

Научная сессия секции ядерной физики  
ОФН РАН, Дубна, 1-5 апреля 2024

# СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКА ЧАСТИЦ ТЕМНОЙ МАТЕРИ

*Евгений Якушев*

*Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Дзелепова,  
ОИЯИ, Дубна*

НАУКА  
СБЛИЖАЕТ  
НАРОДЫ

SCIENCE  
BRINGING  
NATIONS  
TOGETHER



## Основы поиска:

- Темная материя существует!
- Новая неизвестная частица или частицы (вне стандартной модели);
- Плотность падает как  $1/r^3$  из-за расширения Вселенной;
- 26% от полной массы Вселенной, 84% массы всей материи;
- Холодная (основа кластеров и галактик);
  
- Стабильная?
- Участвует в слабом взаимодействии?
  
- Новое взаимодействие ???
- Взаимодействие с темной энергией ???
- Механизм взаимодействия между частицами темной материи ???

## Эксперименты на ускорителях (БАК):

Возможно удастся увидеть недостачу энергии, однако будет трудно доказать, что новая частица(ы) стабильна и именно эта частица образует темную материю.

## Косвенные методы обнаружения (сигналы из Космоса):

Высокоэнергичные нейтрино от Солнца (Земли), антиматерия ( $e^+$ , ...) от аннигиляции пар в гало нашей галактики,  $\gamma$ -лучи от аннигиляции пар в центре галактики, ...

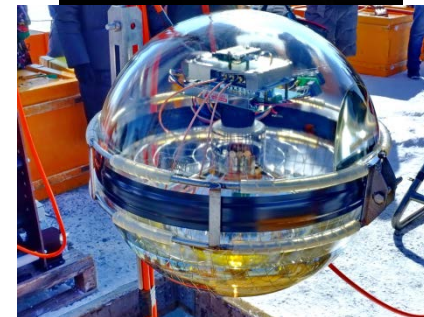
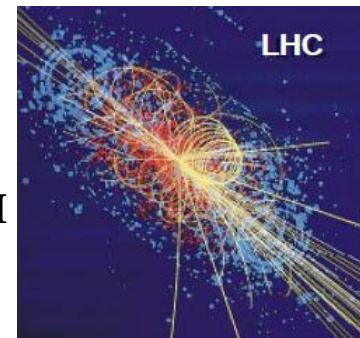
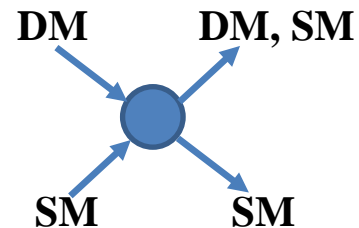
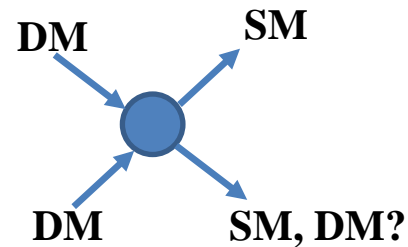
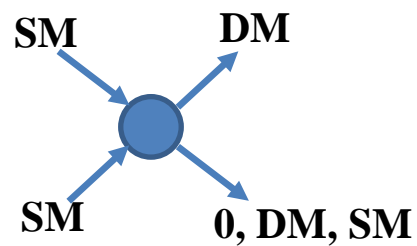
## Прямой поиск:

наблюдение рассеяния частиц темной материи на мишени в лаборатории

Два подхода:

- 1) как можно полное подавление фона;
- 2) поиск признаков дополнительного сигнала при значительном фоне: измерения с низким порогом + поиск полугодовых модуляций сигнала

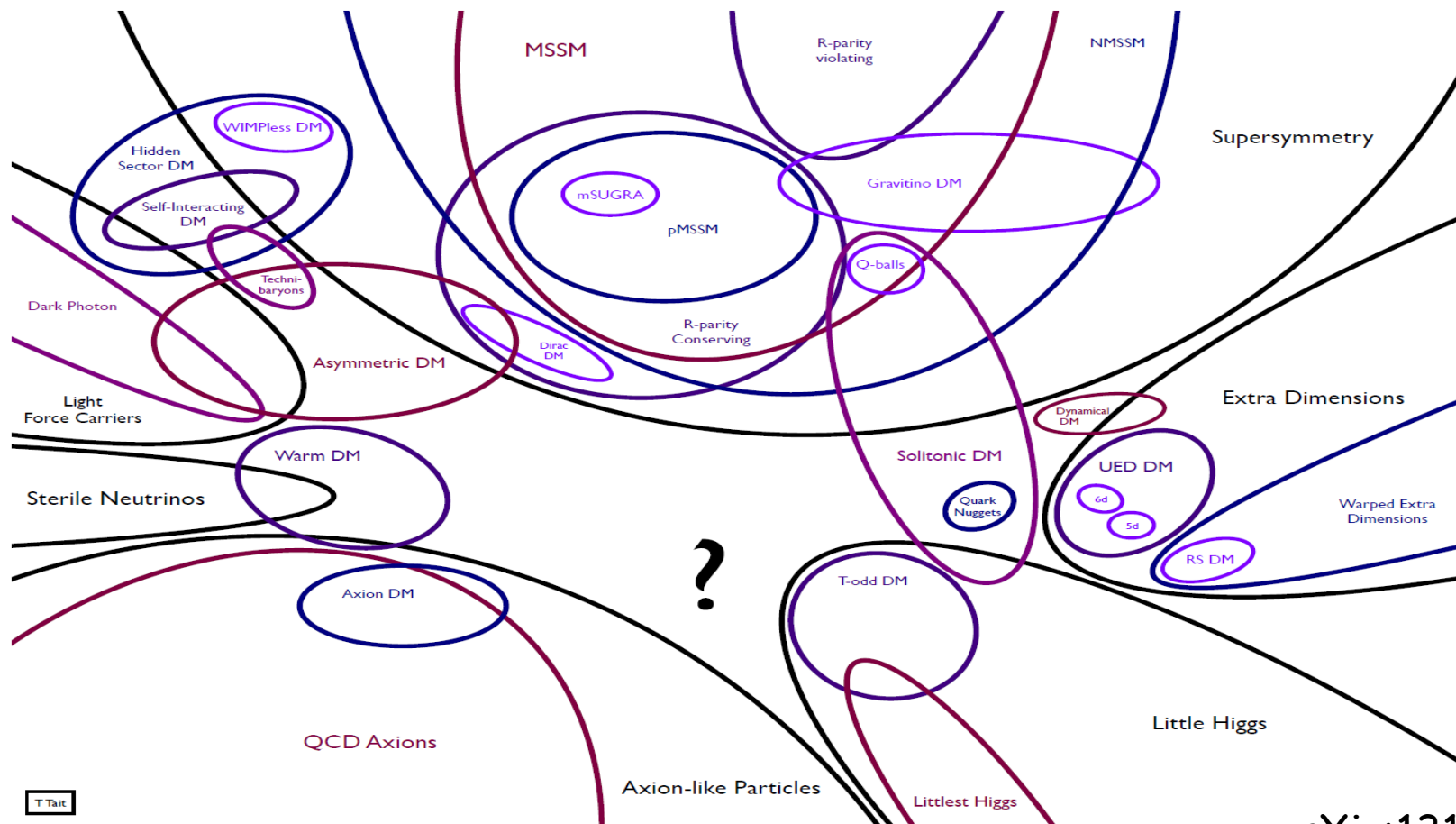
*Прямые измерения дадут прямые доказательства, однако не смогут дать точные значения массы и сечения – т.к. интерпретация результатов сильно зависит от модели.*

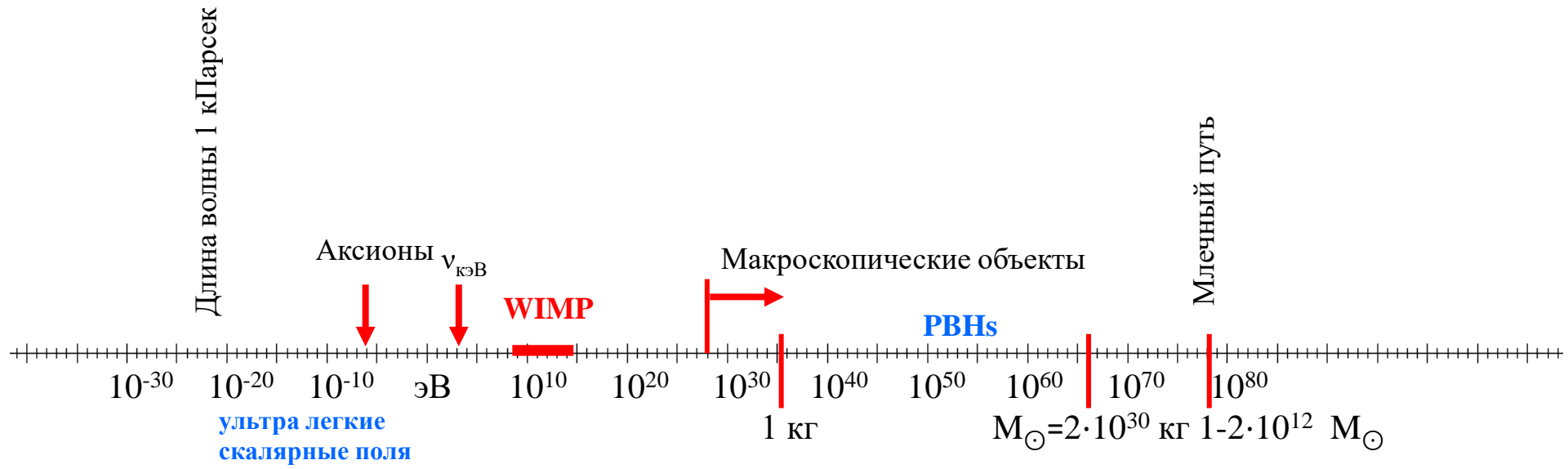


# Snowmass-2013 Cosmic Frontier 3 (CF3) Working Group Summary: Non-WIMP dark matter

## 4 The (incomplete) landscape of candidates

The following sections of this report discuss some of dark matter candidates in more detail.

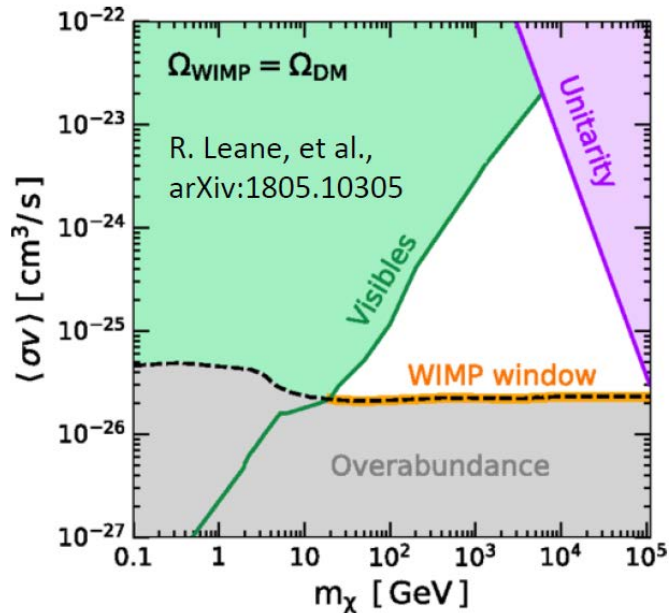
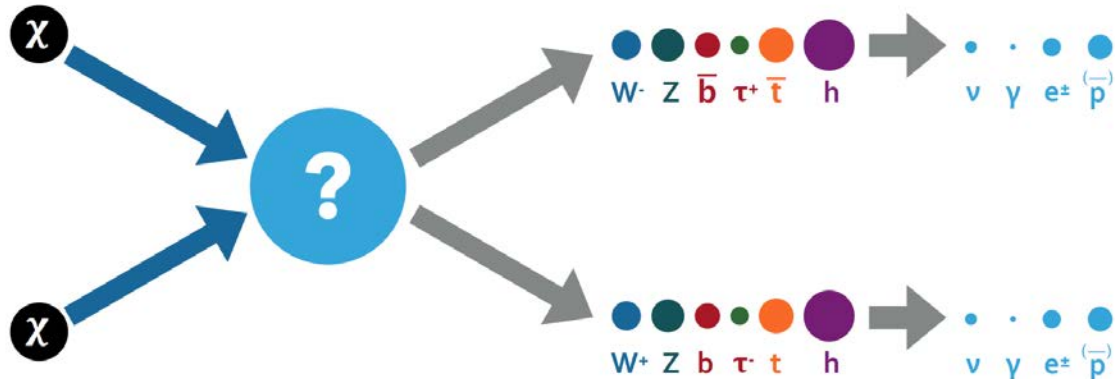




