



Последние результаты эксперимента NA64 в ЦЕРН

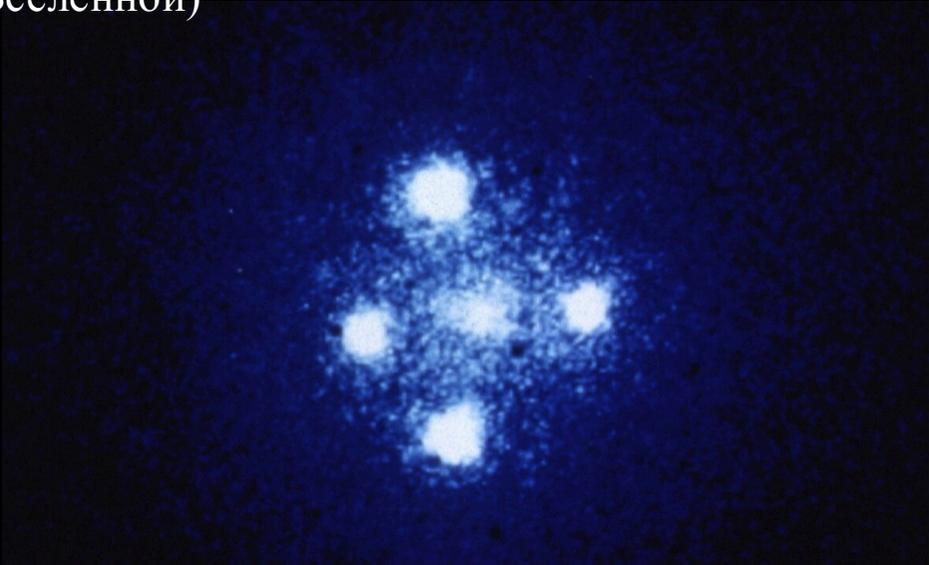
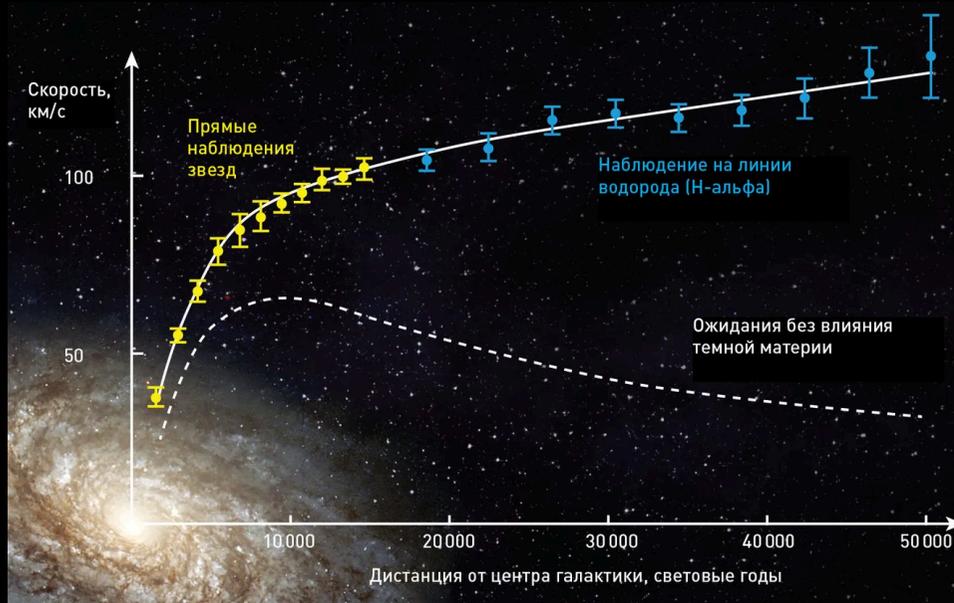
Д.Пешехонов (ОИЯИ, Дубна)

**Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная
70-летию В.А.Рубакова, 17-21 февраля 2025 г.**



Темная материя

- косвенные доказательства существования (скорость вращения галактик, гравитационное линзирование, микроволновой фон, структура Вселенной)



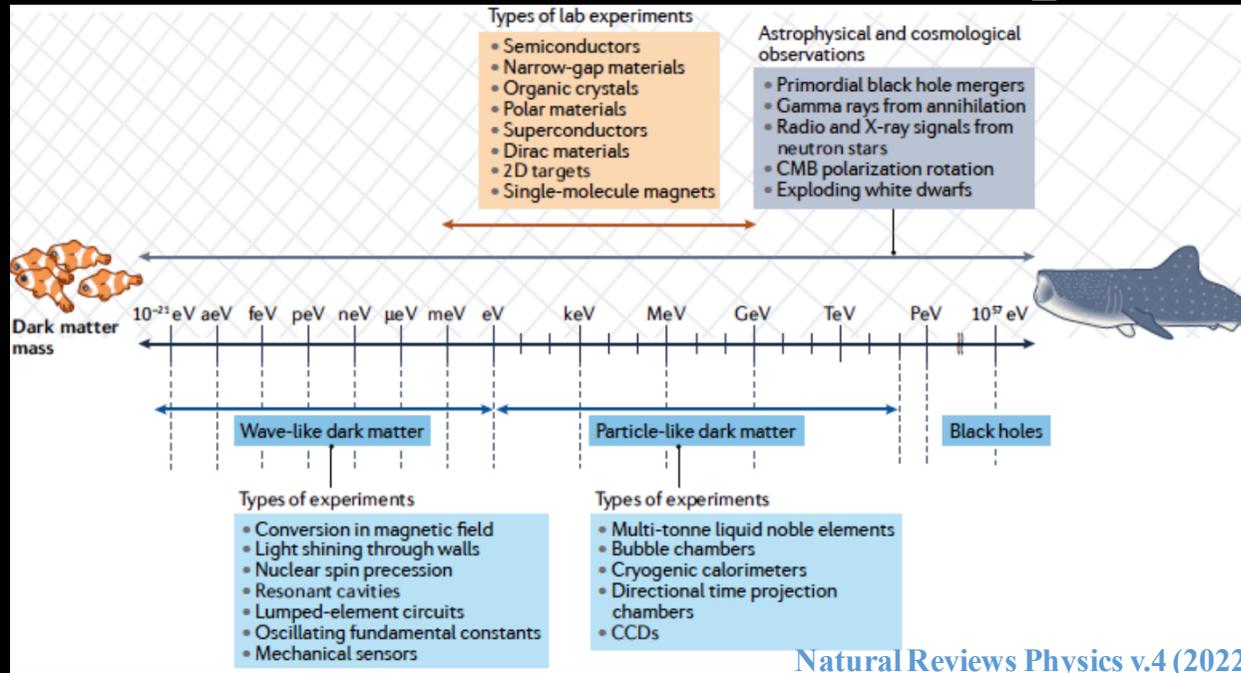
- не участвует в электромагнитном взаимодействии
- не является барионной
- составляет около 85% массы Вселенной



Природа ТМ - ?



Темный сектор



- “fuzzi DM” $\sim 10^{-22}$ эВ (длина волны де Бройля \sim размера галактик) – успешно объясняет структуру и особенности движения галактик;
- массивные компактные объекты («первичные» черные дыры, нейтронные звезды);
- аксионы и ALP;
- стерильные нейтрино
- WIMP: массивные частицы, Э-С шкала;
- легкая темная материя



Темный сектор ($v \ll c$)

Прямой поиск: детекторы на основе газов (XENON, PandaX, DarkSide, ...); кристаллов (CDMS, CRESST, EDELWEISS, ...); пузырьковые камеры (PICO)

Косвенный поиск: гамма/нейтрино/радио телескопы; наблюдение за космическими лучами (IceCube, Baikal, AMS, MAGIC, ...);

Ускорительные эксперименты:

- БАК (WIMP)
- выведенные пучки (LDM)



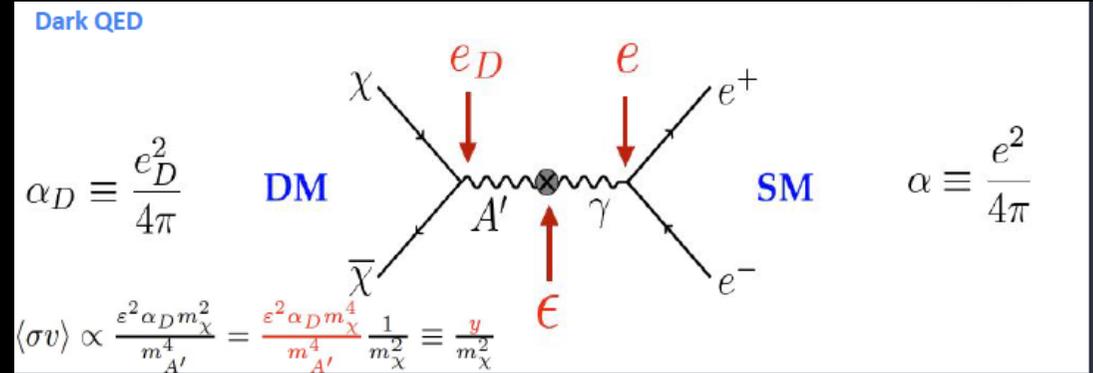
Легкая темная материя

Суб-Гэвные частицы темного сектора очень слабо (ϵ) взаимодействующие с частицами СМ:

- Векторный портал (**темный фотон A'**)
- Скалярный (темный Хиггс бозон)
- Псевдо-скалярный (аксион)
- Фермионный (тяжелый лептон)

