

- обзор физических результатов

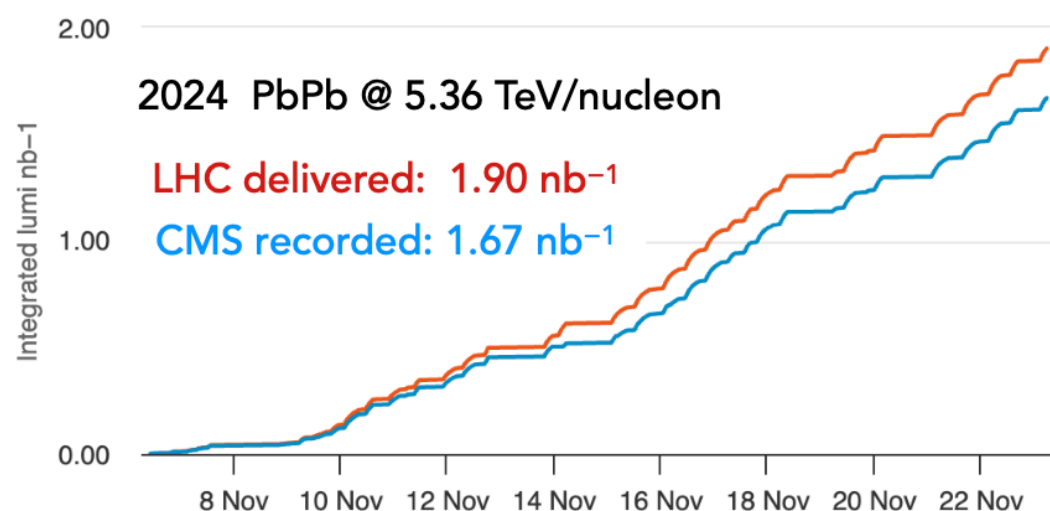
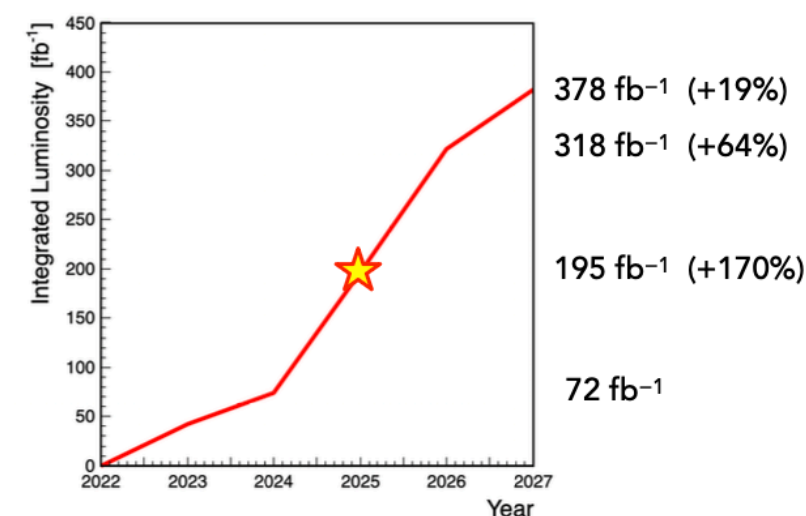
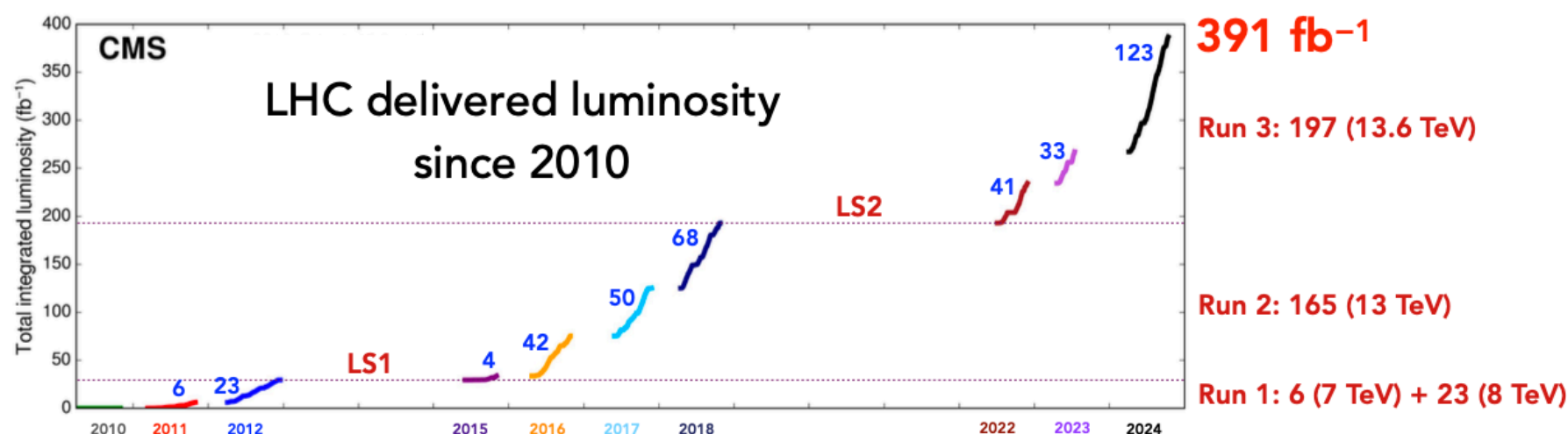
Анатолий Егоров

Научная Сессия ОФВЭ ПИЯФ

25 декабря 2024

НАБОР ДАННЫХ И ПУБЛИКАЦИИ В 2024

Набор данных 2024 (pp and PbPb)



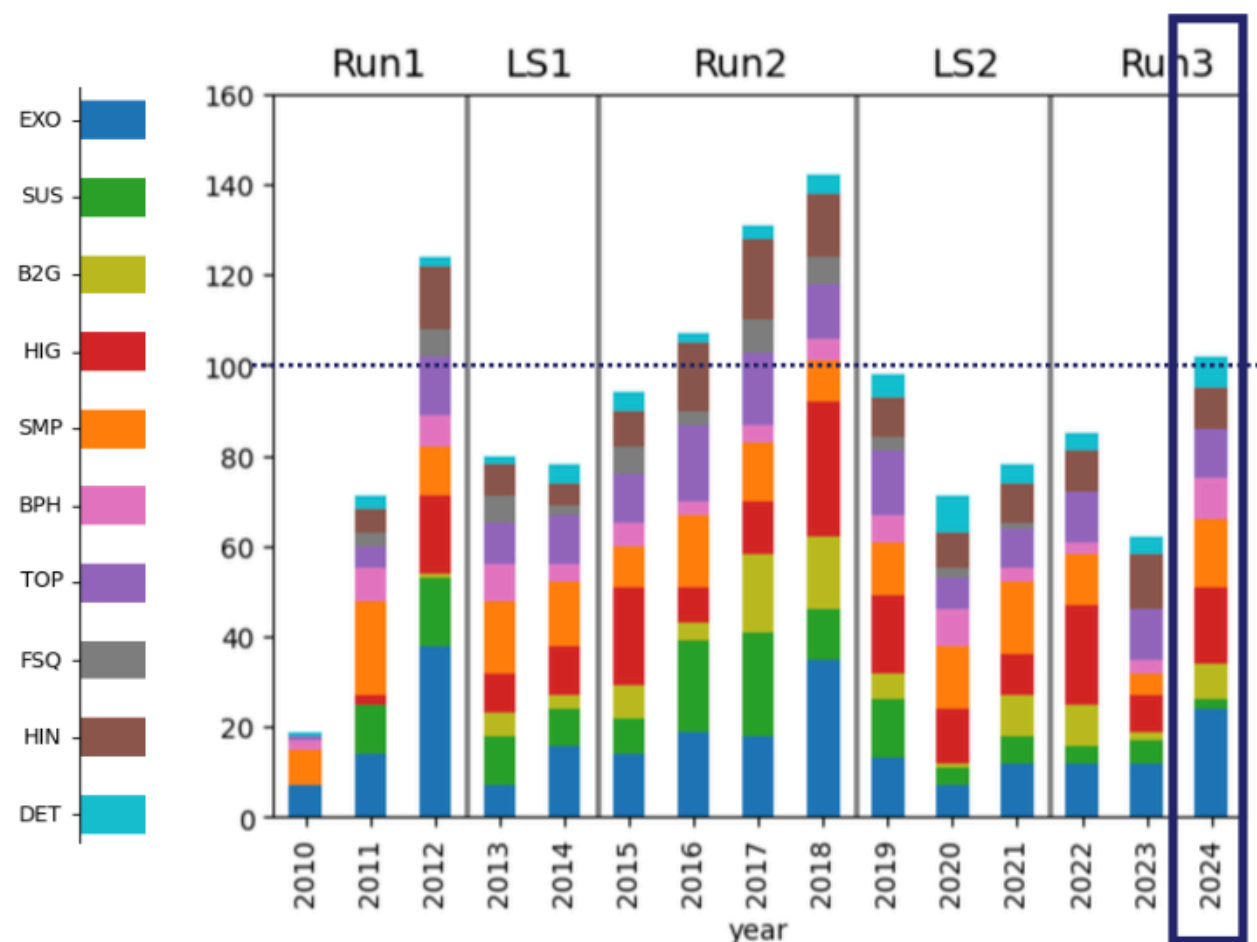
pp:

- 109 fb⁻¹ набранной интегральной светимости (29 fb⁻¹ (2023); 38 fb⁻¹ (2022); 140 fb⁻¹ (Run 2))
- PU ~ 57
- ~92% эффективность набора
- В прошлом году озвучивался план на Run 3 ~ 170 fb⁻¹

