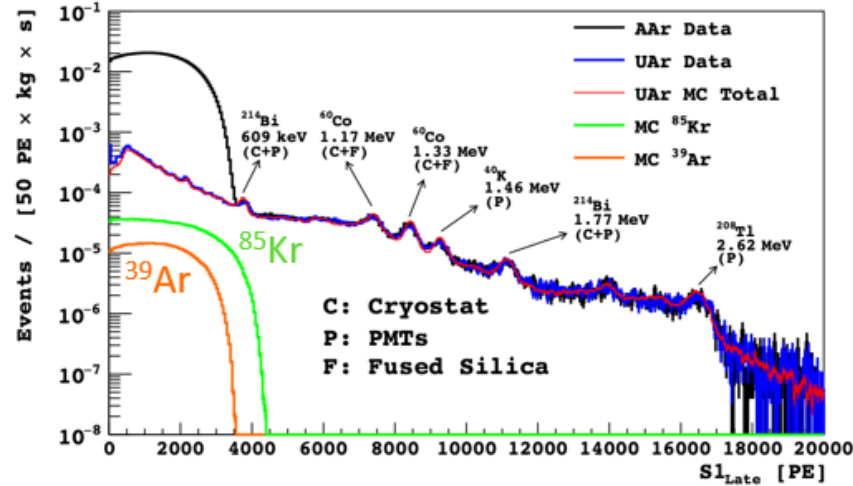
- Для случая рассеяния на электронах аналогичные калибровки проводились на основании измерений с  $^{37}\text{Ar}$  (оболочка L1) и  $^{39}\text{Ar}$
- В отличие от предыдущего анализа, данные от  $^{37}\text{Ar}$  (оболочка K) и  $^{83\text{m}}\text{Kr}$  не использовались в силу их более сложных схем распада
- Это позволило увеличить верхний порог энергии для анализа до  $170\text{ e}^-$  (21 кэВ)



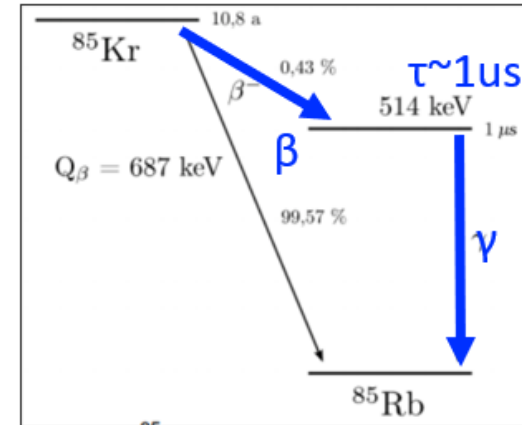


# Модель фона: $^{39}\text{Ar}$ и $^{85}\text{Kr}$

## Фитирование в области высоких энергий

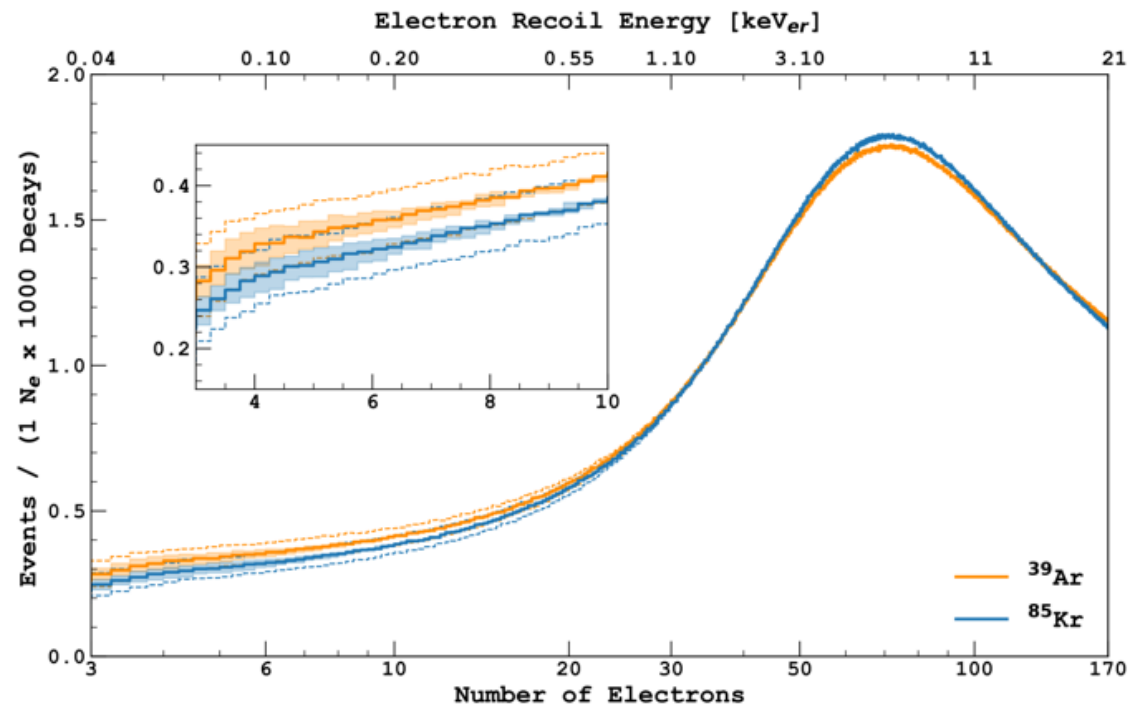


## Схема распада $^{85}\text{Kr}$



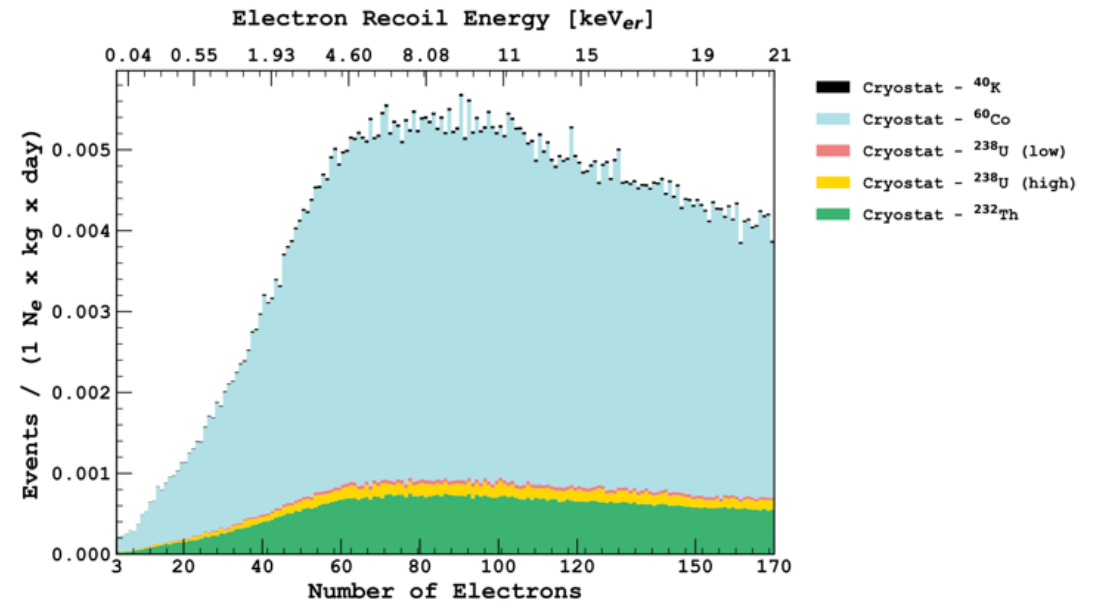
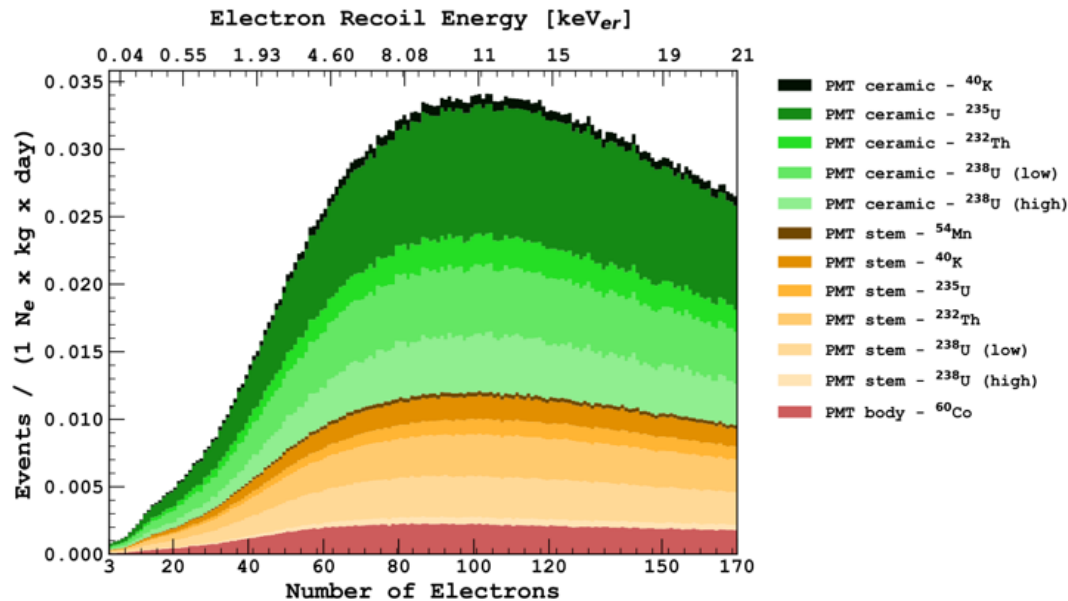
- Ограничения на величины активностей получены с использованием измерений **высокоэнергетичных спектров** и проверки на **совпадения событий  $\beta+\gamma$**