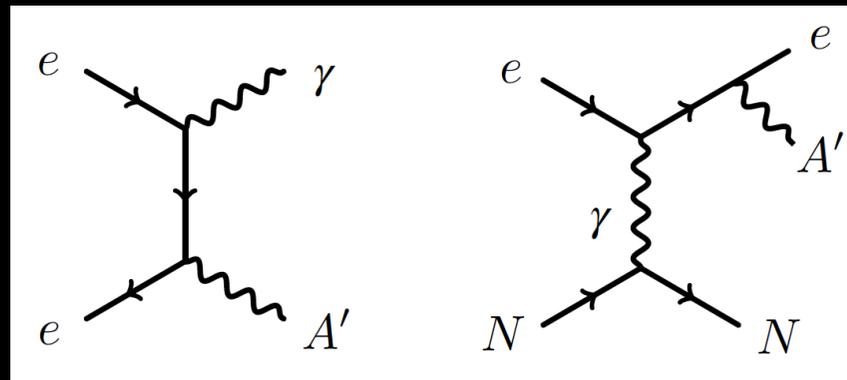
Для A' четыре параметра: ϵ , α_D , m_χ , $m_{A'}$

$$y = \epsilon^2 \alpha_D (m_\chi / m_{A'})^4$$



Брейт-Вигнер подобное сечение с максимумом при $M_{A'}^2 = 2m_e E_{e^+}$

$$\sigma \sim \epsilon^2 Z \alpha_{EM}$$



аннигиляция

тормозное излучение

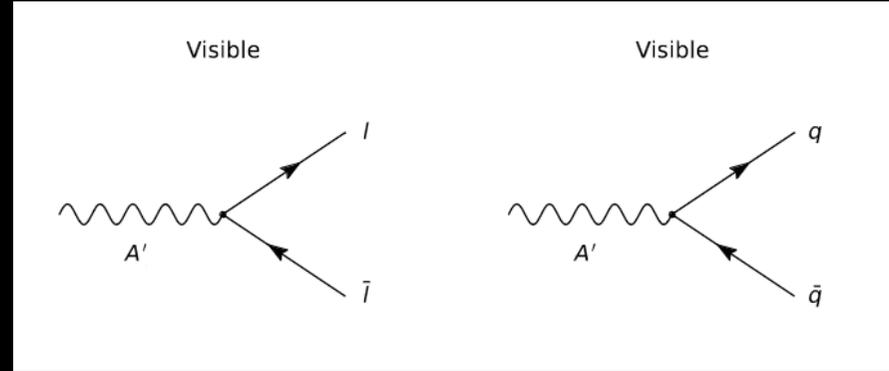
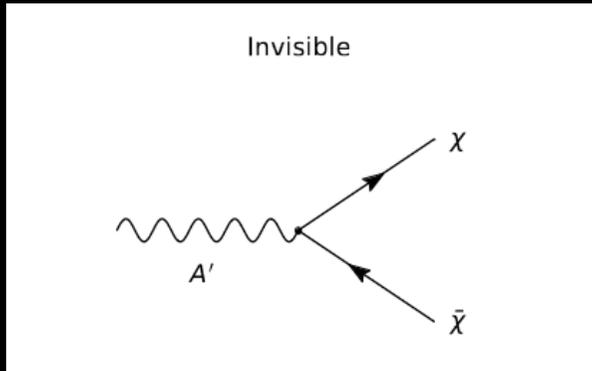
$$\sigma \sim \epsilon^2 Z^2 \alpha_{EM}^3$$



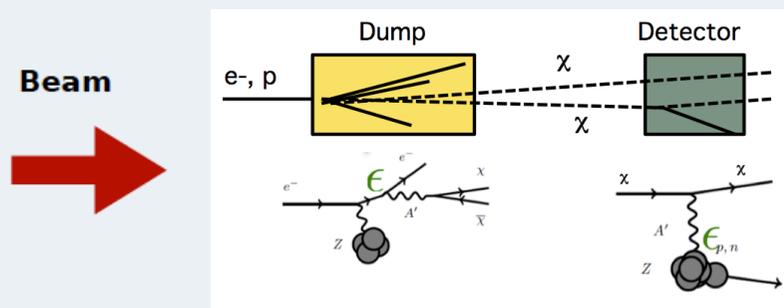
Постановка эксперимента

$$m_{A'} > 2m_\chi, A' \rightarrow \chi\bar{\chi}$$

$$m_{A'} < 2m_\chi, A' \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, \dots$$



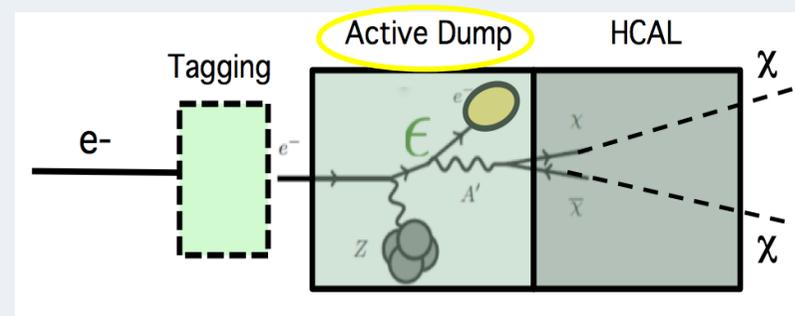
1) BEAM DUMP APPROACH (MiniBooNE, LSND, NA62, SHIP, T2K, DUNE...)



$$\sigma \propto \epsilon^4 \alpha_D$$

Сигнал: регистрация частицы ТМ в дальнем детекторе

2) NA64, LDMX APPROACH



$$\sigma \propto \epsilon^2$$

«недостающая энергия»



Эксперимент NA64

Коллаборация NA64: ~ 60 исследователей из Германии, Испании, Италии, Канады, ОИЯИ, Чили, Швейцарии

2014 – проект P348: эксперименты на пучках SPS CERN по прецизионному поиску легкой темной материи в суб-ГэВной области с применением техник «active dump» и «недостающая энергия»;

2016 – SPSC одобрил проведение эксперимента на электронном пучке (NA64e⁻);

2021 – SPSC одобрил эксперимент на мюонном пучке (NA64μ)

Физическая программа

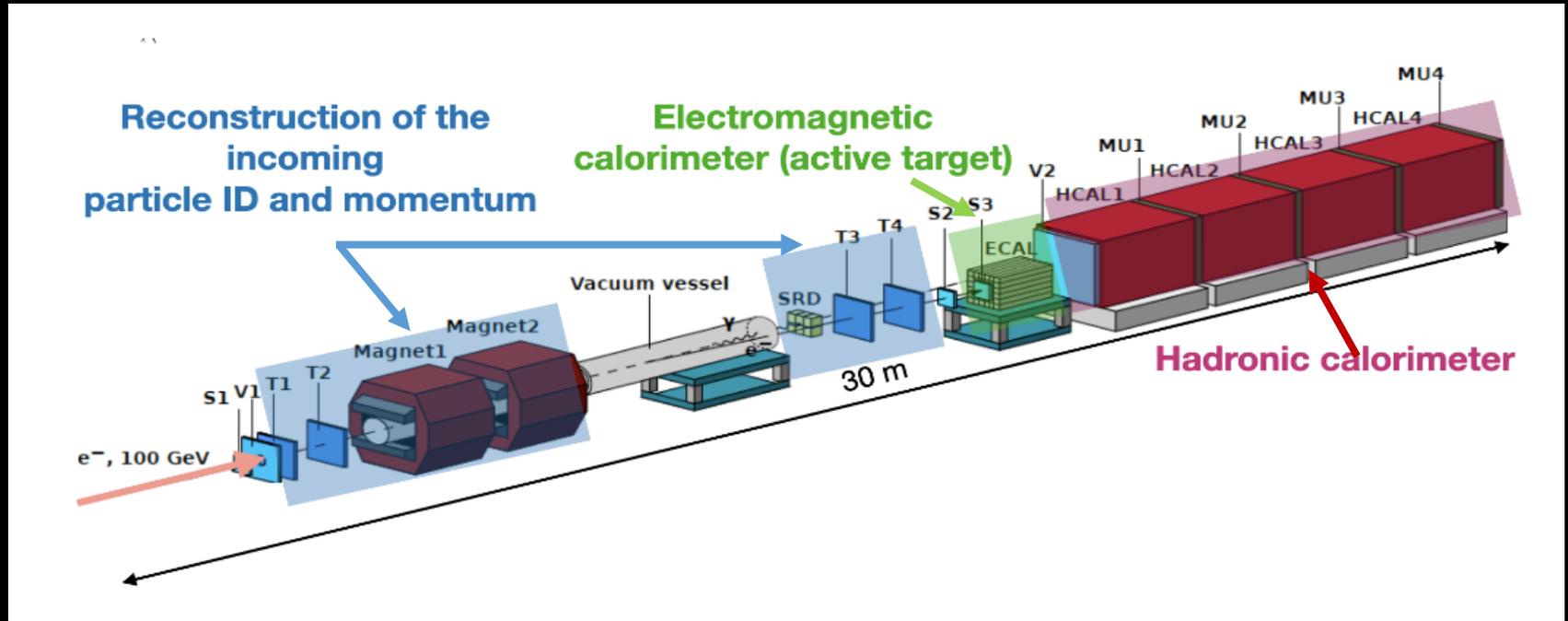
NA64e⁻, NA64e⁺ (50-150 GeV e[±]): поиск темного фотона A' и LDM

NA64μ (100-160 GeV μ⁺): физика BSM: Z' (L_μ-L_τ; B – L; ...), LDM

*NA64h (π⁻, K⁻, p): поиск лептофобного темного сектора
взаимодействующего с кварками*



NA64e⁻



Установка NA64e

Магнитный спектрометр:

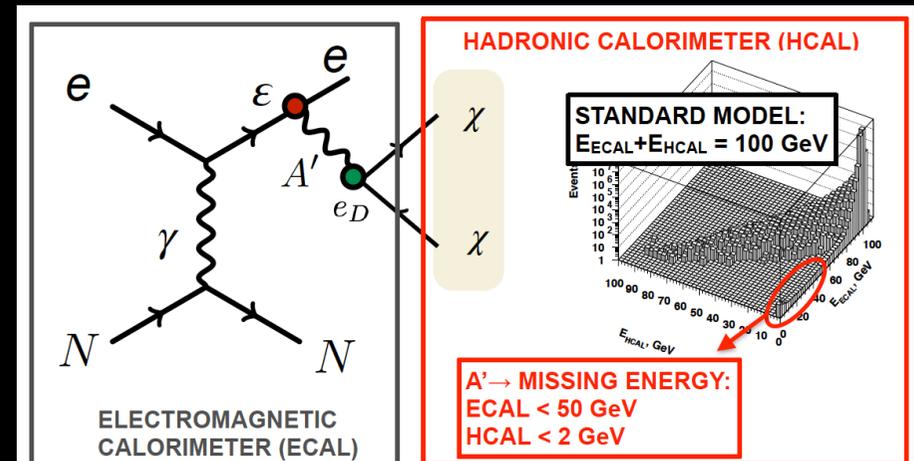
- MM, GEM, Straw, интеграл поля 6,8T, $\Delta p/p \sim 1\%$;

SRD:

- кристаллы LYSO 32x48x45 мм³; $\langle N\gamma \rangle \sim 30 \gamma/s$,
 $\langle E_\gamma \rangle \sim \text{МэВ}$ $\epsilon_{\text{SRD}} > 0.95$, $\pi/e \sim 10^{-6}$

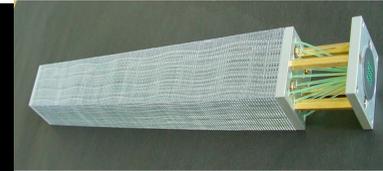
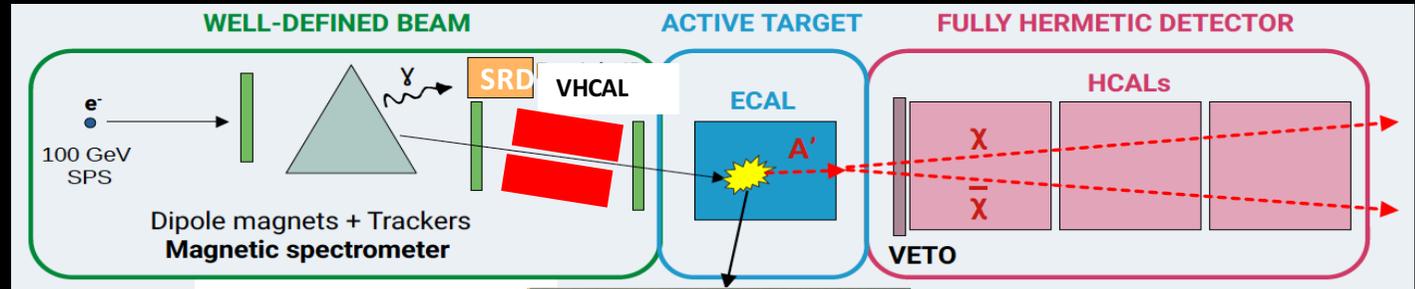
Активная мишень: 40X₀ Pb/Sc калориметр, 20x24см²(5x6)
 150x(1.5мм Pb+1.5мм Sc); $\sim 10\%/\sqrt{E} + 3\%$

Адронный калориметр: 4x7,5λ; 48x(25мм Fe+4мм Sc)
 $\sim 60\text{x}60\text{см}^2$; $\sim 60\%/\sqrt{E}$





NA64e⁻

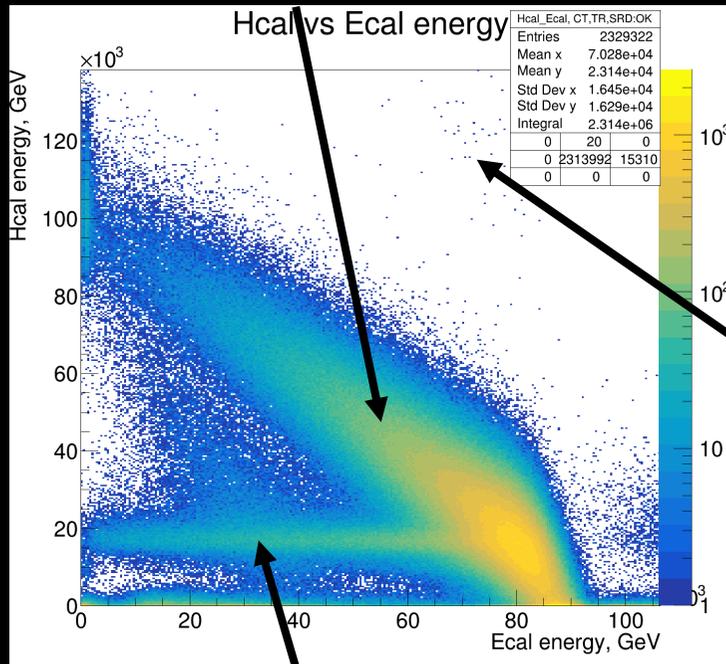


Критерии отбора:

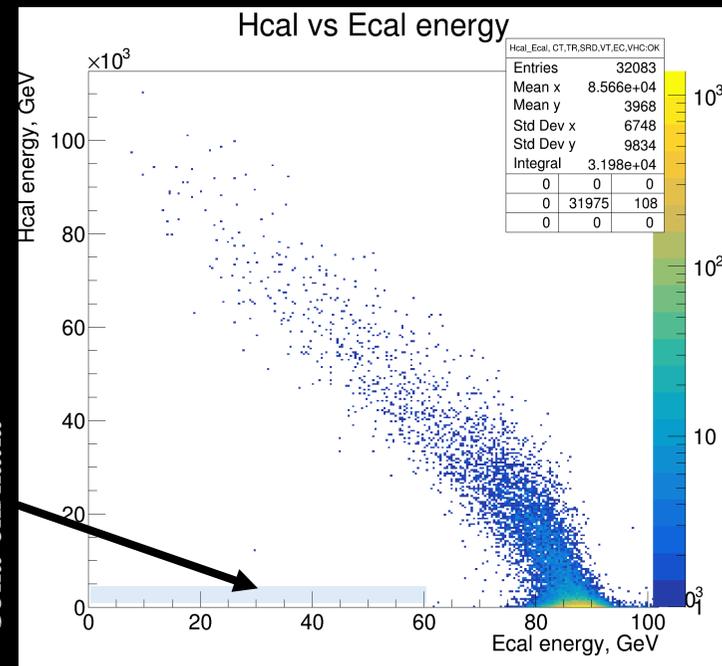
Timing (pile up suppression) + Clean e⁻ track (single hit, correct angle and momentum) + Synchrotron radiation signal + Shower in ECAL compatible with e⁻ + No activity in Veto

Зона II: событие CM

$$E_{ECAL} + E_{HCAL} = 100 \text{ ГэВ}$$



Зона III: наложение сигналов (pile up)

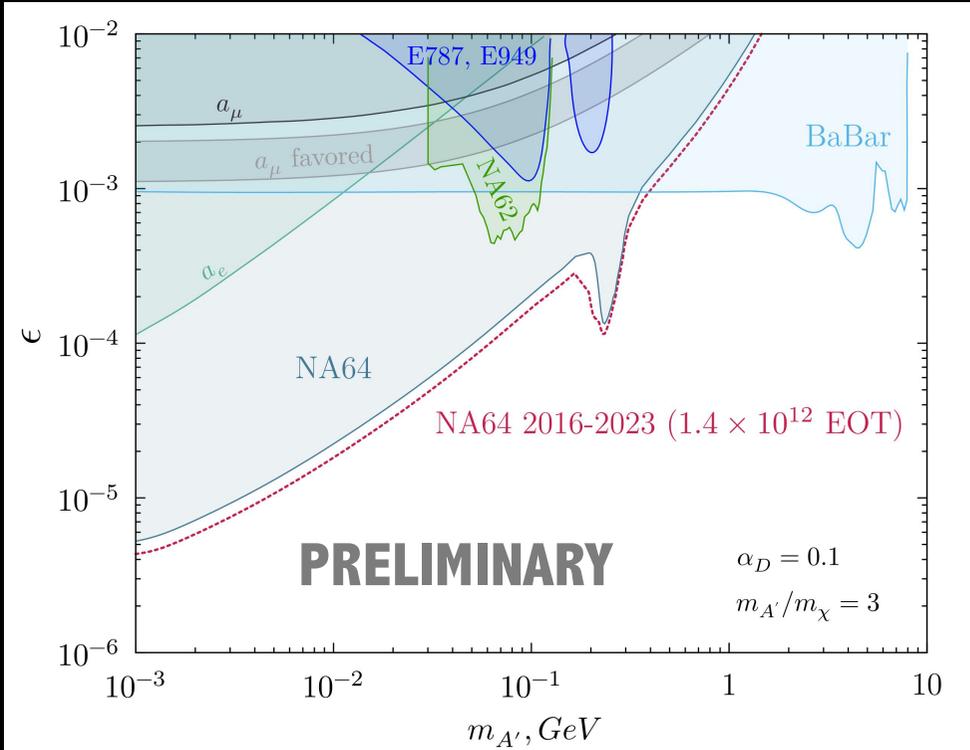
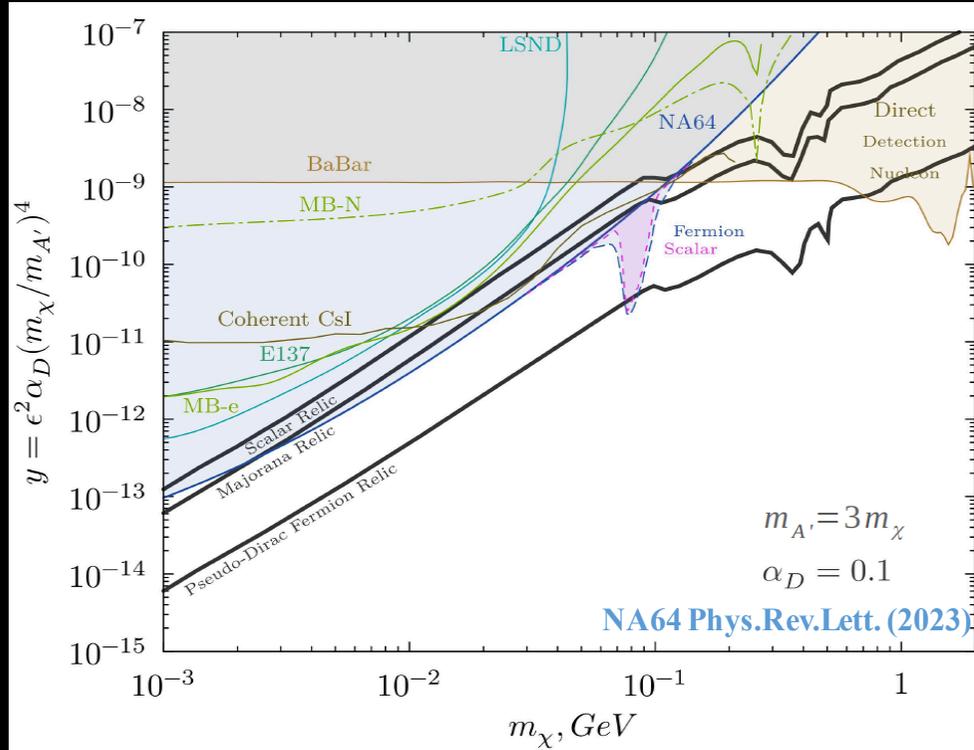