PbPb:

- 1.67 nb⁻¹ (1.82 nb⁻¹ (2023); 1.7 nb⁻¹ (2018))
- MB+High-pt ~ 15.11 В событий (~ примерно как 2023)
- UPC ~ 17.98 В событий (~ 8 В (2023))

Статистика публикаций



[Show all](#)
[Total](#)
[Exotica](#)
[Standard Model](#)
[Supersymmetry](#)
[Higgs](#)
[Top](#)
[Heavy Ions](#)

[B and Quarkonia](#)
[Forward and Soft QCD](#)
[Beyond 2 Generations](#)
[Detector Performance](#)

~1370 публикаций за все время

2024:

> 100 публикаций

> 110 одобренных новых результатов

~ 55 статей в финальной стадии

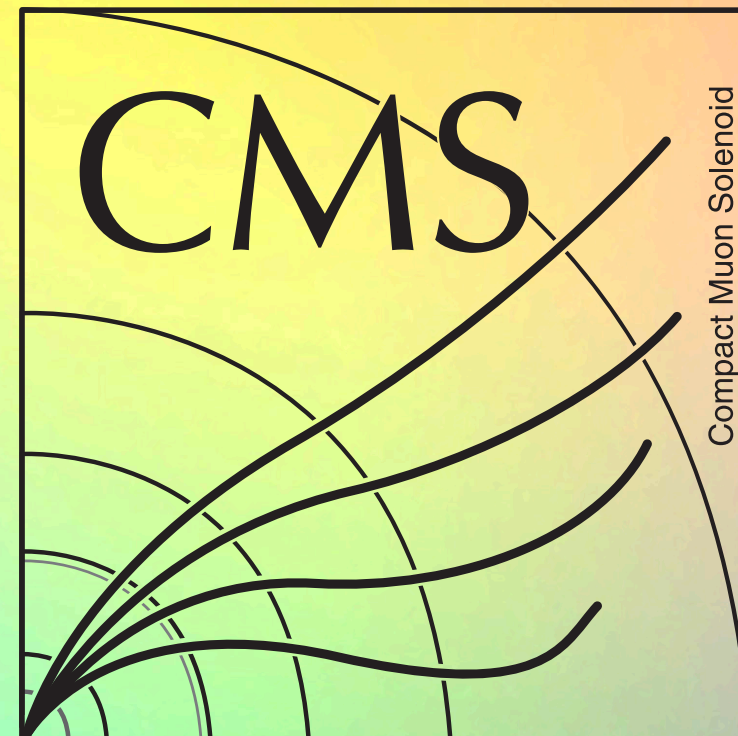
В основном все публикации по RUN2

Всего 7 публикаций по RUN 3 за все время

6 публикаций по RUN 3 в 2024

из них 5 по **pp** и 1 по **PbPb**

ФИЗИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ



Открытие \Rightarrow Точность \Rightarrow Открытие

- Адронные коллайдры: "машины для открытий"
- Электрон-позитронные коллайдеры: "машины для точных измерений"

Развитие компьютерных технологий позволяет экспериментам на БАК конкурировать с Электрон-Позитронными коллайдерами по точности.

Недавнее развитие:

- Широкое использование Машинного обучения (ML):
 - Отбор событий
 - Таггирование объектов
 - Структура адронных струй
 - Дискриминация
 - Обнаружение аномалий
 - Моделирование событий
- Новые детекторные сигнатуры событий
- Техники позволяющие обрабатывать и хранить больше данных



**Нобелевская премия
по физике 2024
за открытия в области
машинного обучения**

[John J. Hopfield](#) и [Geoffrey E. Hinton](#)

ML в физике частиц



**Нобелевская премия
по физике 2024
за открытия в области
машинного обучения**

[John J. Hopfield](#) и [Geoffrey E. Hinton](#)

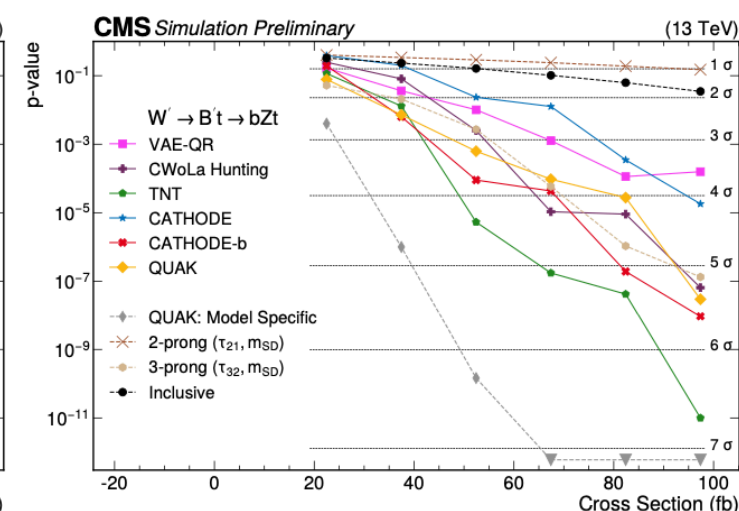
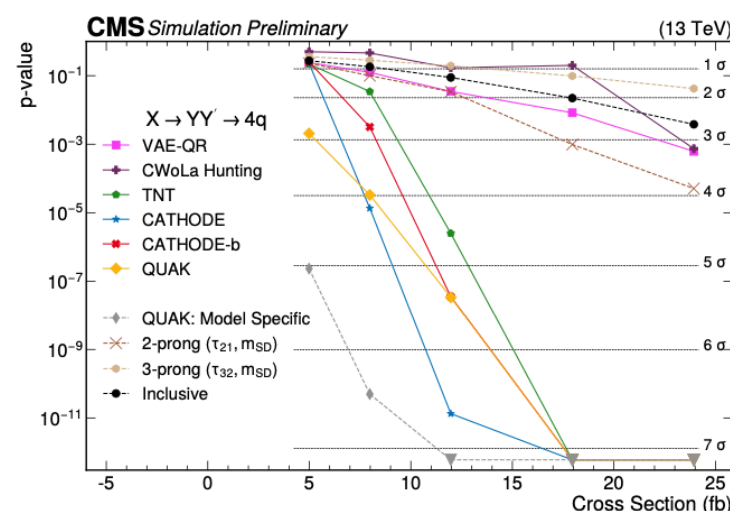
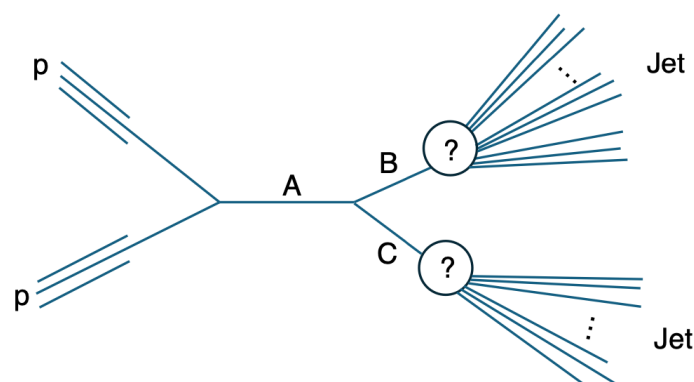
Может ли **ML** самостоятельно искать частицы ?

13 TeV: CMS [[CMS-PAS-EXO-22-026](#)]

Обычно в анализах ведется поиск одной конкретной сигнатуры событий за раз

Что если мы не видим новой физики (новых частиц), потому что ищем не в том направлении?

