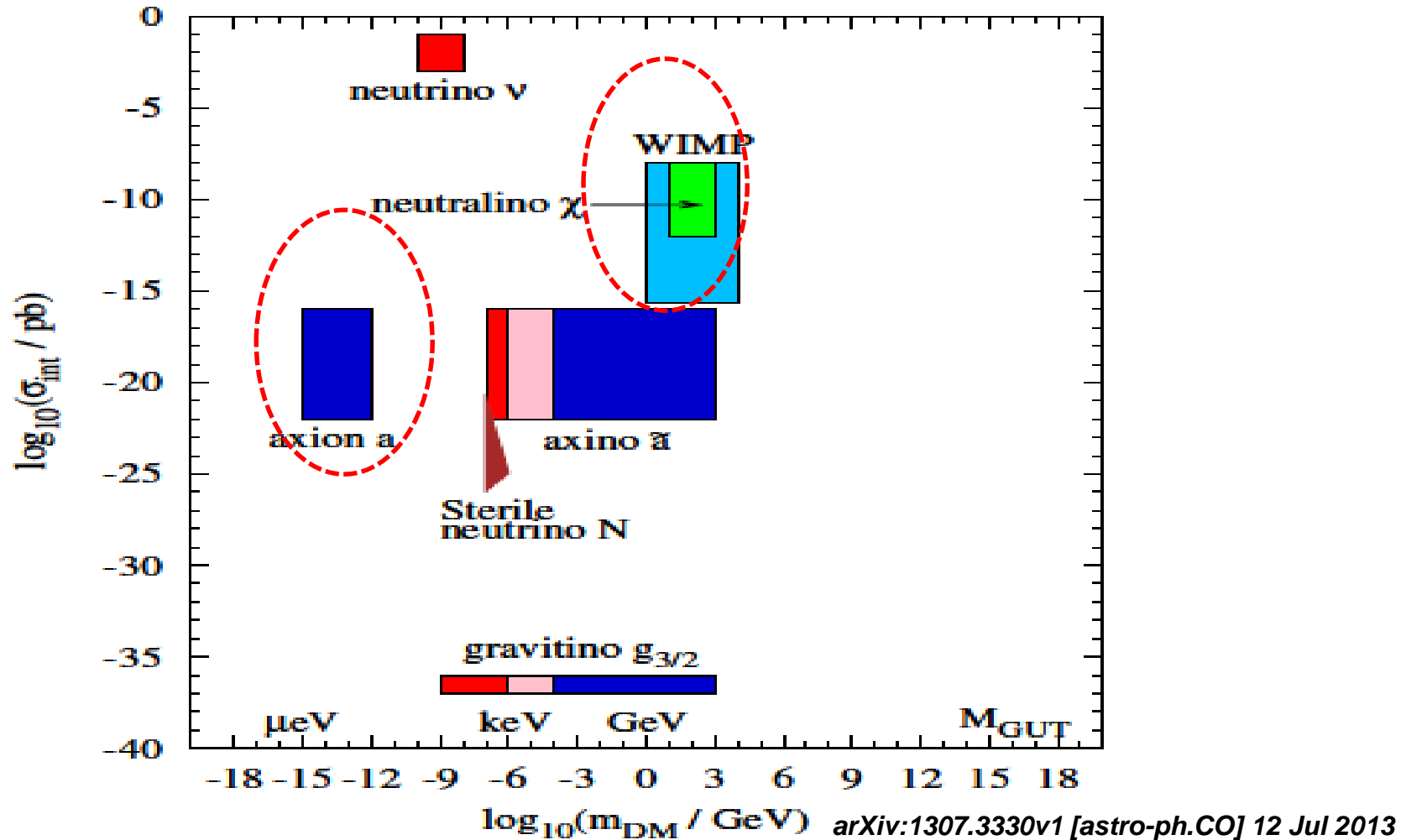


Низкофоновые детекторы на жидком аргоне для прямой регистрации частиц темной материи

А. С. Чепурнов
(НИИЯФ МГУ)

Заседание научного семинара ОЭПВАЯ 18 апреля 2024

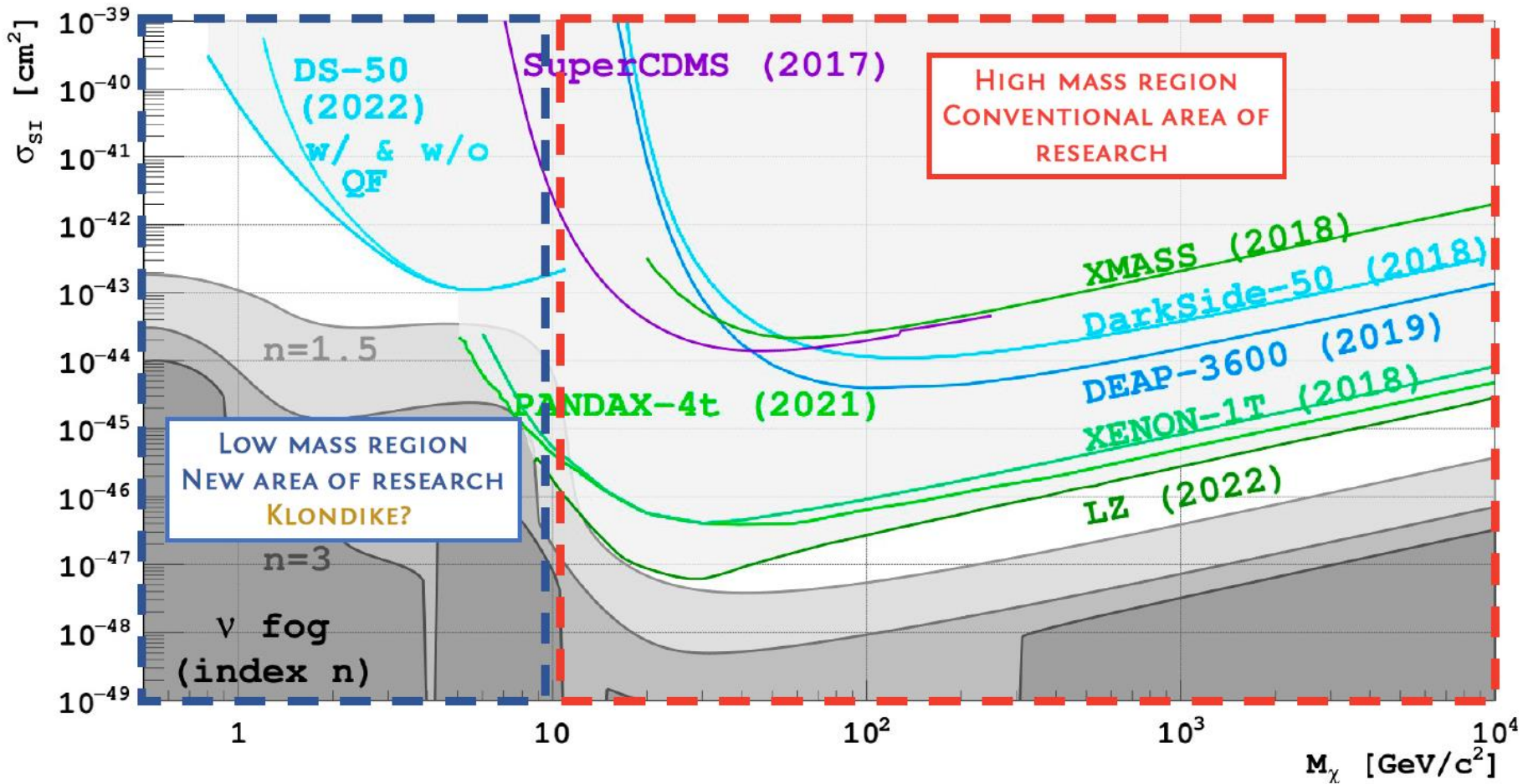
Кандидаты в частицы Темной материи



Одним из кандидатов на роль WIMP является, частица с массой порядка 10-100 ГэВ/c² (LowMass 1-10 МэВ/c²)

Вторым кандидатом, допускающим прямое детектирование считается аксион.

TWO SEARCH DIRECTIONS



Взаимодополняющие методы исследования природы темной материи

Экспериментальная космология

Поиски следов аннигиляции



- Positron (e^+): PAMELA, Fermi-LAT, AMS...
- Photon (γ): Fermi-LAT, HESS...
- Antiproton: BESS, AMS, PAMELA, GAPS
- Antideuteron: GAPS, AMS
- Neutrino (ν): IceCube, AMANDA...

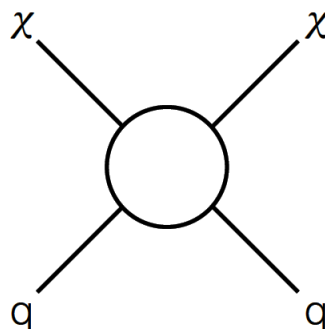


Конверсия аксионов в фотоны в магнитном поле



PLANK, W.M.Keck observatory

Косвенные



Прямые

Рождение

Рождение в ускорительных экспериментах



Дефицит энергии и момента связанные с рождением ТМ



Рассеяние WIMP на частицах барионной материи – основной метод прямой регистрации частиц ТМ

**LIMITS ON COLD DARK MATTER CANDIDATES
FROM AN ULTRALOW BACKGROUND GERMANIUM SPECTROMETER**

S.P. AHLEN ^a, F.T. AVIGNONE III ^b, R.L. BRODZINSKI ^c, A.K. DRUKIER ^{d,e}, G. GELMINI ^{f,g,1}
and D.N. SPERGEL ^{d,h}

^a *Department of Physics, Boston University, Boston, MA 02215, USA*

^b *Department of Physics, University of South Carolina, Columbia, SC 29208, USA*

^c *Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA 99352, USA*

^d *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA 02138, USA*

^e *Applied Research Corp., 8201 Corporate Dr., Landover MD 20785, USA*

^f *Department of Physics, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA*

^g *The Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA*

^h *Institute for Advanced Study, Princeton, NJ 08540, USA*

Received 5 May 1987

**> 30 лет назад был
предложен
экспериментальный
метод по прямому
детектированию
частиц ТМ.**

Какой результат ??

Первый эксперимент по прямому детектированию - 1986 г. в шахте Homestake (двойной бета распад). Быстро стало понятно, что уровень фона является сильным ограничивающим фактором а себестоимость материала для мишени ограничивает увеличение чувствительного объема. В это же время было предложено использовать эффект годовой модуляции.

Detecting cold dark-matter candidates

Andrzej K. Drukier

*Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, 8046 Garching, West Germany
and Department of Astronomy, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics,
60 Garden Street, Cambridge, Massachusetts 02138*

Katherine Freese and David N. Spergel

*Department of Astronomy, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street,
Cambridge, Massachusetts 02138*

(Received 2 August 1985)

Двухфазные детекторы на жидких благородных газах используемые для поиска темной материи были предложены физиками СССР из МИФИ

Письма в ЖЭТФ, том 11, стр. 513 - 516

5 июня 1970 г.

НОВЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ СЛЕДОВ ИОНИЗУЮЩИХ ЧАСТИЦ В КОНДЕНСИРОВАННОМ ВЕЩЕСТВЕ ¹⁾

Б.А.Долгошеин, В.Н.Лебедеенко, Б.У.Родионов

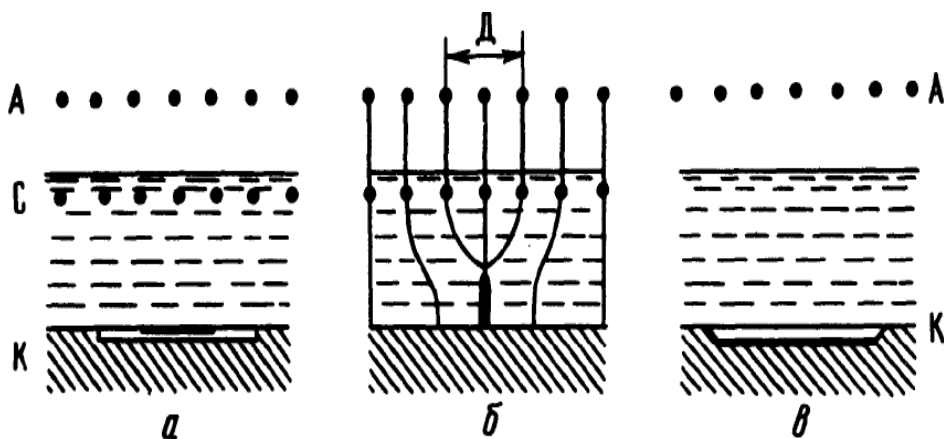
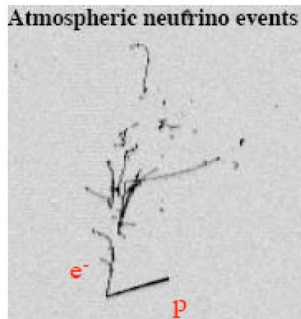


Рис. 1. Схемы опытов: а) – трехэлектродная камера с α-источником: А – анод, С – сетка, К – катод. Расстояние АС – 1 см, СК – 2 см, слой жидкости над сеткой около 0,1 см; б) – то-же, но на катоде укреплен инжектор. Показаны силовые линии электрического поля, определяющие диаметр области эмиссии электронов с поверхности жидкости; в) – двухэлектродная система с α-источником на катоде. АК – 1 см, слой жидкости 0,4 см

Преимущества жидких благородных газов в качестве мишени для низкофоновых детекторов

- высокий световыход (в УФ)
- низкая концентрация U/Th
- возможность e/N дискриминации при измерении ионизационного и сцинтилляционного сигналов
- доступны в больших объемах, прозрачность и время жизни электронов позволяют построить детектор массой десятки тонн
- пространственное восстановление позволяет выделить «виртуальный чувствительный объем»



EP Internal Report 77-8
16 May 1977

Review on TPC's Vincent Lepeltier 2007 *J. Phys.:*
Conf. Ser. 65 012001

THE LIQUID-ARGON TIME PROJECTION CHAMBER:
A NEW CONCEPT FOR NEUTRINO DETECTORS

C. Rubbia

ABSTRACT

It appears possible to realize a Liquid-Argon Time Projection Chamber (LAPC) which gives an ultimate volume sensitivity of 1 mm^3 and a drift length as long as 30 cm. Purity of the argon is the main technological problem. Preliminary investigations seem to indicate that this would be feasible with simple techniques. In this case a multi-hundred-ton neutrino detector with good vertex detection capabilities could be realized.

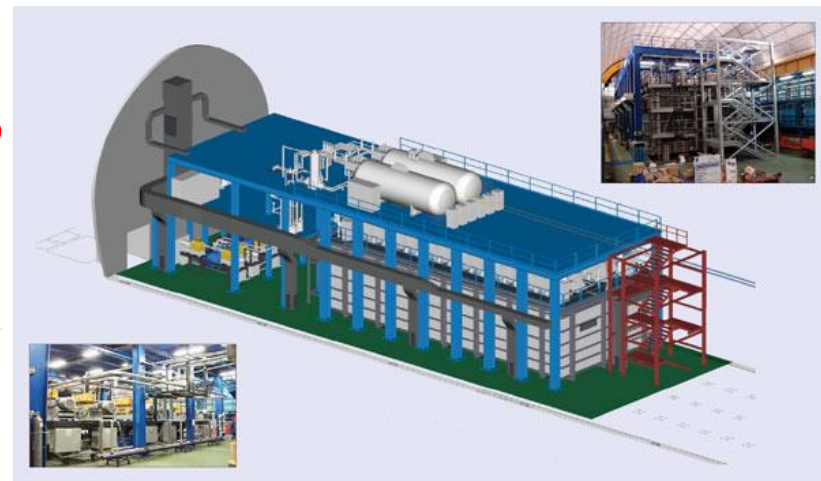


Fig. 2. Centre: Schematic view of the whole ICARUS T600 plant in Hall-B at the Gran Sasso National Laboratory. Top-right: photo of the actual detector installation. Bottom-right: details of the cryo-coolers plant. (CERN COURIER 19 July 2011)

ICARUS (Imaging Cosmic And Rare Underground Signals) is a [physics](#) experiment aimed at studying [neutrinos](#). It was located at the [Laboratori Nazionali del Gran Sasso](#) (LNGS) where it started operations in 2010. After completion of its operations there, it was refurbished at [CERN](#) for re-use at [Fermilab](#), in the same neutrino beam as the [MiniBooNE](#), [MicroBooNE](#) and [Short Baseline Near Detector](#) (SBND) experiments.^[1] The ICARUS detector was then taken apart for transport and reassembled at Fermilab, where data collection is expected to begin in fall 2021.

The ICARUS program was initiated by [Carlo Rubbia](#) in 1977, who proposed a new type of [neutrino detector](#).^[2] These are called Liquid Argon Time Projection Chambers (LAr-TPC), which should combine the advantages of [bubble chambers](#) and [electronic detectors](#), evolving previous detectors.^[3]

Эксперименты по прямой регистрации WIMP в LAr требуют применения целого ряда специальных технологий

- ТРС – сложные электрофизические криогенные детекторы
- Криогенные системы ожижения, хранения
- Системы очистки жидкостей (LXe/Ar, H₂O, ЖОС,) и газов (N₂, Xe, Ar)
- Высокоэффективная электроника для систем сбора данных, ВВ питания и т.п.
- Системы для калибровки детекторов во время их работы
- Ультра низкофоновые детекторы фотонов (SiPM)
- Сверхчистые конструкционные материалы (для ТРС и криостатов)

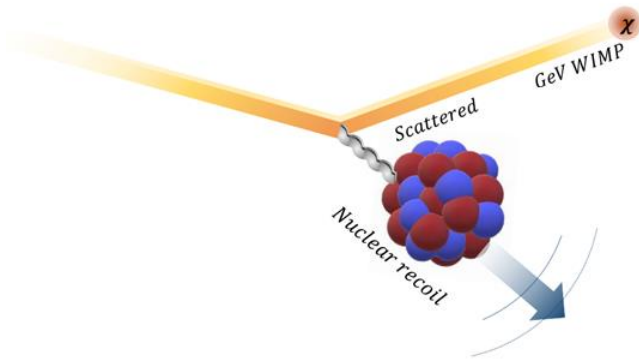
Подземные лаборатории – глубже, больше, чище и удобнее

- Системы измерения и очистки от Rn
- Системы измерения р/а загрязнений уровня ppt

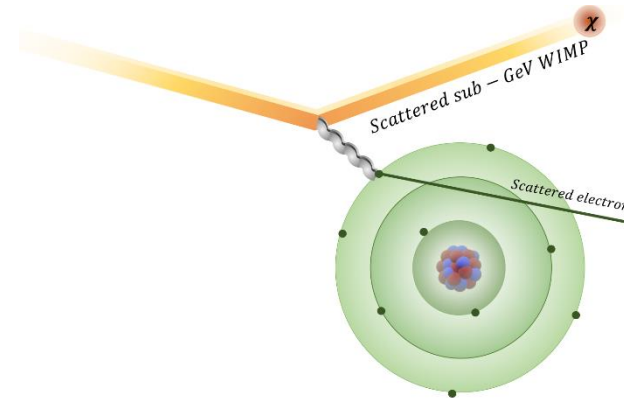
TPC: Processes overview

Elastic scattering

Nuclear Recoil (NR)



Electron Recoil (ER)



DM high-mass range: $\sim 5 \text{ GeV}/c^2$ to $10 \text{ TeV}/c^2$

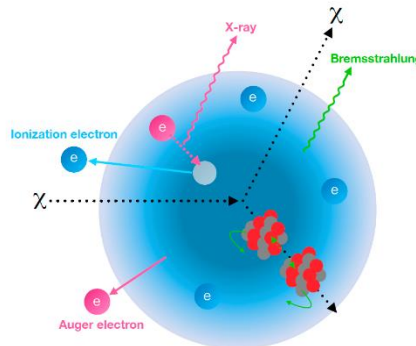
DM low-mass range: $\sim 30 \text{ MeV}/c^2$ to $\sim 5 \text{ GeV}/c^2$