Зона I: сигнал

Зона I: e⁻Z → e⁻Zγ ; γ → μ⁺μ⁻ (reference)



NA64e⁻

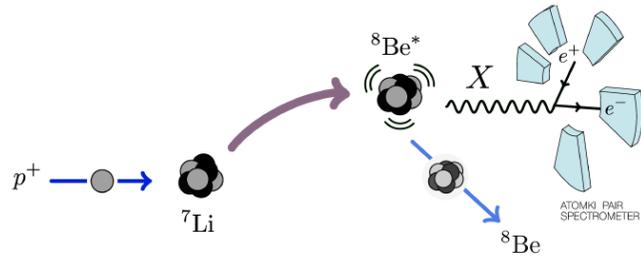


	2016-2022	2023	2024	TOTAL
NA64e	9.7x10 ¹¹ EOT	4.4x10 ¹¹ EOT	5.2x10 ¹¹ EOT	1.9x10 ¹² EOT

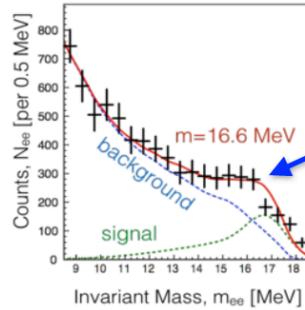
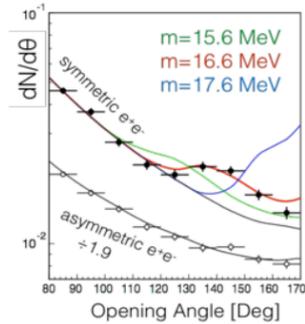


NA64e⁻ - что еще?

⁸Be anomaly and X boson

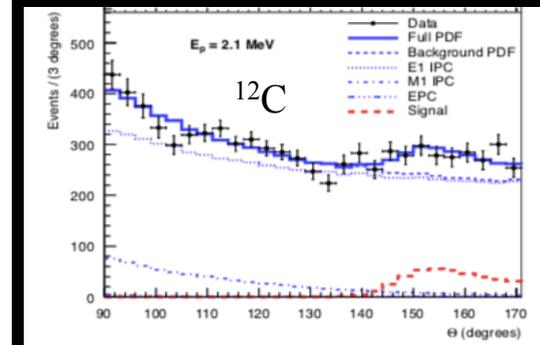
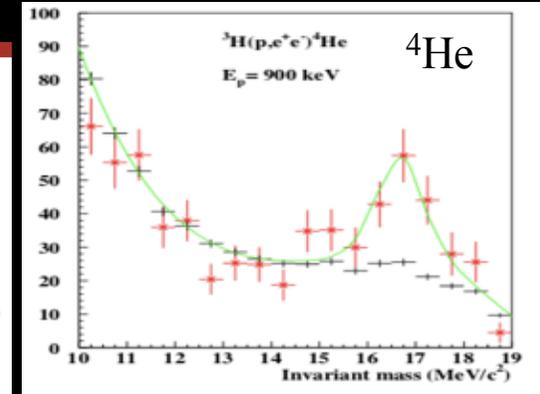


A. J. Krasznahorkay et al. Phys. Rev. Lett.116, 042501 (2015)
and recent results for 4He arXiv:1910.10459

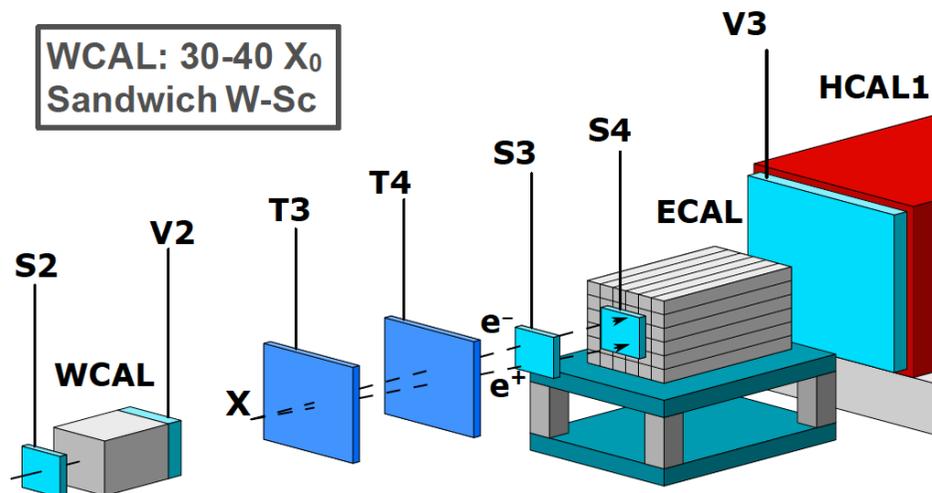


Could be explained by new 'protophobic' gauge boson X with mass around 17 MeV

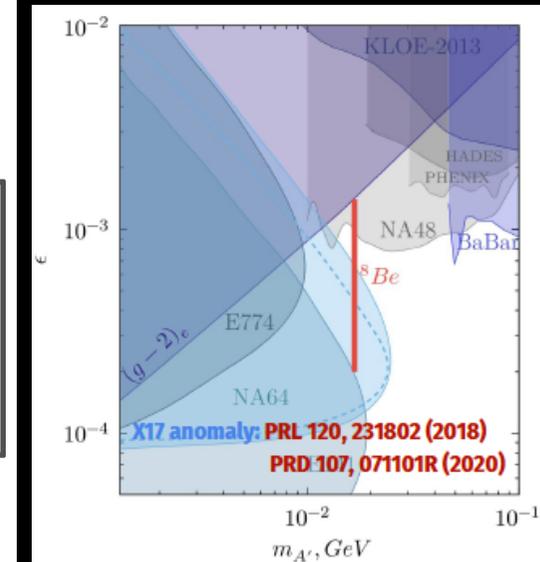
J. L. Feng et al. Phys. Rev. D95, 035017 (2017)



WCAL: 30-40 X₀
Sandwich W-Sc



- Signature:**
- 1) $E_{WCAL} + E_{ECAL} = 100$ GeV
 - 2) No activity in V_{2,3} and HCAL
 - 3) Signal in S3, S4
 - 4) e-m shower in ECAL

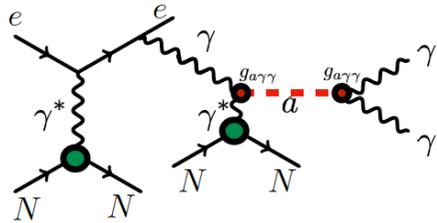




NA64e⁻ - что еще?