[[CMS-PAS-EXO-22-026](#)] использует алгоритмы ML для **Обнаружения Аномалий**



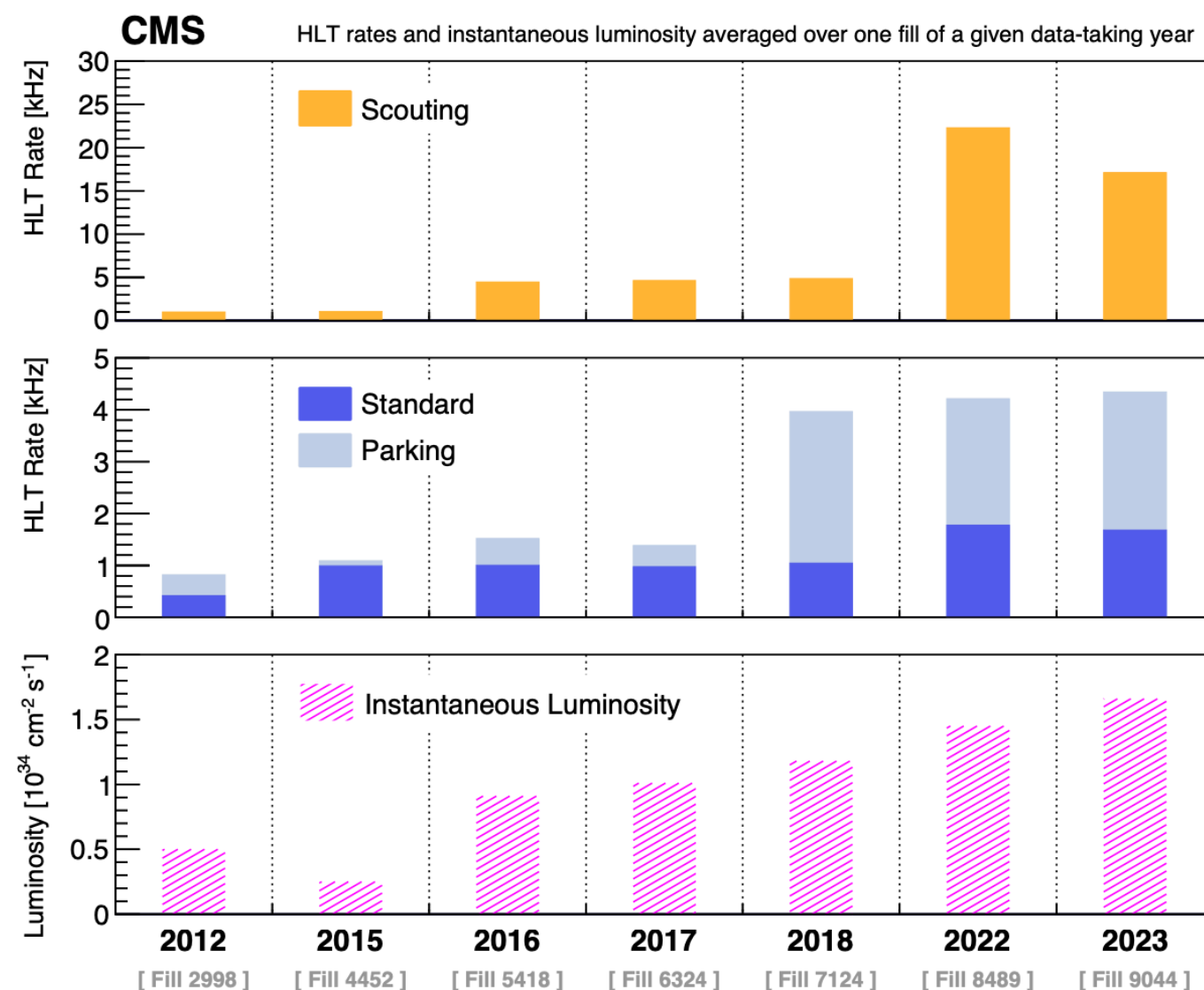
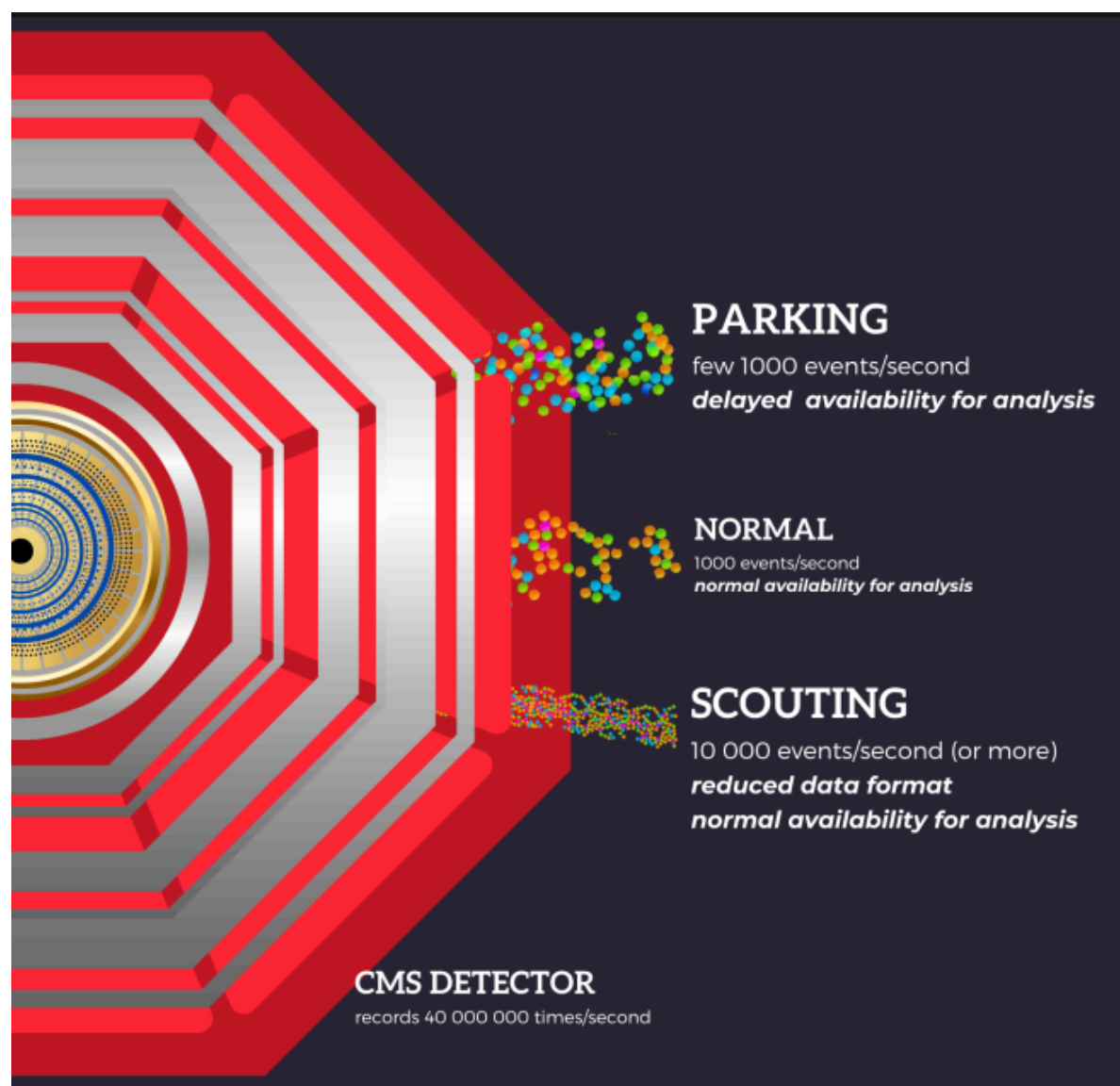
Все еще не обнаружено сигналов новой физики

Но

Методы обнаружения аномалий показали улучшенную чувствительность обнаружения к широкому диапазону возможных сигналов, хотя они менее чувствительны, чем специализированный поиск, основанный на конкретной модели

Данные: Parking и Scouting (1)

CMS [[arXiv:2403.16134](https://arxiv.org/abs/2403.16134)] , [[arXiv:2404.02992](https://arxiv.org/abs/2404.02992)] , [[JHEP06\(2024\)183](https://arxiv.org/abs/2404.02992)]