- $^{85}\text{Kr}$  :  $1.8 \pm 0.1$  мБк/кг
- $^{39}\text{Ar}$  :  $0.7 \pm 0.1$  мБк/кг



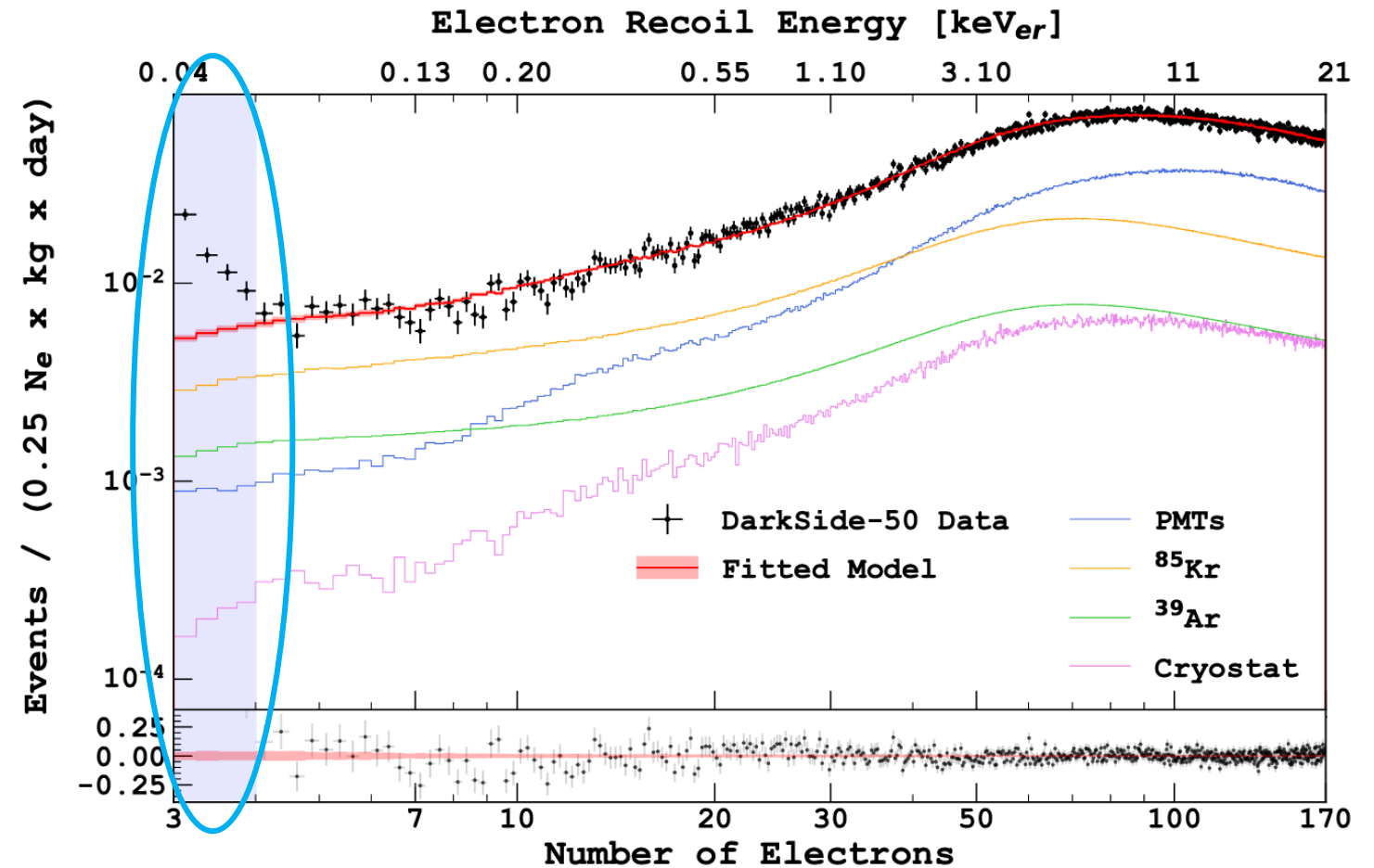
# Модель фона: внешние фотоны

- Для построения модели фотонного фона на основании измерений активности материалов ФЭУ и криостата было произведено моделирование вклада данных материалов
- Это позволило оценить значения активностей данных источников с точностью до 10%
- Расширение диапазона энергии, используемого в анализе, позволяет уточнить данные результаты апостериори



# Модель фона для DarkSide-50

- Внутренний фон обусловлен  $^{39}\text{Ar}$  и  $^{85}\text{Kr}$
- Внешний фон обусловлен примесями в материалах ФЭУ и криостата
- Запаздывающие электроны (SE)