ALP

(g-2)_e



Production via Primakoff effect

$e^-Z \rightarrow e^-ZX$; $X \rightarrow \text{invisible}$

X: scalar (S), pseudoscalar (P), vector(V), axial (A)

e-X: interaction with coupling strength $g_X = \epsilon_X e$

$$\mathcal{L}_S = g_S \bar{e} e S$$

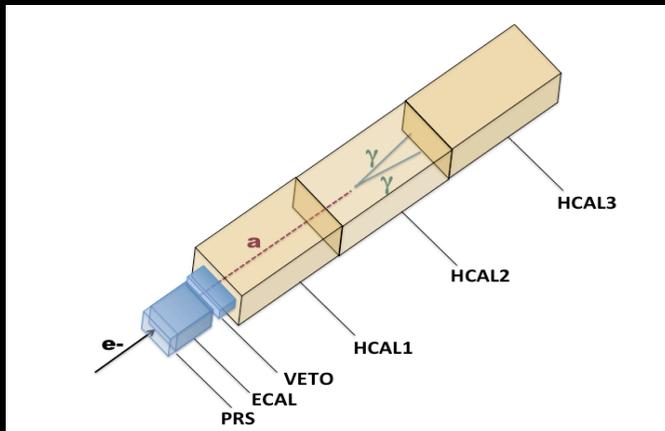
$$\mathcal{L}_P = i g_P \bar{e} \gamma_5 e P$$

$$\mathcal{L}_V = g_V \bar{e} \gamma_\mu e V_\mu$$

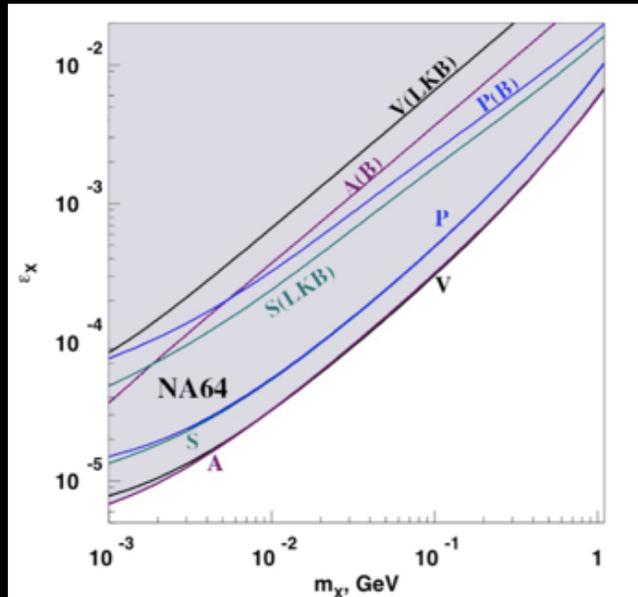
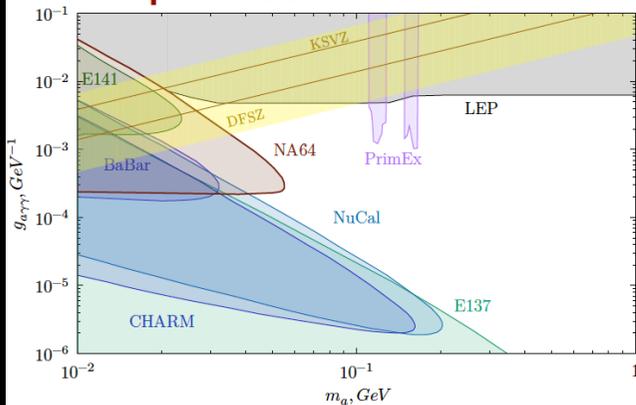
$$\mathcal{L}_A = g_A \bar{e} \gamma_\mu \gamma_5 e A_\mu$$

$$\Delta a_e = a_e^{exp} - a_e^{LKB} = (4.8 \pm 3.0) \times 10^{-13} \quad (1)$$

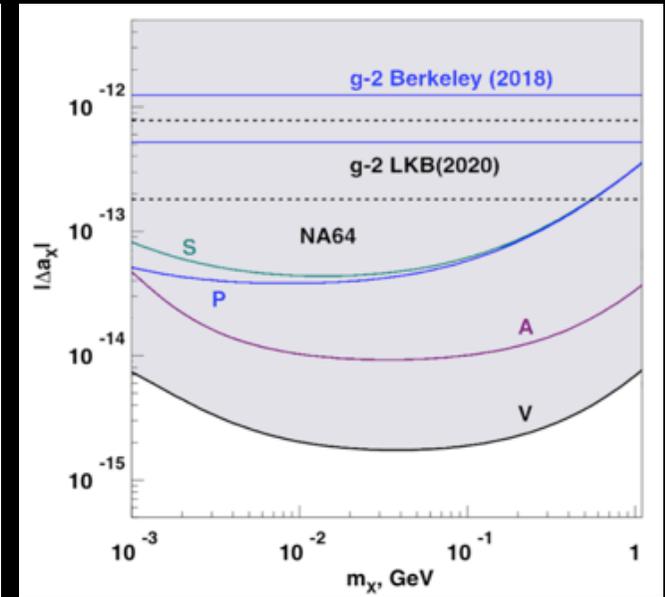
$$\Delta a_e = a_e^{exp} - a_e^B = (-8.8 \pm 3.6) \times 10^{-13} \quad (2)$$



Closing the gap between beam dump and colliders



NA64, Phys.Rev.Lett.(2021)



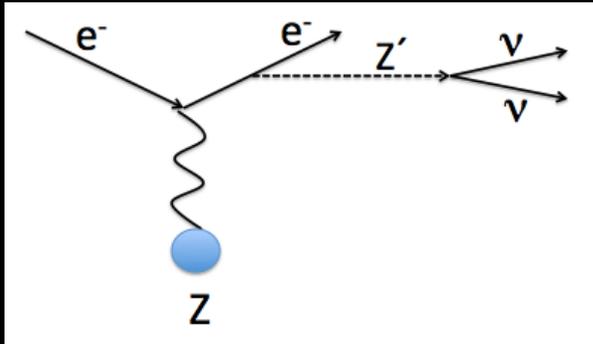
Данные NA64e⁻ дают ограничения конкурирующие с прецизионными измерениями на Δa_e LKB и Berkley



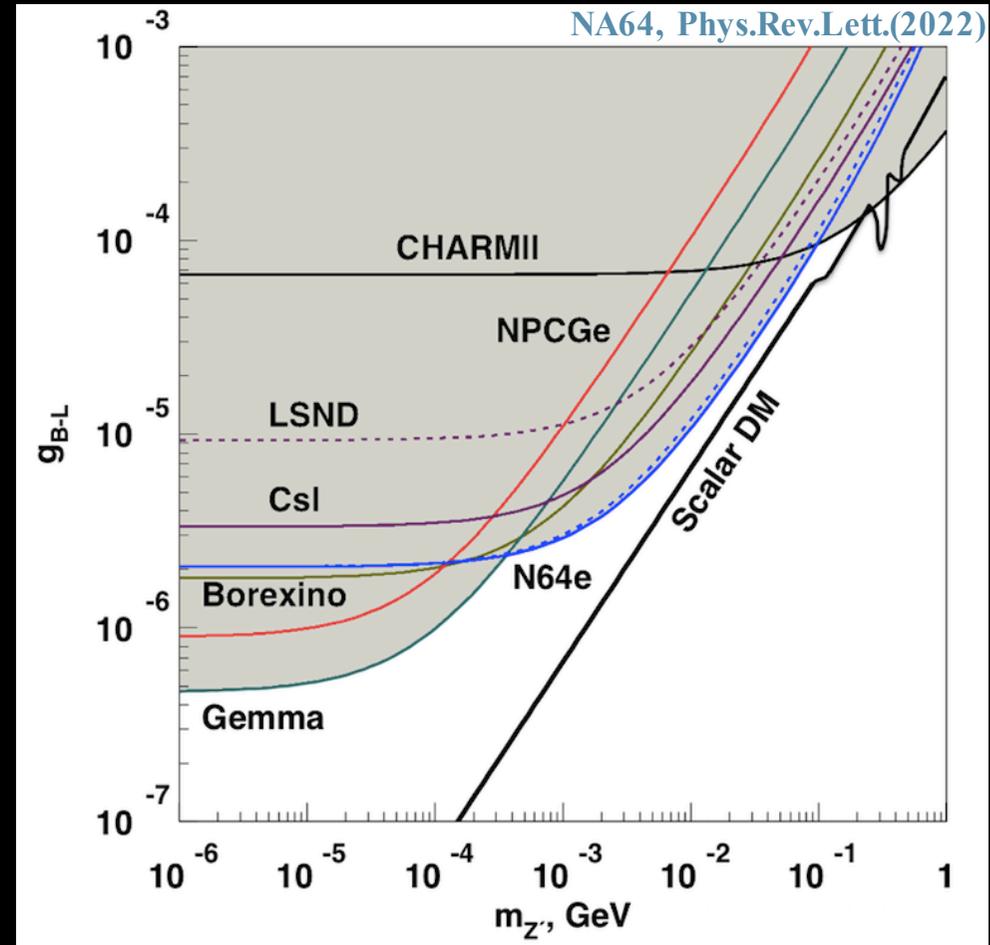
NA64e⁻ - что еще?