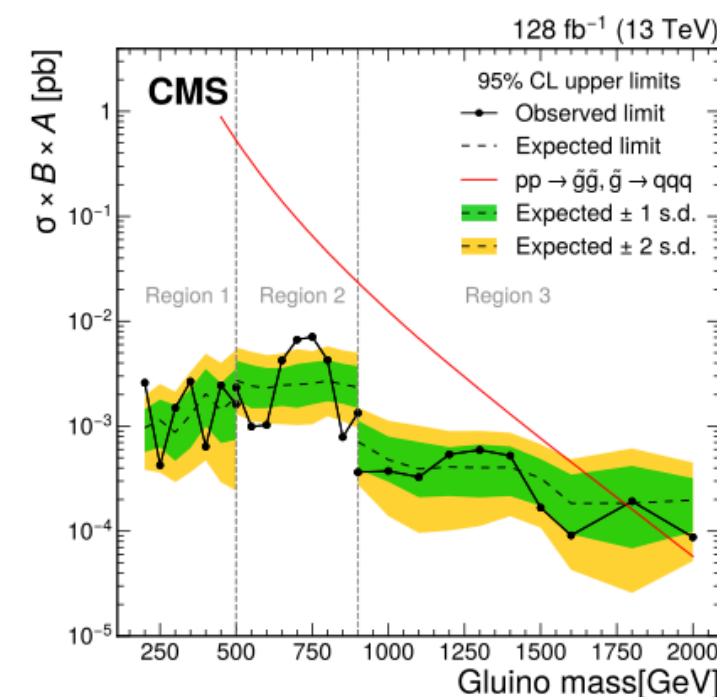
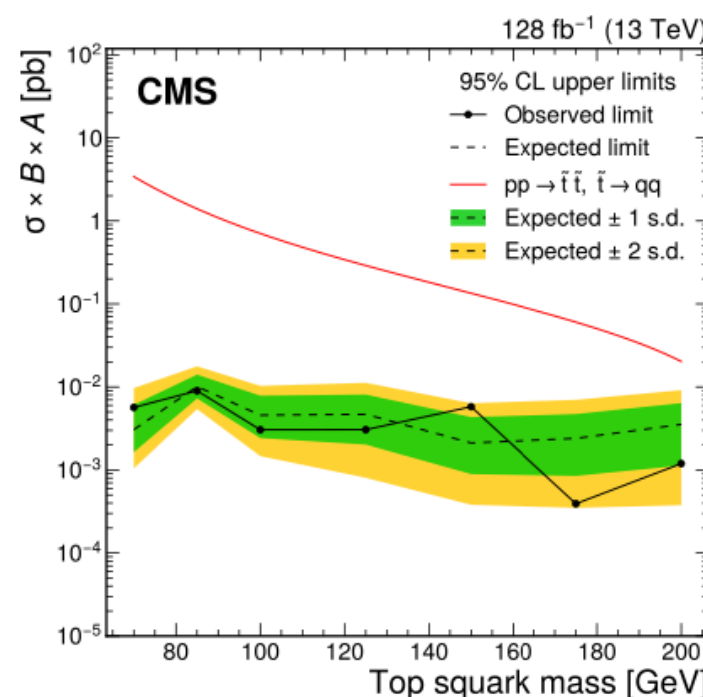
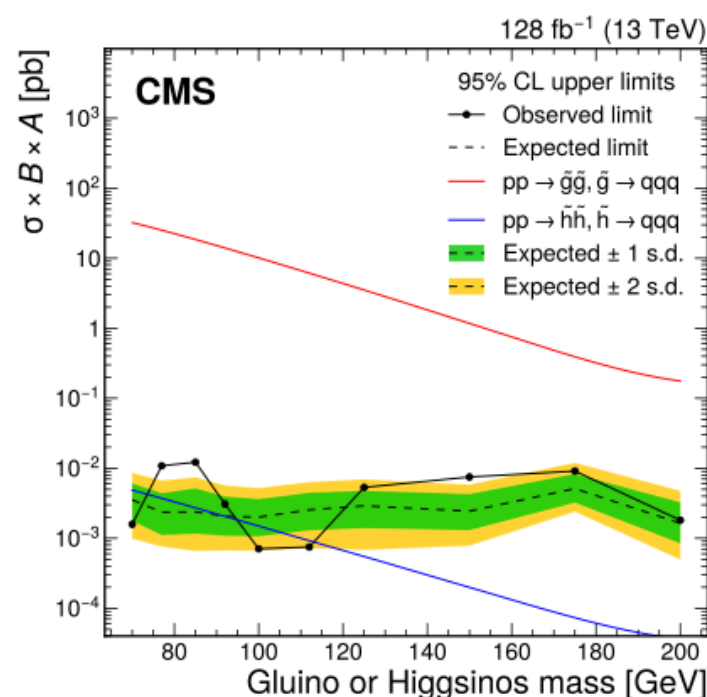
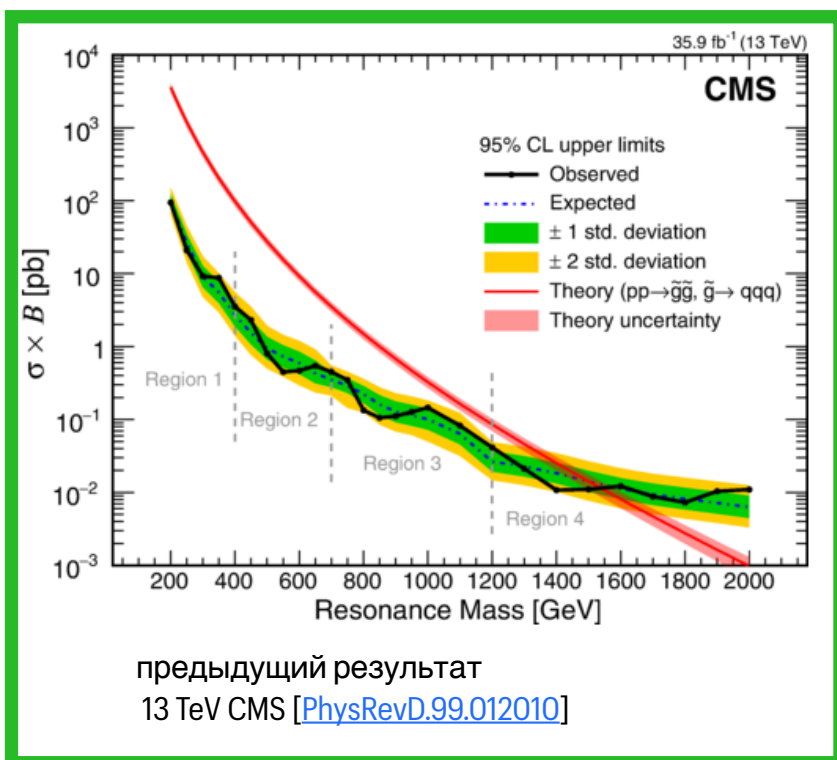
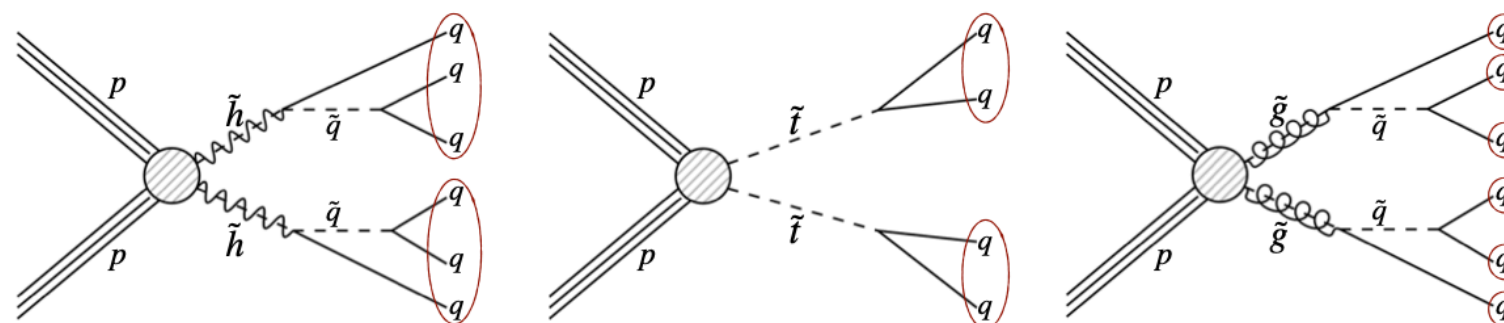


Данные: Parking и Scouting (2)

13 TeV: CMS [[arXiv:2404.02992](https://arxiv.org/abs/2404.02992)]

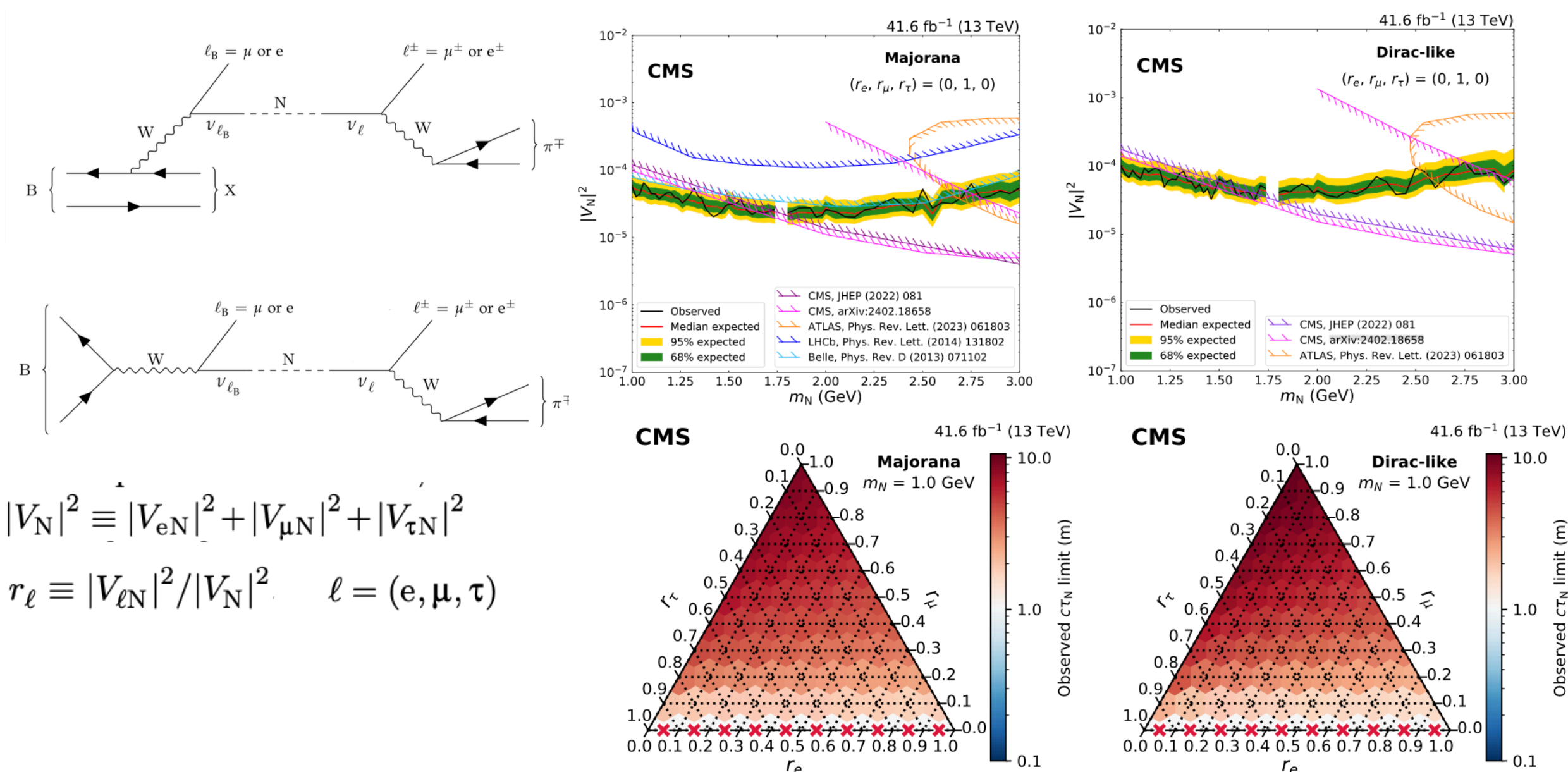
Поиск нарушающих R-четность (R-parity violating RPV) суперсимметричных (SUSY) частиц, **используя Scouting сэмпл.**

$$P_R = (-1)^{3B+L+2s}$$



Новые сигнатуры: Long-lived particles (LLP)