Inelastic scattering

DM-nucleus interactions produce polarized atoms. Then a few phenomena may occur

Migdal

keV-range
electron emission
and X-ray
photon emission



Bremsstrahlung

keV-range
X-ray
photon emission

Problems:
weak effect, low
sensitivity

DM low-mass range: $\sim 30 \text{ MeV}/c^2$ to $\sim 5 \text{ GeV}/c^2$

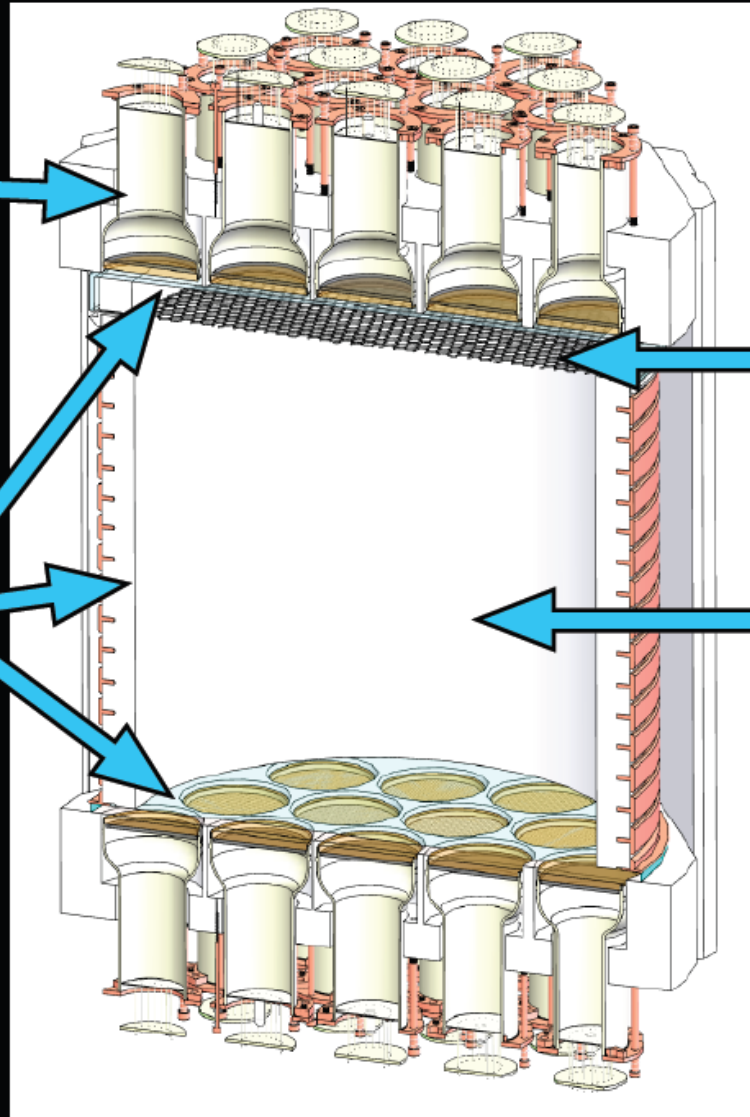
Двухфазная TPC на LAr

Детекторы фотонов
(ФЭУ и SiPM)

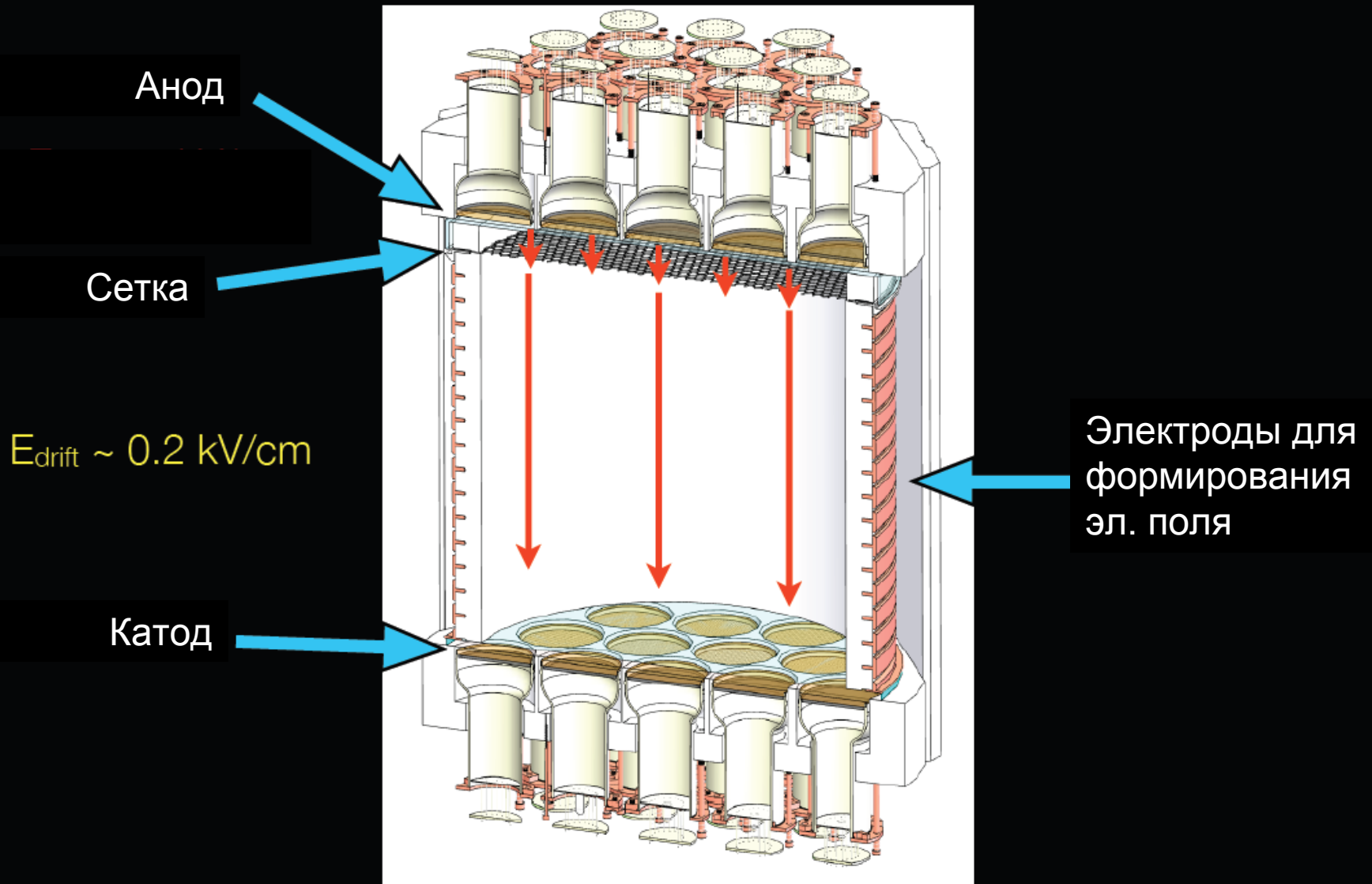
Отражатель и
«переизлучатель»

Газовая фаза

Жидкий аргон
LAr

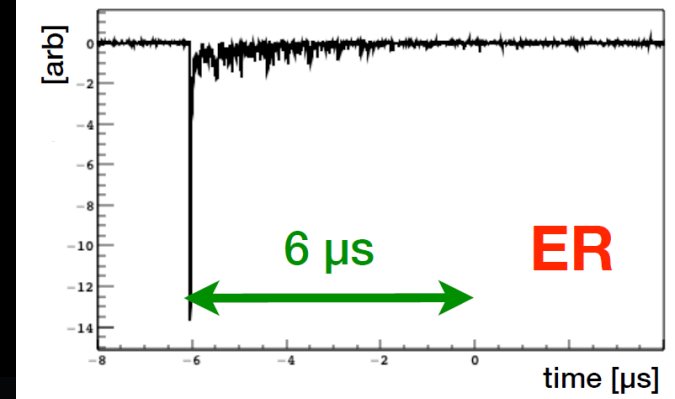
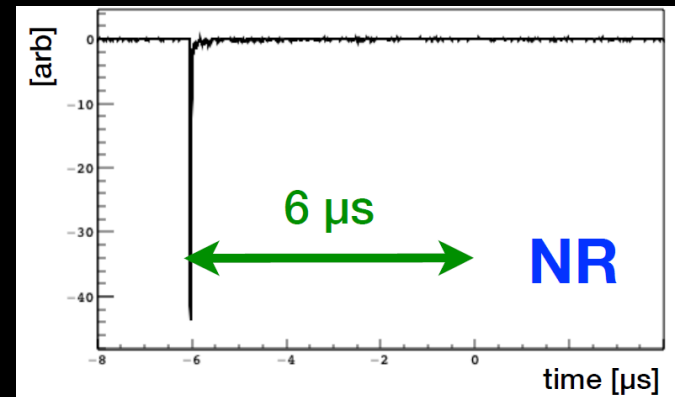
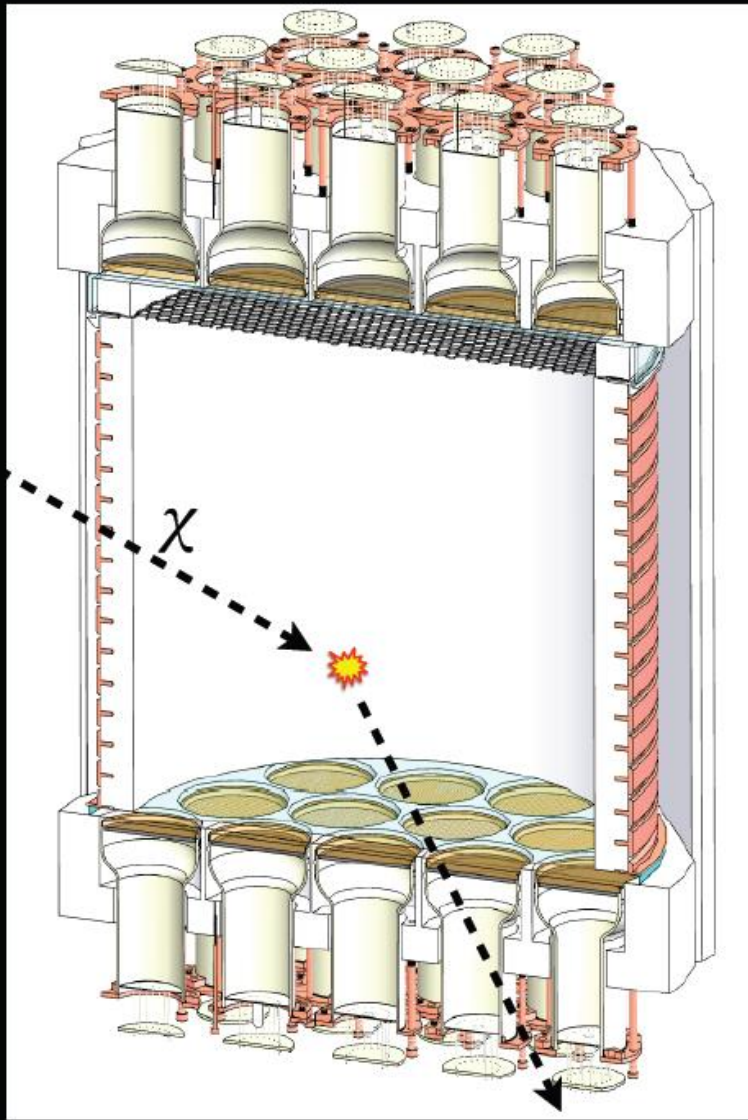


Двухфазная ТРС на LAr



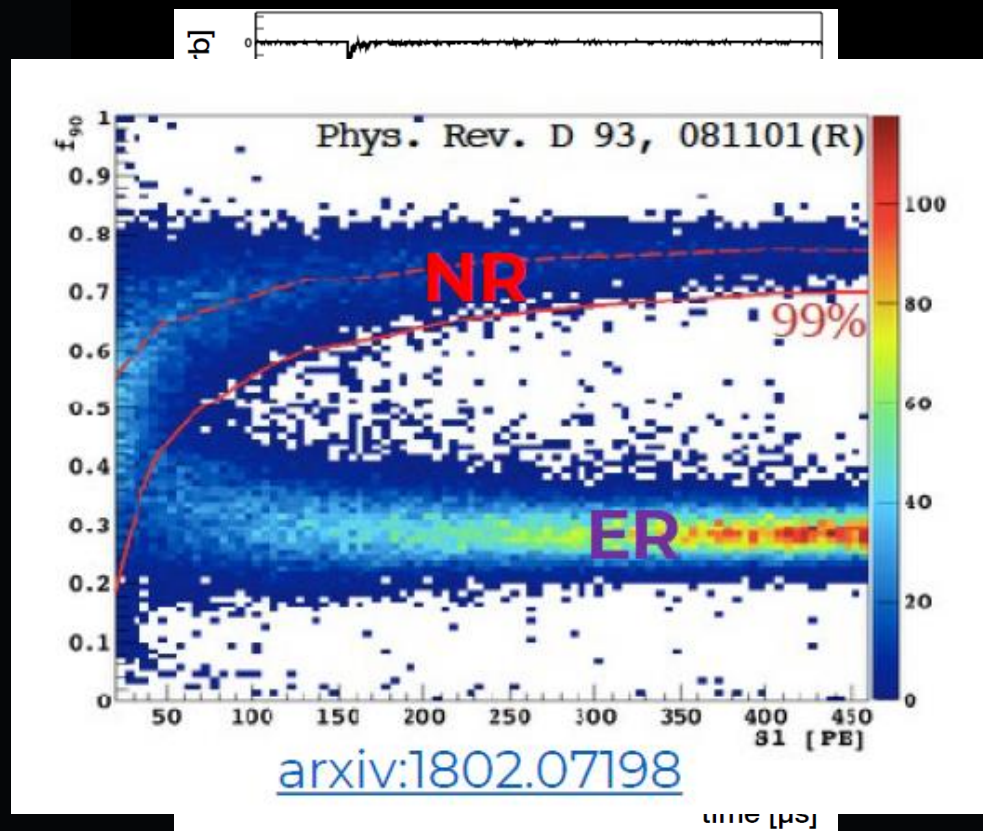
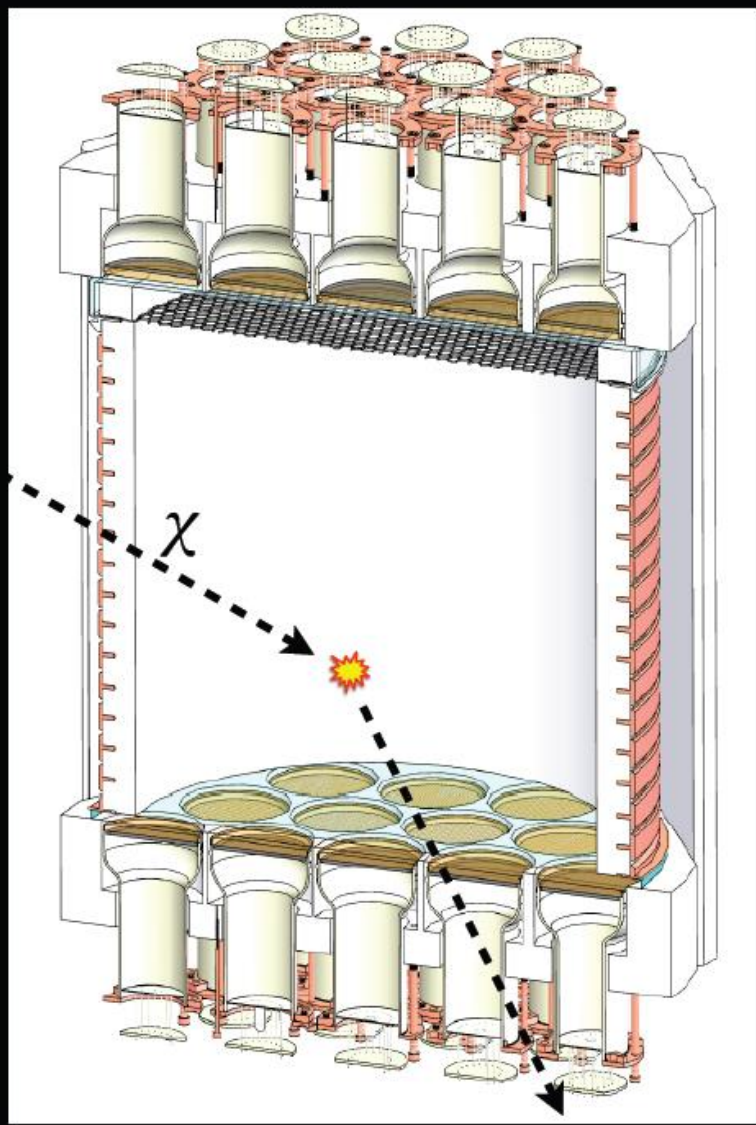
Двухфазная ТРС на LAr

Энергия отдачи возбуждает и ионизирует мишень с образованием фотонов (175 nm LXe, 128 nm LAr) сцинтилляции (**S1**), которые регистрируются ФЭУ



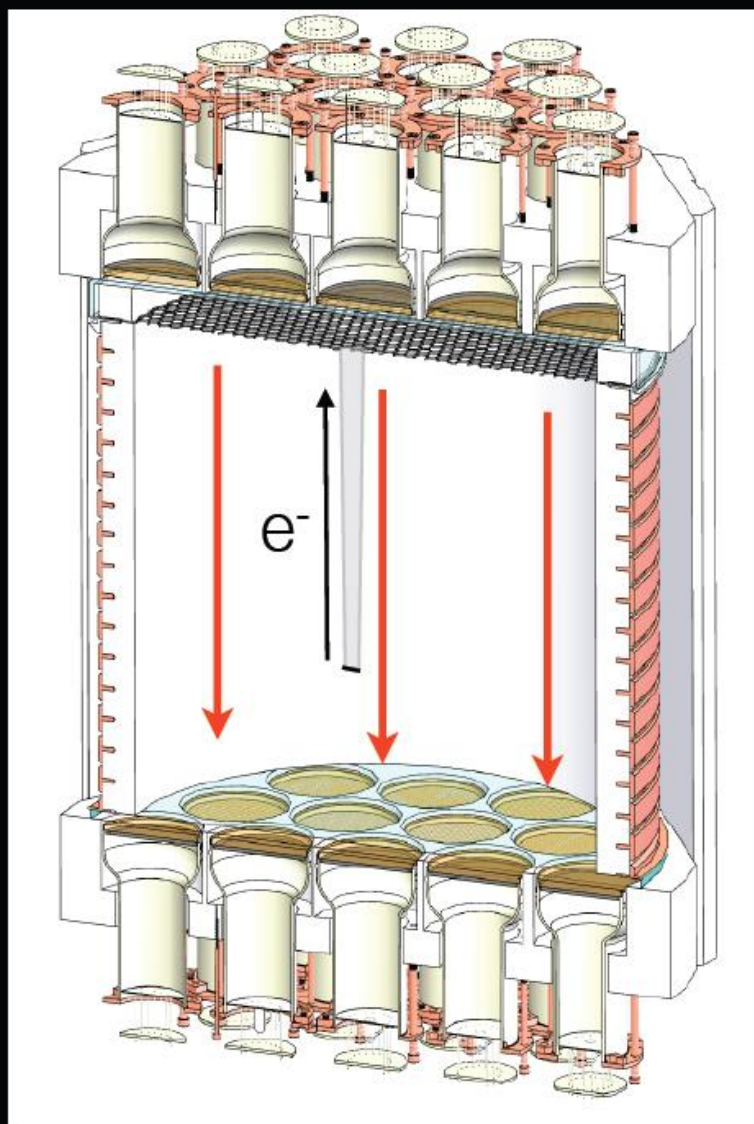
Двухфазная ТРС на LAr

Энергия отдачи возбуждает и ионизирует мишень с образованием фотонов (175 nm LXe, 128 nm LAr) сцинтилляции (**S1**), которые регистрируются ФЭУ



left axis

Двухфазная TPC на LAr



Свободные электроны отдачи, которые пережили рекомбинацию дрейфуют в жидкости к границе жидкость-газ под действием электрического поля