Поиск B-L Z' бозона

Анализ 3.2x10¹¹ еот. Данные 2016-2018 & 2021



$$\mathcal{L} \supset g_{B-L} Z'_\mu \sum_{\text{families}} \left[\frac{1}{3} \bar{q} \gamma^\mu q - \bar{l} \gamma^\mu l - \bar{\nu} \gamma^\mu \nu \right]$$

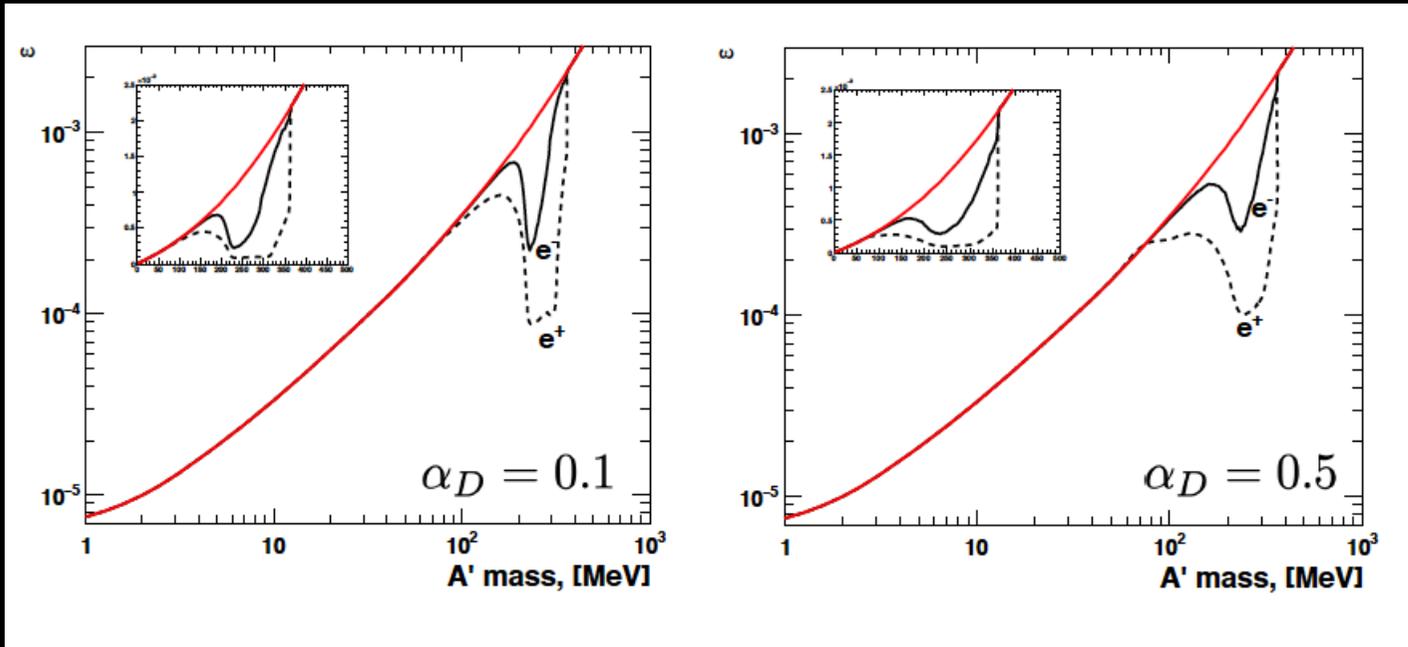


Ограничения NA64 на B-L Z' сравнимы с данными экспериментов по ν - e⁻ рассеянию



NA64e⁺

Преимущества

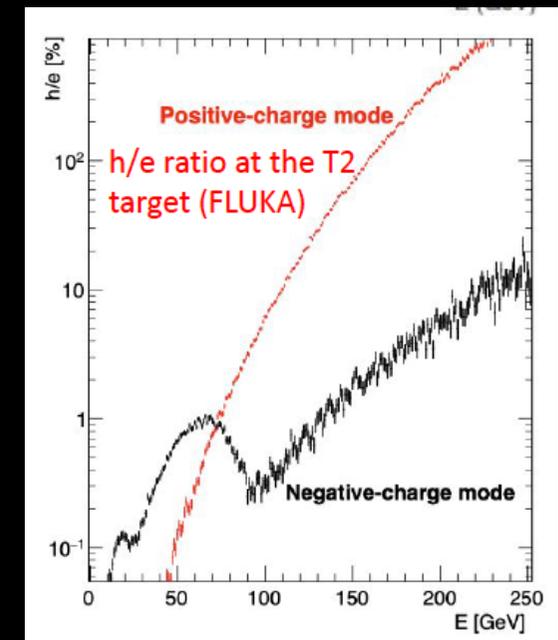


Поиск A' на пучках e^+ с энергией 100 ГэВ

В области $m_{A'} \sim 200-300$ МэВ фактор улучшения $\epsilon \sim 10$, или $\sim 10^2$ для $y \sim \epsilon^2$

Набрано $\sim 10^{11}$ e^+ планируется увеличить статистику до несколько единиц на 10^{12} включая «низкоэнергетический скан» до $E_{e^+} \sim 40$ ГэВ

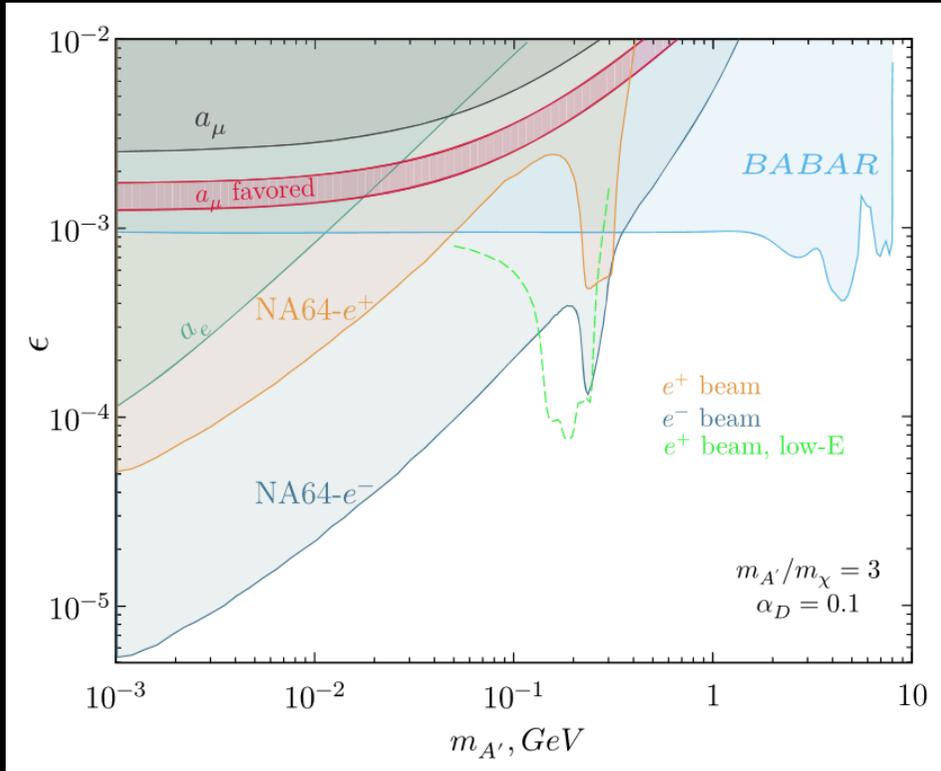
Недостатки



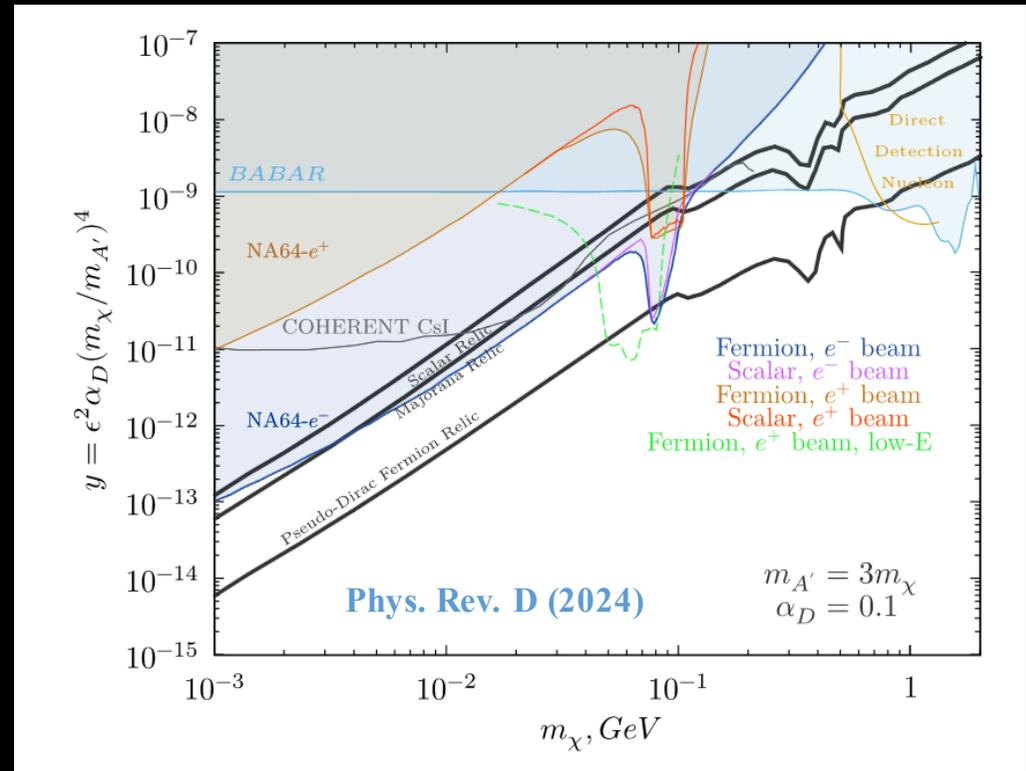
Для 100 ГэВ примесь адронов в пучке $e^- \sim 0,3\%$, что на порядок меньше чем в пучке e^+ , с ростом энергии проблема возрастает



NA64e⁺



Ограничения полученные на пучках e⁺ в пространстве переменных (ϵ , $m_{A'}$) для $\alpha_D = 0.1$. Также показаны ограничения BABAR и NA64e⁻, Зеленым пунктиром показан результат NA64e⁺ при скане с понижением энергии.



Ограничения NA64 e⁺ в пространстве переменных (m_{χ} , y) для $\alpha_D = 0.1$.