13 TeV: CMS [[JHEP06\(2024\)183](#)] Поиск LLP тяжелые нейтрино используя **B-parking** сэмпл



$$|V_N|^2 \equiv |V_{eN}|^2 + |V_{\mu N}|^2 + |V_{\tau N}|^2$$

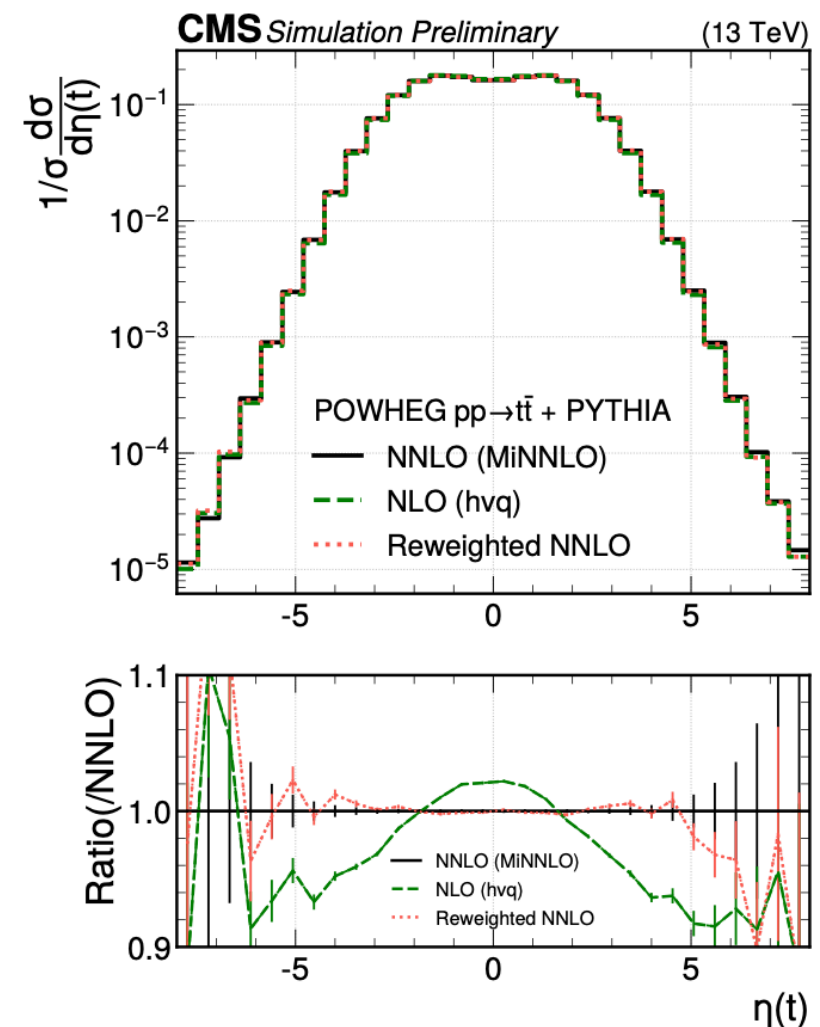
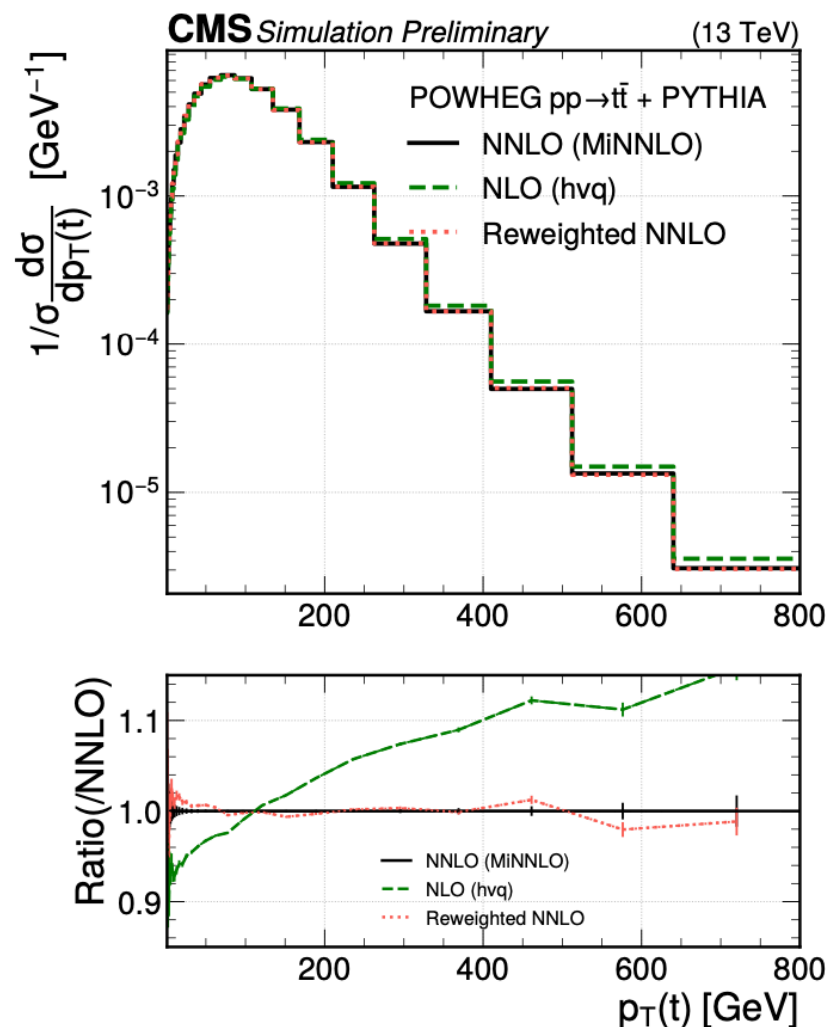
$$r_\ell \equiv |V_{\ell N}|^2 / |V_N|^2 \quad \ell = (e, \mu, \tau)$$

The limits on $|V_N|^2$ for masses $1 < m_N < 1.7 \text{ GeV}$ are the most stringent from a collider experiment to date.

(ML): ускорение Монте-Карло симуляций

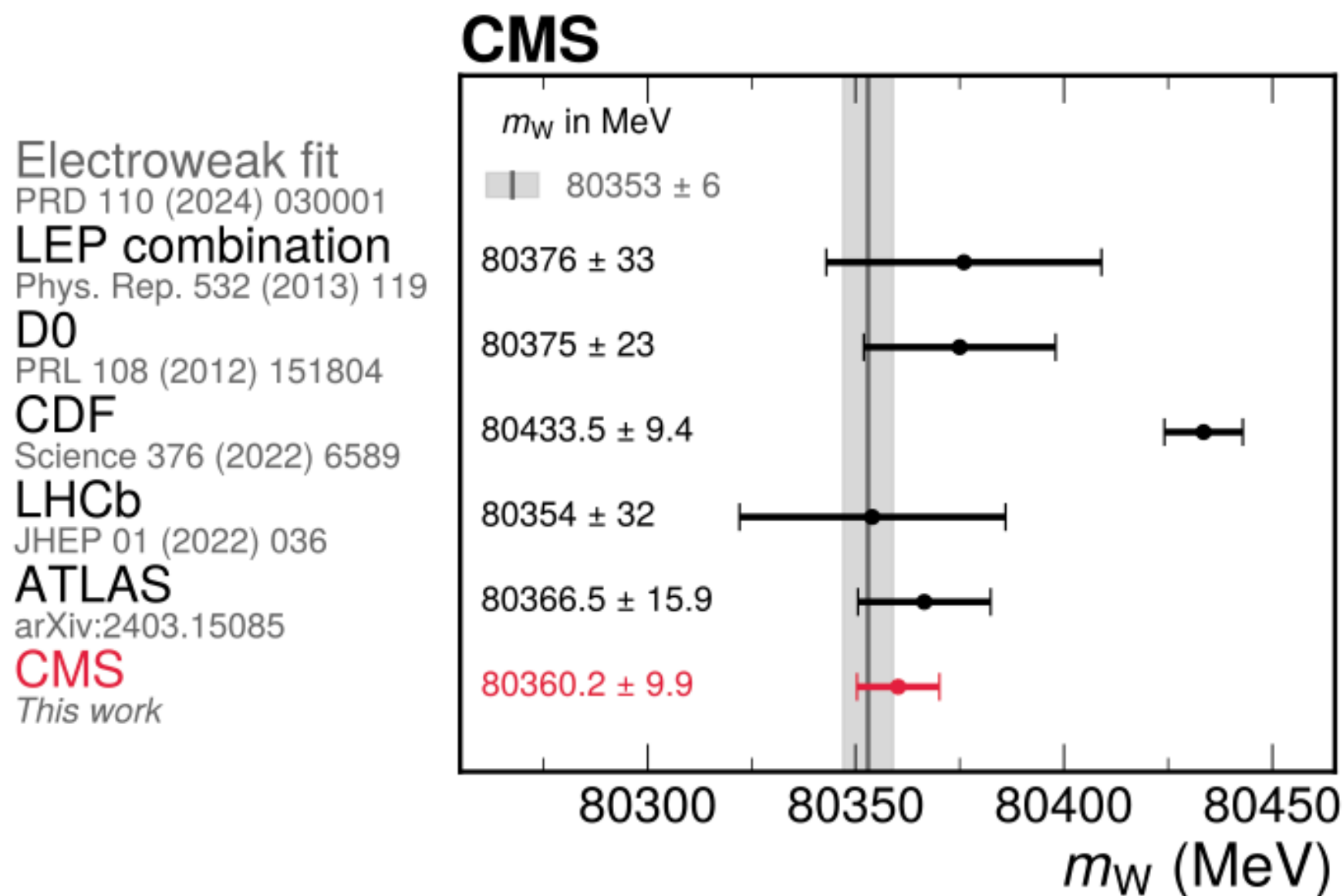
CMS [[CMS-PAS-MLG-24-001](#)] Deep neural network using classification for tuning and reweighting (DCTR)