# Косвенные методы обнаружения темной материи

Далеко в космосе: Кластеры галактик, галактическое гало, центр галактики

Локальные источники: Солнце, Земля

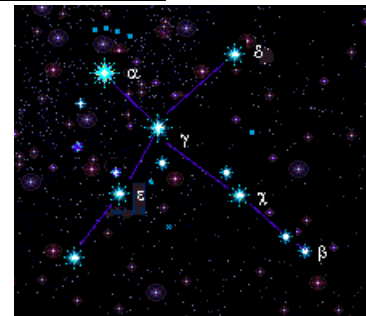
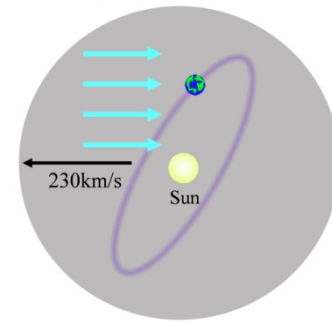
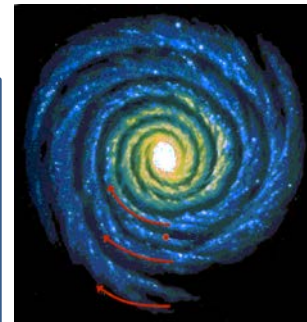
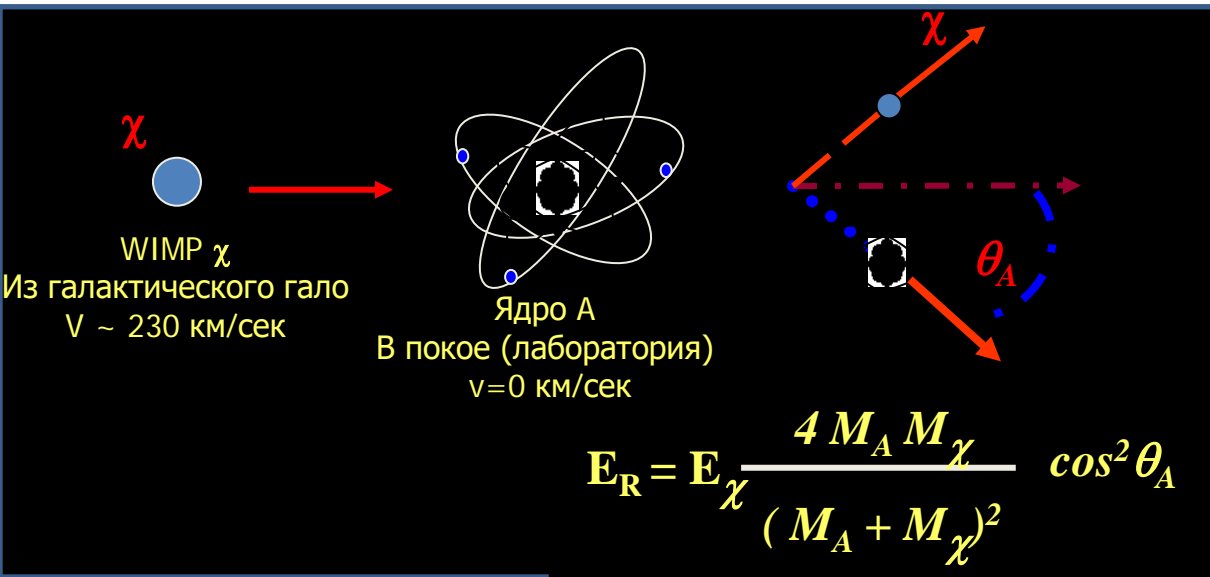
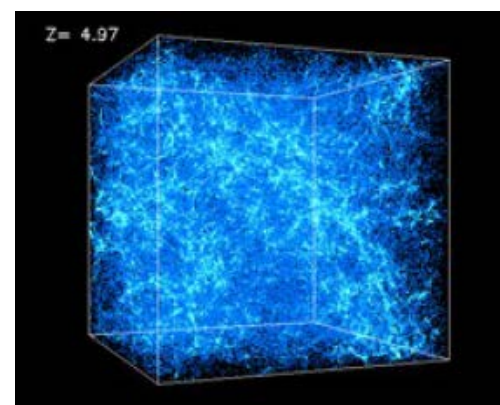


Из-за высокого многообразия астрофизических явлений большинство наблюдений имеет множественную интерпретацию.

**Прямой поиск:**

**где, что и как искать?**

Анализ формирования структур во Вселенной показывает, что темная материя является “холодной”, т.е. нерелятивистской, и что она является основой кластеров обычной материи (галактик и скоплений галактик). При нашем (Солнечная система) движении в галактике мы движемся через гало темной материи, которая при этом может рассеиваться на обычной материи, если например обладает слабым взаимодействием (WIMP).





$$\frac{\text{Rate}}{\text{Mass}} \approx \rho_{\text{wimp}} \times f(\text{Velocity}) \times \frac{A}{M_{\text{wimp}}} \sigma_{\text{wimp-nucleon}} \times F(\text{Coherence})$$

### Астрофизика:

- Lewin&Smith [Astrop 6 (1996) 87] соглашение для сравнения экспериментов
- $\rho_{\text{wimp}} = 0.3 \text{ ГэВ}/\text{с}^2/\text{см}^3$
- ... несмотря на более новые данные:  $0.39 \pm 0.02$  [Ullio+Catena 0907.0018]
- Сферическое изотермическое гало:  $v_{\text{WIMP}} \sim v_{\text{SUN}} \sim 230 \text{ км/сек}$
- ... несмотря на то, что более комплексные модели гало существуют и вполне могут более точно отображать реальность

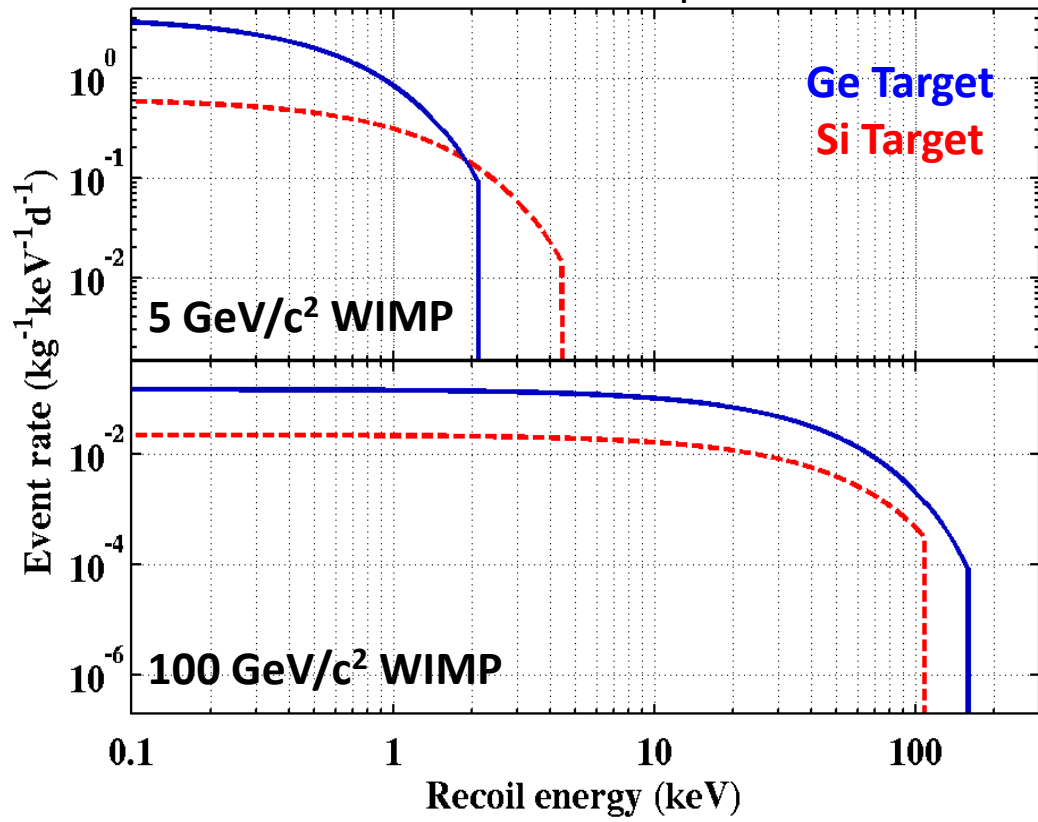
### Физика частиц и ядерная физика:

- Свободные параметры / предсказания теории:  $M_{\text{WIMP}}, \sigma_{\text{WIMP-nucleon}}$
- Экстраполяция WIMP-кварк  $\rightarrow$  WIMP-нуклон:
- Другие факторы (Coherence):
- $\sim A^2$  для скалярного взаимодействия (спин-независимое, доминирует для  $A \sim 20$ )
- $\sim J(J+1)$  для аксиального взаимодействия (спин-зависимое)
- Ядерный форм фактор (подавляет  $A^2$  усиление для больших  $A$ )

Данные, полученные телескопом Gaia в 2018 году, указали на остатки вблизи нашего положения большой галактики, давно поглощенной нашим Млечным Путем.



$$\sigma = 1 \times 10^{-41} \text{ cm}^2, v_{\text{escape}} = 544 \text{ km/s}$$



# Что собой представляет современный детектор частиц темной материи?

$$E_R < \sim 100 \text{ кэВ}$$



Высокоэффективный детектор,  
низкий порог, хорошее  
энергетическое разрешение

$$R_0 < 1 \text{ соб./1000 кг/год}$$



Масса  
10 кг – 10000 кг

$$\text{Фон} \rightarrow 0$$



Эффективная защита,  
Подземная лаборатория,  
Отбор материалов, ...

Что нужно:

- 1) Детекторы, позволяющие проводить измерения в нужном диапазоне энергий;  
масса детекторов, состав, собственный фон;
- 2) Детектирующая установка (условия для работы детекторов, набор данных);
- 3) Обеспечить фоновые условия;
- 4) Калибровки и МС;
- 5) Стабильный набор данных;
- 6) Хранение и анализ данных;
- 7) Результат.

# Основные подходы к прямому поиску частиц темной материи:

Криогенные (Ge, Si, ...)

Твердотельные сцинтилляторы (NaI, CsI)

Сцинтилляторы на основе сжиженных благородных газов (LXe, LAr)

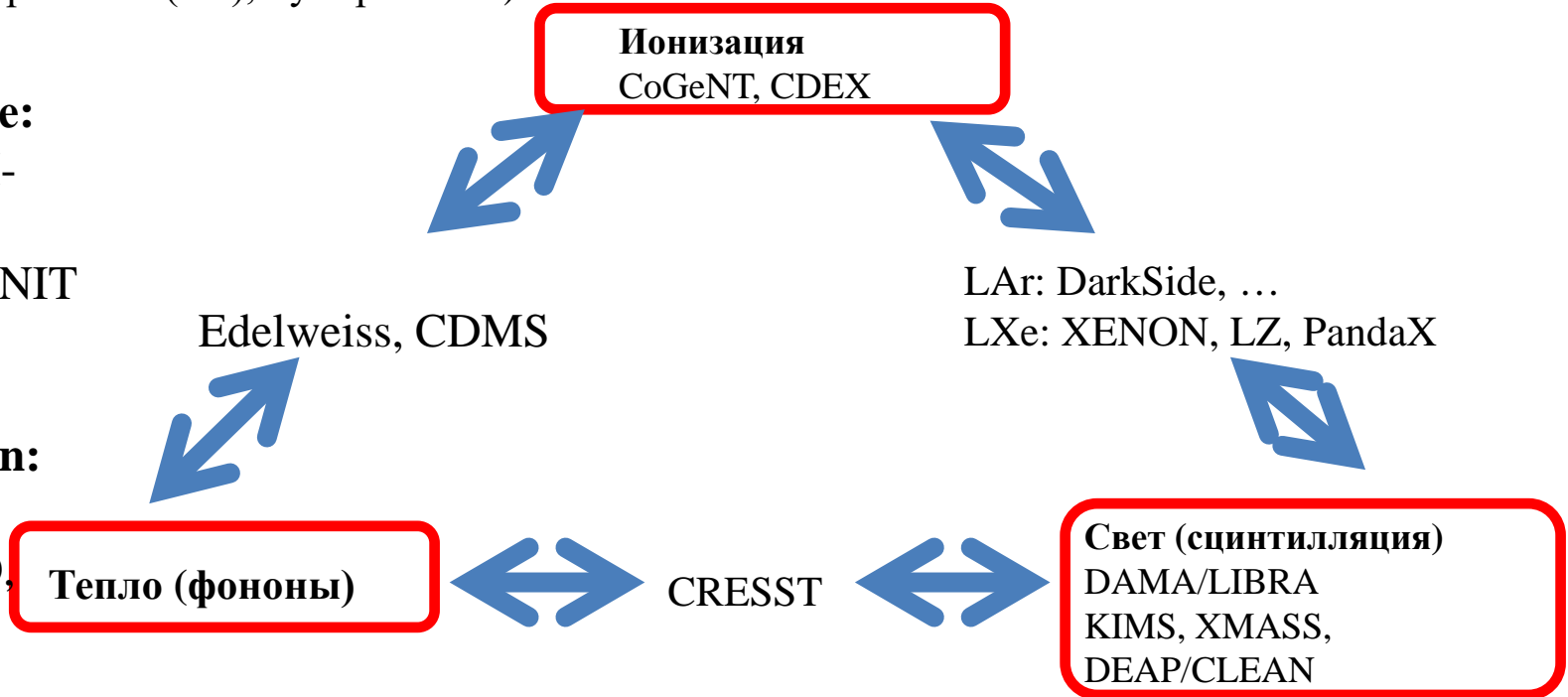
Другие (трековые (газ), пузырьковые)