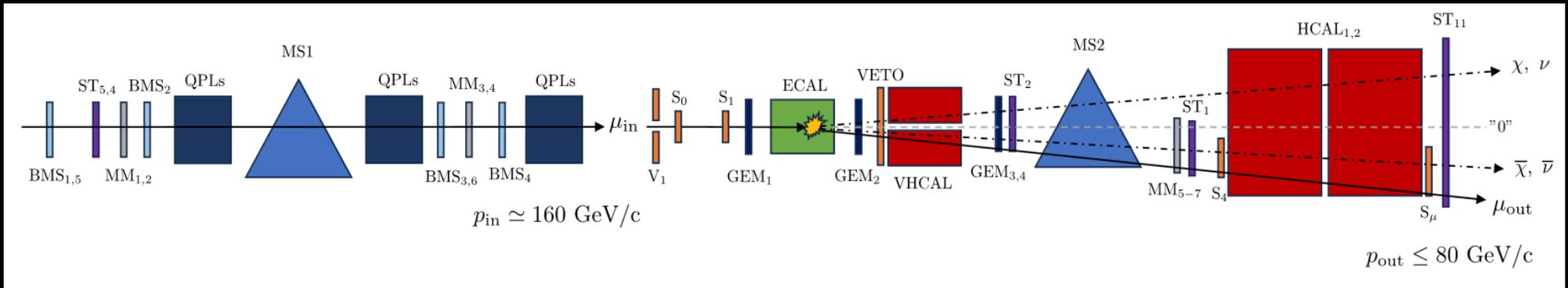


NA64 μ

160 ГэВ мюонный канал M2 SPS предоставляет уникальные возможности для поиска возможного объяснения $(g-2)_\mu$ и частиц «темного сектора»

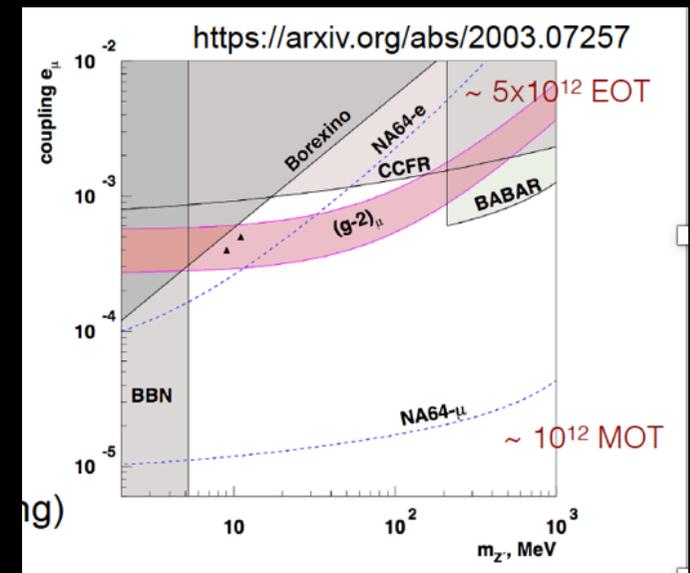
$$\mu + Z \rightarrow \mu + Z + Z_\mu, Z_\mu \rightarrow \nu\bar{\nu}$$

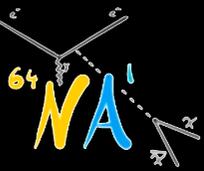
L_μ - L_τ models Z_μ could explain $(g-2)_\mu$



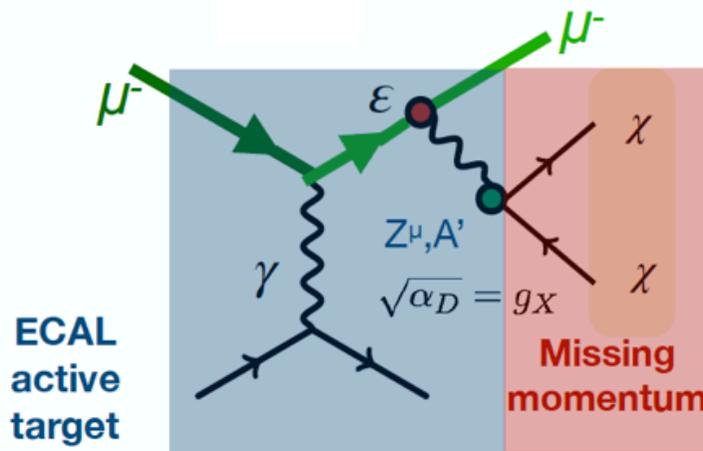
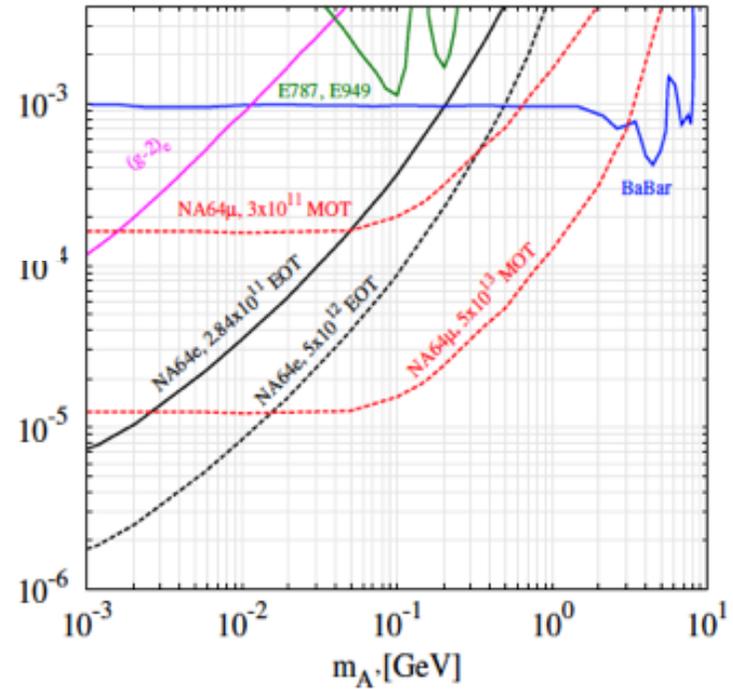
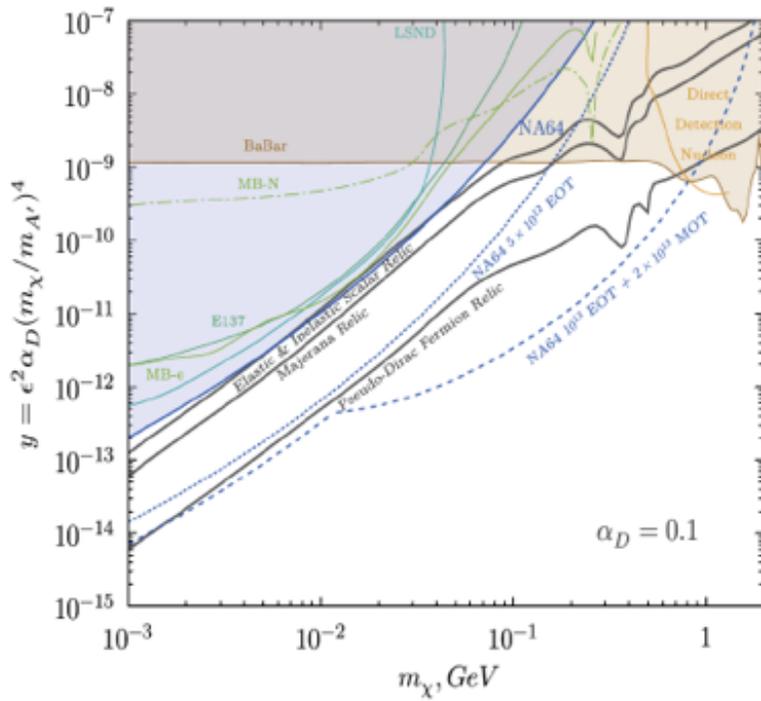
Иная методика проведения эксперимента

	2022	2023	2024	TOTAL
NA64μ	2.0x10 ¹⁰ MOT	1.5x10 ¹¹ MOT	1.5x10 ¹¹ MOT	3.2x10 ¹¹ MOT



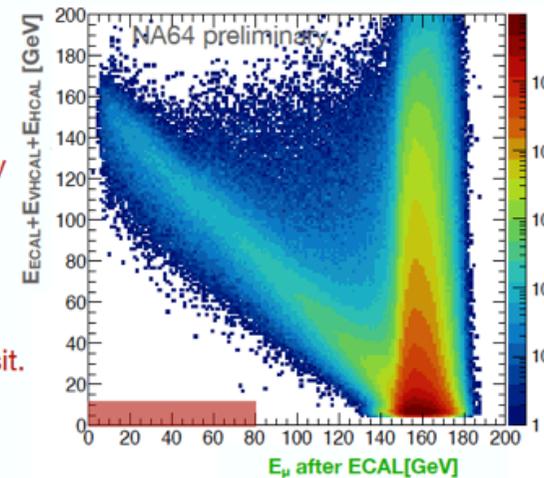


NA64μ (оценки)