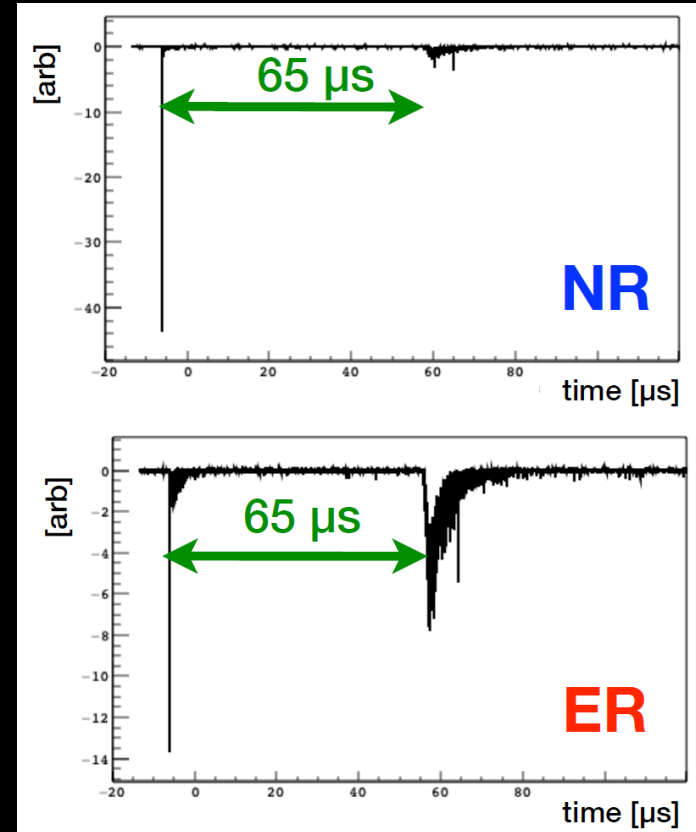
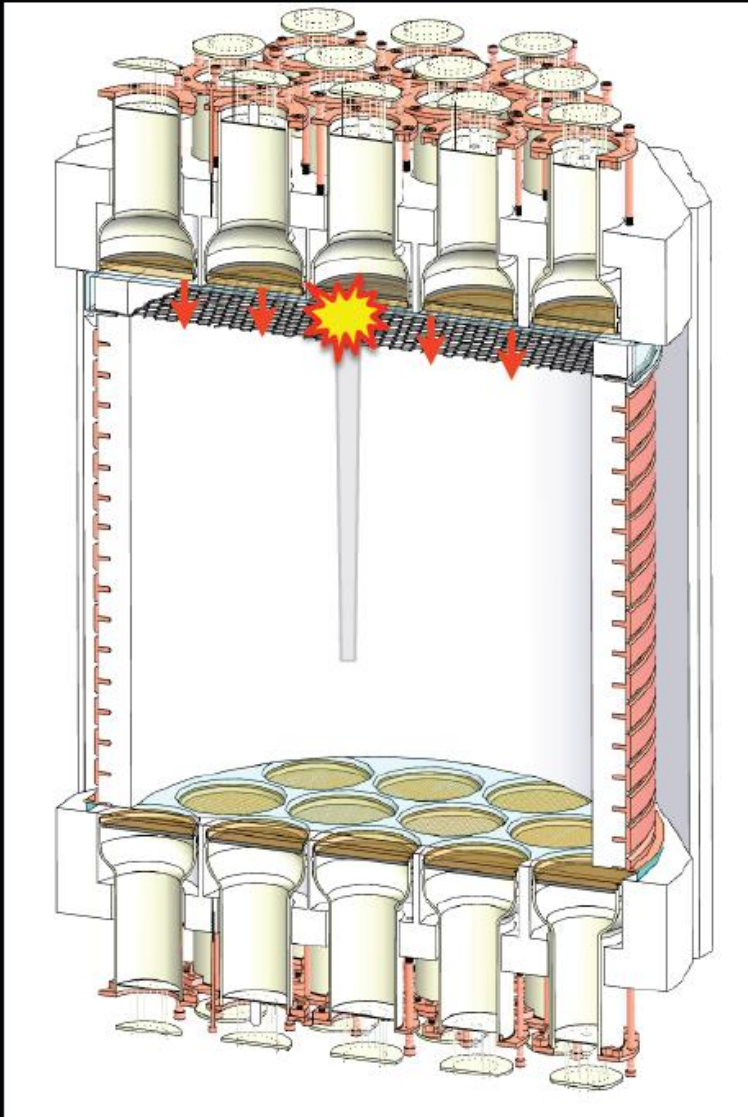
Время жизни электронов $> 5\text{ мс}$

при макс. времени дрейфа $\sim 375\text{ мкс}$ и

скорости дрейфа $\sim 0.9\text{ мм/мкс}$

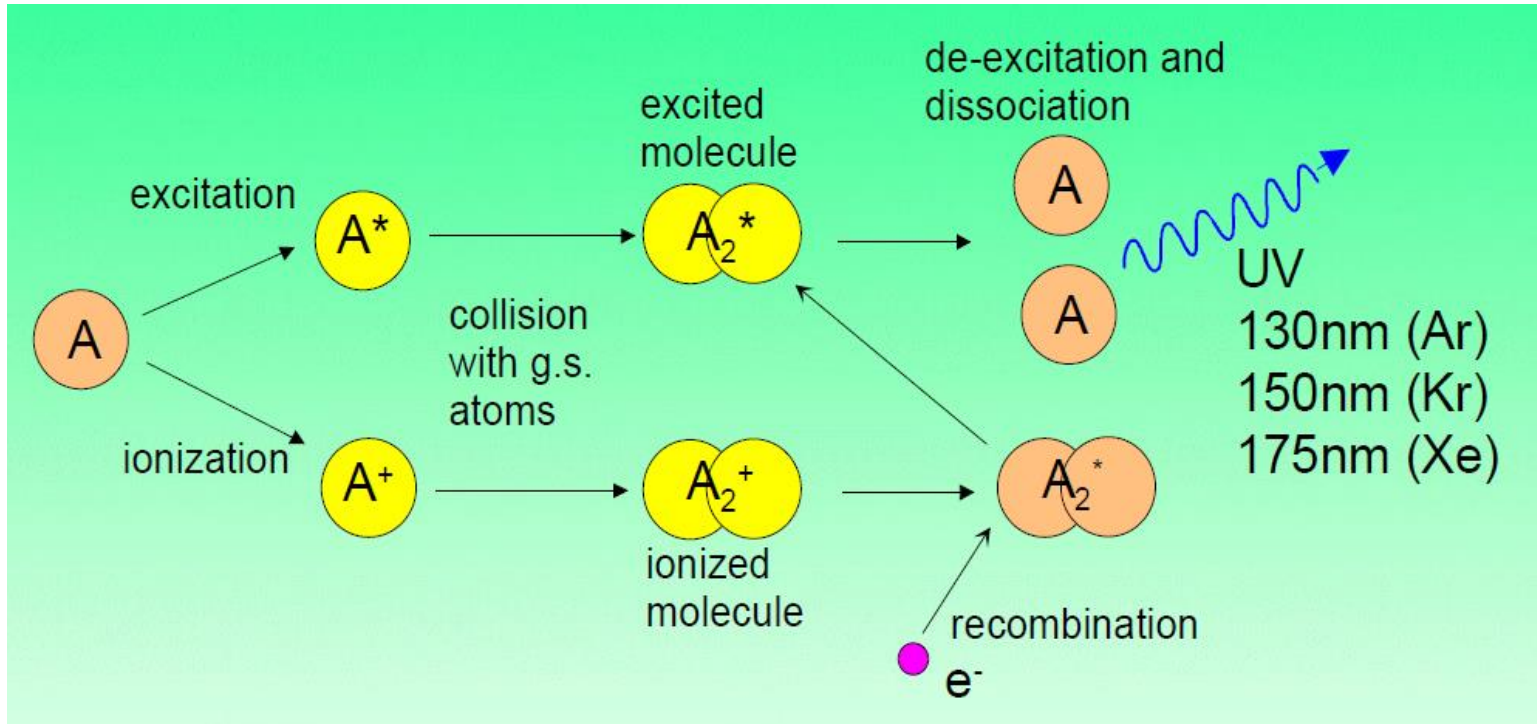
Двухфазная ТРС на LAr

Электроны инжектируются в газовую фазу и вызывают электролюминисценцию (**S2**)



Время между S1 и S2 дает координату по высоте

Сцинтилляция/электролюминисценция в LAr



1. При возбуждении атомов среды формируются возбужденные димеры (эксимеры)

Эксимеры могут образоваться в синглетном или в триплетном состоянии

Распад состояний происходит через излучение фотонов с энергией меньшей, чем энергия возбуждения мономеров, т.е. среда прозрачна для собственной сцинтилляции

синглетное состояние (6 ns Ar)

триплетное состояние (1.6 μ s Ar)

Световой выход очень хороший - 40,000 photons/MeV для Ar

2. Необходимо смещение спектра в видимую область \rightarrow Тетра-фенил-бутадиен (TPB)

3. Возможно смещение спектра за счет подбора смеси сжиженных газов

ELECTROLUMINESCENCE OF THE NOBLE GASES

Yu. A. BUTIKOV, B. A. DOLGOSHEIN, V. N. LEBEDENKO, A. M. ROGOZHIN, and B. U. RODIONOV

Moscow Engineering-Physics Institute

Submitted January 23, 1969

Zh. Eksp. Teor. Fiz. 57, 42-49 (July, 1969)

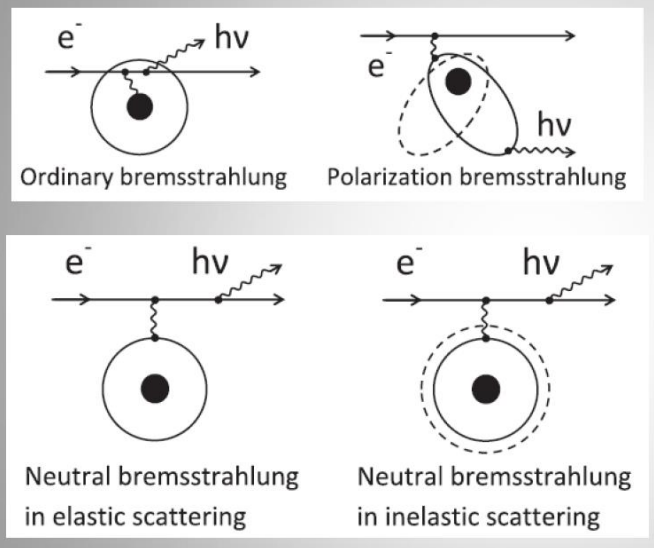
A study has been made of the characteristics of the luminescence initiated by ionizing radiation in gaseous xenon located in an electric field. The mechanism, and also some possibilities for application of noble-gas electroluminescence, are discussed.

J. Phys. D: Appl. Phys. 19 (1986) 527-545. Printed in Great Britain

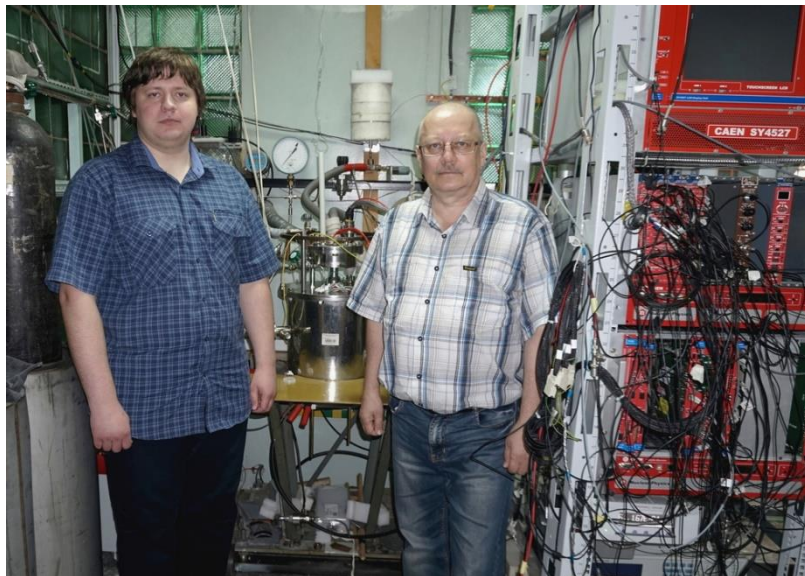
A unidimensional Monte Carlo simulation of electron drift velocities and electroluminescence in argon, krypton and xenon

Teresa H V T Dias†, A D Stauffer‡ and C A N Conde†
† Departamento de Fisica, Universidade de Coimbra, 3000 Coimbra, Portugal
‡ Department of Physics, York University, Toronto, Ontario, Canada

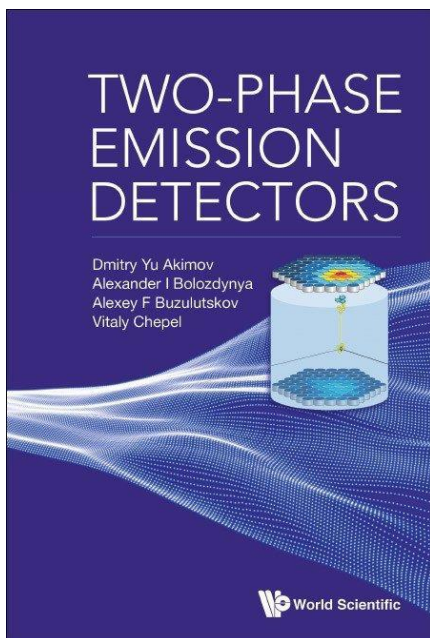
The agreement of our results with previous experimental work... mechanisms based on the direct excitation of the noble gas atoms by the primary ionization... account for the secondary light production. There is no need to consider... like collisions with ground state dimers or neutral bremsstrahlung...



А.Ф. Бузулуцков // Budker Institute of Nuclear Physics (Budker INP), Novosibirsk, Russia
Новосибирск State University (NSU), Novosibirsk, Russia
Тормозное излучение на нейтральных атомах и его применение для регистрации частиц
Neutral bremsstrahlung and its application for particle detection // Экспериментальный семинар ИЯФ 01/04/2022



<https://www.inp.nsk.su/press/novosti/25229-obnaruzhenie-neobychnoe-yavlenie-v-ramkakh-mezhdunarodnogo-eksperimenta-po-poisku-temnoj-materii>



Eur. Phys. J. C (2021) 81:1128
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09913-z>

THE EUROPEAN
 PHYSICAL JOURNAL C



Regular Article - Experimental Physics

Neutral bremsstrahlung and excimer electroluminescence in noble gases and its relevance to two-phase dark matter detectors

E. Borisova^{1,2}, A. Buzulutskov^{1,2,a}

¹ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Lavrentiev Avenue 11, 630090 Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Pirogov Street 2, 630090 Novosibirsk, Russia

Received: 13 July 2021 / Accepted: 6 December 2021

© The Author(s) 2021

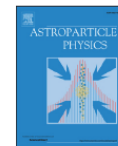
Astroparticle Physics 103 (2018) 29–40



Contents lists available at ScienceDirect

Astroparticle Physics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/astropartphys



Revealing neutral bremsstrahlung in two-phase argon electroluminescence

A. Buzulutskov^{a,b,*}, E. Shemyakina^{a,b}, A. Bondar^{a,b}, A. Dolgov^b, E. Frolov^{a,b}, V. Nosov^{a,b}, V. Oleynikov^{a,b}, L. Shekhtman^{a,b}, A. Sokolov^{a,b}

^a Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Lavrentiev avenue 11 630090 Novosibirsk, Russia

^b Novosibirsk State University, Pirogov street 2, Novosibirsk 630090, Russia



Три механизма электролюминесценции в благородных газах - excimer, atomic and NBrS: emission spectra

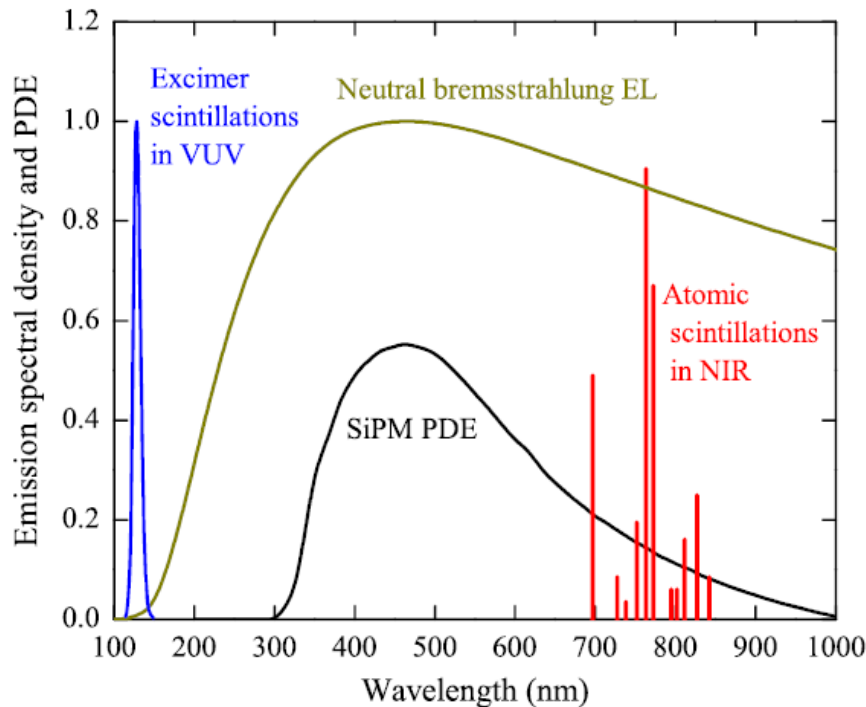


Fig. 4 Photon emission spectra in gaseous Ar due to excimer scintillations in the VUV measured in [15], NBrS EL at 8.3 Td theoretically calculated in [4] and atomic scintillations in the NIR measured in [16,17]. Also shown is the photon detection efficiency (PDE) of the typical SiPM [18]

1. Теоретически и экспериментально доказано существование нового механизма электролюминесценции (EL), а именно тормозного излучения электронов на нейтральных атомах (NBrS), в газовом Ar и Xe. Расчеты показывают, что NBrS EL с похожими свойствами существует во всех благородных газах.

2. Теоретически предсказано существование NBrS EL во всех жидких благородных газах. Экспериментальные работы по ее обнаружению ведутся – в жидком Ar с помощью THGEM.

3. Практическим применением NBrS эффекта являются двухфазные и однофазные детекторы на основе благородных газов с оптическим считыванием в видимом диапазоне для экспериментов по поиску темной материи и регистрации нейтрино.

The Global Argon Dark Matter Collaboration (GADMC) (Since 2017)

GADMC unified in a single Collaboration more than ≈ 100 institutions w/ ≈ 500 members interested in DM searches with argon to explore heavy (and light) dark matter to the neutrino floor and beyond by exploiting LAr knowledge from multiple experiments to maximize exposure and WIMP sensitivity

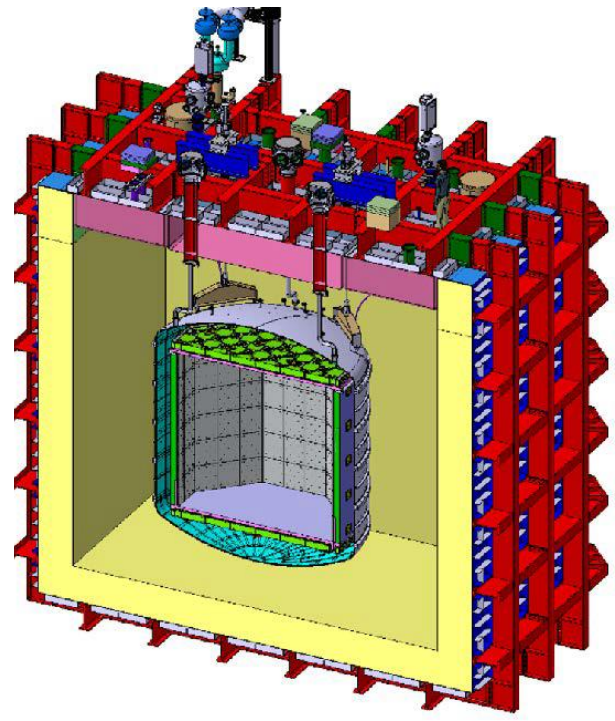
DarkSide-10
2010-2012



DarkSide-50
2013-present

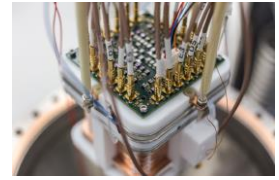


Russia : Budker INP, SINP MSU,
NRC Kurchatov Inst., MEPHI, JINR
Dubna, Belgorod Univ.