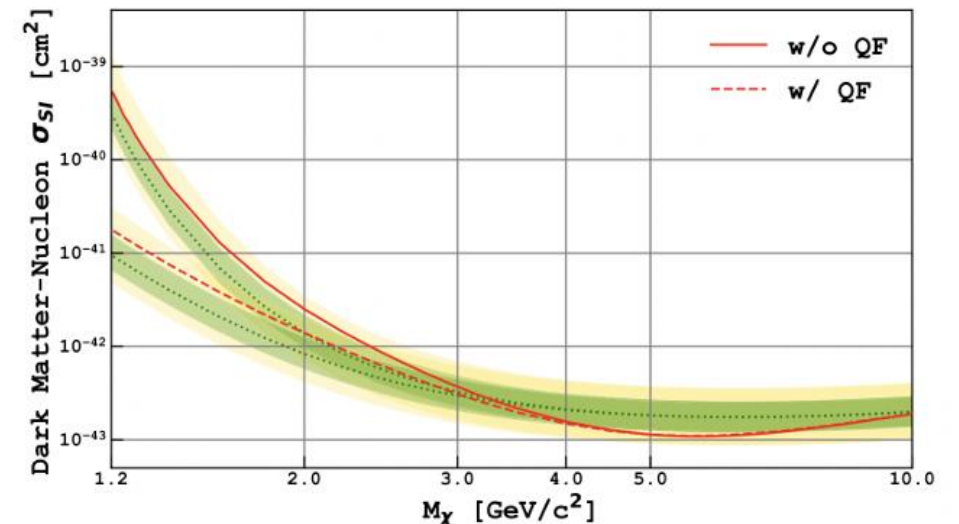
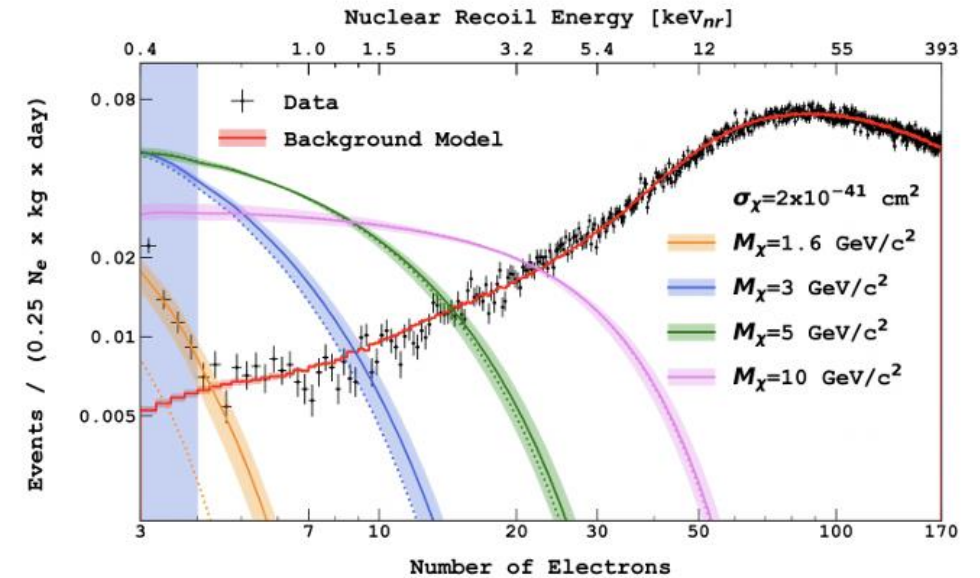
Phys. Rev. D 107, 063001 (2023)

# Стандартный поиск в области низких масс

Анализ по сигналам S1+S2, исследуются рассеяния на ядре с использованием PSD

Для увеличения чувствительности поиска в области низких масс были использованы:

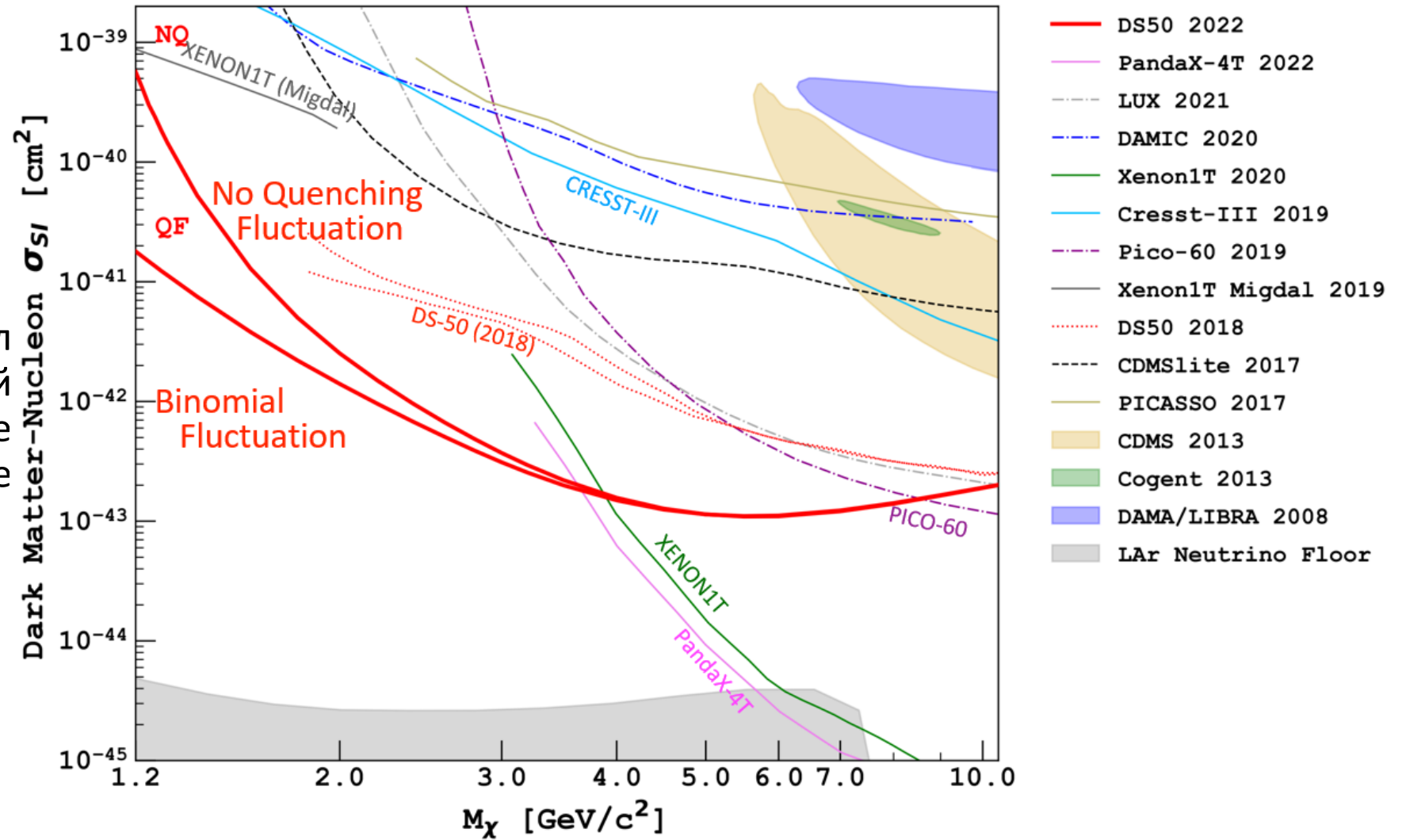
- Расширенная экспозиция
- Усовершенствованные критерии отбора
- Более точная калибровка
- Улучшенное моделирование фона



Phys. Rev. D 107, 063001 (2023)