- Текущая оценка: необходимо 150 В МК событий в год после начала работы HL-LHC 2029.
- Недостаток фактор 4 для CPU и 7 для дискового пространства.
- 75% вычислительного времени занимает моделирование детектора
- Подход позволяет создать только один сэмпл с полной симуляцией детектора
- Использовать основанную на ML процедуру перевзвешивания к сэмплу с необходимыми свойствами



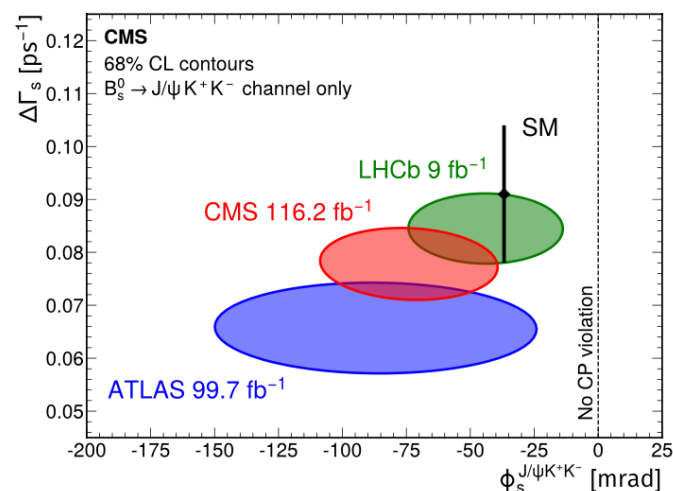
Прецизионные измерения в рамках Стандартной Модели (1)

13 TeV: CMS W-mass [[arXiv:2412.13872](https://arxiv.org/abs/2412.13872)]; отправлена в Nature



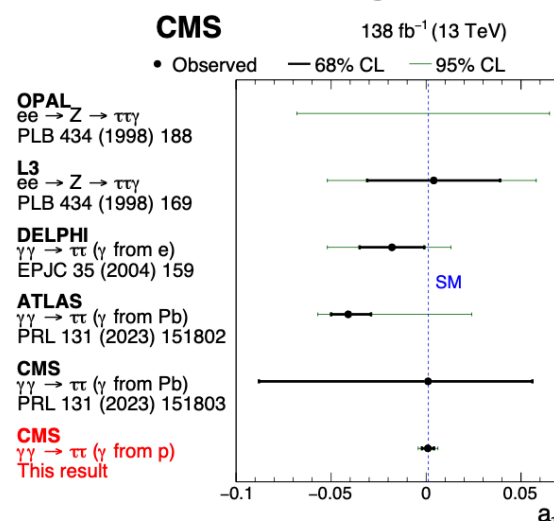
Прецизионные измерения в рамках Стандартной Модели (2)

Evidence for CP violation in B_s mixing



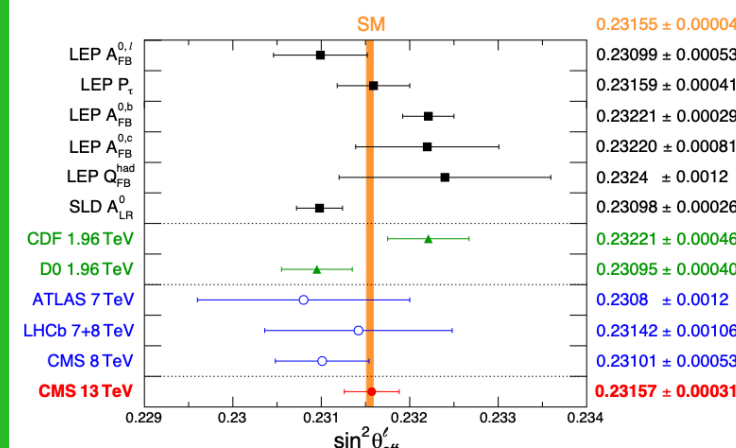
[CMS-PAS-BPH-23-004]

Precise measurement of the tau g-2



[Rep. Prog. Phys. 87 107801]

Determination of $\sin^2\theta_{\text{eff}}$

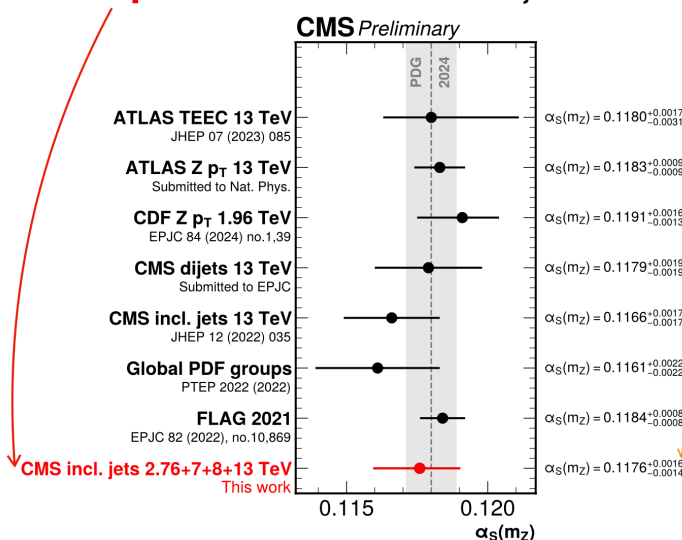


[arXiv:2408.07622]

$\alpha_s(m_Z)$ from inclusive jets

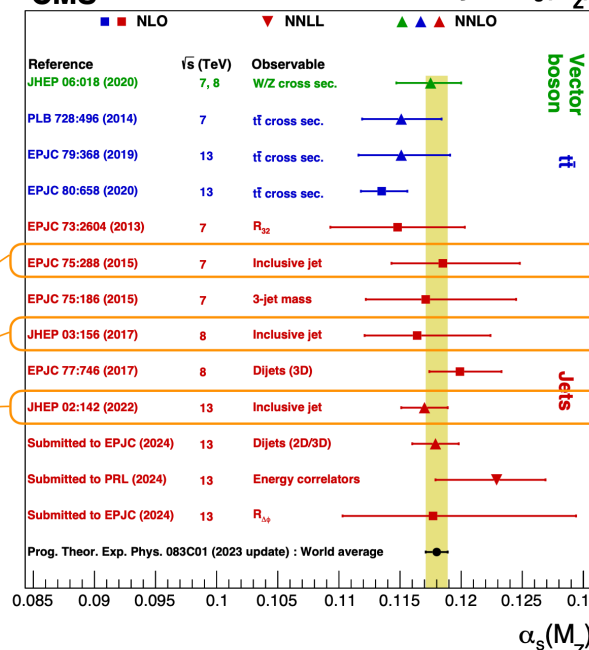
[CMS-PAS-SMP-24-007]