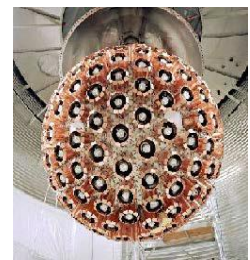


- DS-20k/ LNGS**
- Under construction
 - Start of operations in 2026
 - 20 t fiducial volume

- ARGO/ ???**
- Future LAr DM detector – 2030 and beyond
 - 300 t fiducial volume



ReD/ Naples Univ. Fed. II



DEAP-3600/ SNOLAB



MiniCLEAN/SNOLAB



ARDM/CANFRANC

Эксперимент DarkSide -> GADMC



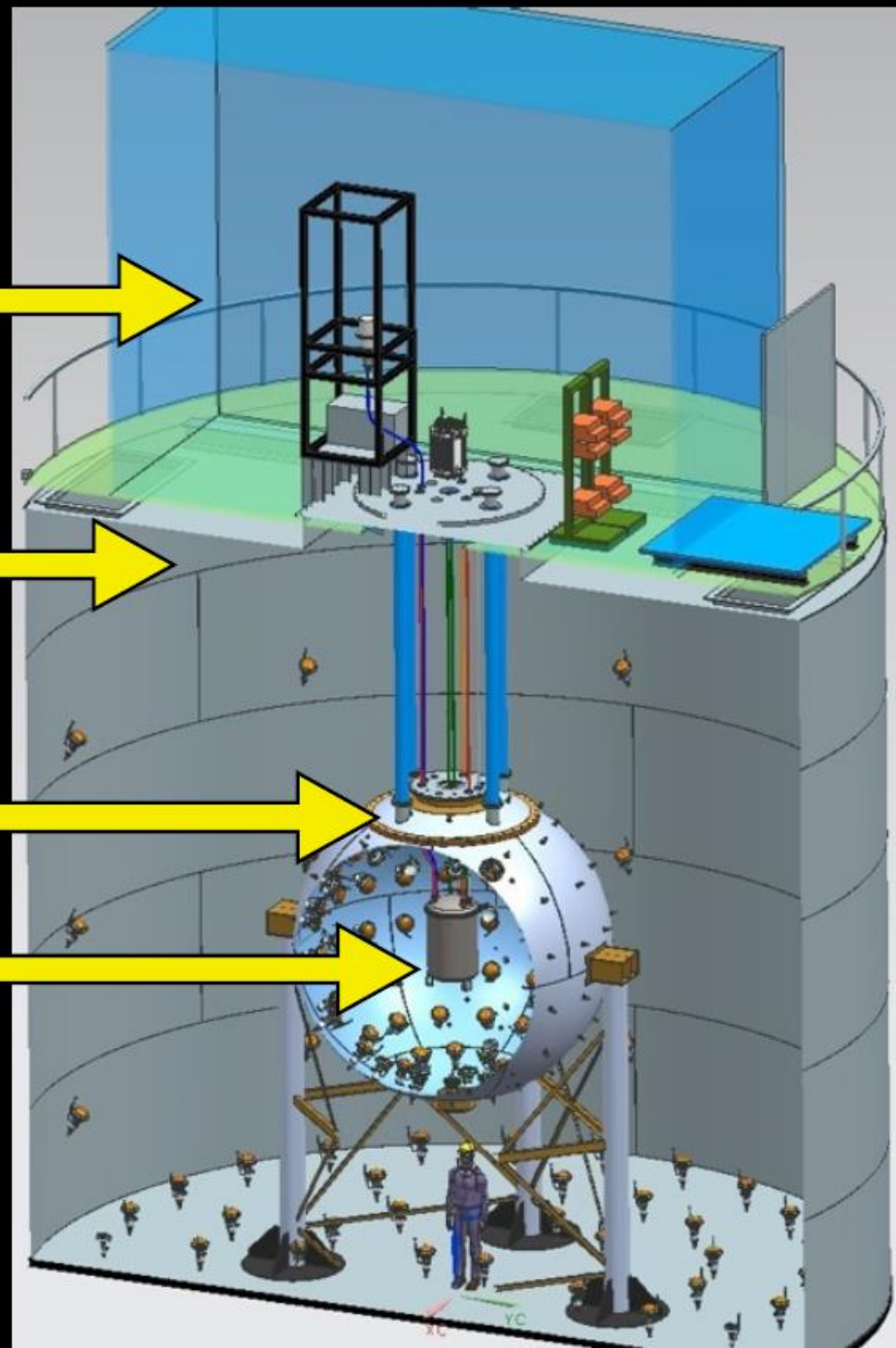
DarkSide 50

«Без Rn» чистая комната

Танк (СТФ BOREXINO) 10м x Ø11м
1000 т сверхчистой вода для
защиты от внешнего гамма-фона,
«черенковское» мюонное вето

4м Ø 30 т жидкого сцинтиллятора
PC+ TMB «нейтронное вето»

Внутренний детектор - TPC
153 кг обедненного по ^{39}Ar
«Подземного аргона»



DarkSide-50 Results

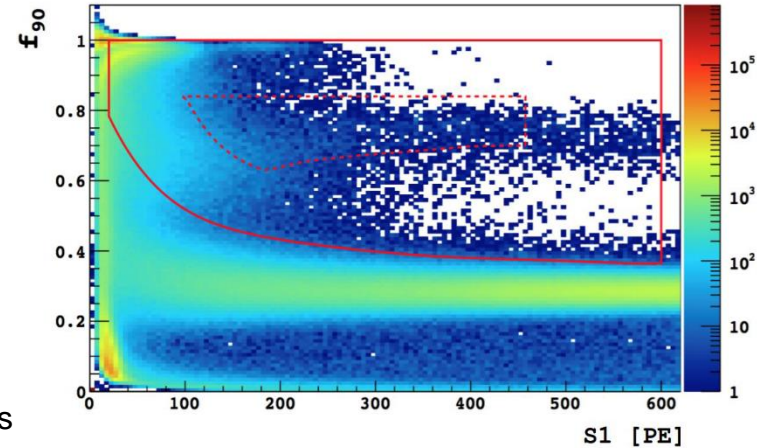
The DarkSide-50 is running with UAr since April 2015.

Over 15 published papers, more are coming.

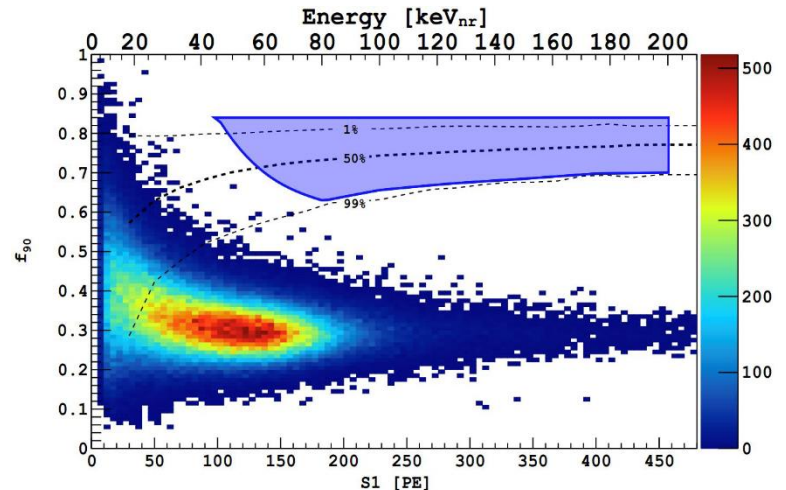
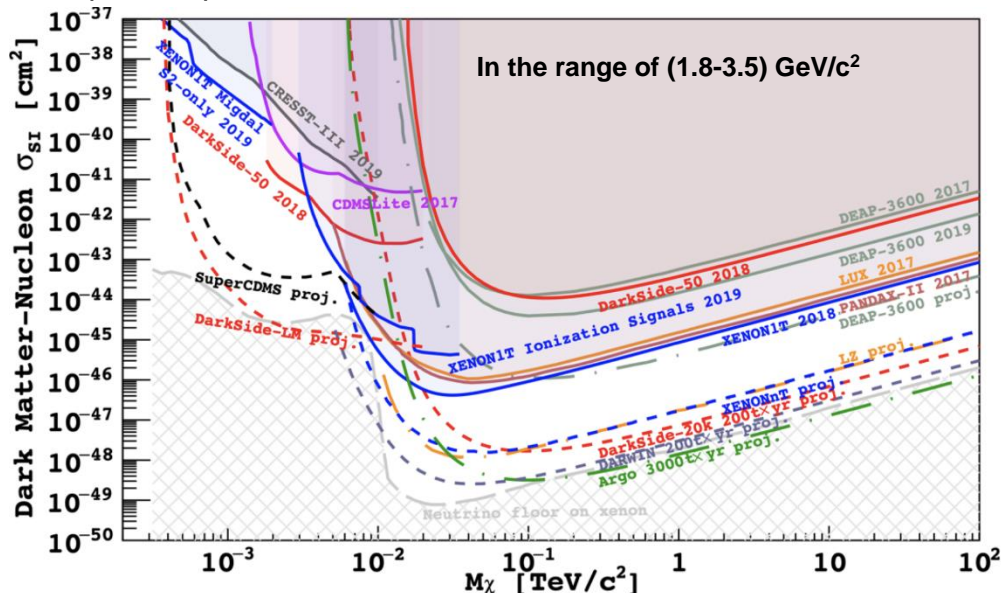
High Mass Analysis
Physical Review D 98 (10), 102006 (2018)

Low Mass Analysis
Physical Review Letters 121 (8), 081307 (2018)

The 532 live days x 46kg results (16660 ± 270)kg d exposure.
 Cuts are studied on 70 live days + AAr data.



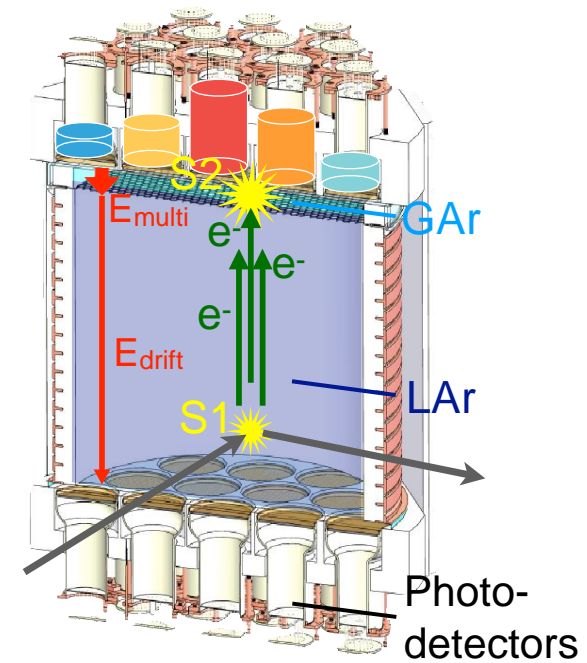
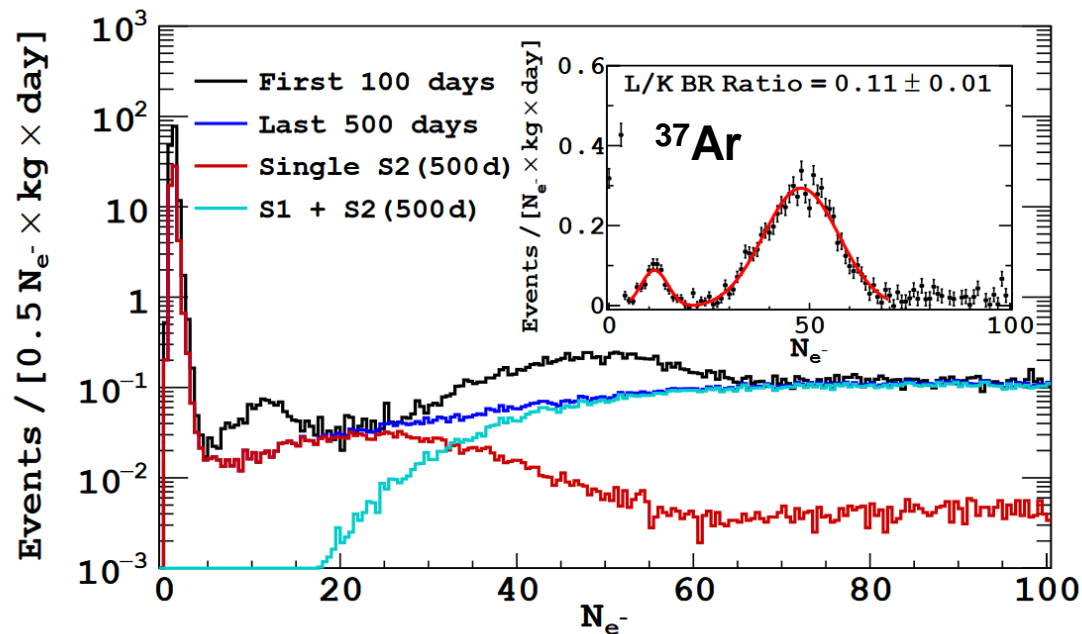
Spin-independent DM-nucleon cross section 90% C.L. exclusion limits



Yury Suvorov INSTR'20, 24-28 February, Novosibirsk, Russia

Low-mass Dark Matter Search with DS-50

- High amplification (electroluminescence gain) of ~ 100 photons/e- enables low-mass DM search with S2 signal only
- Efficient **electron** detection capability down to $1e^-$
- Ionization electron extracted to gas-phase with $\sim 100\%$ efficiency
- No S1, so no ER (PSD) discrimination
- Possible, thanks to high radiopurity of UAr target (low ER background)



Sensitive to very low-energy deposition.

АНАЛИЗ ДАННЫХ DARKSIDE-50: ПОИСК ЛЁГКИХ ЧАСТИЦ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ С ПОМОЩЬЮ ЭФФЕКТА МИГДАЛА

Учёт атомных эффектов позволяет искать лёгкие частицы тёмной материи

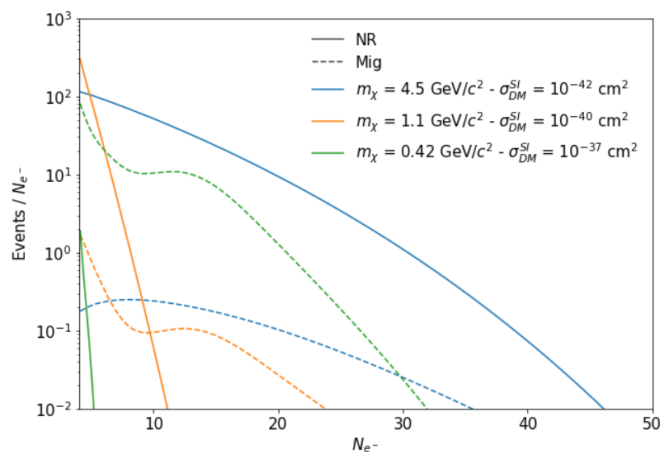


Fig. 4 Signal events in the $N_{e^-} = [4, 50]$ range assuming the DS-50 exposure. The colors represent different DM masses for the NR (solid) and Migdal (dashed) processes.

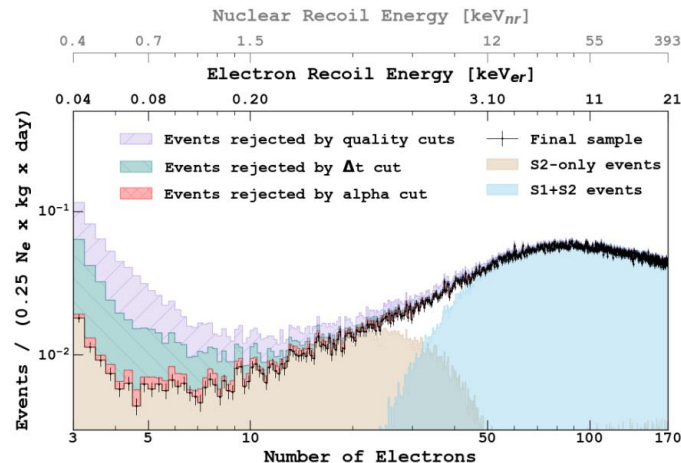
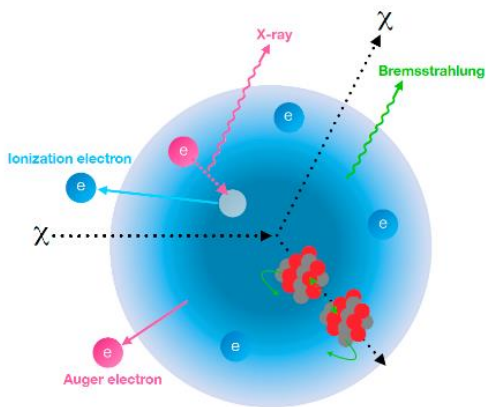
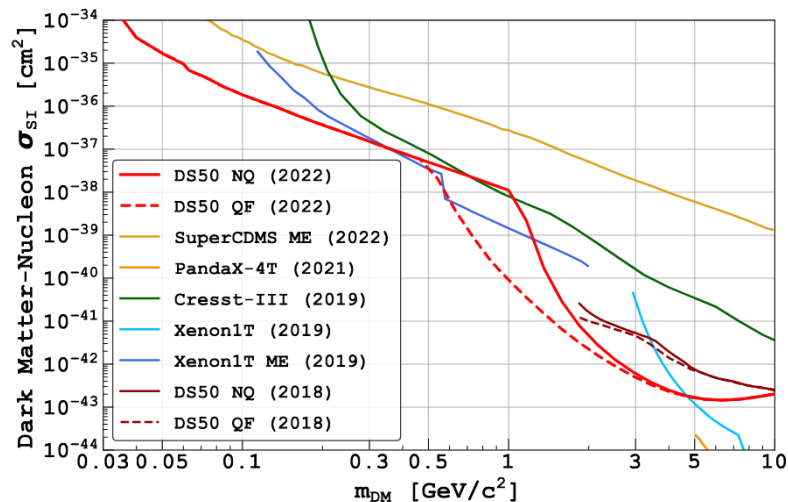


FIG. 2. N_e spectra at different steps of the data selection, after rejection of events outside the fiducial volume and with multiple interactions.

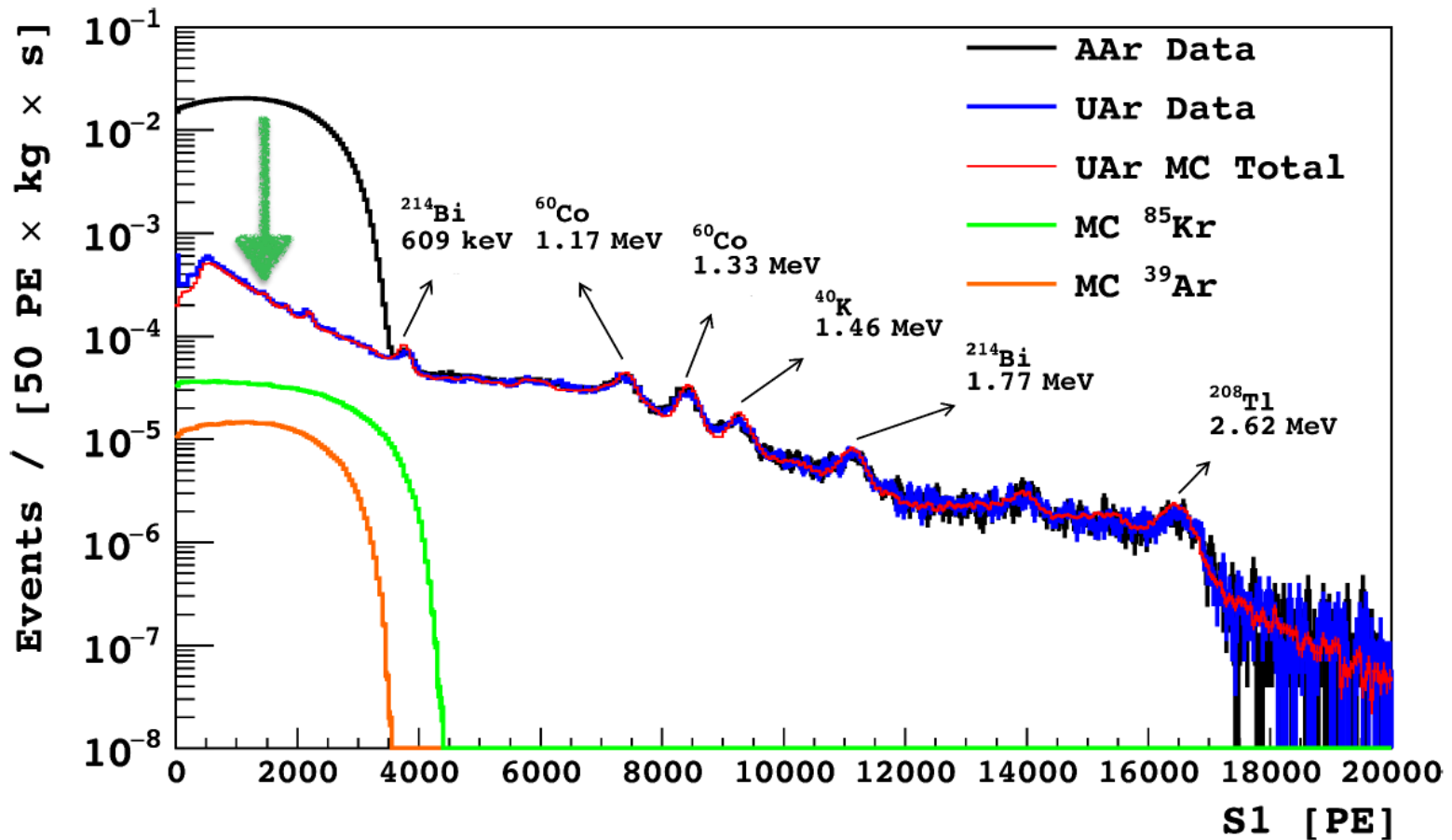


Запаздывание атомной оболочки по отношению к ядру отдачи приводит к испусканию электронов и рентгеновских фотонов