# Стандартный поиск в области низких масс

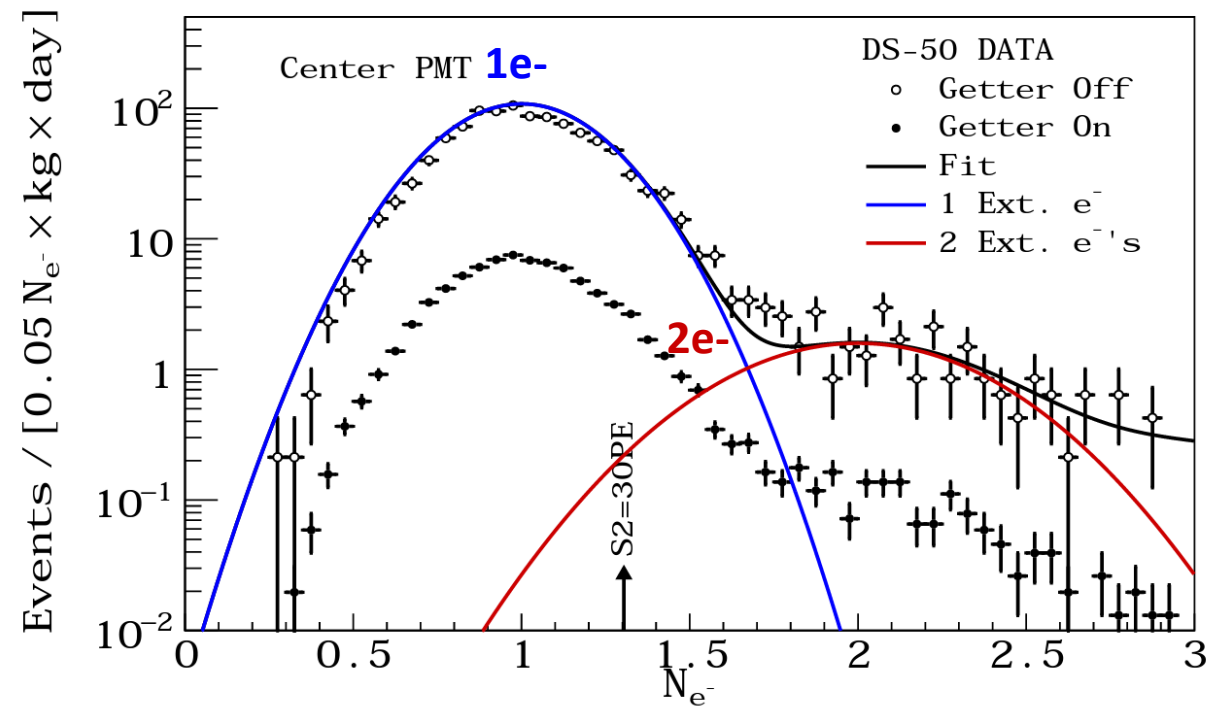
Данный подход позволил установить наиболее строгий верхний предел на сечение взаимодействия в диапазоне  $M_\chi = [1.2, 3.6]$  ГэВ/ $c^2$



Phys. Rev. D 107, 063001 (2023)

# Поиск с использованием только сигналов S2

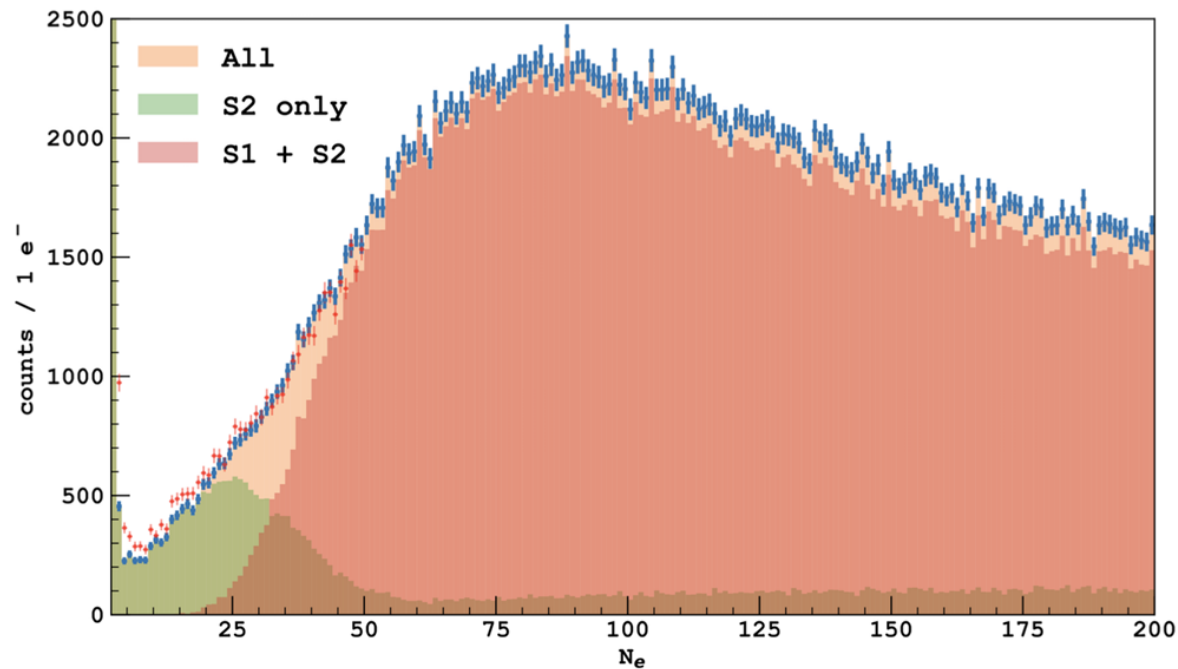
- Использование в анализе только сигналов S2 позволяет увеличить чувствительность к низкоэнергетичным взаимодействиям (что критично для поиска в области низких масс), но PSD и реконструкция Z координаты становятся недоступными
- Сигналы S2, усиленные в GAr, позволяют зарегистрировать даже отдельные электроны



Phys. Rev. Lett. 121, 081307 (2018)

# Поиск с использованием только сигналов S2

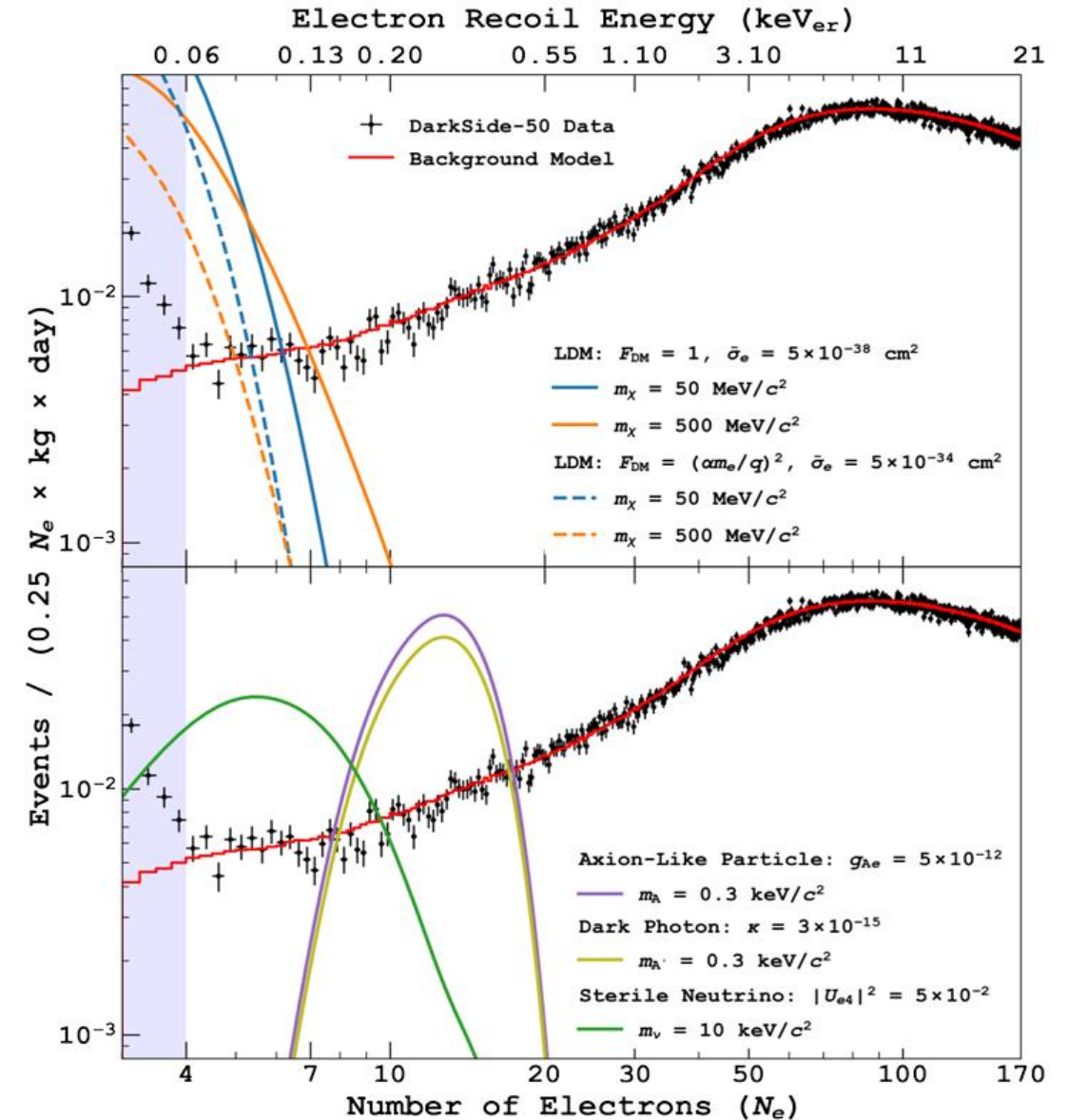
- Использование сигналов S1+S2 существенно повышает степень отбраковки фона, но устанавливает нижний порог энергии  $\sim 3\text{--}4$  КэВ
- Использование только сигналов S2 позволяет добиться лучшего нижнего порога энергии  $\sim 0.6$  кэВ, но накладывает высокие требования к точности моделей отклика детектора и фона