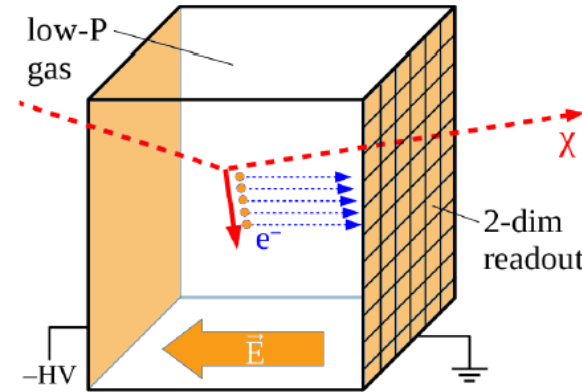
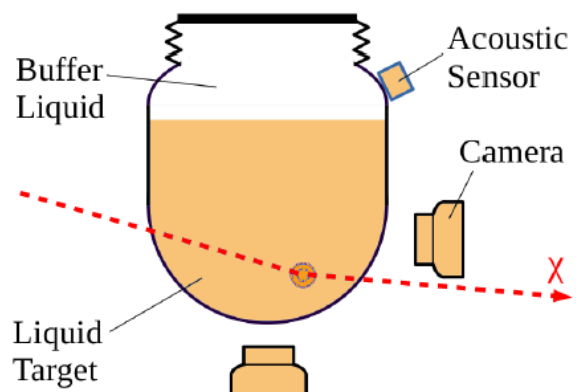
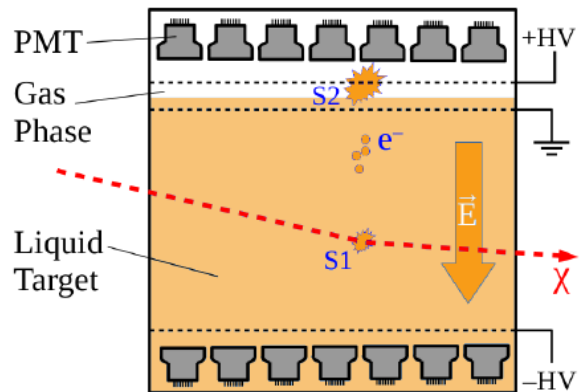
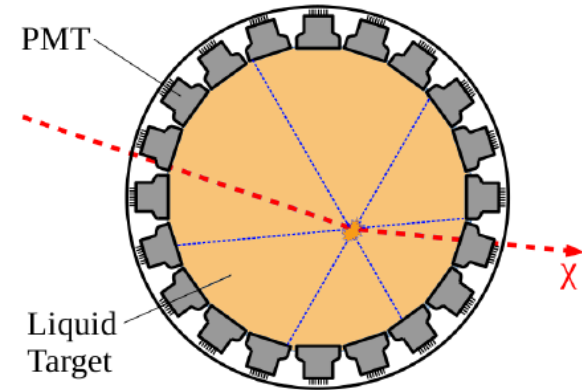
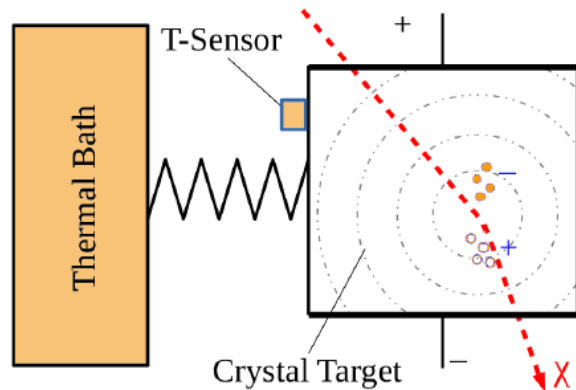
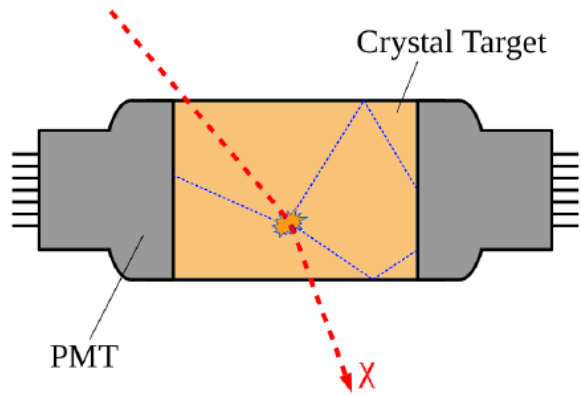
## Трековые:

Drift, DM-TPC,  
MIMAC, NIT

## Bubble Formation:

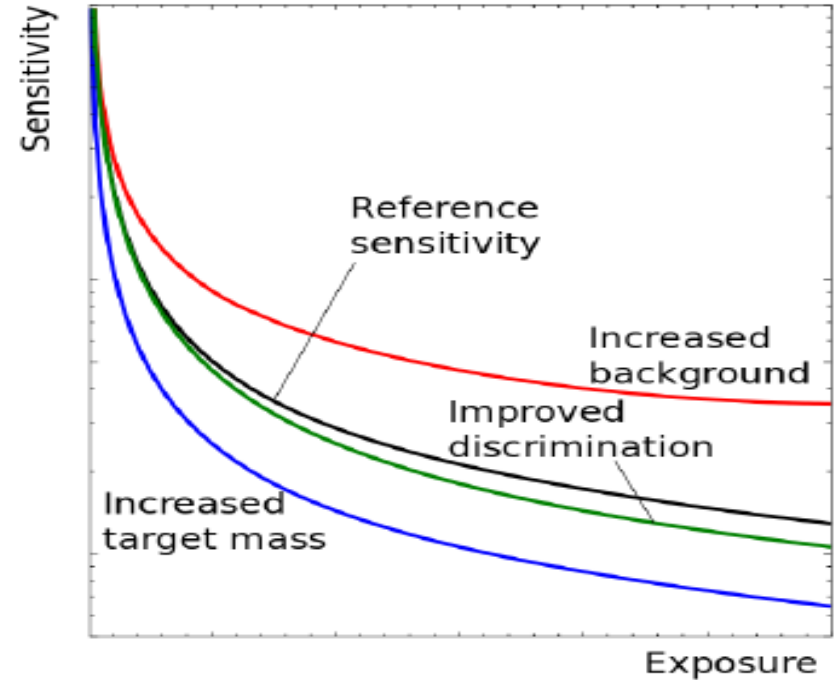
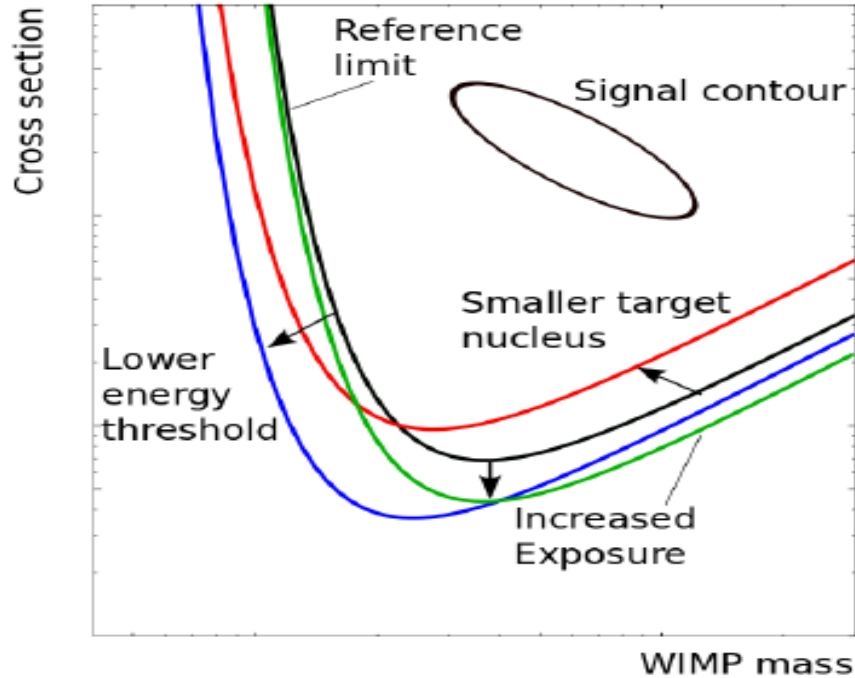
COUPP,  
PICASSO,  
PICO





Julien Billard *et al* 2022 *Rep. Prog. Phys.* **85** 056201

# Какой детектор использовать?



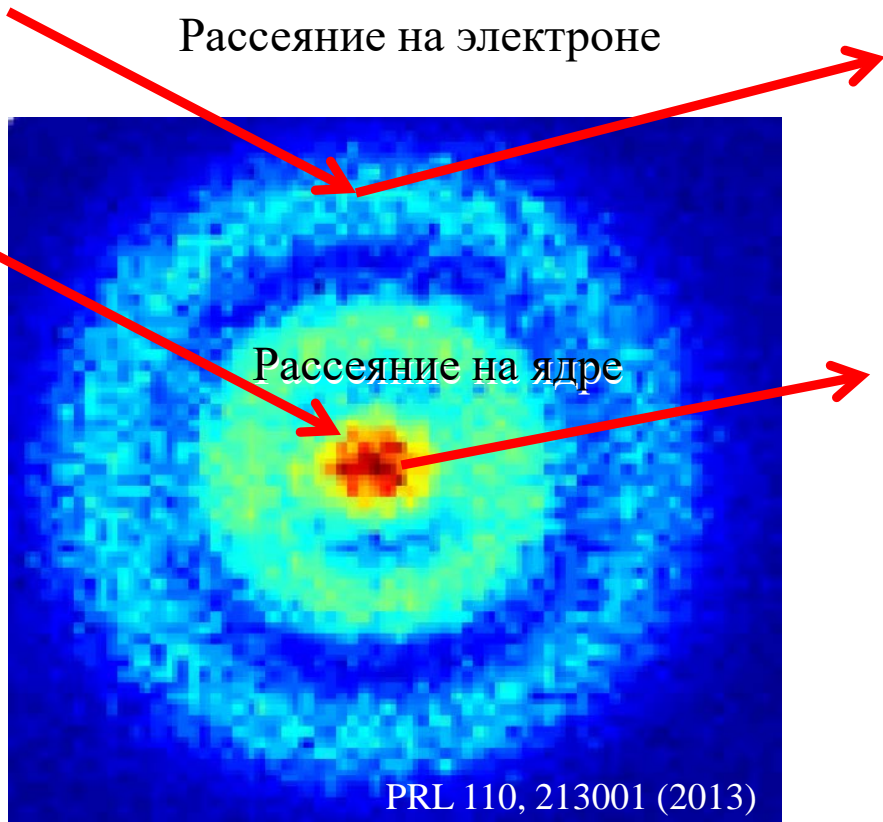
(Teresa Marrodan Undagoitia и Ludwig Rauch)arxiv:1509.08767

**Сжиженные благородные газы:** *большая масса, тяжелые элементы, низкий фон*

→ энергетическое разрешение не достаточно для открытия ниже  $10 \text{ ГэВ}/c^2$

**Криогенные детекторы и другие методы:** *отличное энергетическое разрешение, разные мишени*

→ исследование региона масс ниже  $10 \text{ ГэВ}/c^2$



## Ядра отдачи

- SI
- SD
- Экзотика

## Рассеяние на электроне

- Темные фотоны
- Бозонная ТМ
- Магнитная ТМ
- Аксионы и ALP
- Luminous ТМ

## Ядро отдачи и электрон

- Неупругое рассеяние ТМ
- MIMPs
- Эффект Мигдала и тормозное излучение



## *Две основные задачи:*

- ожидаемое количество событий (масса детекторов)
- уменьшить количество фоновых событий до уровня ниже ожидаемого сигнала от частиц темной материи