Signature

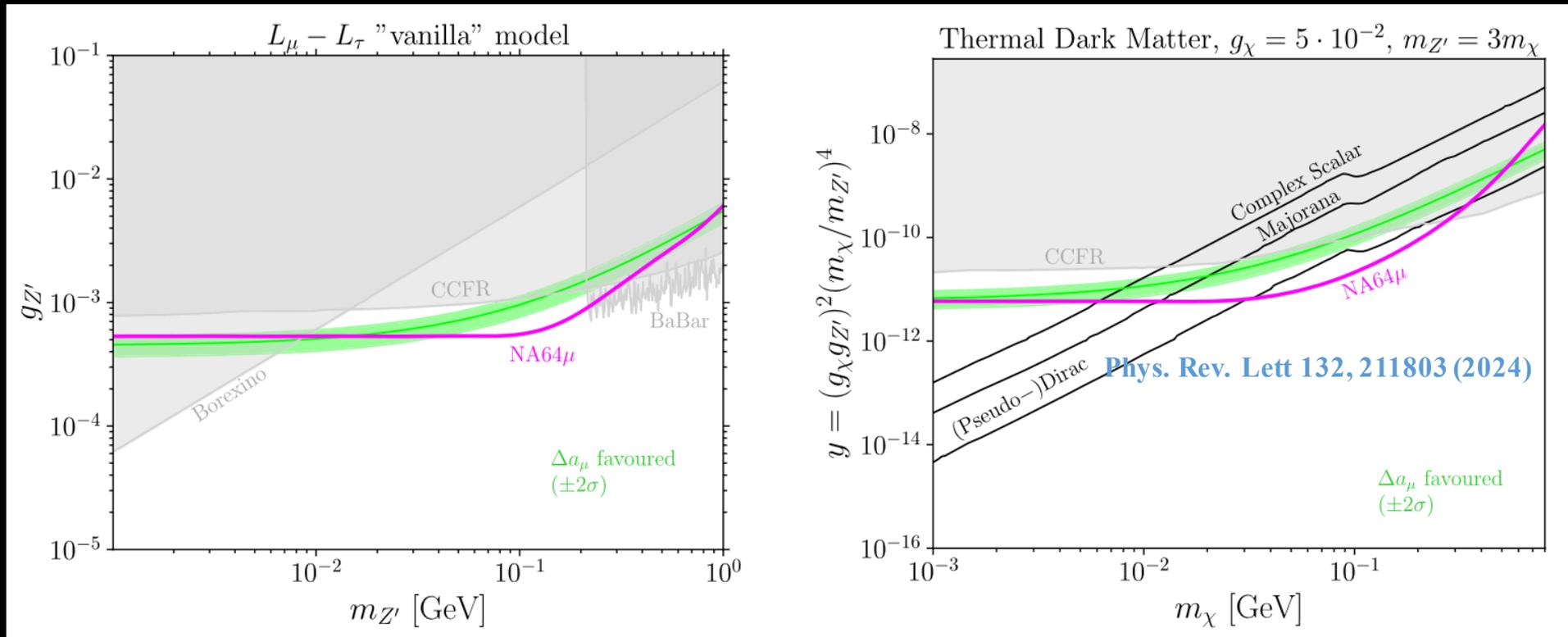
- Missing momentum (Deflected μ^- energy < 80 GeV).
- Energy on ECAL, VHCAL and HCAL compatible with a muon energy deposit.



Z^μ, A' decaying to DM particles



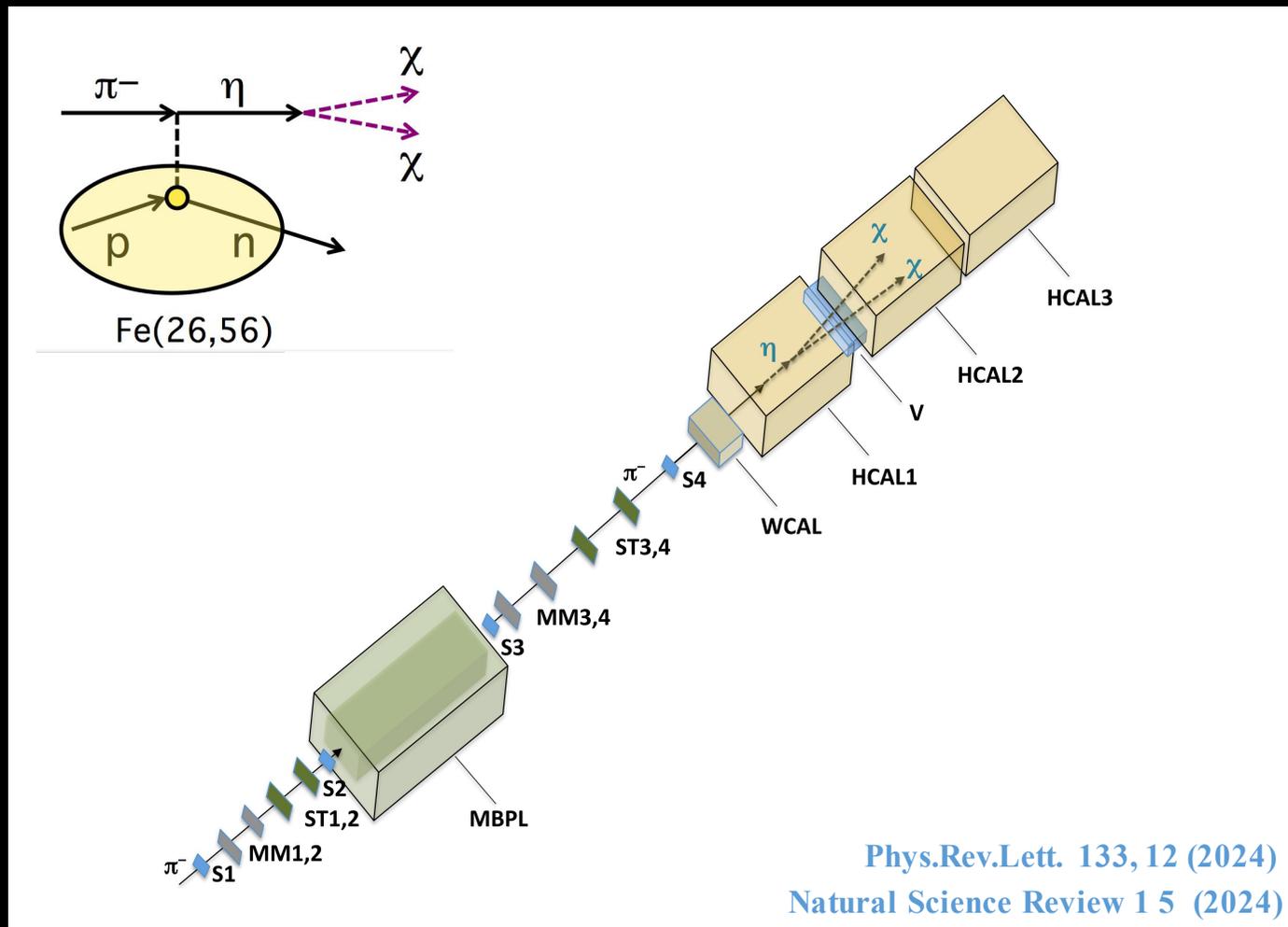
NA64μ (первые результаты)



Left: NA64μ 90% C.L. exclusion limits on the coupling $g_{Z'}$ as a function of the $m_{Z'}$, for the vanilla $L_\mu - L_\tau$ model. The 2σ band for the Z' contribution to the $(g - 2)_\mu$ discrepancy is also shown. Existing constraints from BABAR and from neutrino experiments such as BOREXINO and CCFR are plotted. Right: The 90% C.L. exclusion limits obtained by the NA64μ experiment in the (m_χ, y) parameters space for thermal dark matter charged under $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ with $m_{Z'} = 3m_\chi$ and the coupling $g_\chi = 5 \times 10^{-2}$ for 2×10^{10} μot .

	2022	2023	2024	TOTAL
NA64μ	2.0×10^{10} MOT	1.5×10^{11} MOT	1.5×10^{11} MOT	3.2×10^{11} MOT

NA64h



50 ГэВ π^- , МIP в WCAL, отсутствие сигнала в HCALs

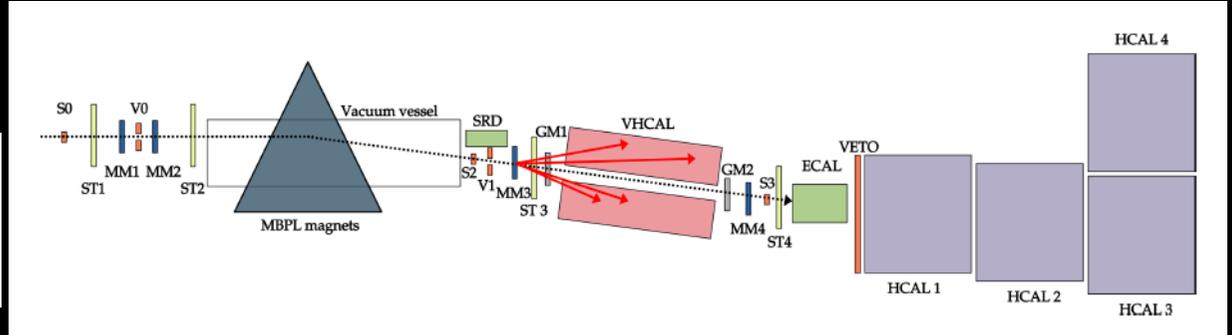
В 2022 году было набрано $\sim 3 \cdot 10^9$ π^- от для проверки возможности проведения эксперимента и оценки фона (ArXiv:2406.01990)

В октябре 2025 состоится тестовый сеанс на PS в рамках подготовки программы NA64h



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

NA64e набрал $\sim 2 \cdot 10^{12}$ eot; в 2025 году планируется сеанс длительностью 8-10 недель; в 2025 году калориметры будут оснащены быстрой ADC электроникой (250 МГц/14 бит), что позволит повысить эффективность и работать с интенсивностью выше в 1.5-2 раза; будет увеличена герметичность спектрометра за счет установки дополнительных VHICAL.



На установке NA64μ на 160 ГэВ пучке μ по программе поиска $L_\mu-L_\tau$ Z' бозона как возможное объяснение $(g-2)_\mu$ аномалии и в рамках расширения программы NA64e по поиску LDM, A' , $\mu \rightarrow \tau$ и $\mu \rightarrow e$ LFV процессов планируется зарегистрировать $\sim 2 \cdot 10^{13}$ μot



**Программа исследований NA64 актуальна и конкурентоспособна.
Планируется продолжение набора и анализа данных.**

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!