# Рассеяние тёмной материи на электронах

Ряд моделей тёмной материи допускают возможность взаимодействия тёмной материи с электронами:

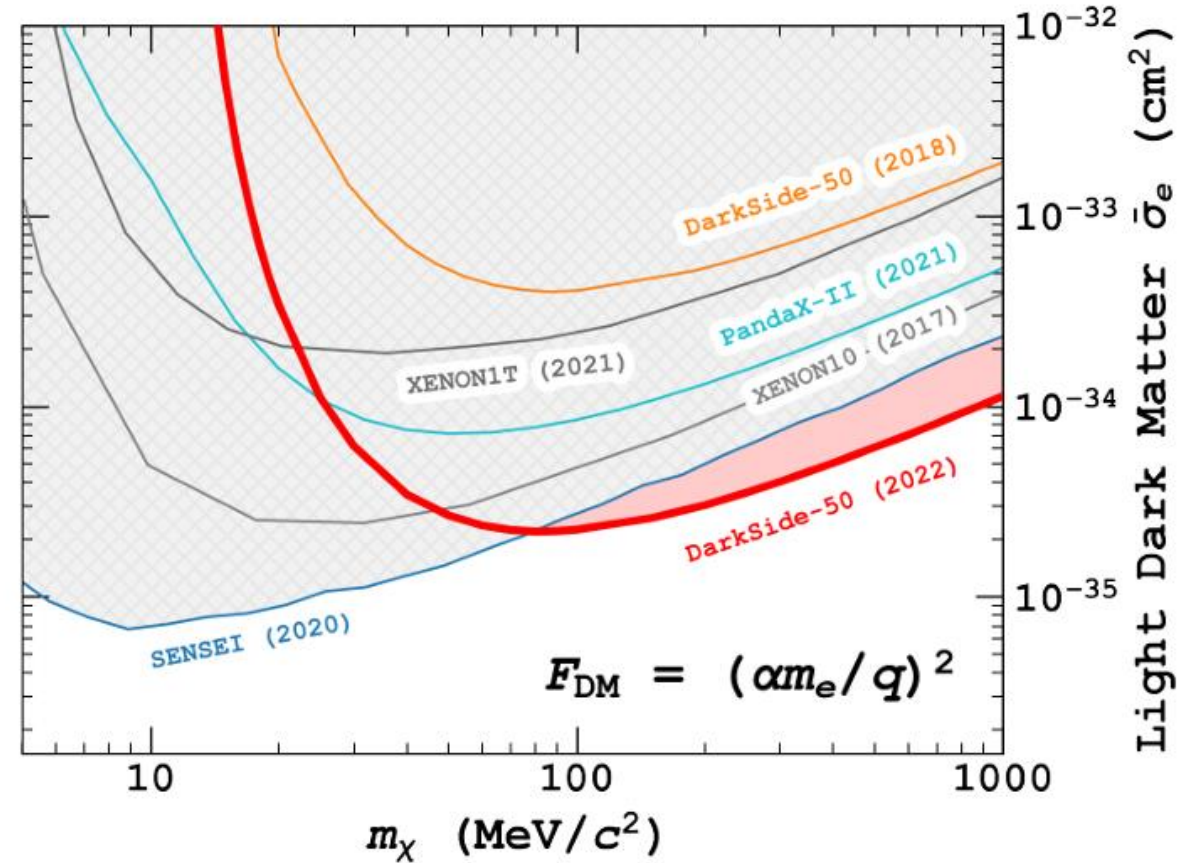
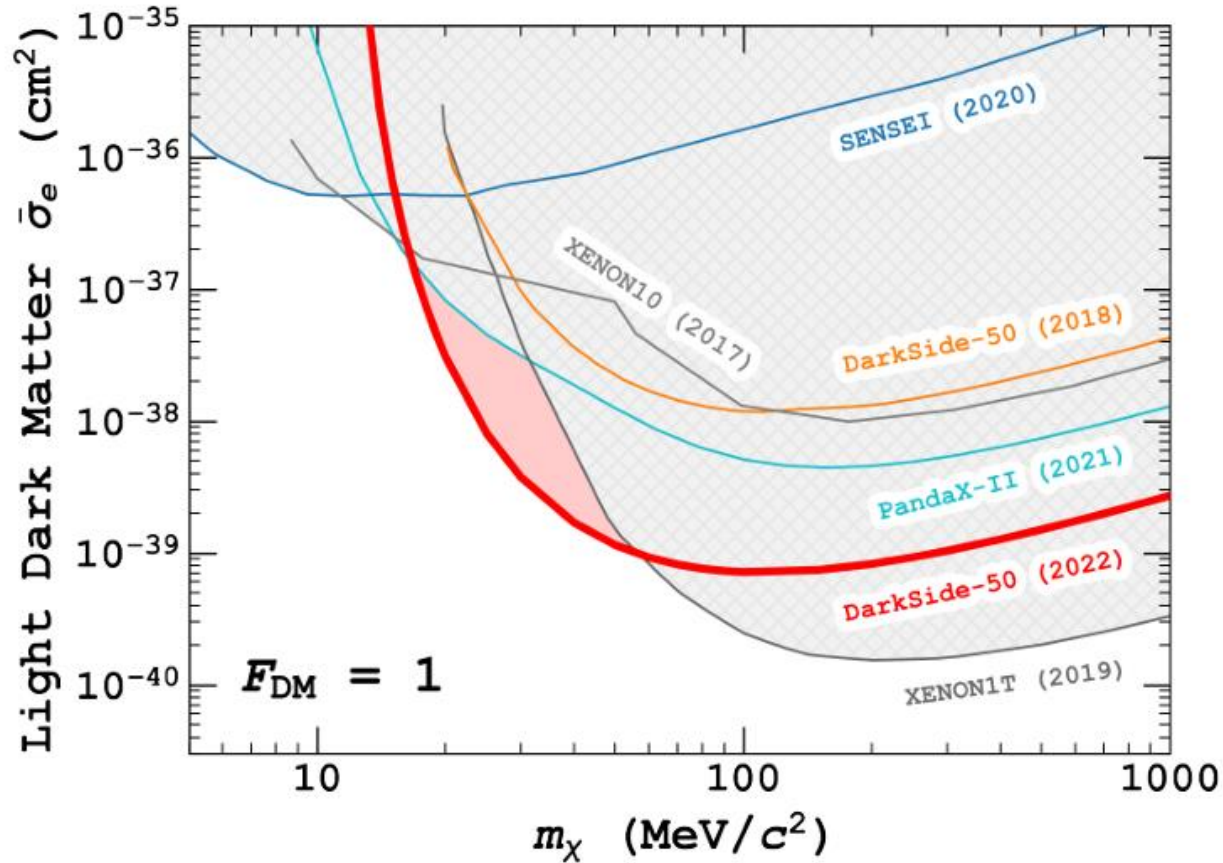
- Фермионная или скалярная бозонная лёгкая DM (LDM) взаимодействует посредством векторного медиатора  $\rightarrow$  ионизация
- Псевдоскалярная DM (аксионоподобные частицы) или векторная бозонная DM (темные фотоны) поглощаются электронами в оболочках атома  $\rightarrow$  моноэнергетический сигнал, величина которого зависит от массы частицы
- Стерильные нейтрино неупруго рассеиваются на связанных электронах  $\rightarrow$  ионизация