## **Что создает Фон:**

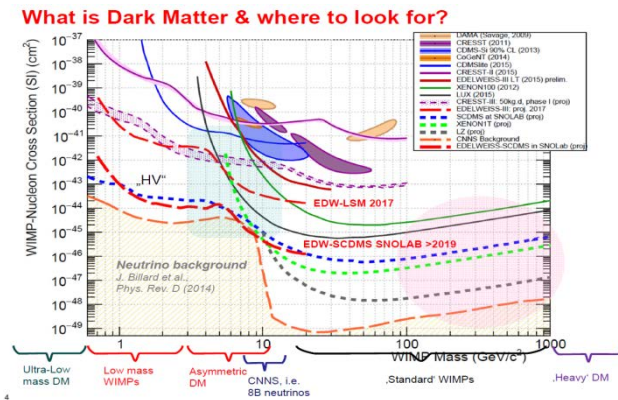
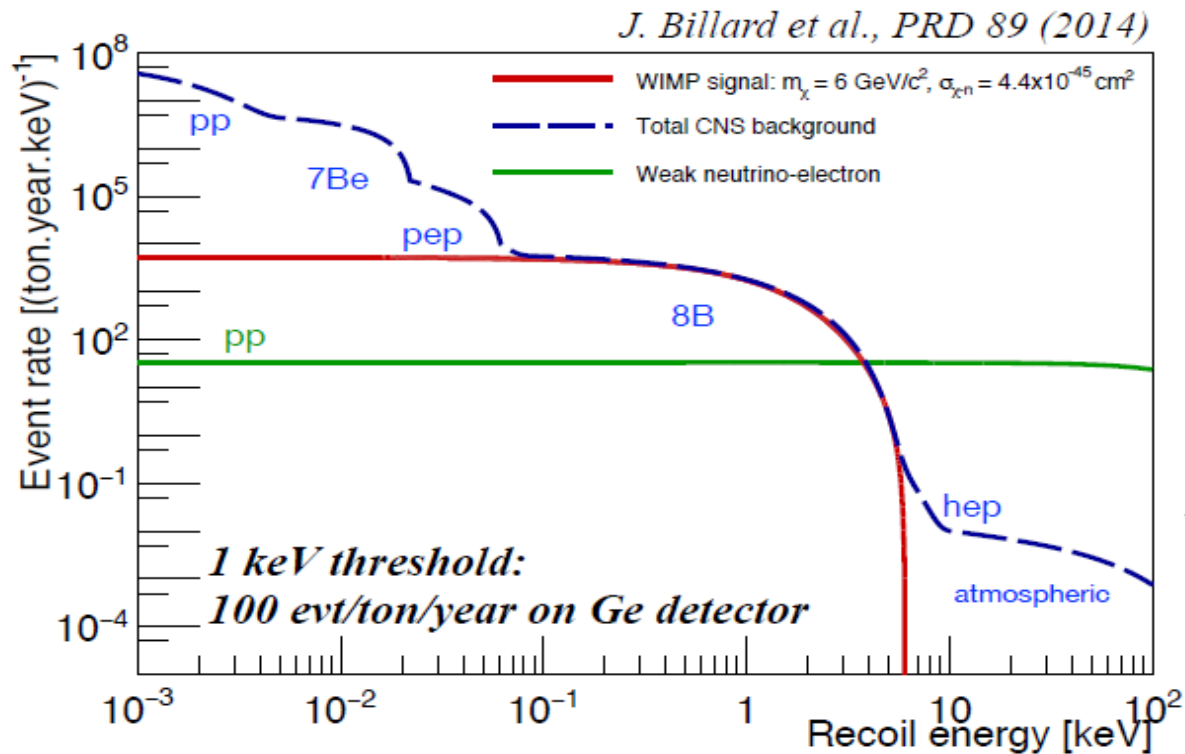
- **Космические лучи и активация**
- **Естественная радиоактивность материалов и стен (горной породы)**
- **Естественная и техногенная радиация в пылинках**
- **Радиоактивные газы в воздухе, например радон**

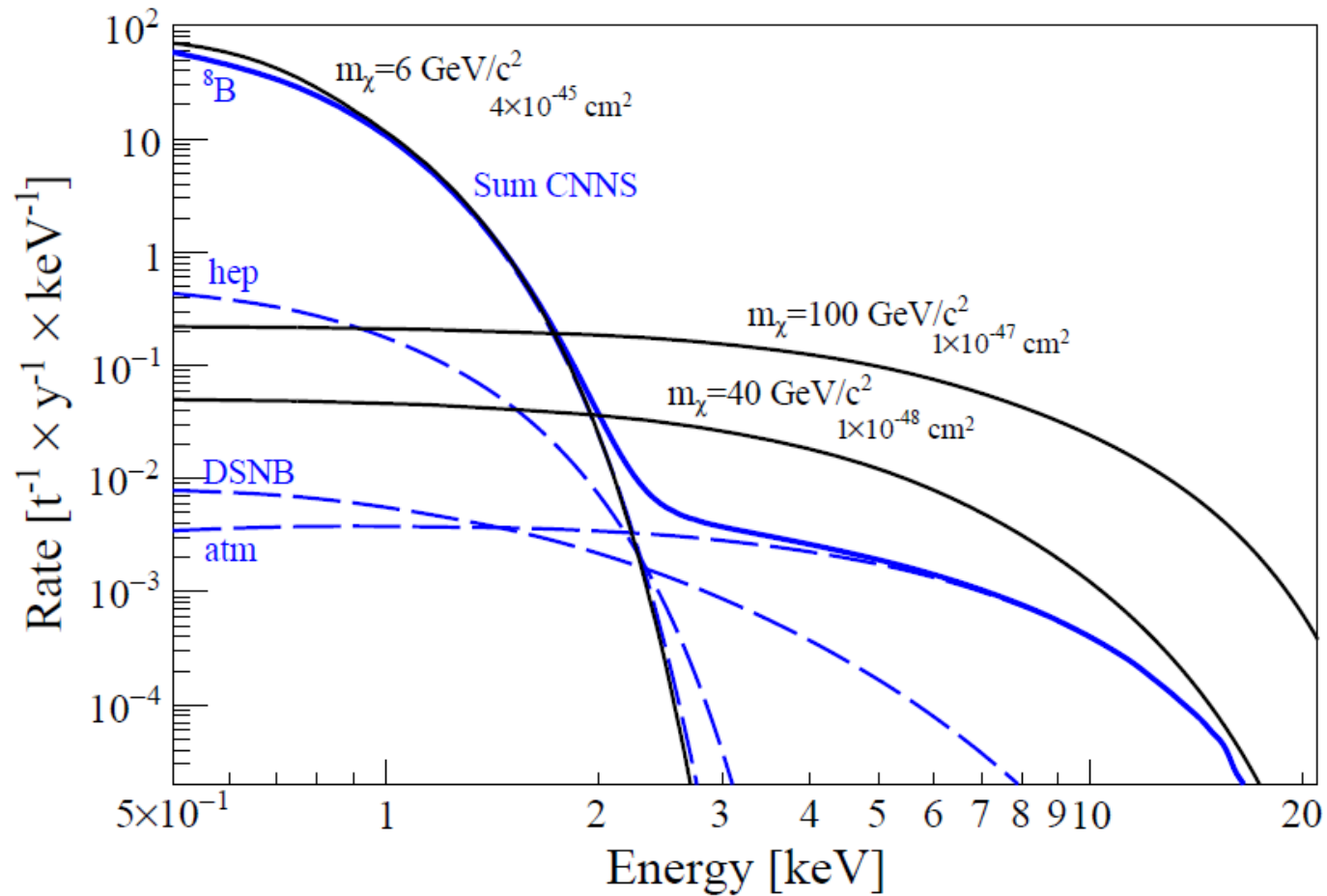
...

## Дополнительные критерии для отбора событий

- Форма импульса
- Комбинация методов измерения
- Отбор по месту и времени
- Мульти-детекторная сборка
- Специфическое изменение (временные вариации)

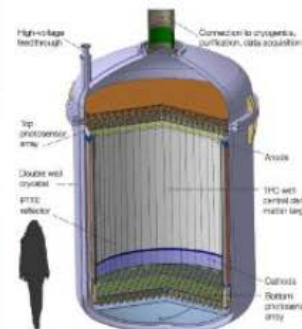
Наряду с обычными фонами необходимо учитывать и “экзотические” каналы.  
Самый яркий пример: фон от когерентного рассеяния нейтрино





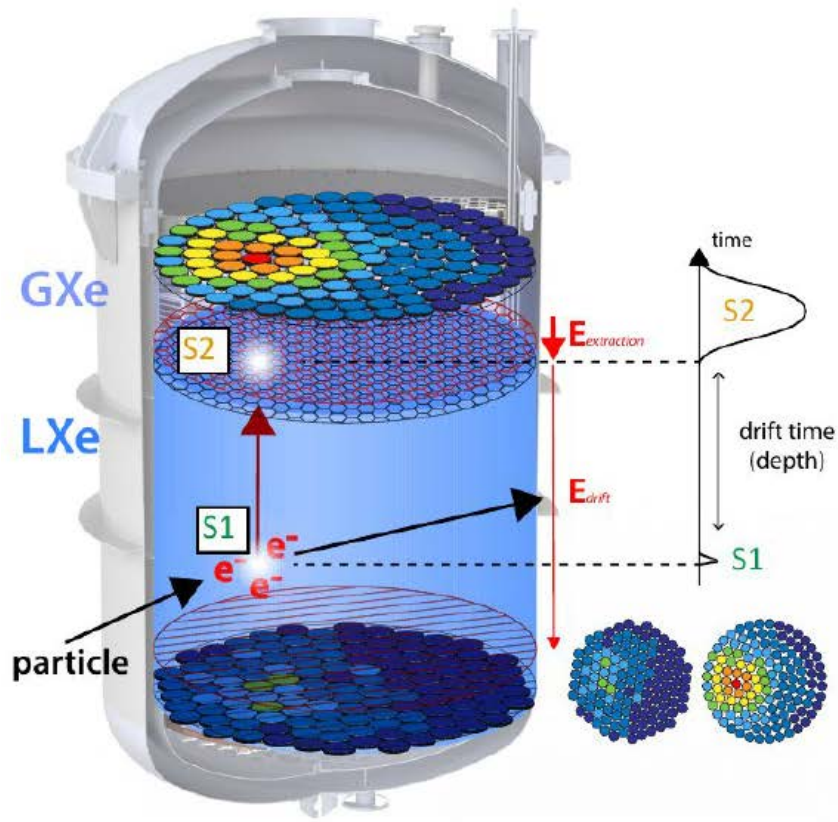
## Ar и Xe

- **Xe:** большое A;
- **Ar:** низкая цена
  - нужна очистка
  - $^{39}\text{Ar}$  (1 Бк/кг): нужно уменьшить  $>10^8$   
для  $10^{-46}$  см<sup>2</sup>
- Фон:
  - Self-shielding
  - Двухфазные детекторы
  - Форма импульса



	XENON10	XENON100	XENON1T	XENONnT	DARWIN
<b>Operation period</b>	2005-2007	2008-2016	2012-2019	2020-2026	2030
<b>Xenon mass</b>	14 kg Xe target	62 kg Xe target	2 t Xe target	5.9 t active Xe 8.5 t total Xe	~40 t active Xe ~50 t total Xe
<b>Height</b>	15 cm	30 cm	96 cm	148 cm	~2.6 m
<b>Diameter</b>	20 cm	30 cm	97 cm	133 cm	~2.6 m



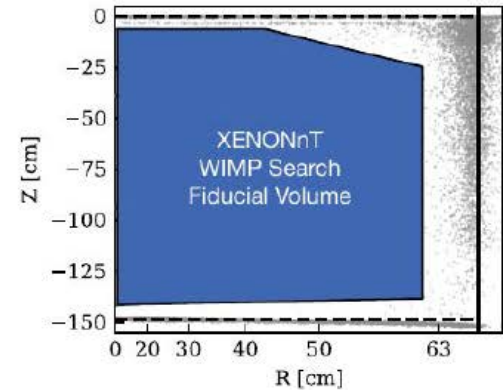


## Light and Charge readout

- Prompt scintillation signal (**S1**)
- Secondary proportional scintillation signal in GXe from drifted electrons (**S2**)