The **most precise** measurement from jet cross sections



Extracted together with the PDFs of the proton in an analysis at NNLO in QCD

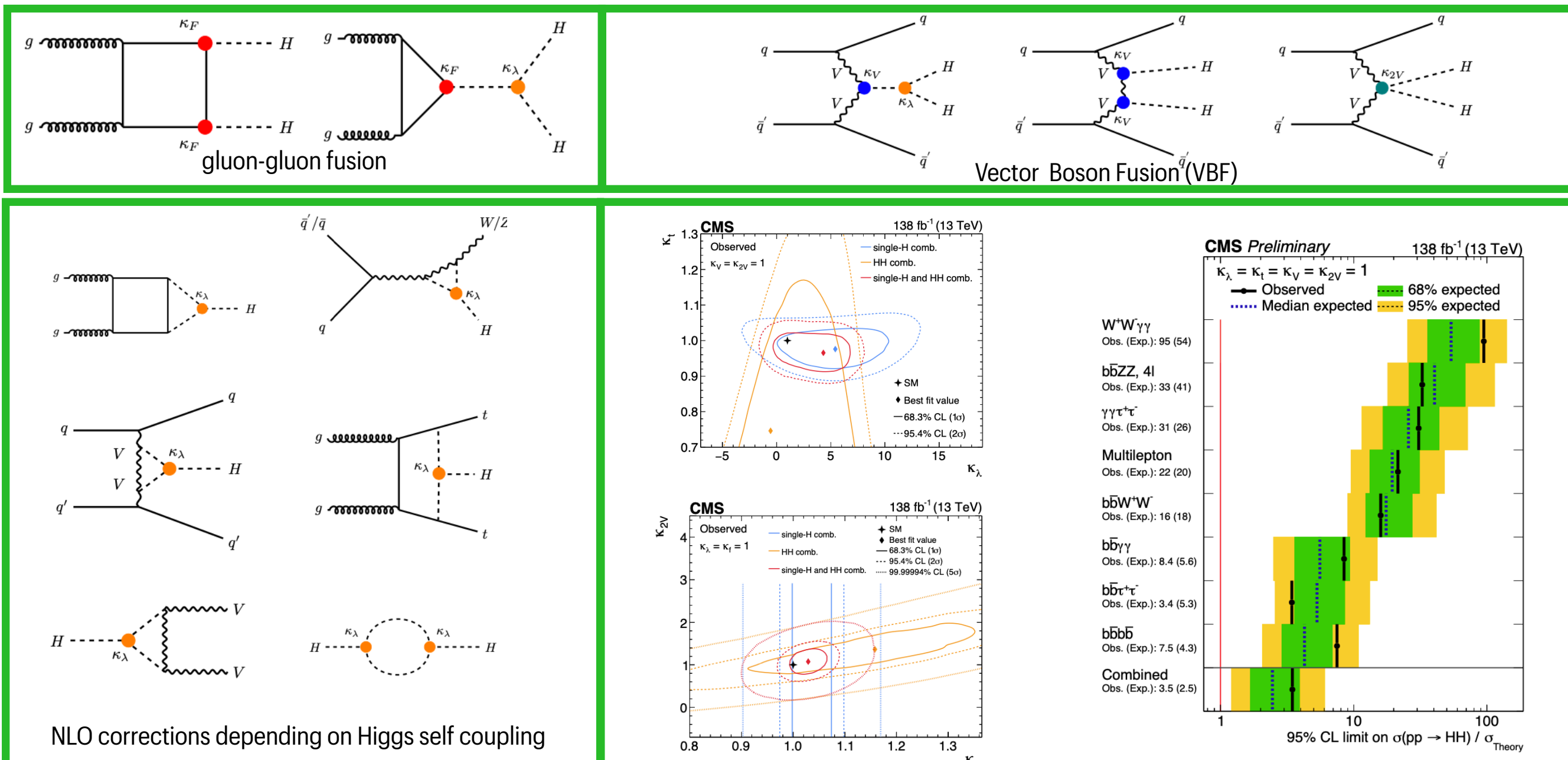
Summary of $\alpha_s(M_Z)$



Exhaustive program to measure α_s

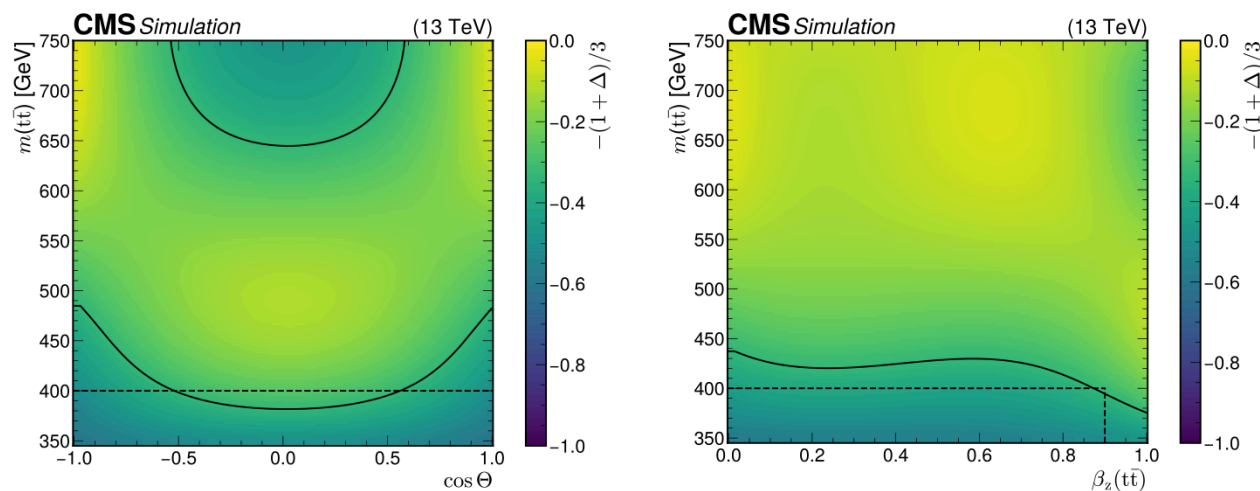
Самодействие бозона Хиггса

13 TeV: CMS [[arXiv:2407.13554](https://arxiv.org/abs/2407.13554)], [[CMS-PAS-HIG-20-011](https://cds.cern.ch/record/2811111)] Higgs self coupling



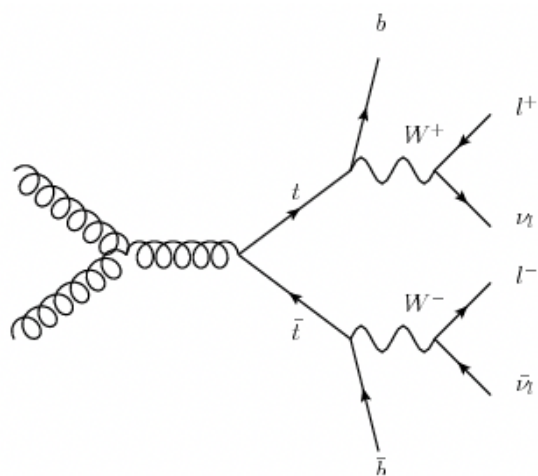
Квантовая запутанность $t\bar{t}$

13 TeV: CMS [[Rep. Prog. Phys. 87 117801](#)] , [[arXiv:2409.11067](#)];

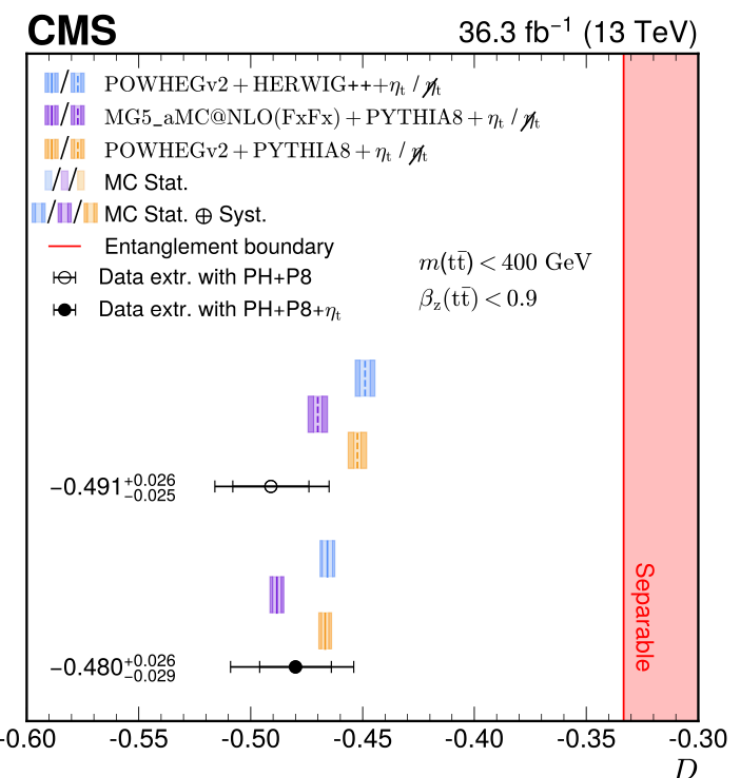
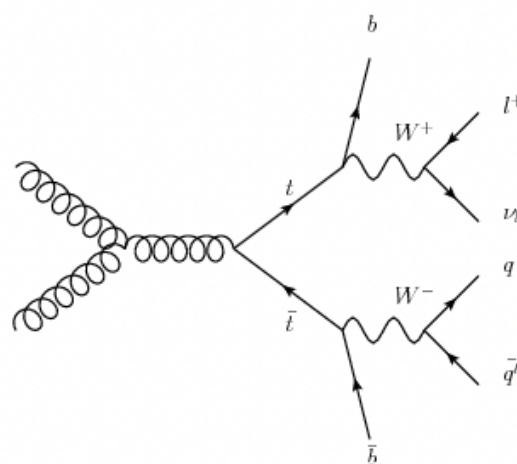


$345 < m(t\bar{t}) < 400 \text{ GeV}$ and $\beta_z(t\bar{t}) < 0.9$

Ди-лептонный канал

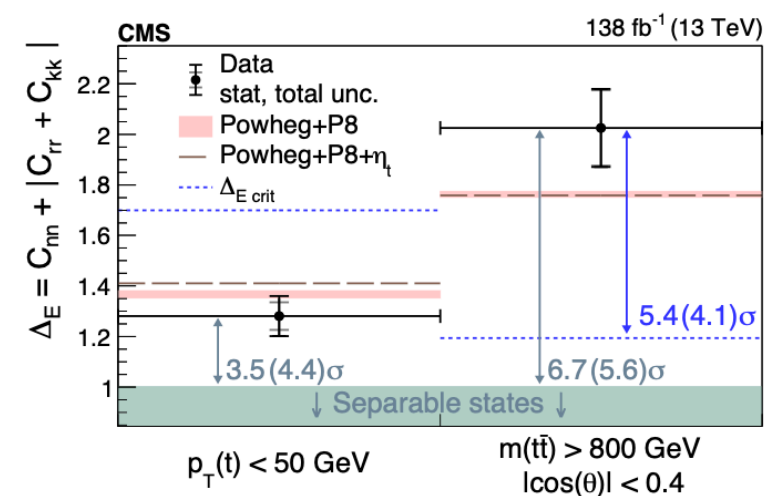


Лептон+Струи канал



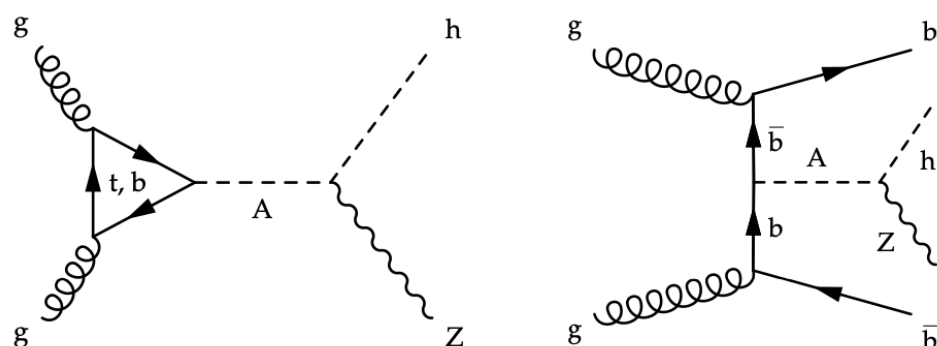
$-0.480^{+0.026}_{-0.029}$ ($-0.467^{+0.026}_{-0.029}$)