Phys. Rev. Lett. 130, 101002 (2023)



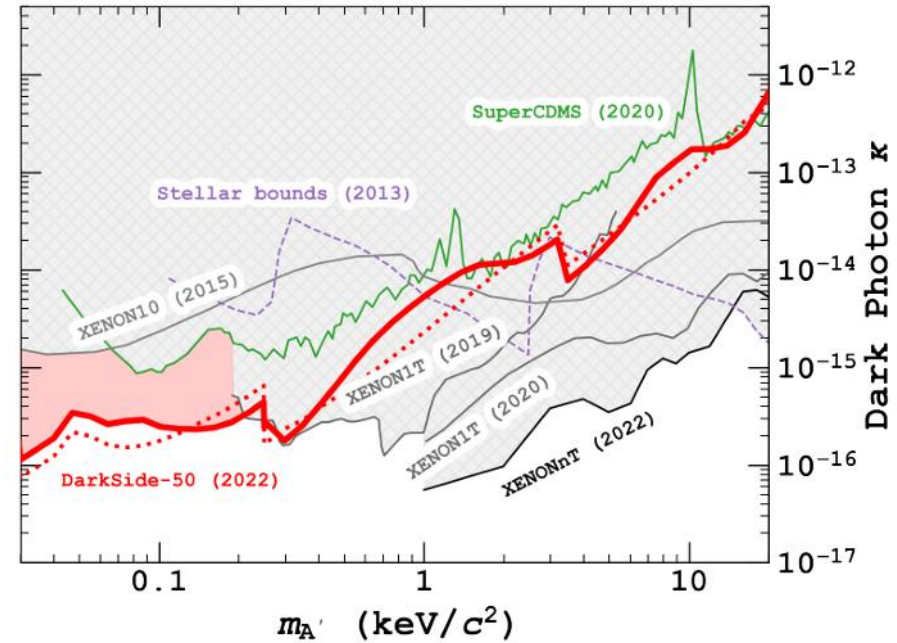
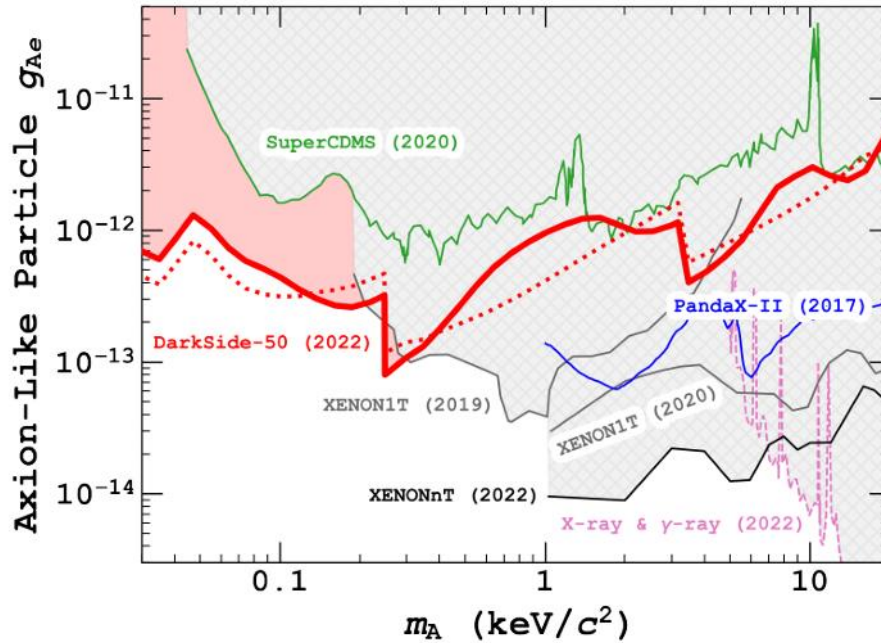
# Рассеяние тёмной материи на электронах



Phys. Rev. Lett. 130, 101002 (2023)

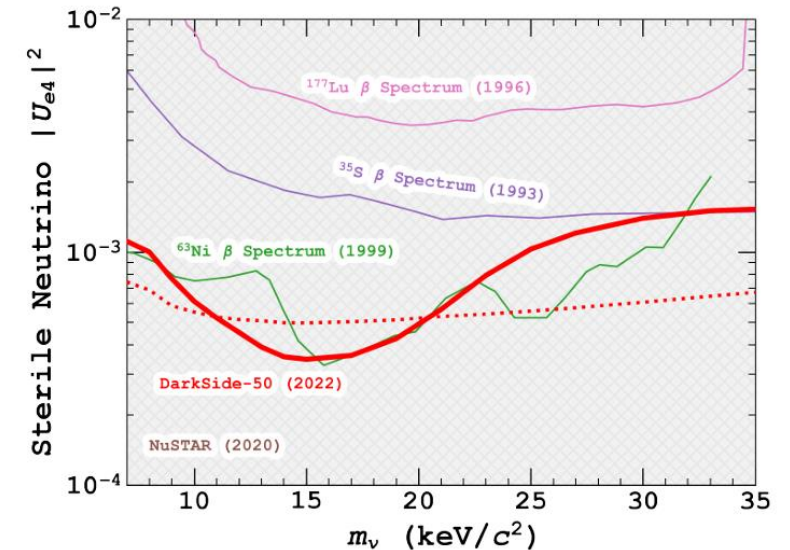
Самый строгий предел на сечение взаимодействия ДМ с электроном был установлен в области масс [16, 56] МэВ/с<sup>2</sup> для тяжелого медиатора и выше 80 МэВ/с<sup>2</sup> для легкого медиатора