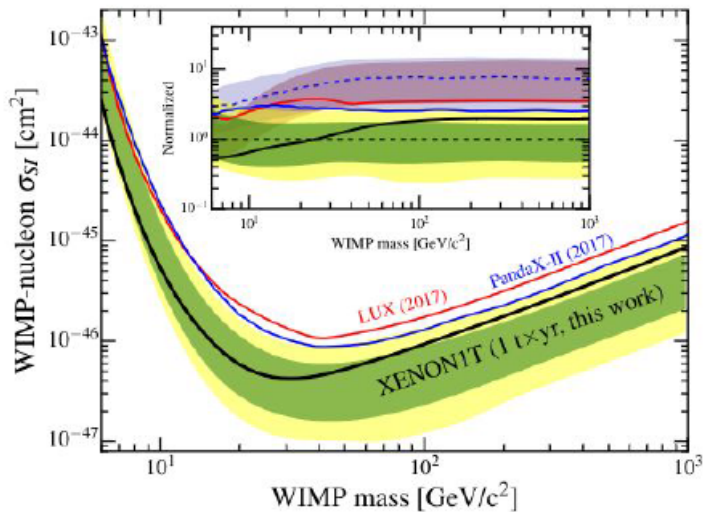
## Event reconstruction

- **3D Position:**
  - **Z** from drift time
  - **(X, Y)** from PMTs hit pattern
- **Energy**  $\rightarrow E = W \cdot (n_{ph} + n_e)$



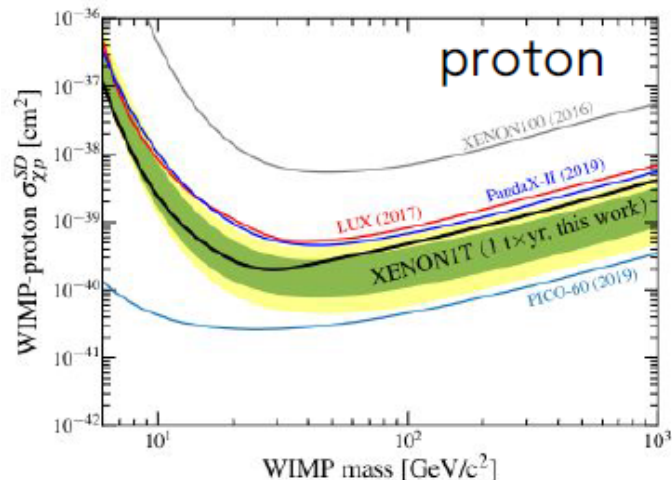
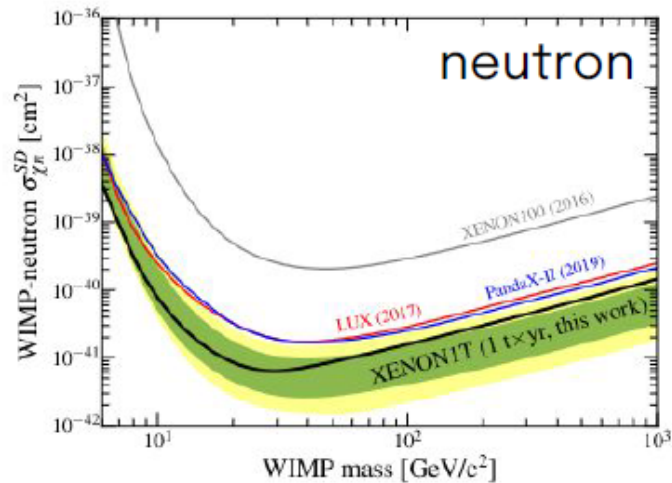


SI



Phys. Rev. Lett. 121, 111302 (2018), [Link](#), [arXiv:1805.12562](#)

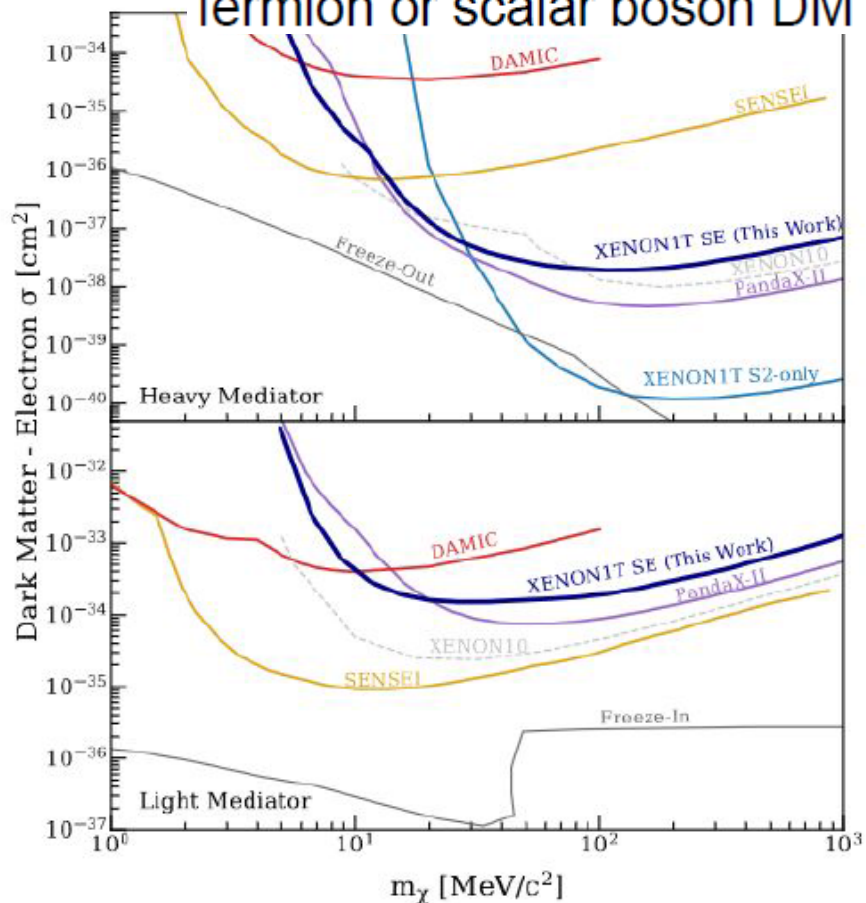
SD



Phys. Rev. Lett. 122, 141301 (2019), [arXiv:1902.03234](#)

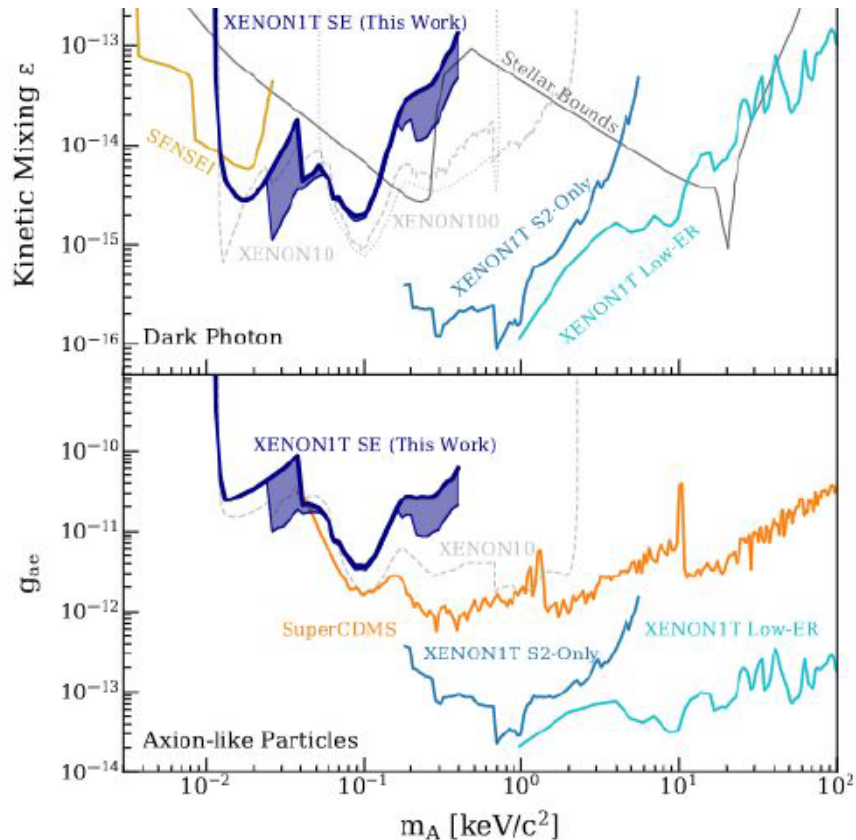
# TM - электрон

fermion or scalar boson DM

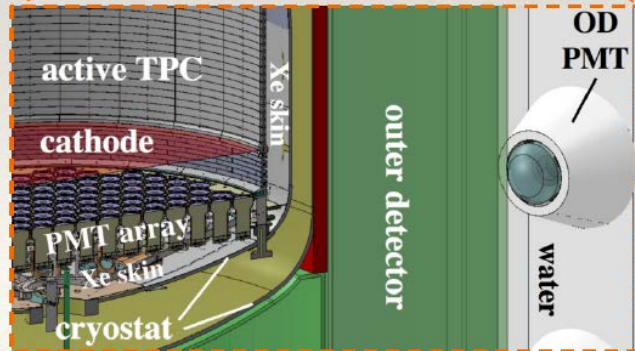
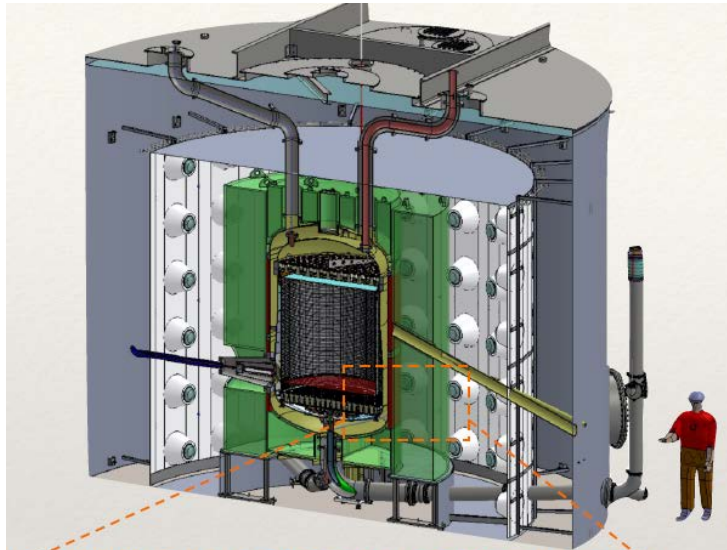


Vector-boson DM  $\rightarrow$  dark photons

Pseudo-scalar DM  $\rightarrow$  axion-like particles (ALPs)



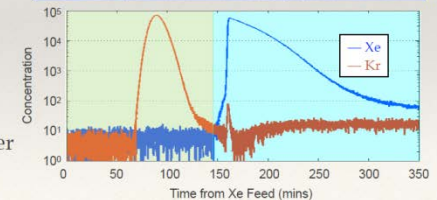
# LUX-ZEPLIN (LZ)



- ❖ LZ is a dark matter direct detection experiment based at the Sanford Underground Research Facility
  - 4850 ft underground -> cosmic ray reduction
- ❖ Dual-phase xenon time projection chamber (TPC)
  - 7 t active xenon viewed by 494 photomultiplier tubes

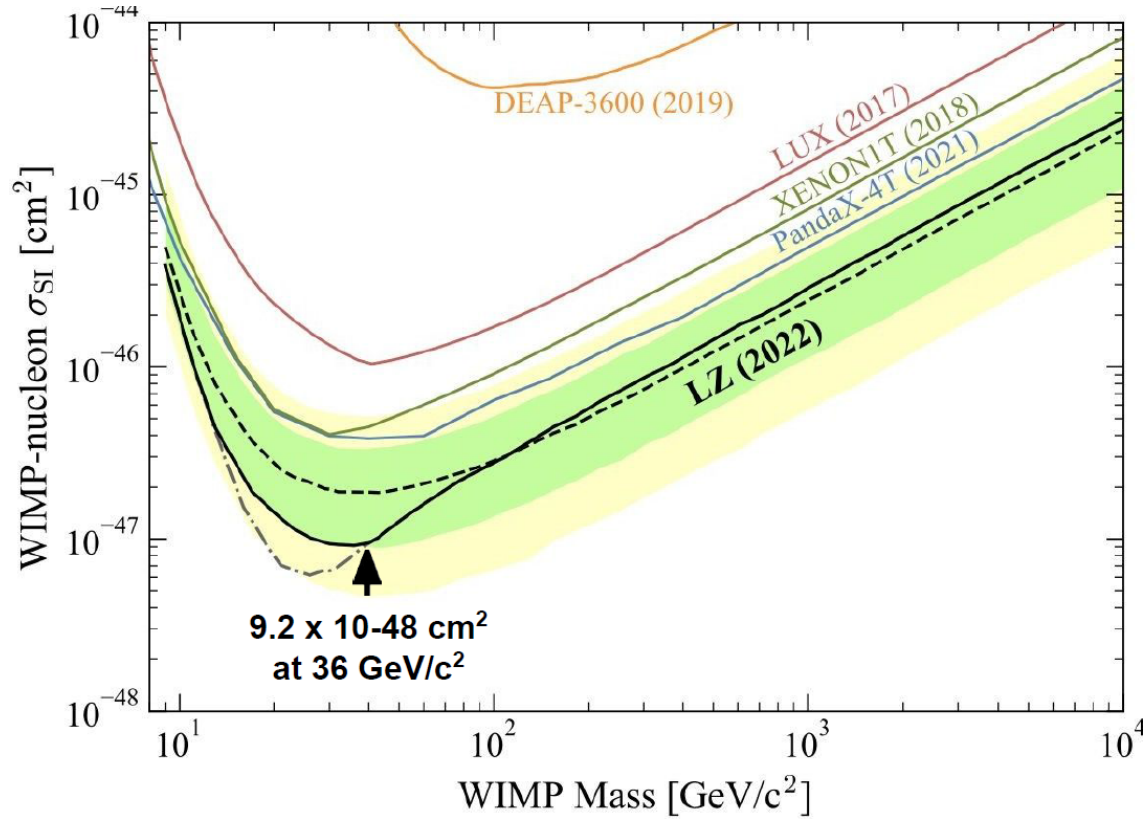
## Background Control

- ❖ Material selection based on ~2000 assays with 13 HPGe detectors, ICPMS, neutron activation analysis
- ❖ Four Rn emanation screening sites
- ❖ TPC assembly in Rn-reduced cleanroom
  - Cleanliness protocols limiting surface contamination
    - Dust (<500 ng/cm<sup>3</sup>)
    - Plate-out (<0.5 mBq/m<sup>2</sup>)
- ❖ Charcoal chromatography at SLAC to remove xenon contaminants (<sup>85</sup>Kr, <sup>39</sup>Ar)
- ❖ Online radon reduction system and purification via getter