Пределы получены впервые для аргонной мишени



DS-50 UAr



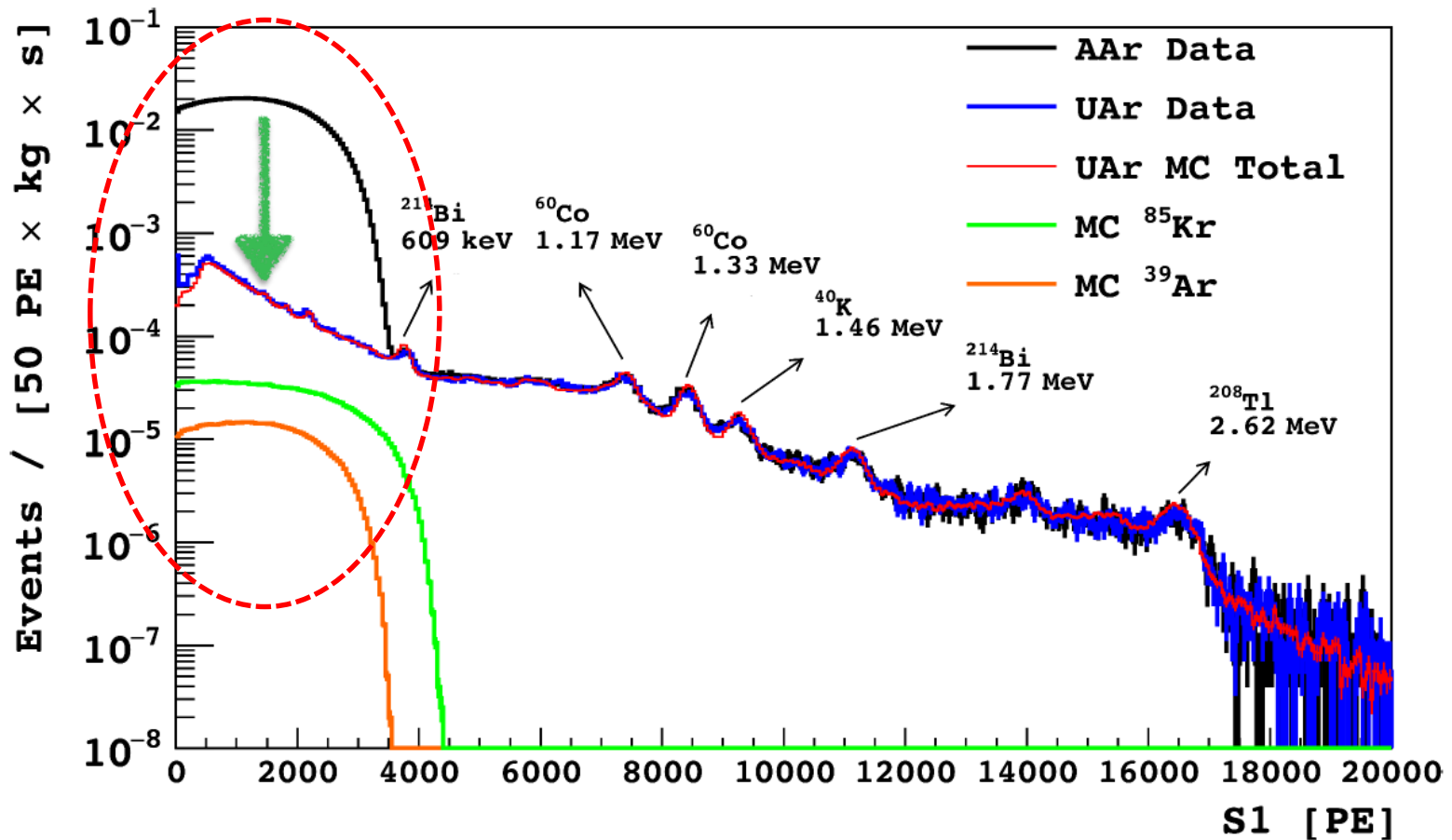
- 153 kg extracted, purified, shipped by sea FNAL-> LNGS
- This spectrum taken with drift field off to improve γ -ray resolution
- Identified γ -ray lines from cryostat & PMT's (identical to AAr case)

Содержание ³⁹Ar (бета активный изотоп) в атмосферном аргоне ограничивает размеры детекторов ТМ из-за наложений (pile-up).

Концентрация в атмосферном аргоне 10^{-15} g/g.

1 Bq/kg activity, 269 лет период полураспада.

DS-50 UAr



- 153 kg extracted, purified, shipped by sea FNAL-> LNGS
- This spectrum taken with drift field off to improve γ -ray resolution
- Identified γ -ray lines from cryostat & PMT's (identical to AAr case)

Содержание ³⁹Ar (бета активный изотоп) в атмосферном аргоне ограничивает размеры детекторов ТМ из-за наложений (pile-up).

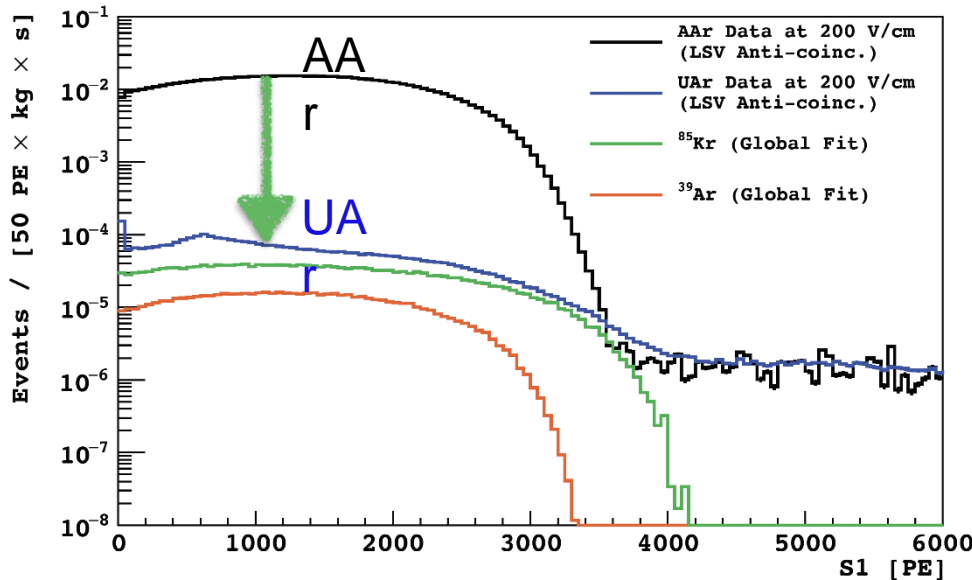
Концентрация в атмосферном аргоне 10^{-15} g/g.

1 Bq/kg activity, 269 лет период полураспада.

Underground Argon

- The ^{39}Ar gives 1Bq/kg of bkg events ($^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar} \sim 8 \times 10^{-16}$ in AAr mixture). Looking for Ar from the deep underground CO_2 sources. Activity starts in 2009. Exploration of wells in Cortez, Colorado looks very promising. First in situ extraction and enrichment plant, from 400ppm to 5%.
- Colorado \triangleright Fermilab for further purification in 3.2m tall cryogenic distillation column (purification rate: 1kg/d). The content of CO_2 , O_2 , N_2 and He all $< 100\text{ppm}$. Outcome UAr purity is at $\sim 99,96\%$.
- Finally the UAr was shipped to Gran Sasso National Laboratory (LNGS), Italy. DS-50 fill with Zr getter as the very last stage of purification. Recirculation with SAES hot getter.

Six Years Effort! 155 kg produced



The $(1.4 \pm 0.2) \times 10^3$ less ^{39}Ar with respect to atmospheric Argon



DarkSide-50 → DarkSide-20k

Restrictions for Liquid Scintillator use at LNGS.

New design: No liquid scintillator. No water. **LAr only!** Great simplification. Overall need: AAr $\sim(700 + 120)$ tonnes plus 50 tonnes of UAr.

PMTs \triangleright **SiPMs** designed and developed for LAr use in collaboration with FBK.

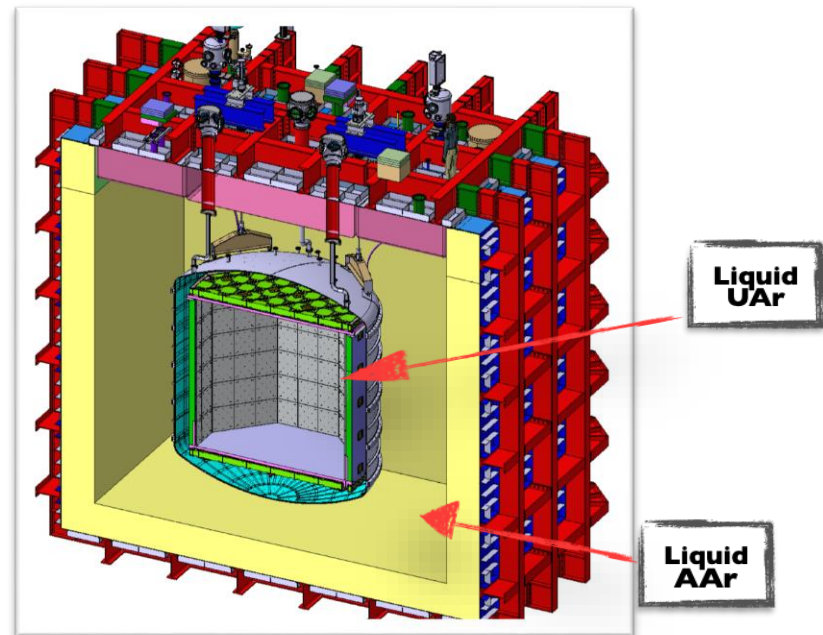
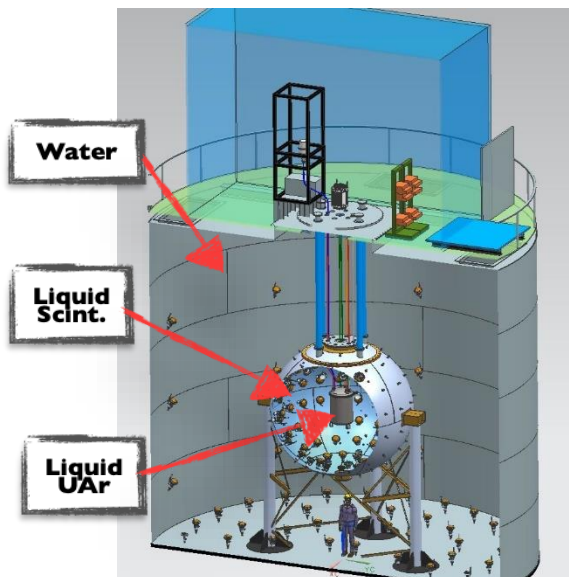
Acrylic TPC. Move from teflon to octagonal sealed acrylic vessel surrounded by the acrylic Veto.

Enhanced Speculare reflector (ESR) to improve the light collection in the TPC & Veto.

ITO \triangleright **Clevios**, new conductive polymer, no copper rings.

UAr as target material. New global community, joint effort towards the DS-20k & later ARGO (URANIA, ARIA).

ProtoDUNE type cryostat (*DarkSide-20k is a recognised experiment at CERN*).



DarkSide-50 → DarkSide-20k

Restrictions for Liquid Scintillator use at LNGS.

New design: No liquid scintillator. No water. **LAr only!** Great simplification. Overall need (700 +120) tonnes plus 50 tonnes of UAr.

PMTs ▷ **SIPMs** designed and developed for LAr use in collaboration with FBK

Acrylic TPC. Move from teflon to octagonal sealed acrylic vessel surrounded by a Veto.

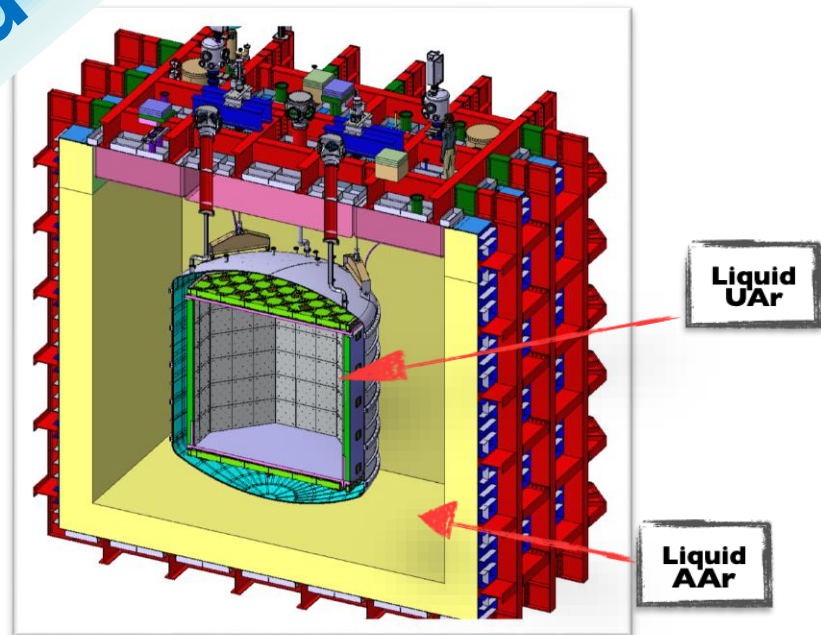
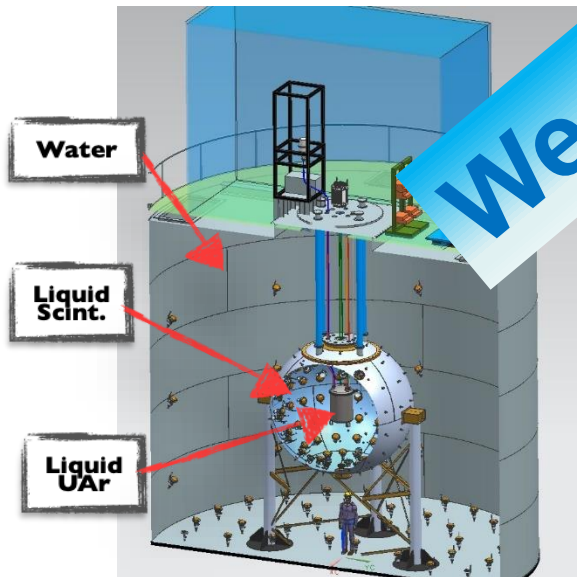
Enhanced Speculare reflector (ESR) to improve the light collection in the TPC.

ITO ▷ **Clevios**, new conductive polymer, no copper rings.

UAr as target material. New global community, joint effort to build DarkSide-20k & later ARGO (URANIA, ARIA).

ProtoDUNE type cryostat (*DarkSide-20k is a recognised design at CERN*).

We need ~50t of UAr



Underground Argon



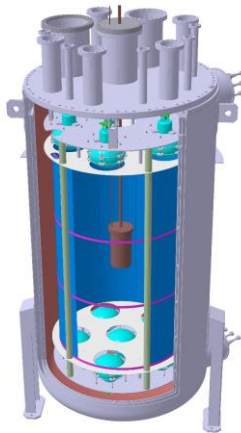
URANIA: We need ~50t of UAr. New extraction plant at Cortez, Colorado (same location as for DS50).
Estimated production rate: 330 kg/day.
Production capability \approx 120 t over two years for DS-20k
Outcome purity: 99.99%
Recovery: 98%
Installations starts on Jan-Feb 2021. Ready to operate from Nov 2021.



ARIA: New **350m** tall (0.32m inner diameter) distillation column installed in the coal mine well in Sardinia. Purification speed of **1t per day**.

Demonstrator column **Seruci-0 (25m)** made of three modules (reboiler, condenser and middle module) was successfully tested. Resulting UAr purity: 99.999% *Eur. Phys. J. C (2021) 81:359*

Assembly of the final column **Seruci-1 (350m)** is ongoing.



DArT is a single phase low-background detector designed to measure the ^{39}Ar depletion factor of different underground argon batches (URANIA+ARIA).

Made of 99.99% OFHC Cu cylinder, 1ℓ active volume, PMMA support structure with TPB coating, Readout two PDMs (1 cm² SiPMs) from DS-20k (DArTeye).

It is located at LSC inside ArDM, LAr TPC (850 kg AAr) to be used as active veto.

Underground Argon



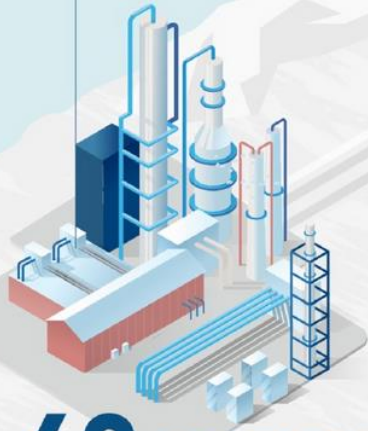
URANIA: We need ~50t of UAr. New extraction plant at

Corte
Estim
Produ
Outco
Recov
Instal
from M
ARIA:
in Sar
Demo
modul
Assen

ГЕЛИЕВЫЙ ХАБ



**Амурский
газоперерабатывающий завод**
г. Свободный



60 млн М³ ГЕЛИЯ
В ГОД

Станет **крупнейшим в мире**
производителем гелия

1400 км БЕЗ
ДОЗАПРАВКИ

Температура гелия
внутри контейнера **-269° C**

КАМАЗ-5490 NEO

Экология

Заправляется сжиженным
природным газом (СПГ)

Эффективность

Экономия (по сравнению с дизелем) —
7 рублей на километр

Технологии

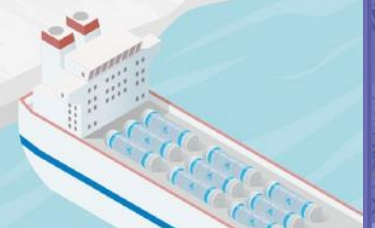
Модификация разработана
специально для «Газпрома»

Гелиевый хаб
г. Владивосток

Станет **крупнейшим логисти-
ческим центром гелия в мире**
и единственным в России

4500

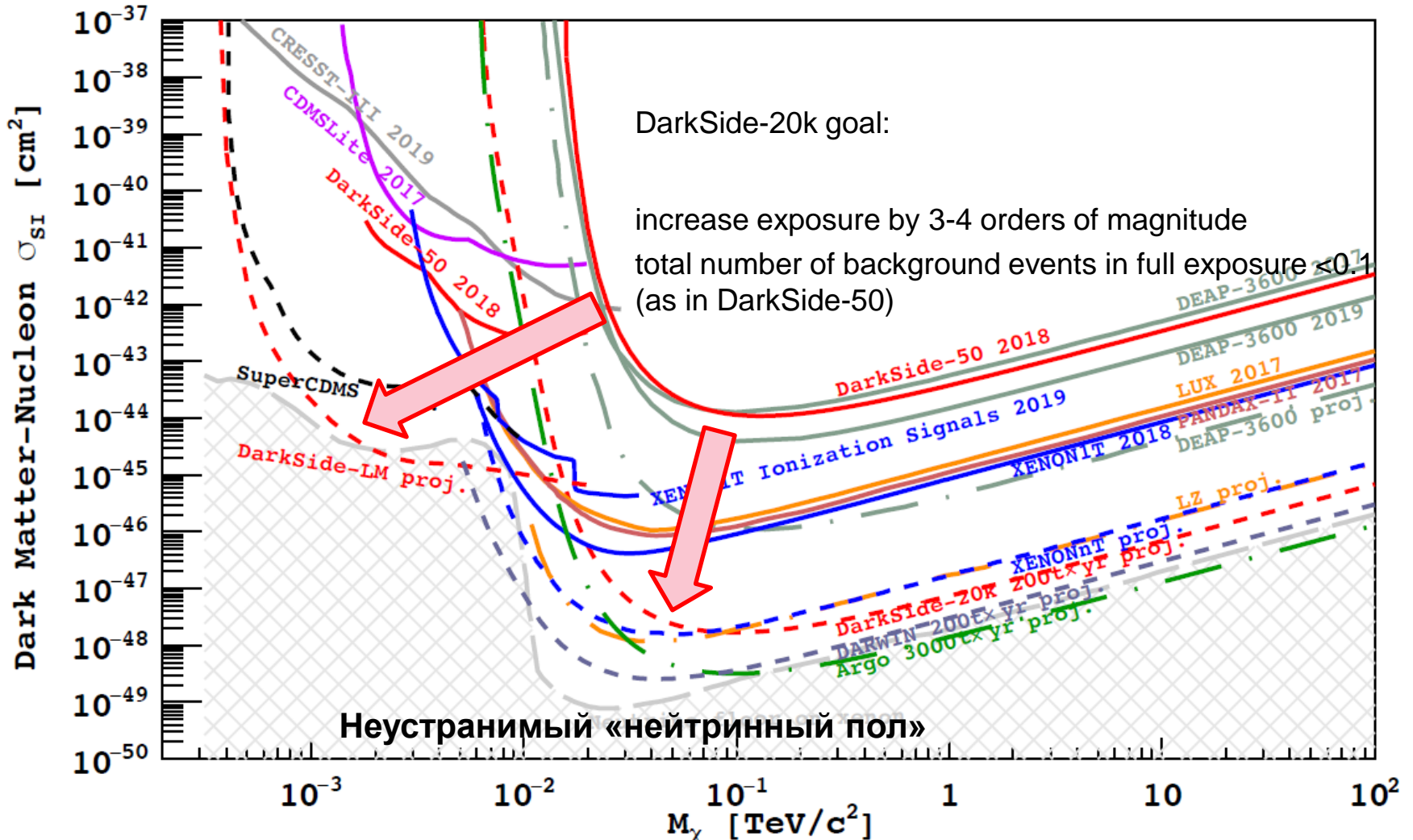
ОПЕРАЦИЙ С ГЕЛИЕВЫМИ
КОНТЕЙНЕРАМИ В ГОД



(DARTEye).