# Рассеяние тёмной материи на электронах



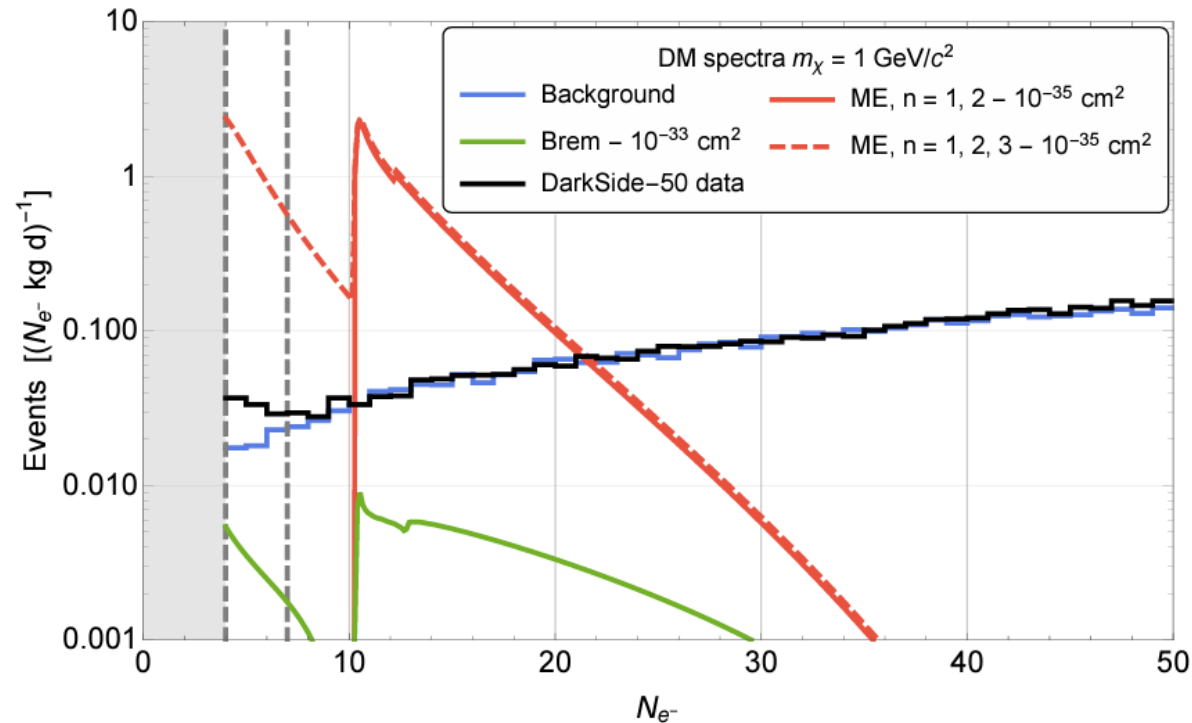
Для остальных моделей тёмной материи пределы устанавливались на параметры модели:

- Постоянная взаимодействия аксиона и электрона  $g_{Ae}$
- Кинетическая постоянная смешивания фотона и тёмного фотона  $\kappa$
- Угол смешивания стерильного нейтрино  $|U_{e4}|^2$



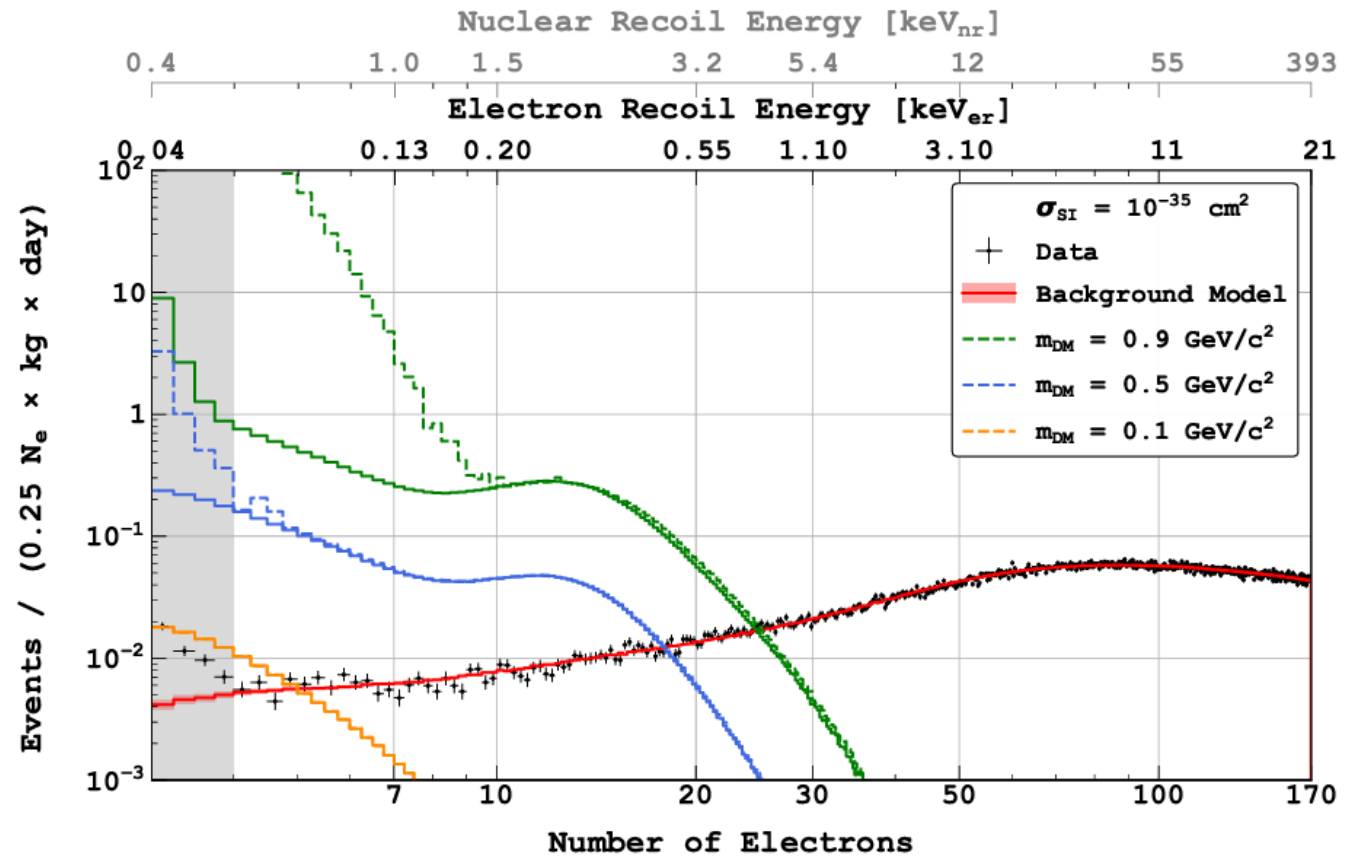
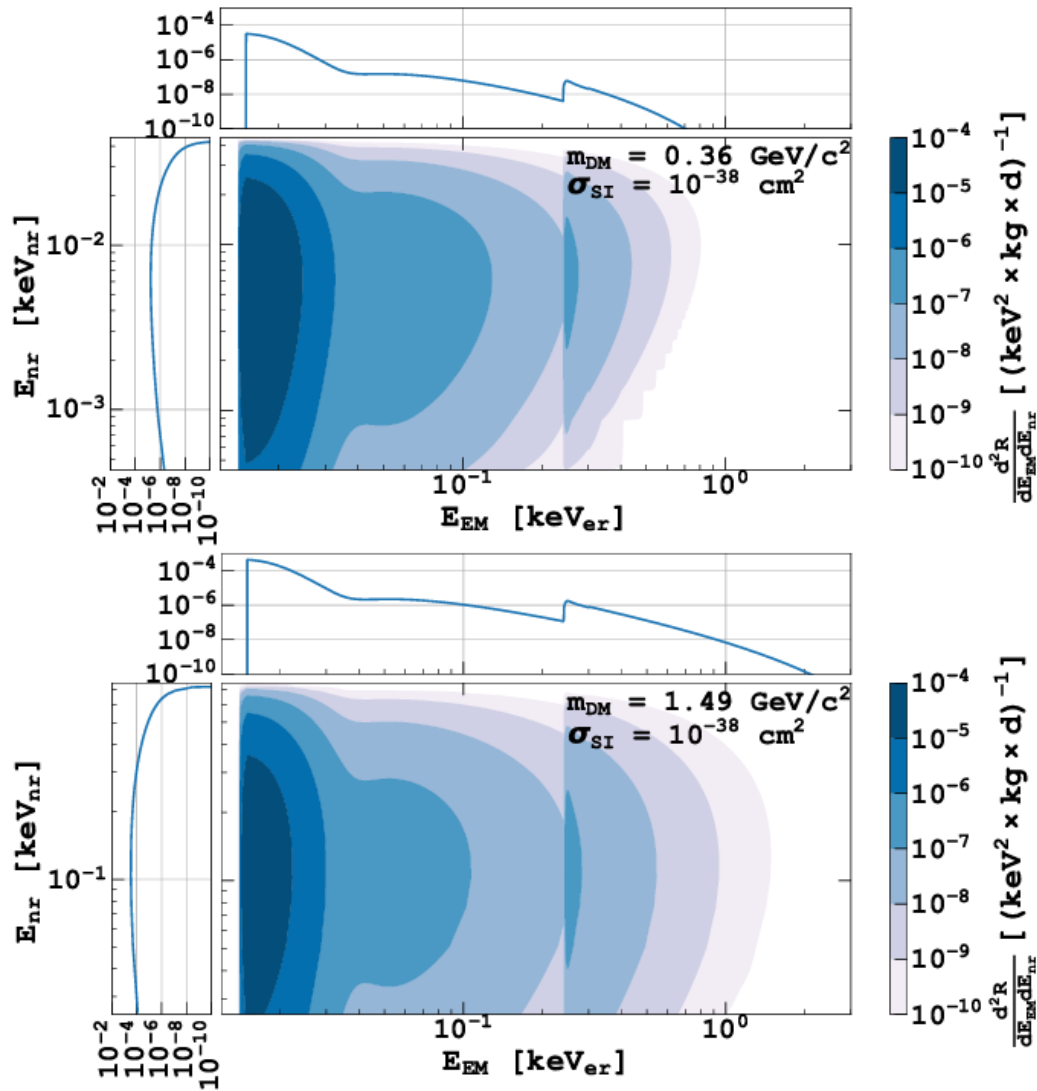
# Эффект Мигдала и тормозное излучение