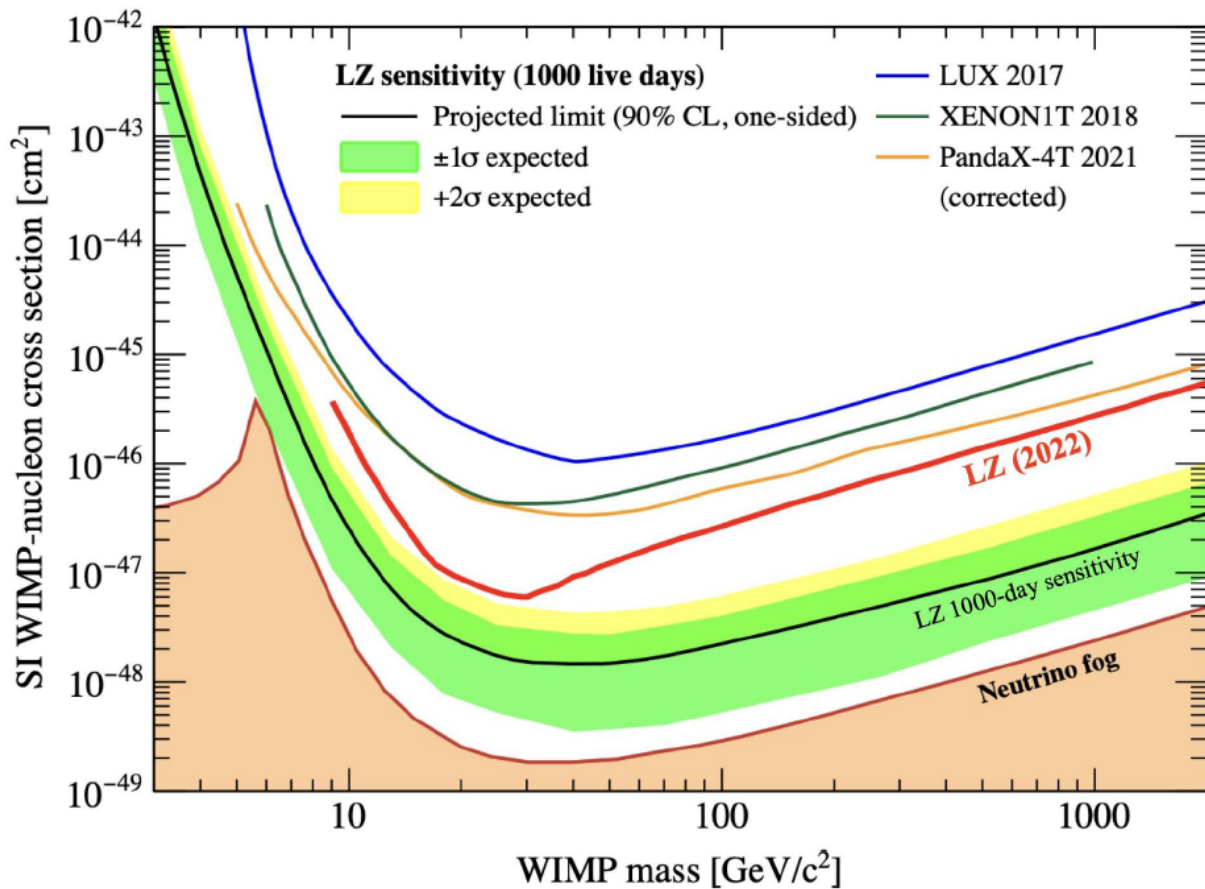


[EPIC, Vol 80: 1044 \(2020\)](#)

# The LZ Liquid Xenon (LXe) TPC





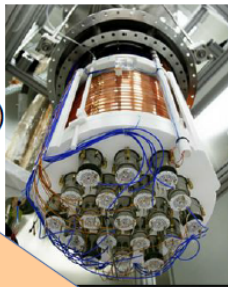


# Liquid argon detectors

10 kg

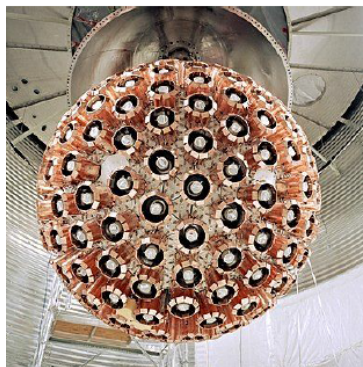
2010

**DarkSide-50**  
(50 kg, LNGS)



100 kg

**ArDM** (1t, LSC)



1000 kg

**DEAP-3600** (3.3t,  
SNOLAB)

2015

- More than 300 scientists from 15 countries and 60 institutions
- Officially supported by underground labs: LNGS, LSC, and SNOLAB

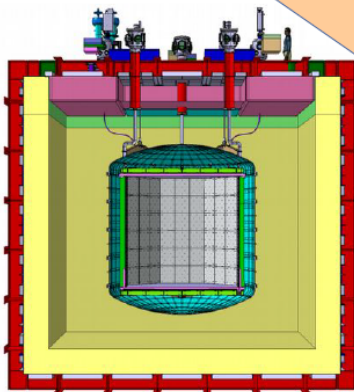
**Global Argon Dark Matter  
Collaboration formed**