It is located at LSC inside ArDM, LAr TPC (850 kg
AAr) to be used as active veto.

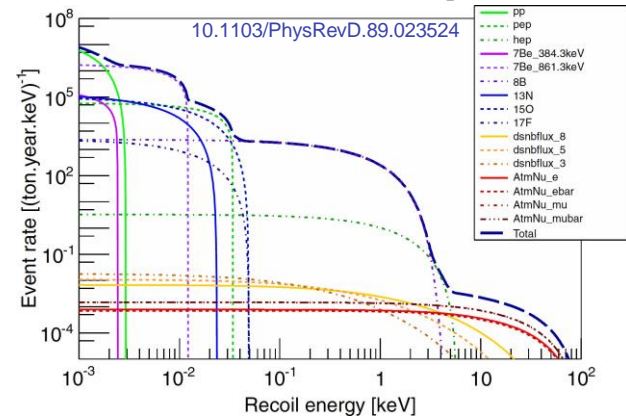
Научная цель DarkSide -20k



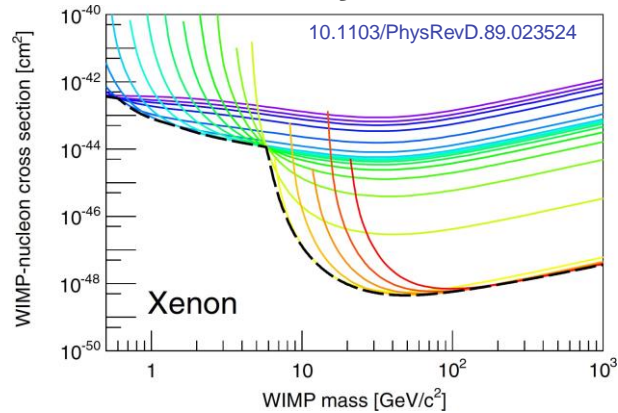
- $6.3 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$ for 1 TeV/c^2 WIMP (90% C.L.)
- $2.1 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ (5σ) discovery
- nominal exposure: (20×10) t yr
- background: 0.1 events

Irreducible NR Backgrounds in WIMP Search: Neutrinos

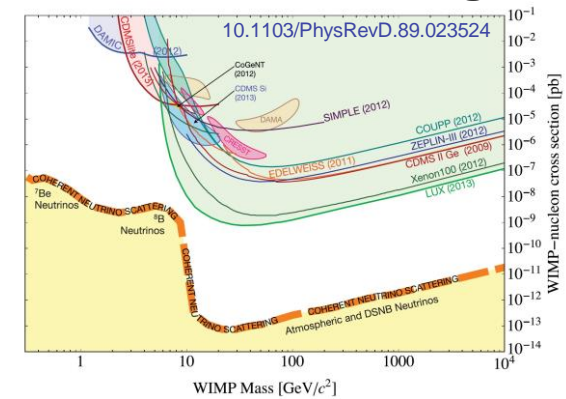
Solar and atmospheric



Sensitivity vs E_{th}



Neutrino floor/fog



- Solar ⁸B at low energies
- Coherent scattering on nuclei
- Atmospheric ν at high energies
- CC interactions with ⁴⁰Ar

- Background-free sensitivity for exposures reaching 1 neutrino event
- Different energy thresholds
- (from 0.001 (purple) to 100 keV (red) in log)

Envelope forms the neutrino floor

- Limit on experimental sensitivity for any detector
- How to go beyond?
 - Modulation
 - Directionality

The challenges: Radiopurity

- Complete control over every component that goes into the detector.
 - Down to the resistor level
- Complete simulations, especially critical for γ and neutron transport (large mean free path).
- Knowledge on the chemical composition of the components in order to calculate the n yield via $X(\alpha, xn)Y$.
 - DarkSide is the first experiment with the (a,n) neutron background fully calculated with Geant4: SaG4n (<http://win.ciemat.es/SaG4n/>) Nucl. Instrum. Methods A 960, 163659 (2020)
- Control on the surface exposure to air:
 - ^{222}Rn decay daughters attach to surfaces and have long half-lives (^{210}Pb 22 y).
- Hundreds of assays performed combining Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, HP Germanium screening, surface screening and Po radiochemical extraction
- Monitor the history of exposure of materials to cosmogenic radiation (U. Zaragoza)
- Worldwide effort combining facilities at LSC (Sp), Gran Sasso (It) UJ (PI), Boulby (UK), SNOLAB (Ca), Temple (US) coordinated by Spain (CIEMAT).

Experimental Backgrounds

- *In rare event search, it is critical to identify, minimize, and reject backgrounds*

NR backgrounds

- cosmogenic (muon-induced) neutrons
- natural radioactivity in materials
- (α, n) reactions
- spontaneous fission
- neutrinos (irreducible)

No discrimination

→ design experiment with zero neutron background

ER backgrounds

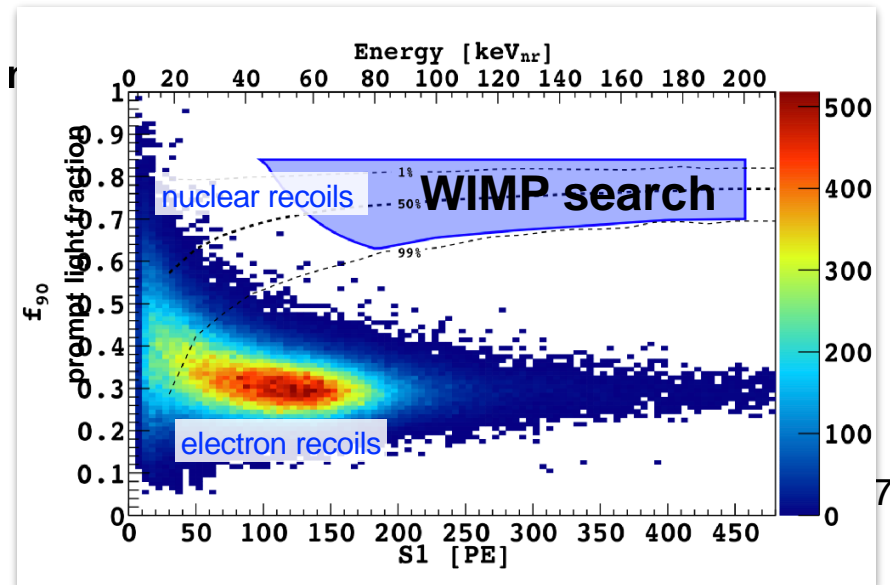
- cosmogenic activation of detector components, in particular $^{40}\text{Ar}(n, 2n)^{39}\text{Ar}$
- radioactive contamination in detector components
- intrinsic contamination (^{222}Rn)

Discrimination with high efficiency based on PSD

Surface background events

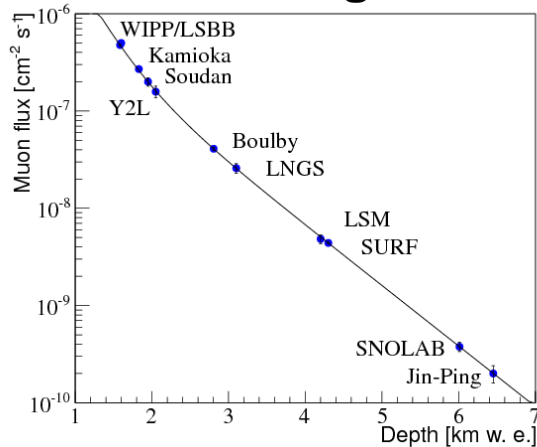
- intrinsic contamination (^{222}Rn)

Discrimination via fiducial volume cut + surface treatment

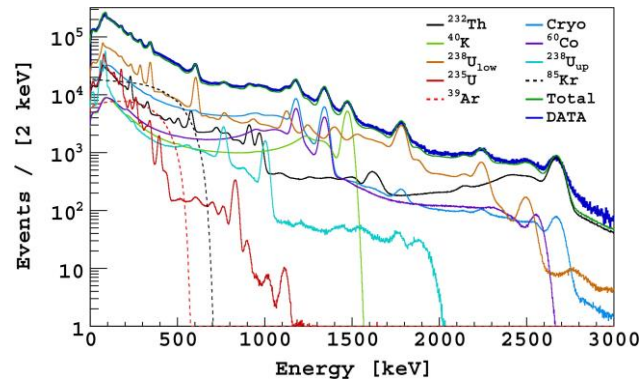


Radiogenic and cosmogenic backgrounds

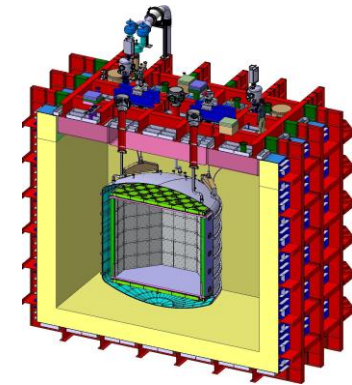
Cosmogenic



Radiogenic



Solution



- Excessive muon rate at surface
- Radioactive isotopes activated
- Neutron generation
- Go underground!

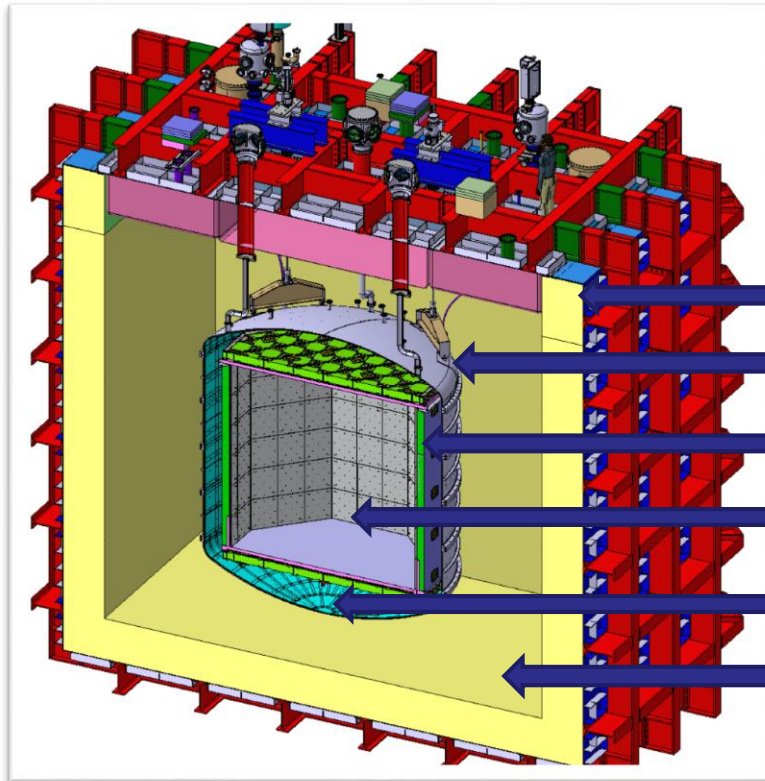
- Natural radioactive isotopes: U and Th chains, non-actinides
- Material assay and selection
- Particle identification: ER/NR
- Fiducialization: surface events

- Onion-like structure:
 1. Muon veto
 2. Neutron veto
 3. LAr TPC as WIMP detector

Детектор DarkSide -20k

Коллаборация GADMC

- Место установки LNGS Hall C
- Внутренний детектор : ПММА двухфазная ТРС заполненная ~ 50т «Подземного аргона» (UAr);
- Мембранный криостат ~700т «Атмосферного аргона» (AAr);
- Вето-детектор: ПММА+Gd
 - ~8000 датчиков фотонов типа SiPM для ТРС
 - и ~3000 для Вето-детектора



- Криостат
- Металлический бак
- ТРС
- Мишень
- Нейтронное вето
- Внешний аргоновый буфер



Вклад группы из НИИЯФ МГУ

1. Участие в пересмотре дизайна детектора DarkSide-20k
 - разработан и предложен гадолинизированный пластик для стенок ТРС (ПММА + Gd(АсАс)3)
 - планировалось использовать российский ультрачистый по U и Th титан для бака, готовы первые образцы (совместно с РХТУ и Белгородским университетом)
2. Расчёт фона от (α, n) реакций, протекающих в материалах детектора из-за U и Th
3. Калибровочный источник нейтронов (совместно с Белгородским университетом)

Научная кооперация российских научных организаций в эксперименте GADMC

МГУ/НИИЯФ

- опыт экспериментальной работы в низкофоновой физике
- моделирование детекторов и физических процессов
- обработка данных
- низкофоновое материаловедение

РХТУ

- низкофоновые измерения
- низкофоновое материаловедение

Курчатовский институт

- теория процессов при рассеянии частиц ТМ
- опыт экспериментальной работы в низкофоновой физике
- моделирование детекторов и физических процессов
- обработка данных

ОИЯИ

- опыт экспериментальной работы в низкофоновой физике
- опыт участия в проектировании LAr детекторов

НГУ/ ИЯФ

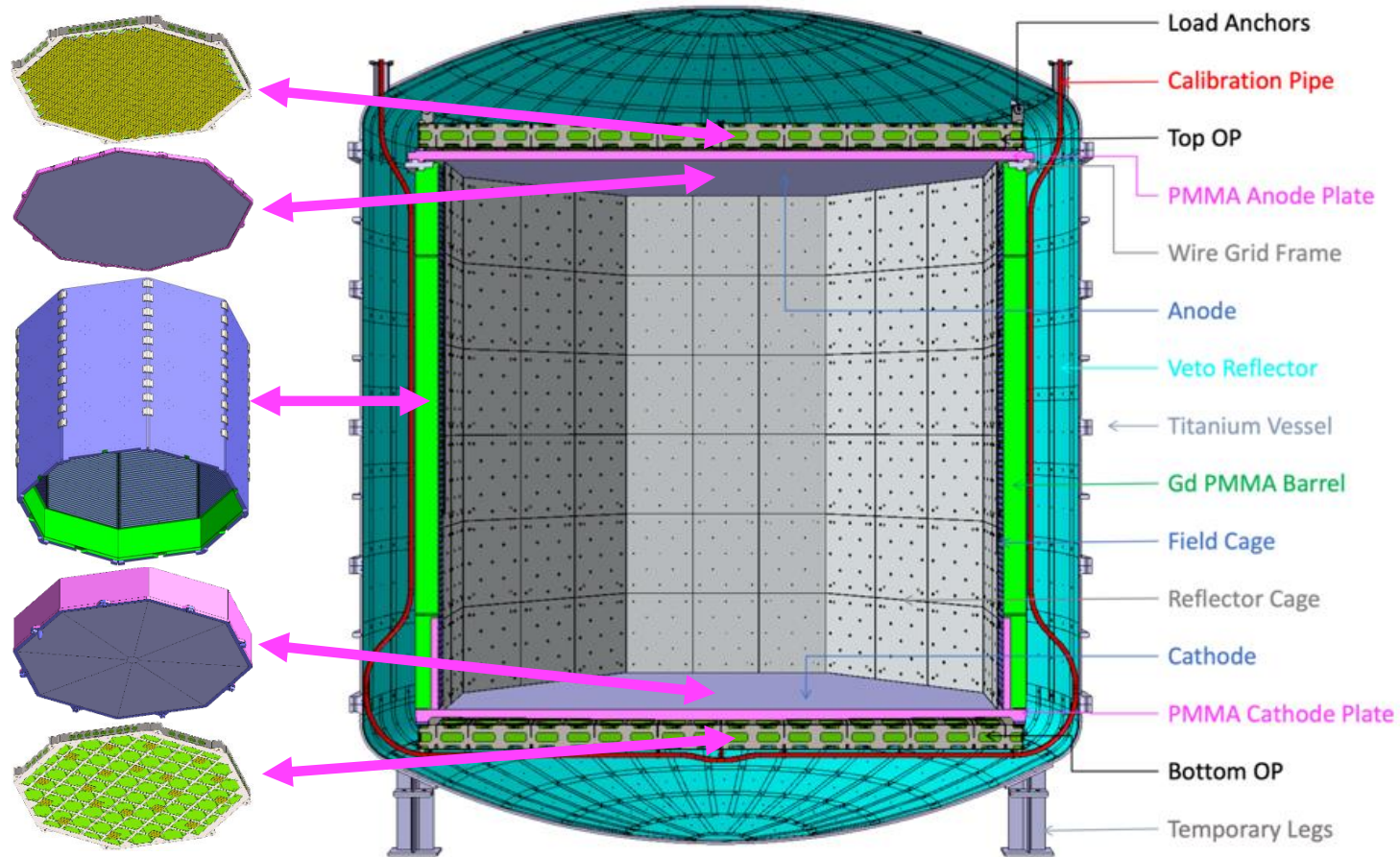
- двухфазные детекторы и большой опыт в их проектировании
- фундаментальное понимание процессов в LAr
- установки по ожижению и очистке
- пучки нейтронов