- Эффект Мигдала (ME): запаздывающее движение электронных оболочек за ядром отдачи  $\rightarrow$  поляризация атома  $\rightarrow$  ионизация и испускание фотонов
- Тормозное излучение: ускоренное движение ядра отдачи в поле его электронных оболочек  $\rightarrow$  испускание фотонов (слабый эффект)



ЖНЕР 11 (2020) 034 (with old dataset)

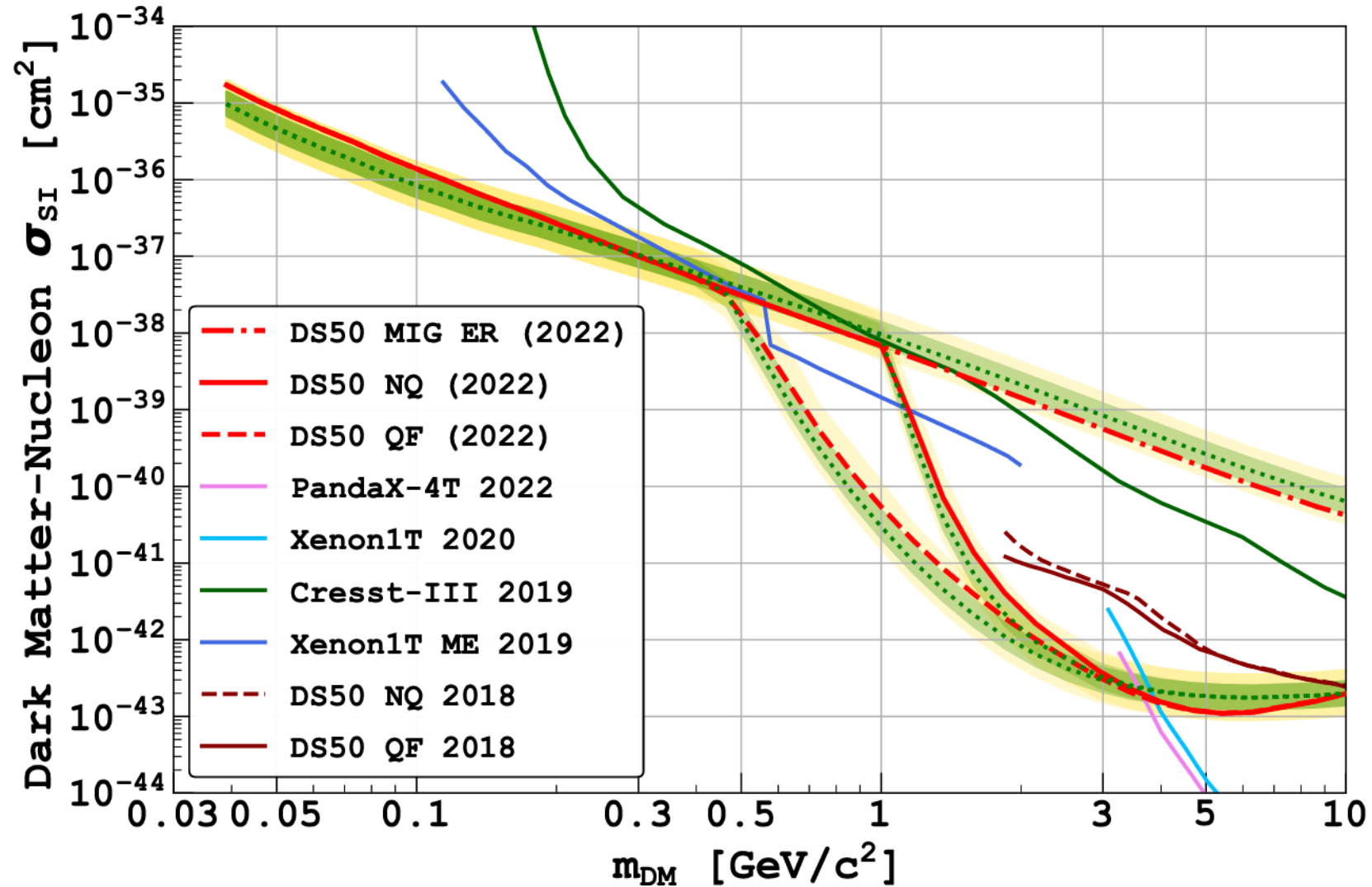
# Эффект Мигдала



Phys. Rev. Lett. 130, 101001 (2023)

# Эффект Мигдала

- Данный подход позволил установить наиболее строгий предел на сечение взаимодействия в диапазоне  $M\chi = [0.04, 3.6] \text{ ГэВ}/c^2$
- Эффект полностью обусловлен эффектом Мигдала вплоть до  $0.5 \text{ ГэВ}/c^2$ ; также, предел в этом диапазоне масс не зависит от выбора модели флуктуации квенчинга



Phys. Rev. Lett. 130, 101001 (2023)

# Заключение

- Детекторы с двухфазными времяпроекционными камерами на базе аргона, такие как DarkSide-50, способны существенно увеличить возможности поиска тёмной материи в области низких масс
- Усовершенствованные методы анализа и внедрение в анализ атомных эффектов, таких как эффект Мигдала, способствуют увеличению чувствительности поиска легких частиц тёмной материи
- Увеличение экспозиции критично для поиска тёмной материи в области низких масс, и это будет достигнуто в рамках экспериментов со значительно большей массой мишени, таких как DarkSide-LowMass и DarkSide-20k – следующих стадиях программы DarkSide