2020

**DarkSide-20k**  
(50t, LNGS)

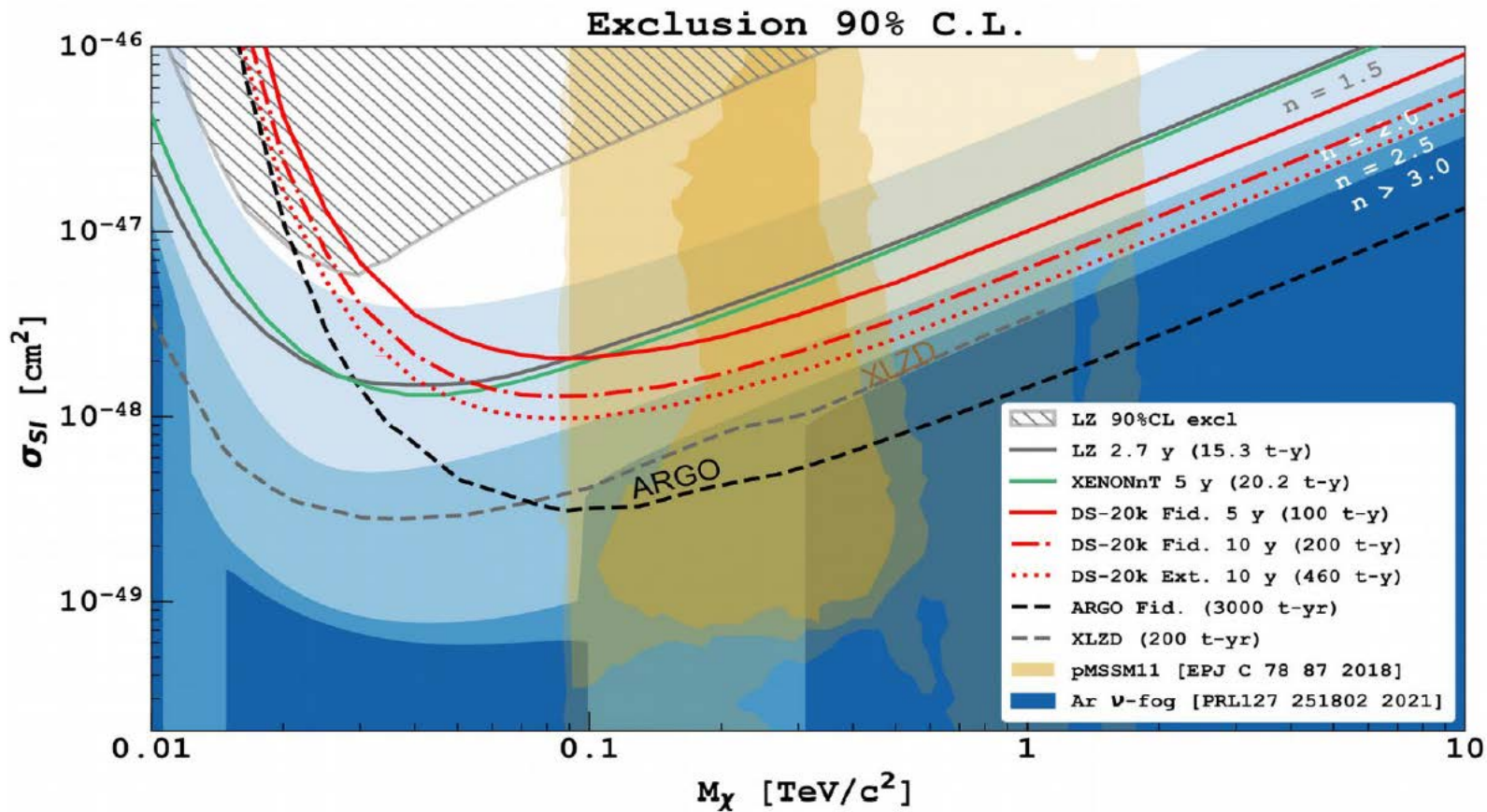
100000 kg

**ARGO: 400 t**



## DarkSide-50 experiment and dual-phase TPC technique

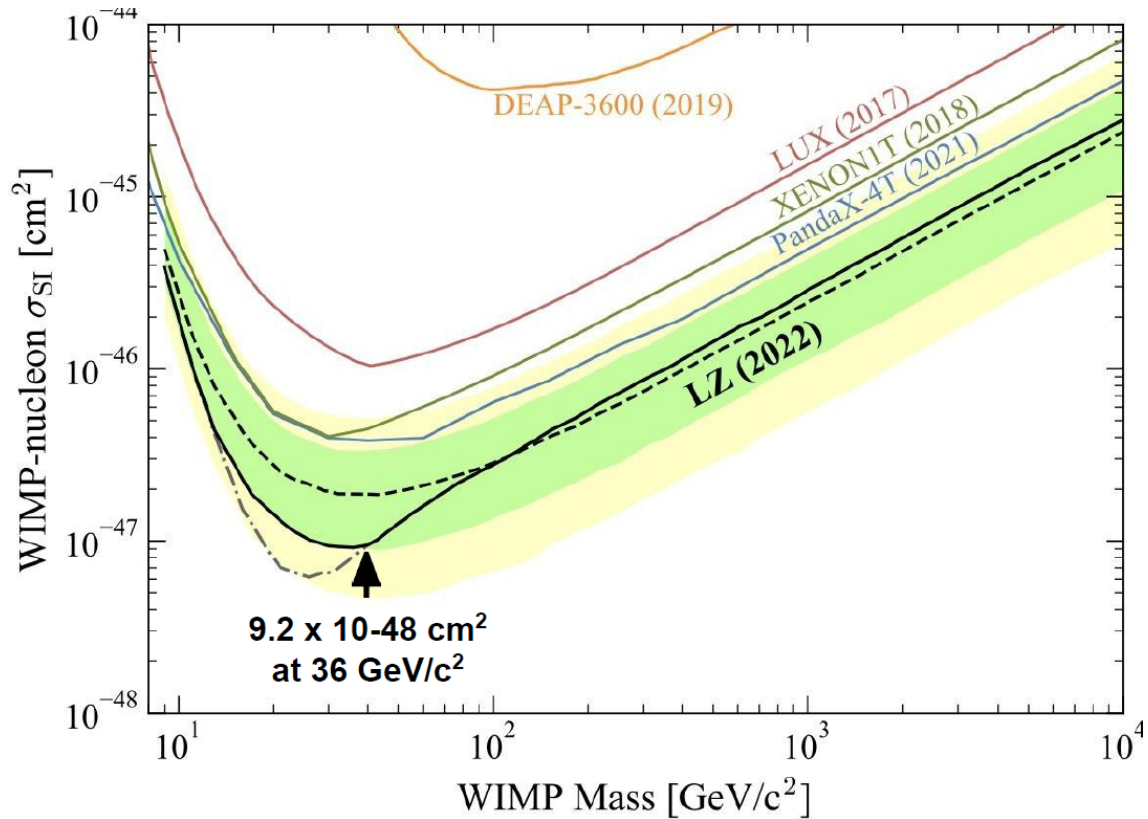


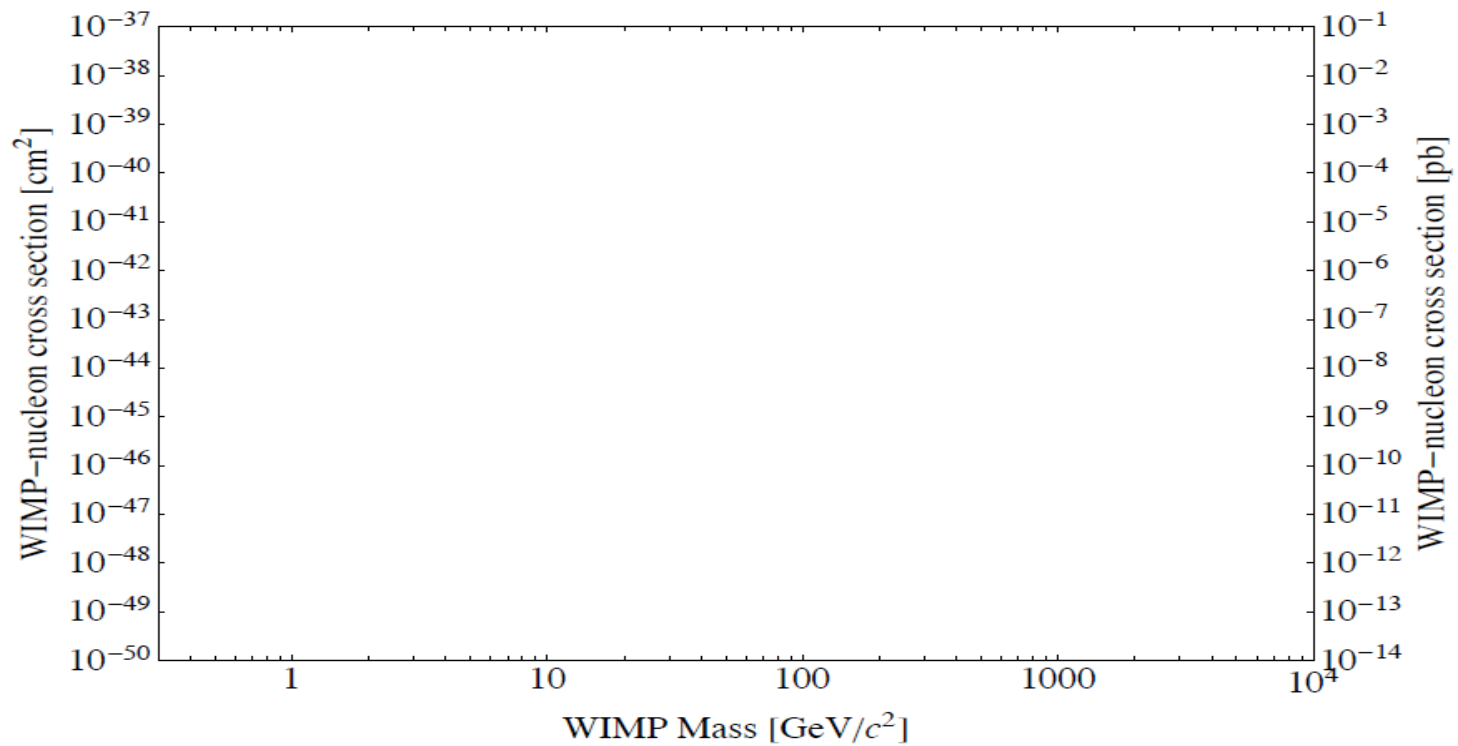




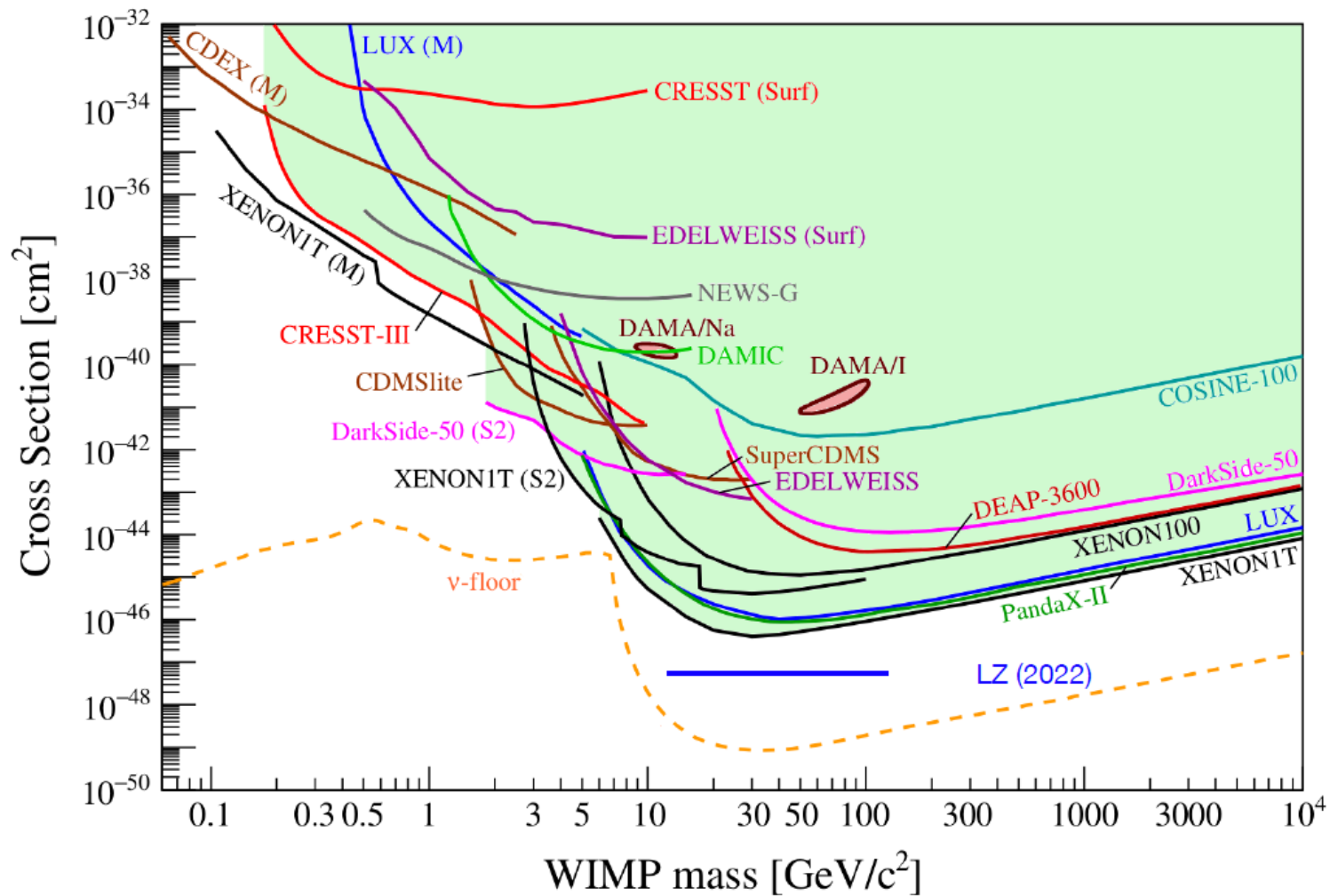
В последнее время  
увеличивающийся  
интерес к области малых  
масс, очень тяжелых  
WIMPs, других  
кандидатов ...

- Отсутствие SUSY на БАК;
- Новые теоретические модели;
- Отсутствие WIMP в ожидаемом регионе.

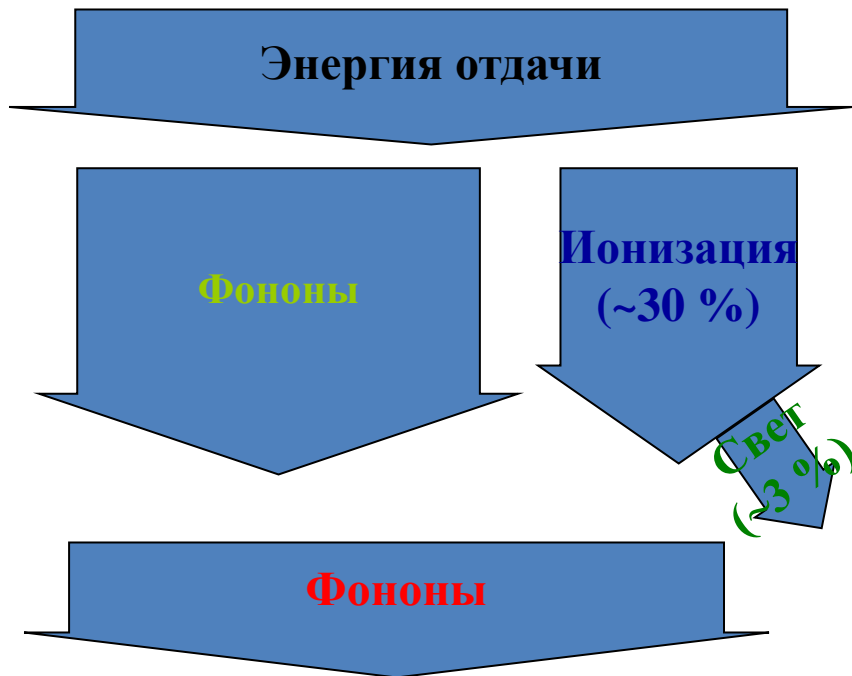




R. Hill 2016 Aspen Winter Conference

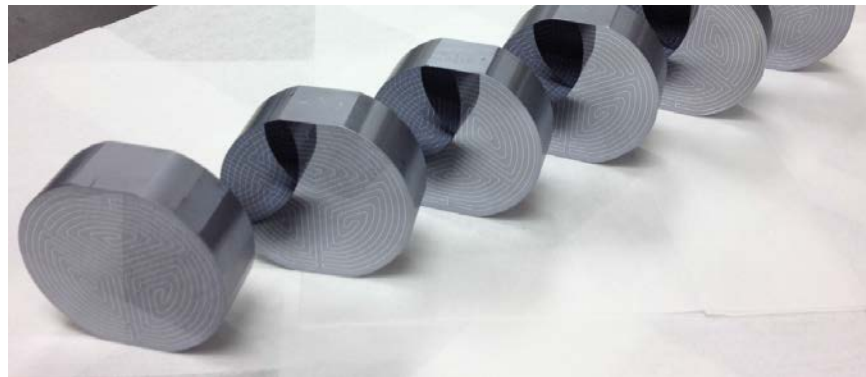


# Криогенные детекторы



**Фононы:** прецизионное измерение энергии

**Заряд / Свет:** выход зависит от частицы, т.е. можно убрать некоторые из фонов.



# EDELWEISS

1. Германиевые детекторы-болометры
2. Традиционные методы подавления фона:

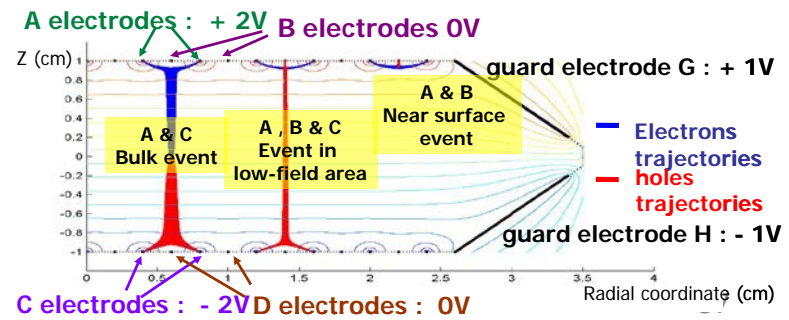
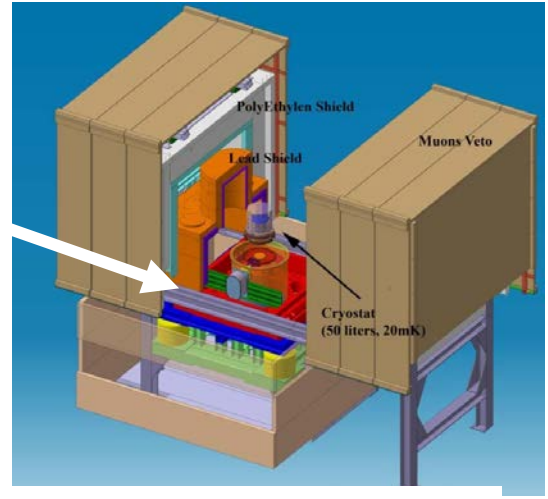
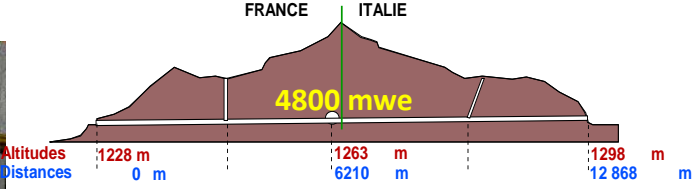
Подземная лаборатория LSM  
 Многослойная защита + активное veto  
 Отбор материалов  
 Непрерывный контроль уровня радона  
 Непрерывный мониторинг нейтронного потока

3. Специальные методы подавления фона
- 2 канала измерений: фоновый и ионизационный

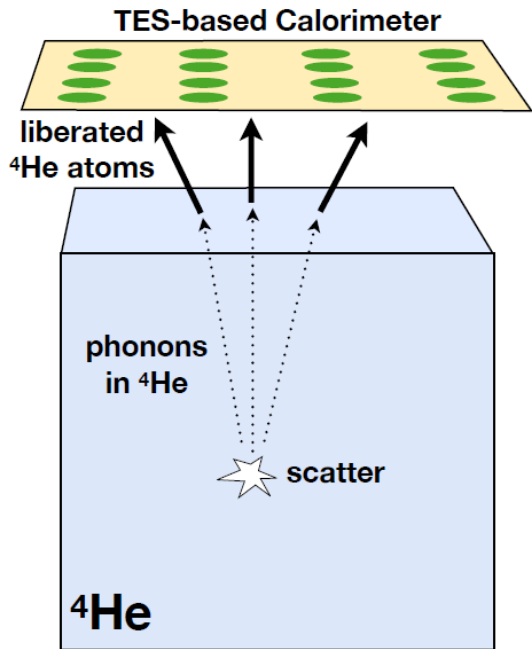
Отношение  $E_{ionization}/E_{recoil}$   
 =1 для электронов  
 ≈0.3 для ядер отдачи  
 ⇒ Возможность отобрать события – кандидаты WIMP  
 ⇒ Подавление  $\gamma$ -фона > 99.999%

Детекторы со специальной схемой электродов, позволяющей проводить активный отбор поверхностного фона (событий с неполным сбором заряда)

Эффект Неганова-Трофимова-Люка для исследования  $E \sim 0$  эВ



# Physics of a Superfluid $^4\text{He}$ Target



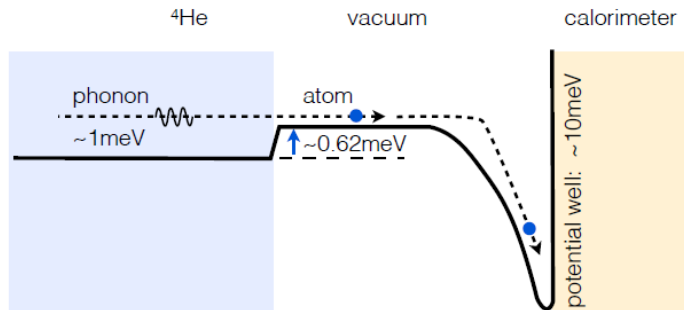
## Primary Signal Channel : 'Quantum Evaporation'

A single phonon can liberate a single atom into the vacuum

- typical phonon energy in  $^4\text{He}$ :  $\sim 1\text{meV}$
- binding energy of  $^4\text{He}$  to the  $^4\text{He}$  liquid surface:  $\sim 0.62\text{meV}$

Signal: the *adsorption* of atoms onto a calorimeter

- binding energy of  $^4\text{He}$  to a typical calorimeter surface:  $\sim 10\text{meV}$

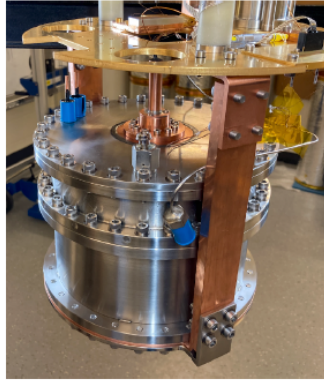
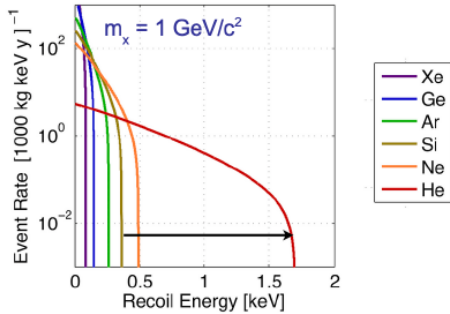
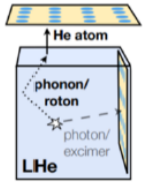




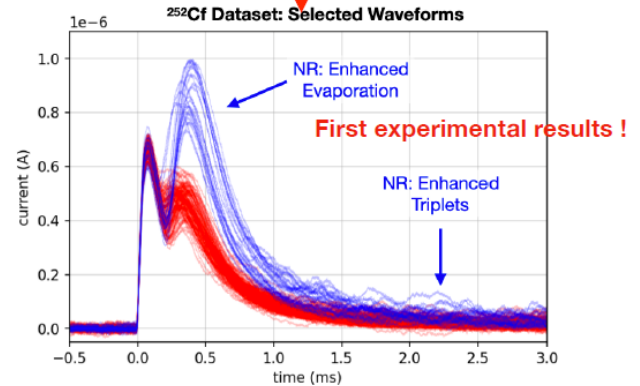
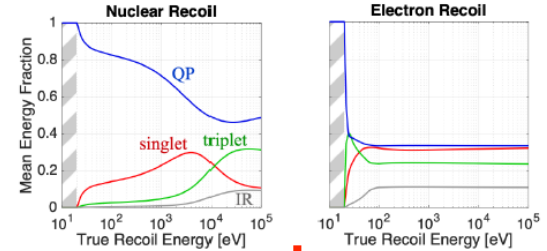
TESSERACT

# TESSERACT@LSM: HeRALD

## Helium Roton Apparatus for Light Dark matter



R. Anthony-Petersen et al., arXiv:2307.11877

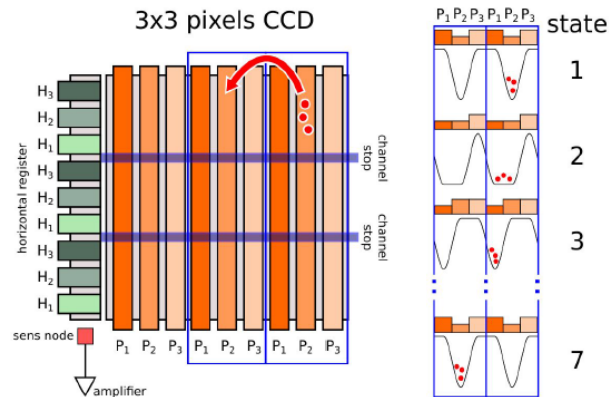
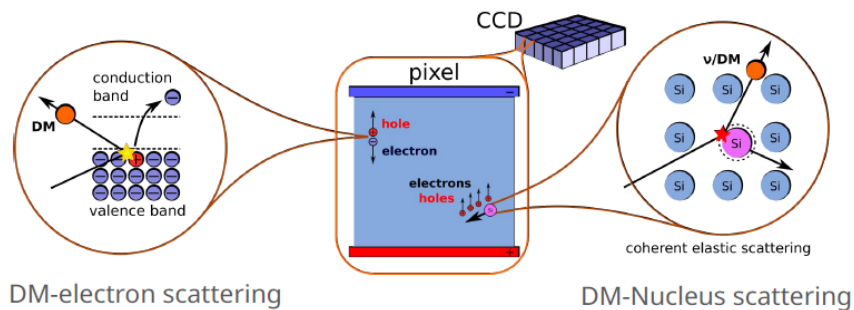


- Well kinetically matched to GeV-scale DM
- Easy to purify, intrinsically radio pure
- Monolithic and scalable
- LHe cell operated at 20-50 mK with wafer-like cryogenic detectors with TES suspended in vacuum
  - UV/IR photons and **He atoms** from qp induced evaporation
- **First evidence of ER/NR discrimination @10 keV**
- **Already achieved ~170 eV threshold on He recoils (300 MeV DM)**



# The SENSEI<sup>†</sup> Experiment: sub-GeV dark matter searches with skipper-CCD

A. M. Botti\* for the SENSEI<sup>†</sup> collaboration  
18th International Conference on Topics in Astroparticle  
and Underground Physics, Vienna  
August 31, 2023







**2017**  
Demonstrate sub-electron resolution

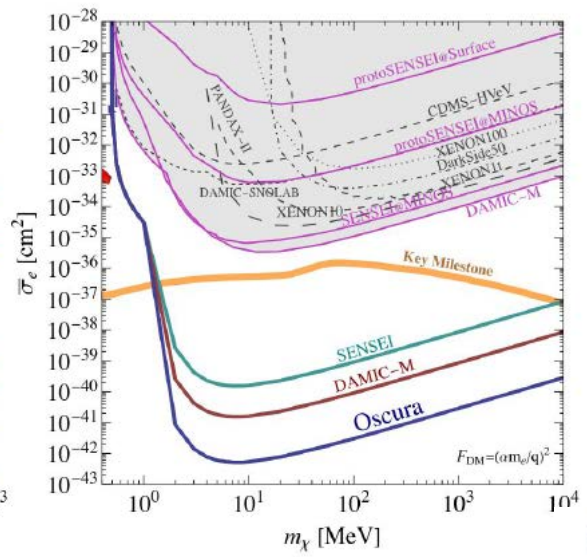
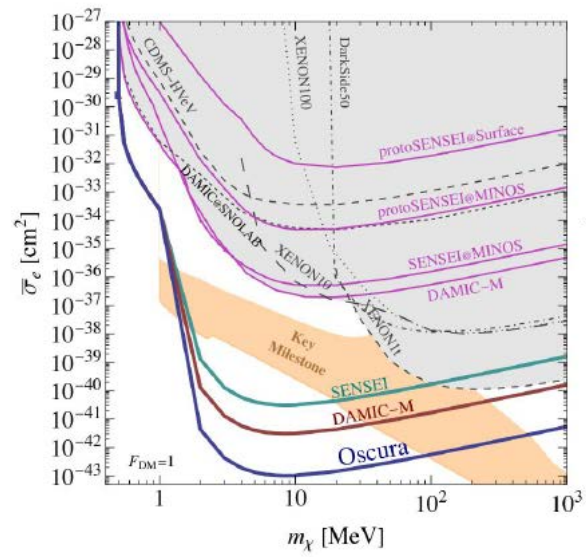
**2018**  
DM search with **proto-SENSEI** (0.1 g) at **surface**

**2019**  
DM search with **proto-SENSEI** at **MINOS** (230 m.w.e.)

**2020**  
DM search with **science grade** (~2 g) at **MINOS**

**Ongoing**

**Production** (100g) + commissioning at **SNOLAB** (6000 m.w.e.)



arXiv: 2304.04401

## Как достоверно зарегистрировать частицы темной материи?

- 1) Характеристические свойства зарегистрированных событий;
- 2) Равномерное распределение событий в детекторах;
- 3) Характеристический энергетический спектр, который зависит от массы ядра и спина
- 4) Модуляции сигнала (спектр и интенсивность), связанные с движением Земли вокруг Солнца
- 5) Одинаковые параметры из разных независимых экспериментов
- 6) Подтверждение результатов на ускорителях и в непрямом поиске

## **Заключение и выводы:**

- Открытие и изучение темной материи одна из наиважнейших задач современной науки;
- Многообразие методов исследования, которые должны дать единый результат;
- Основные экспериментальные трудности – модели, фоны, необходимость больших и уникальных детекторов;
- Новые идеи необходимы для детектирования частиц темной материи.