БелГУ

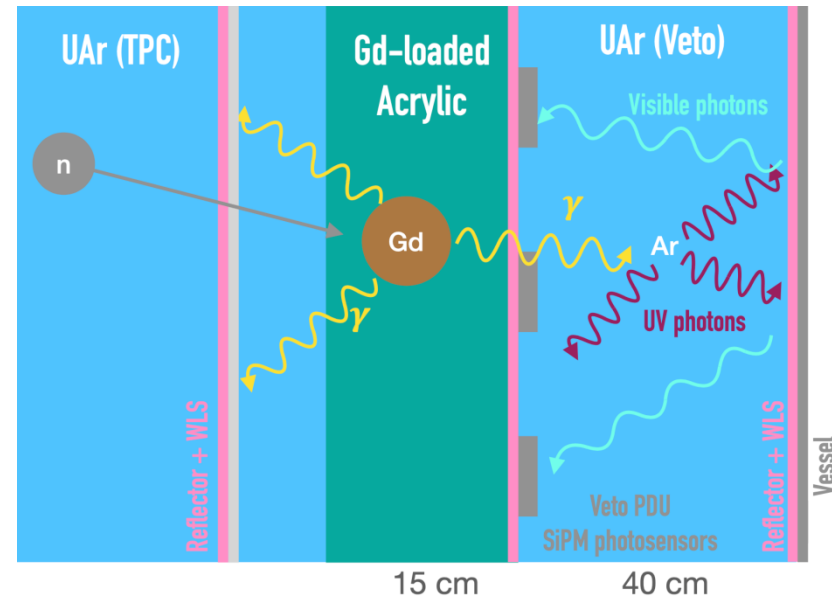
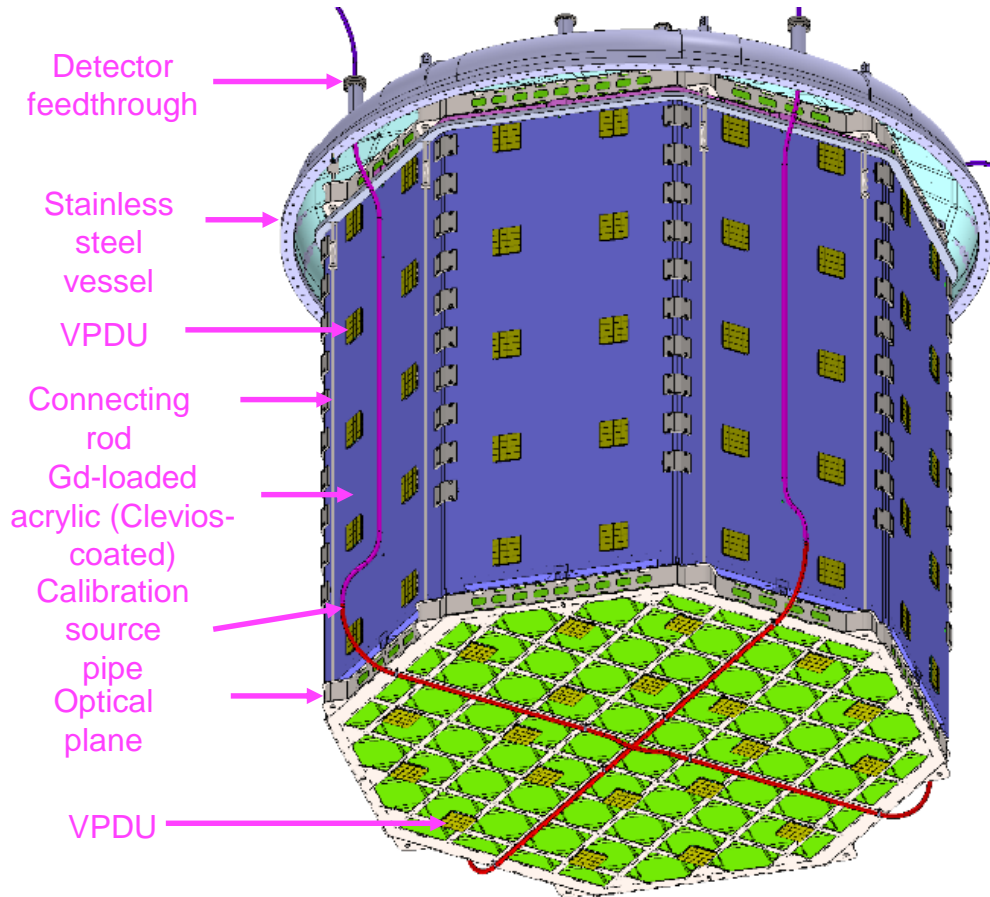
- низкофоновое материаловедение
- компактные источники для калибровок

Inner Detectors (TPC and Neutron Veto)

- DS-20k ⇔ **Dual-phase argon TPC** for DM search
- Fiducial volume ≈ 20 t **underground argon** (UAr), depleted in ^{39}Ar
- Active neutron veto integrated into the TPC structure via **gadolinium-loaded** (1% wt) PMMA (acrylic)
- “Reflector cage” covering inner TPC surface using **TPB-coated ESR foils**
- Sophisticated **silicon photomultiplier (SiPM)** based photo detection (total TPC area $\approx 21 \text{ m}^2$)



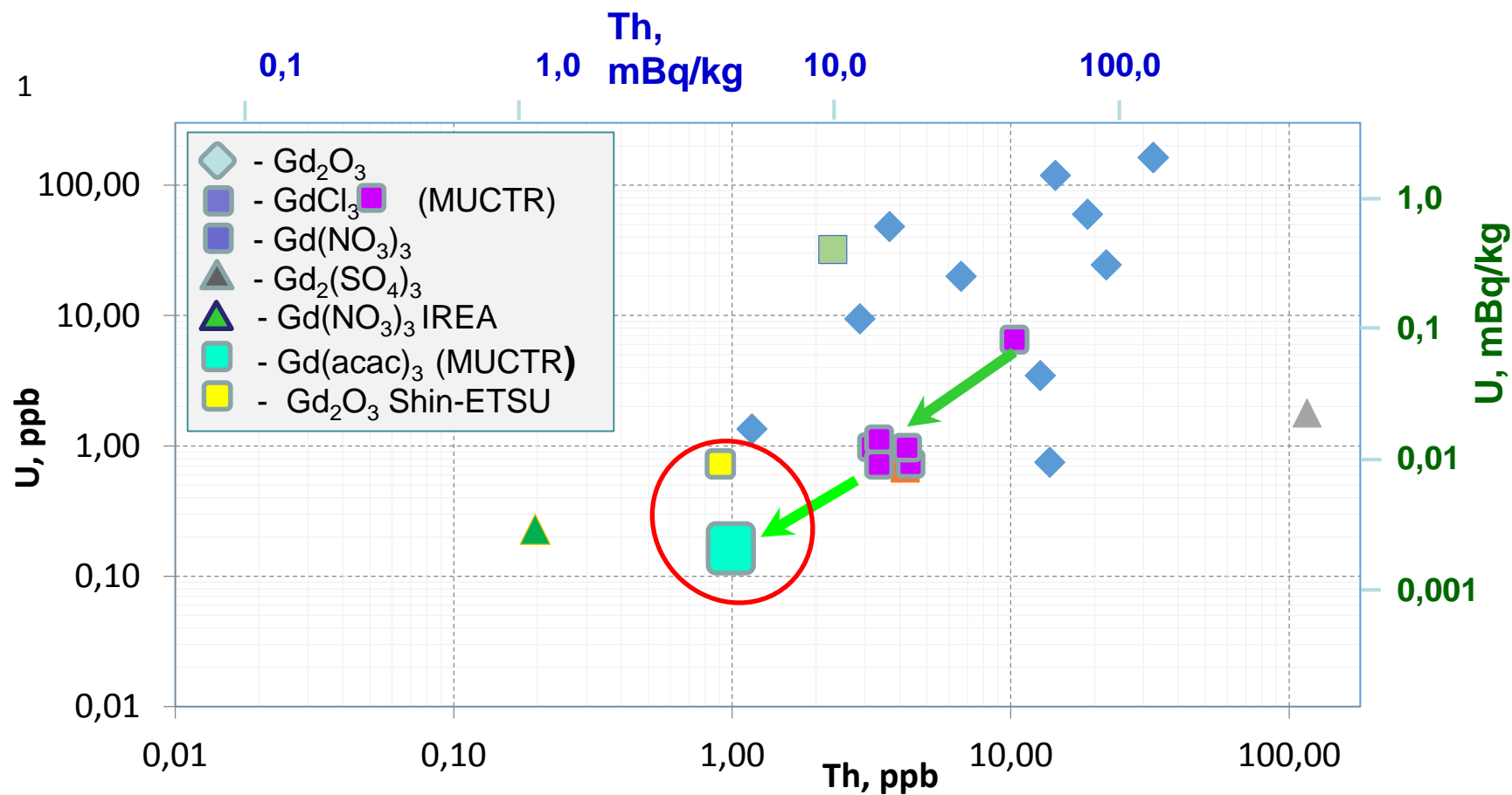
“Active” neutron veto



- Neutrons are moderated by the PMMA and capture on gadolinium
- γ -rays are emitted (totaling ≈ 8 MeV)
- UV photons from argon are wavelength shifted (PEN) in the veto region and detected by the veto photo detectors (VPDU)

Gadolinium compounds

Gd – compounds radiopurity according ICP-MS data



Металлический бак

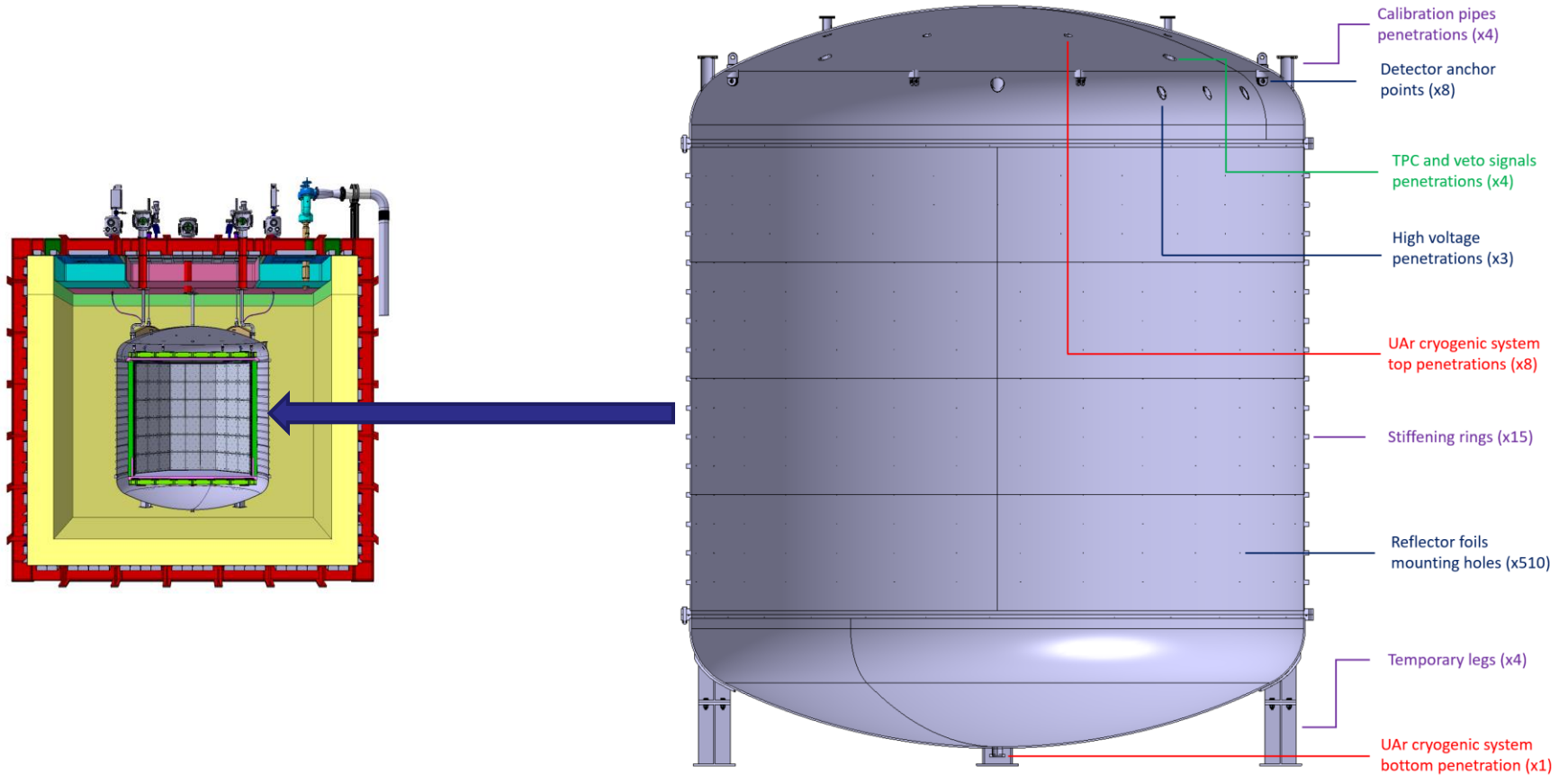
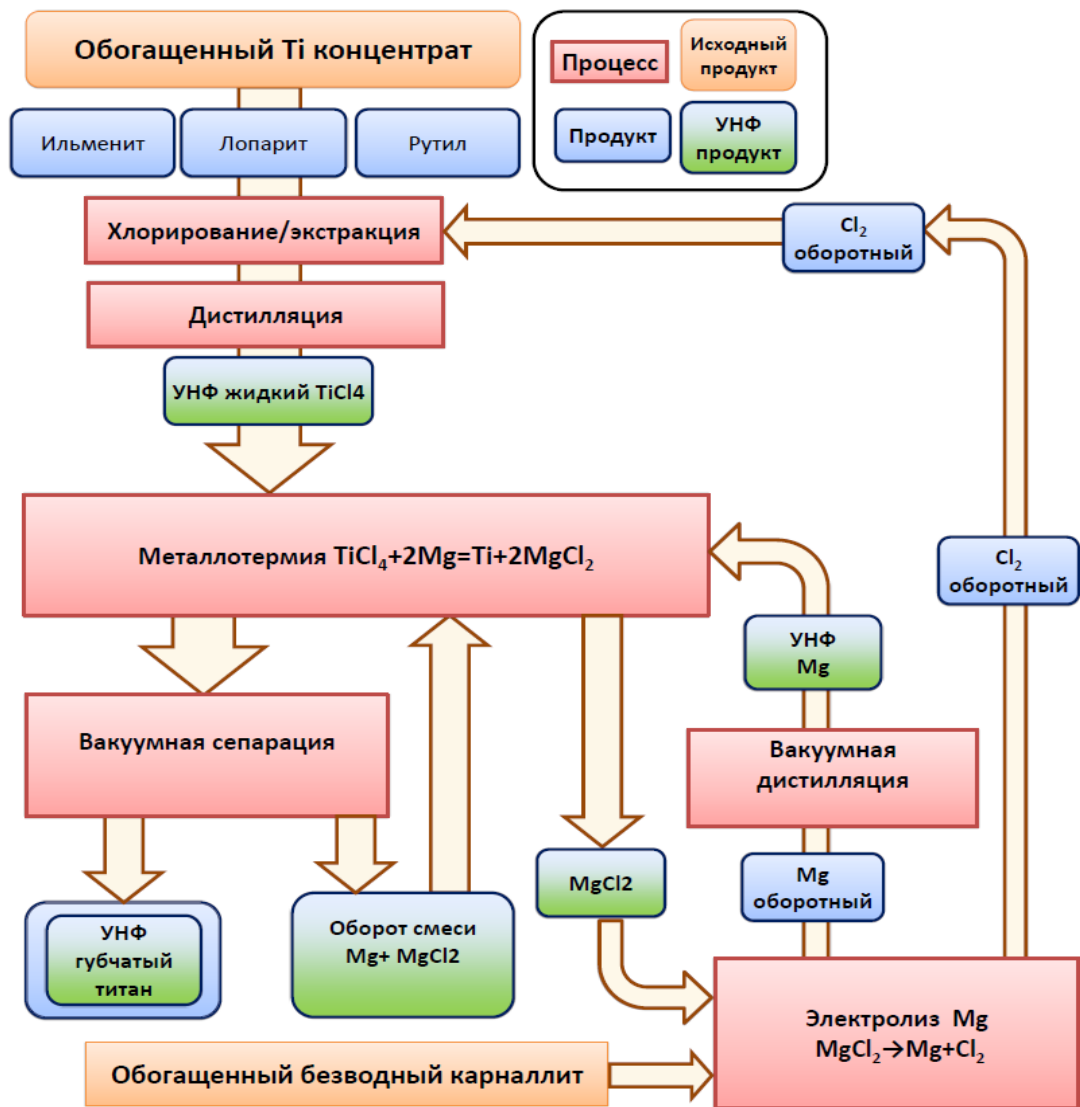
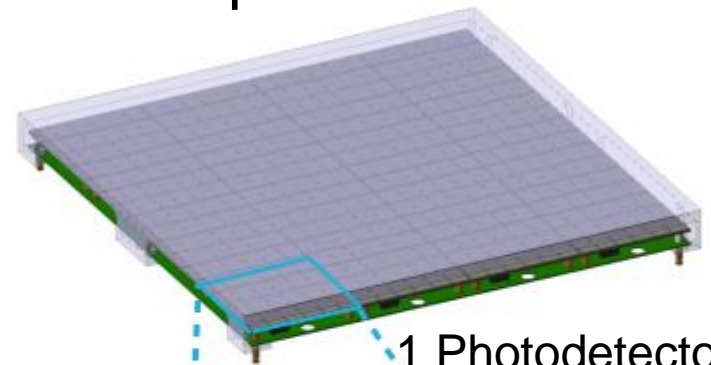


Схема оптимального технологического процесса производства губчатого титана для обеспечения низкофононости конечного материала.
(УНФ – ультранизкофоновый)



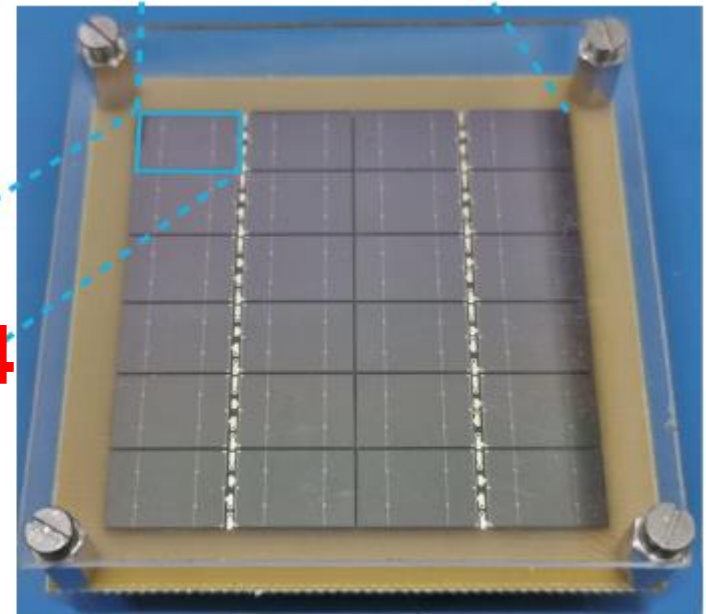
The challenges: large area cryogenic radiopure SiPMs

- Custom cryogenic SiPMs developed in collaboration with Fondazione Bruno Kessler (FBK), in Italy.
- Photon detection efficiency ~45%
- Low dark-count rate < 20 cps
- Timing resolution ~ 10 ns
- 2112 channels TPC + 480 channel Veto.
- Mass production of the raw wafer in LFoundry company
- PDM+PDU assembly in a dedicated facility at LNGS (NOA).

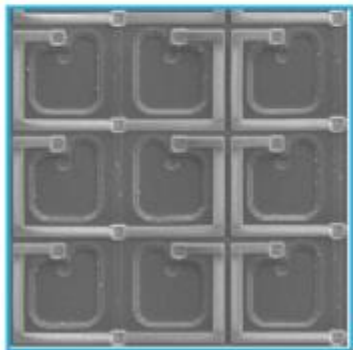


1 Photodetector Unit (PDU)

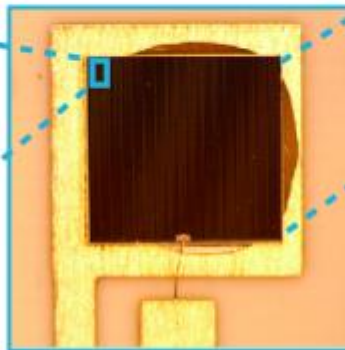
x 16



1 Photodetector module (PDM)



Single SPAD 25-30 μm^2



Single SiPM 1 mm^2

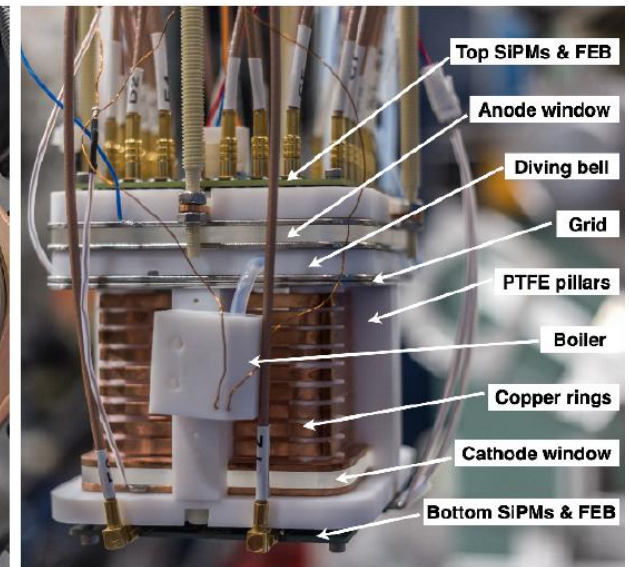
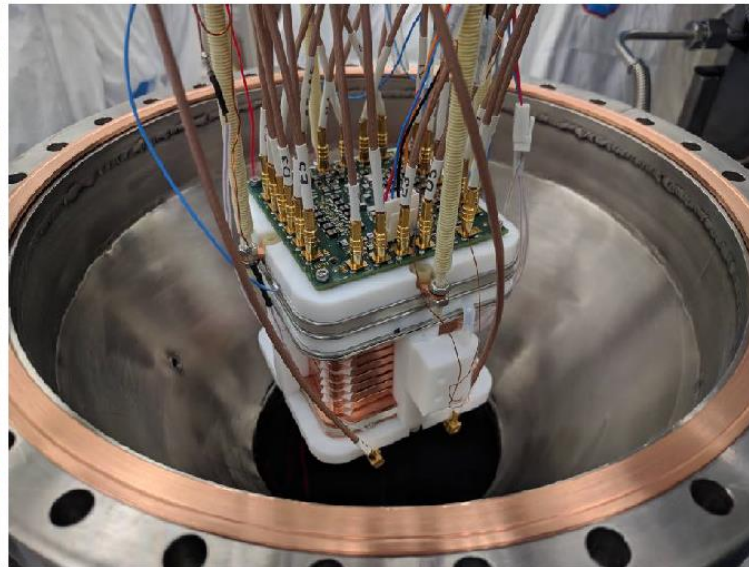
x 24

ReD Time Projection Chamber

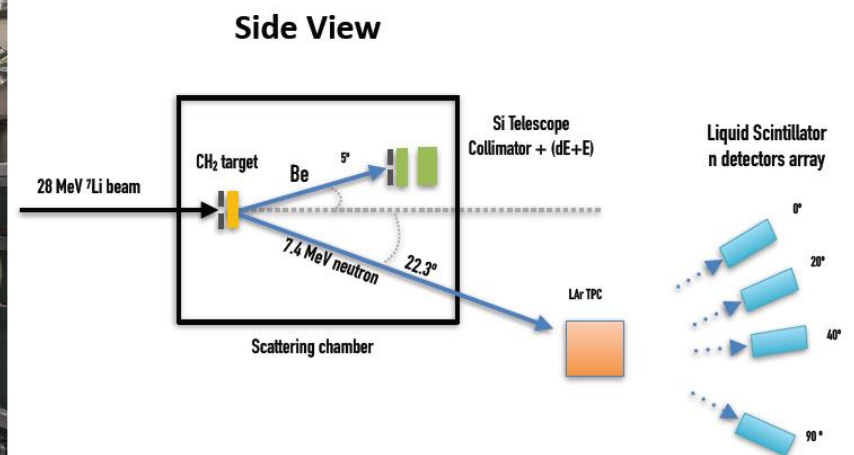
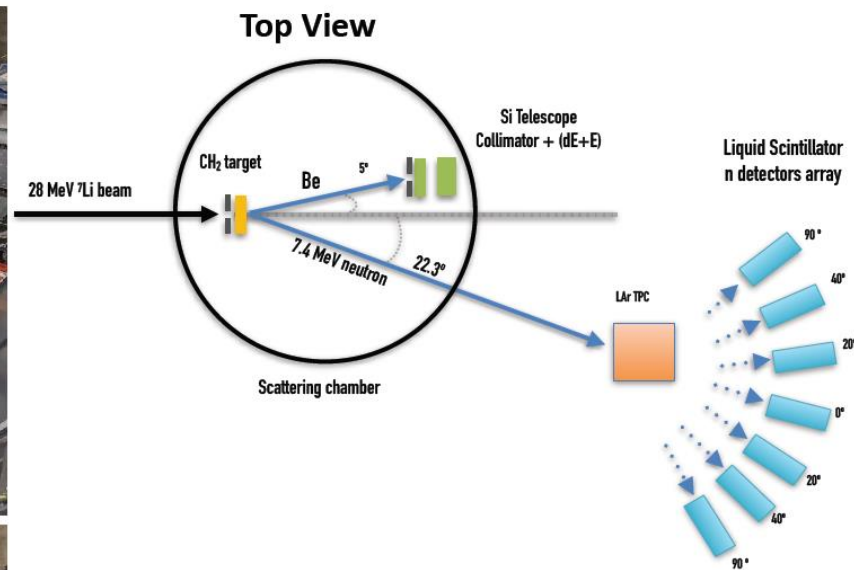
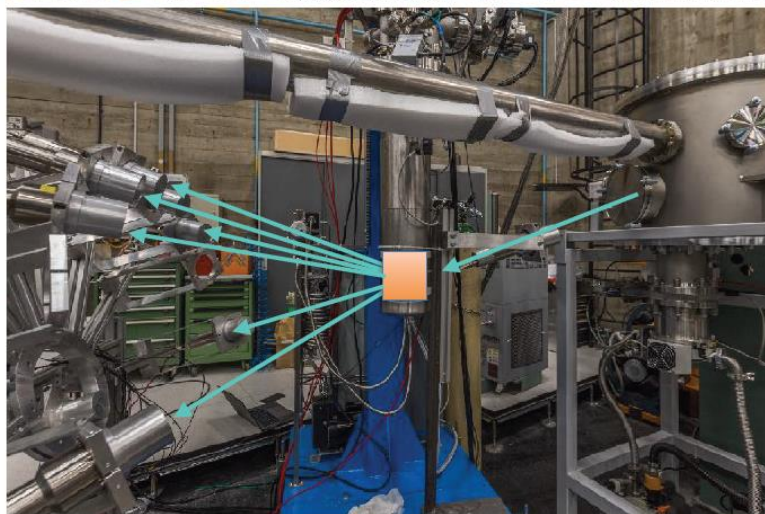
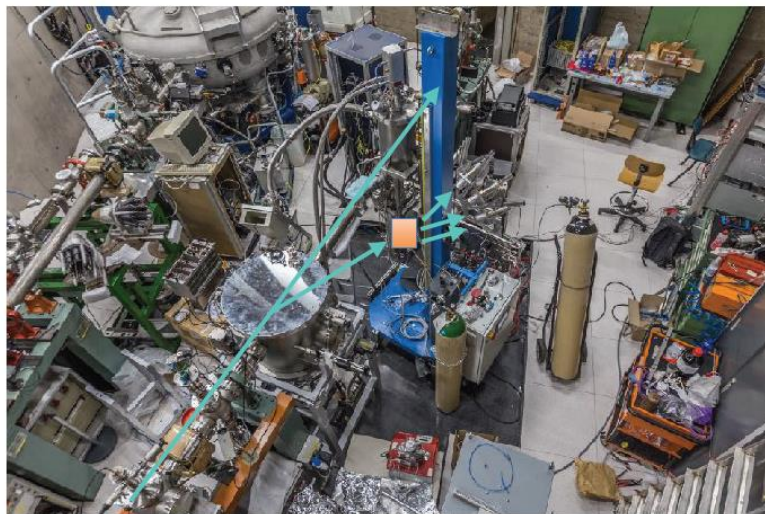
The cuboid of 5 cm x 5 cm x 6 cm (L x W x H) designed and builded by UCLA group.
Active mass of LAr is 185 g.

Teflon structure and acrylic top and bottom 4.5mm thick windows (ITO coating → Cathode & Anode.)
Inner side of the TPC (acrylic + 3M reflective foil) all covered with a wls TPB (128 nm → 420 nm).

Customised cryostat and condenser.



Experimental setup in Catania (INFN-LNS)



- Что делать пока детектор строится ??

Наши знания и опыт в области прямой регистрации частиц ТМ (LAr)

МГУ/НИИЯФ

- теория и моделирование ТМ
- средства диагностики излучений
- опыт экспериментальной работы в низкофоновой физике
- моделирование детекторов и физических процессов

РХТУ

- низкофоновые измерения
- низкофоновое материаловедение

Курчатовский институт

- теория процессов при рассеянии частиц ТМ
- опыт экспериментальной работы в низкофоновой физике
- моделирование детекторов и физических процессов
- пучки нейтронов
- Технологии разделения изотопов

ОИЯИ

- нейтронные пучки
- опыт экспериментальной работы в низкофоновой физике
- опыт участия в проектировании LAr детекторов

НГУ/ ИЯФ

- двухфазные детекторы и большой опыт в их проектировании
- Фундаментальное понимание процессов в LAr
- Установки по ожижению и очистке
- Пучки нейтронов

БелГУ

- Низкофоновое материаловедение
- Компактные источники для калибровок

МИФИ

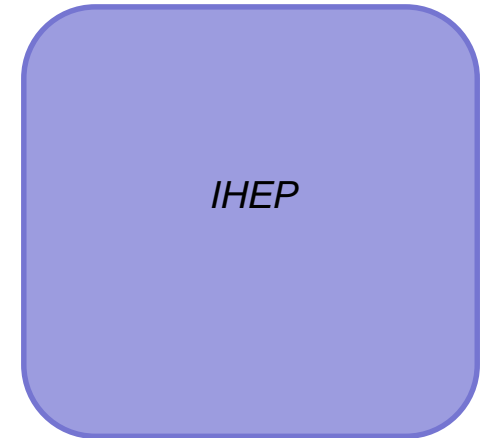
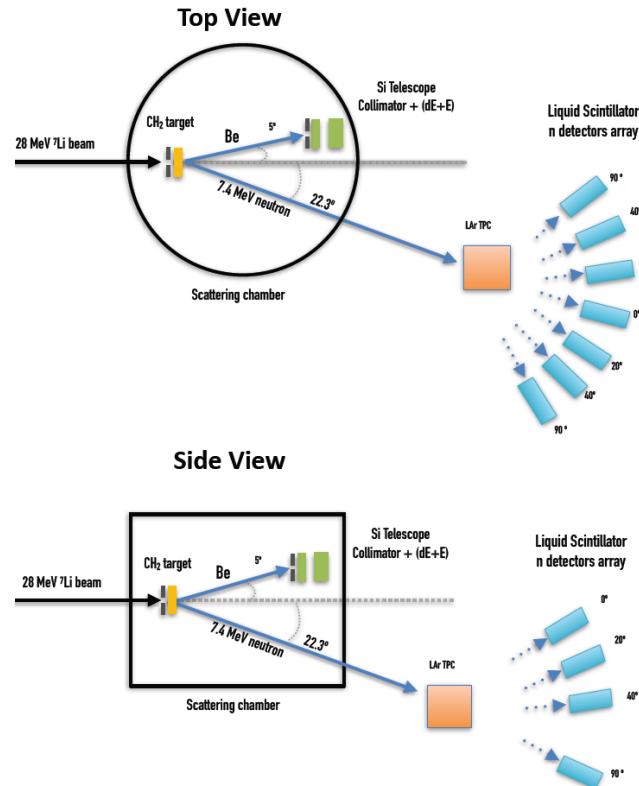
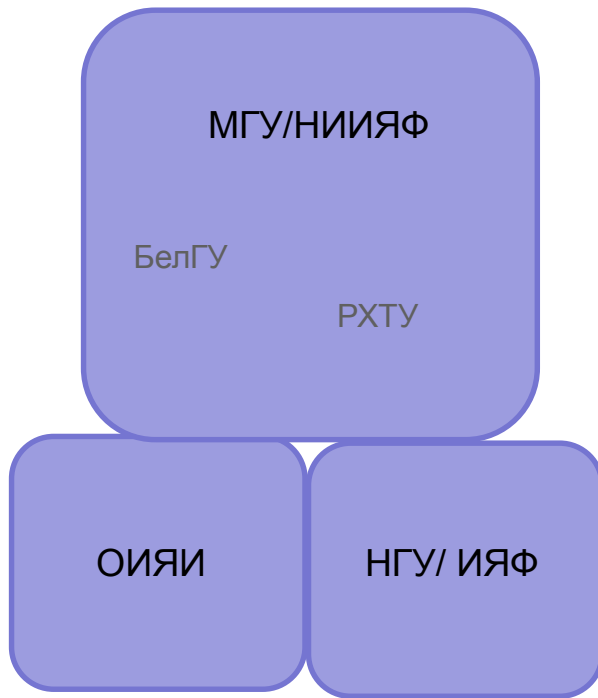
Эксперимент RED-100 (Ar)

Заявка на грант RSF- CNSF

Исследование процессов отдачи при сверхнизких энергиях в двухфазном детекторе на жидком аргоне для поиска темной материи в области малых масс

Study for ultra-low energy recoils with dual-phase argon technology for low mass dark matter search

利用液氩技术进行效应的研究



Научная программа заявки на грант RSF- CNSF

1. Разработать и запустить новый детектор, состоящий из LAr TPC масштаба единиц л, используя опыт, накопленный в INEP и при проведении эксперимента RED в рамках эксперимента DarkSide
2. Провести измерения на пучках нейтронов с целью изучения «эффектов направленности» при различных переданных энергиях ядер отдачи
3. Калибровка ионизационного выхода для NR (Q_y^{NR}) в области малых энергий, достичь порога $<7 \text{ keV}_{nr}$
4. Изучение эффектов ER с интенсивными источниками гамма-излучения
5. Исследование отдачи при и малых энергиях с использованием изотопа ^{37}Ar . Прямая наработка изотопа (например, облучение CaO порошка нейтронами)
6. Исследование эффекта Мигдала при рассеянии нейтронов на ядрах
7. Полученные результаты калибровок будут внесены в код программы NEST (NEST - Noble Element Simulation Technique)
8. Применение полученных результатов калибровок для оценки чувствительности будущих экспериментов: RED- 100 (LAr) (coherent antineutrino scattering), DarkSide-LowMass and DarkSide-20k

Scientific program for RSF- CNSF grant

1. **Design a new detector** based on a small LAr TPC using the IHEP and ReD experience and the ReD+ upgrade proposals
2. Measurements focused on the **directionality** effect detection **@ different NR energies**
3. **Calibration** of the NR ionization yield (Q_y^{NR}) for **the low-energy range** ($<7 \text{ keV}_{nr}$)
4. Study of ER with external gamma sources
5. On-site ^{37}Ar production and deployment **for low-energy nuclear recoil measurement** (for example, irradiation of CaO powder with a neutron source)
6. Study of the **Migdal** effect induced **by neutron-nucleus scattering**
7. Implementing the calibration results into the **NEST** code (NEST - Noble Element Simulation Technique, from version 2 to version 3)
8. **Applying the calibration results** for sensitivity projections of the future experiments: RED (coherent antineutrino scattering), DarkSide-LowMass and DarkSide-20k

It should be noticed that aside from AmBe, AmC and ^{252}Cf neutron sources we have access to neutron guns and accelerator sources (in JINR (Dubna) and BINP (Novosibirsk)), which provide much more versatility for purposes listed above

Dark matter search application for the medical physics: the 3D π project. II project.

M. Lai*, A. Ramirez, X. Li, A. Renshaw, M. Wada, A. Zabih, D. Franco, F. Gabriele, C. Galbiati and H. Wang

Full text: pdf

Pre-published on: January 26, 2022

Published on: May 12, 2022

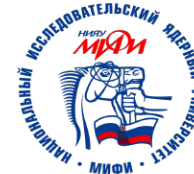
Abstract

3D π will be the first total-body scanner for Positron Emission Tomography (PET) using liquid Argon as a scintillator medium. The project is an application in medical physics of the ongoing R&D of the DarkSide collaboration, whose main aim is the direct detection of dark matter particles via liquid Argon targets. Utilizing liquid Argon as a scintillator will allow for a competitive and cost-effective total-body PET scanner to be built, thanks to the high availability of atmospheric Argon that can be isotopically distilled as needed, along with potential for the availability of underground Argon. The preliminary results here demonstrate that, while the spatial resolution is comparable to that of commercial scanners, the 3D π scanner is expected to show outstanding detection sensitivity, allowing for a reduction of the PET scanning time or a reduction of the patient dose. II will be the first total-body scanner for Positron Emission Tomography (PET) using liquid Argon as a scintillator medium. The project is an application in medical physics of the ongoing R&D of the DarkSide collaboration, whose main aim is the direct detection of dark matter particles via liquid Argon targets. Utilizing liquid Argon as a scintillator will allow for a competitive and cost-effective total-body PET scanner to be built, thanks to the high availability of atmospheric Argon that can be isotopically distilled as needed, along with potential for the availability of underground Argon. The preliminary results here demonstrate that, while the spatial resolution is comparable to that of commercial scanners, the 3D π scanner is expected to show outstanding detection sensitivity, allowing for a reduction of the PET scanning time or a reduction of the patient dose.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ НА ТЕМУ:
ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННЫЙ ТОМОГРАФ НА ЖИДКОМ АРГОНЕ

Научный руководитель
к.ф.-м.н., ст. преподаватель
Гробов А.В.

Выполнил
студент группы М19-115
Левашко Н.М.



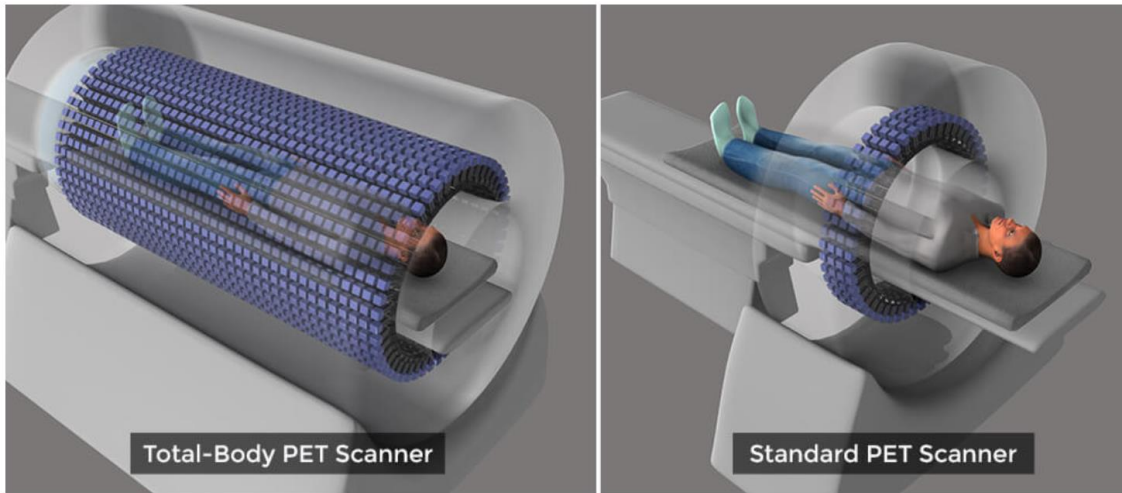
Москва 2020



Преимущества томографа на аргоне

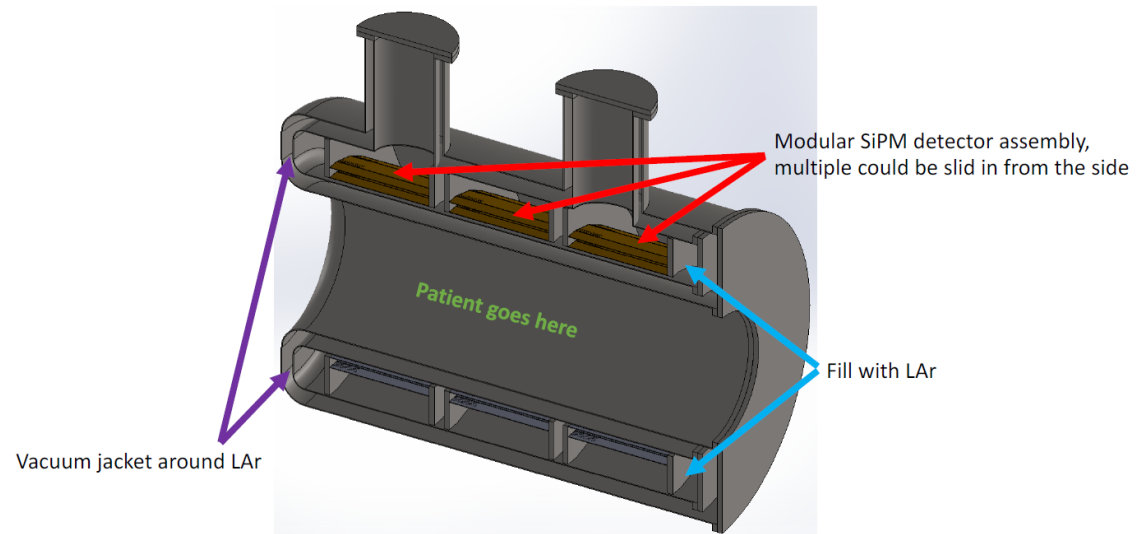
- Быстрая сцинтилляционная компонента ~ 6 нс (медленная компонента \sim мс может быть подавлена)
- 40 000 сцинтилляционных фотонов на 1 МэВ, на 30% больше чем LYSO
- Значительно более низкая цена за атмосферный аргон (1/5000)
- Благодаря чувствительности SiPM можно будет существенно снизить дозу радиоактивного препарата
- Время, проведенное пациентом внутри сканера, сокращается с ~ 10 мин до ~ 10 сек. Это позволит повысить количество пациентов в день
- Благодаря скорости сканирования и высокой чувствительности можно реализовать ситуацию, когда проводятся несколько сканирований в течение нескольких дней при разовом введении радионуклида пациенту. Это позволит изучить динамику развития болезни

Total-Body TOF-PET



<https://www.cancer.gov/news-events/cancer-currents-blog/2017/total-body-pet>

Conceptual Design of a LAr PET Detector



Благодарю за внимание !