Significance 5.1σ

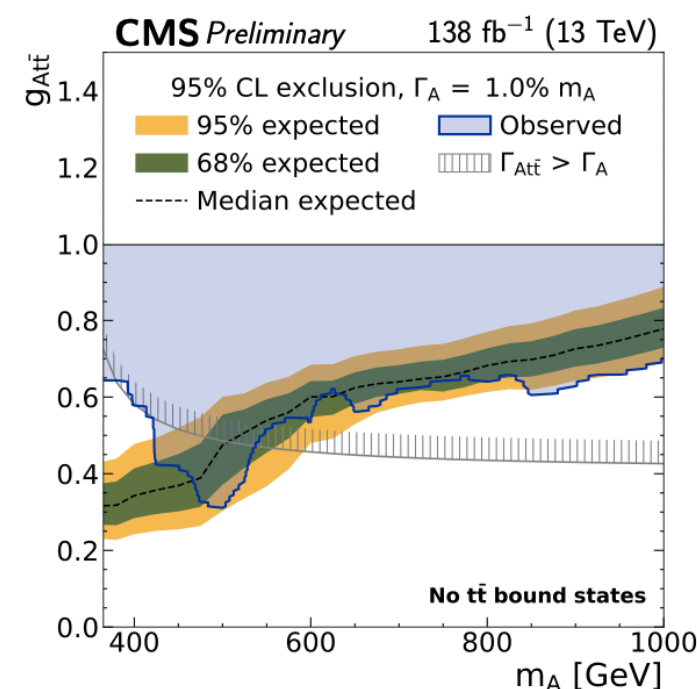
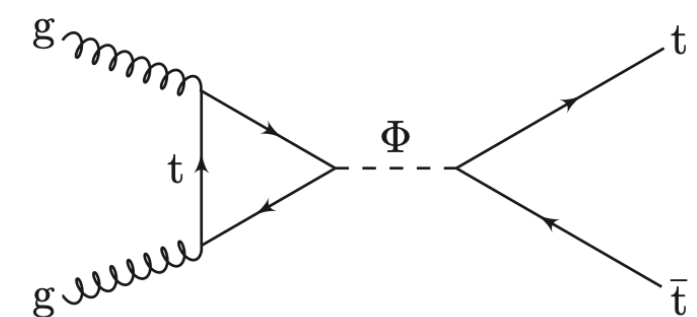
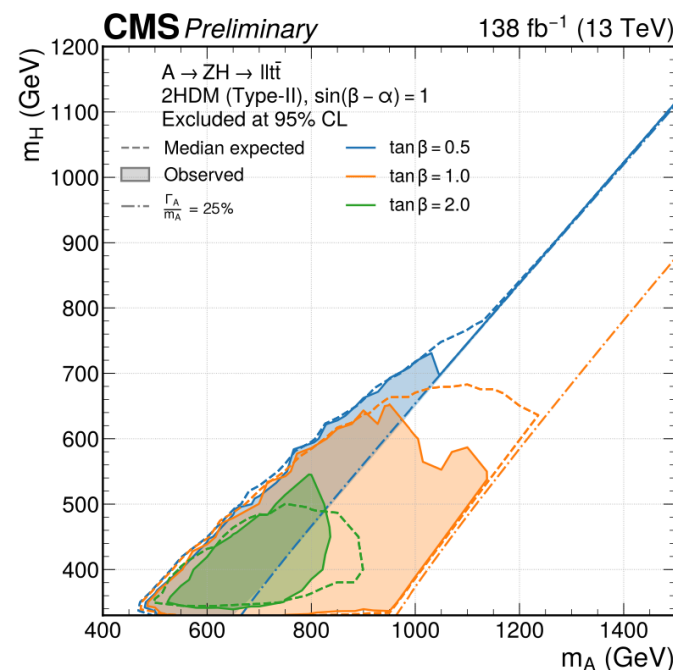
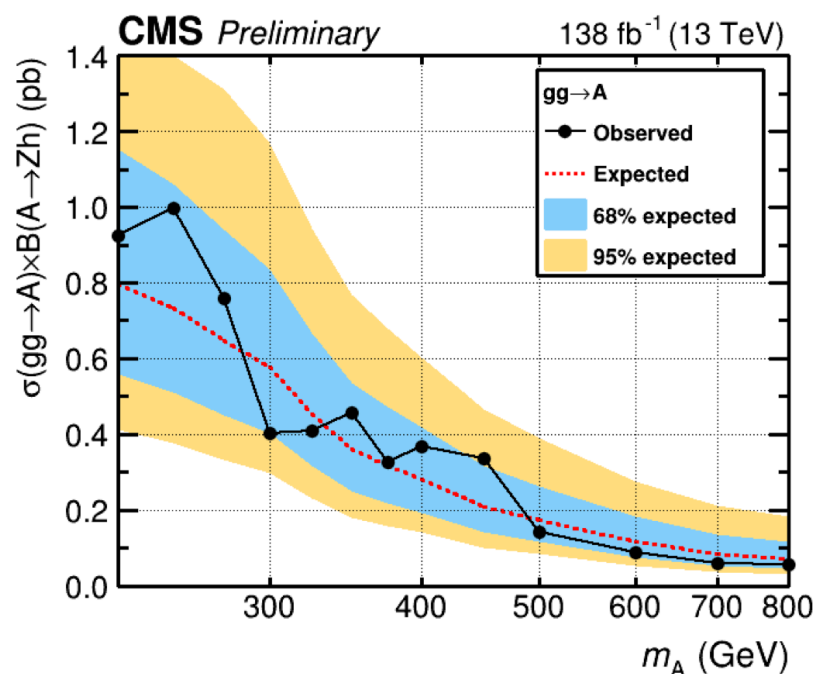


Дополнительные бозоны Хиггса

13 TeV: CMS [[CMS-PAS-HIG-22-004](#)], [[CMS-PAS-B2G-23-006](#)], [[CMS-PAS-HIG-22-013](#)]



Two-Higgs-Doublet Models (2HDMs) вводит дополнительный Хиггсовский дублет:
 H^\pm , (h, H) и псевдоскаляр A
 the ratio of the vacuum expectation values of the two doublets ($\tan \beta$)

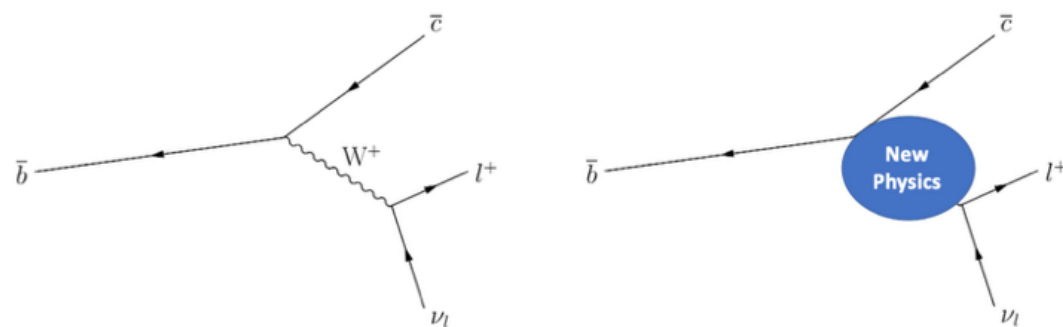


$^1S_0^{[1]}$ $t\bar{t}$ bound state (η_t).

Lepton Flavor Universality (LFU)

CMS [[arXiv:2408.00678](https://arxiv.org/abs/2408.00678)] LFU в распадах B_c^+

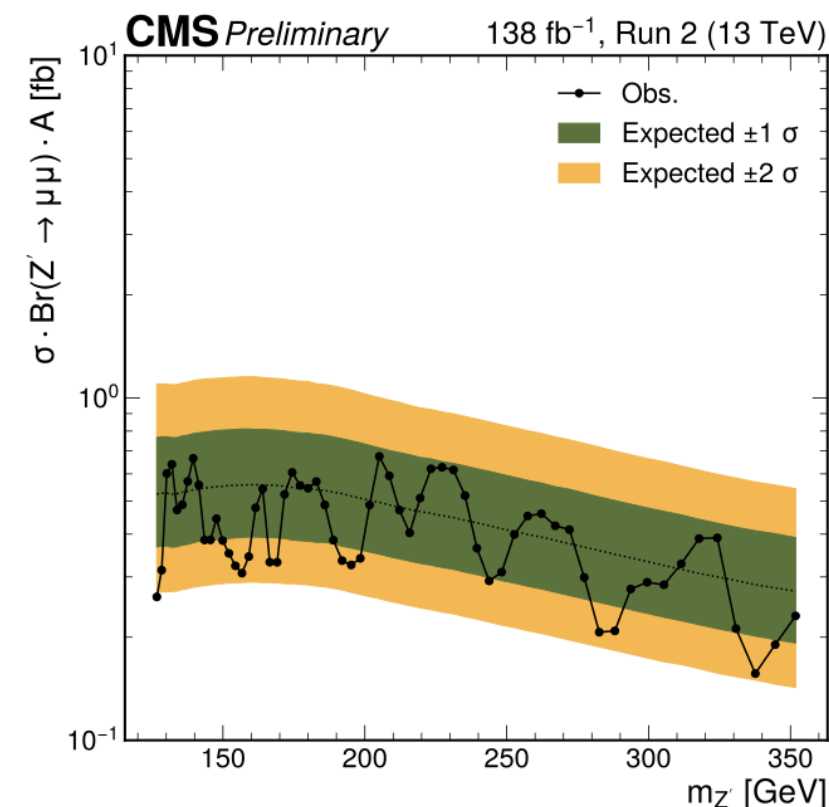
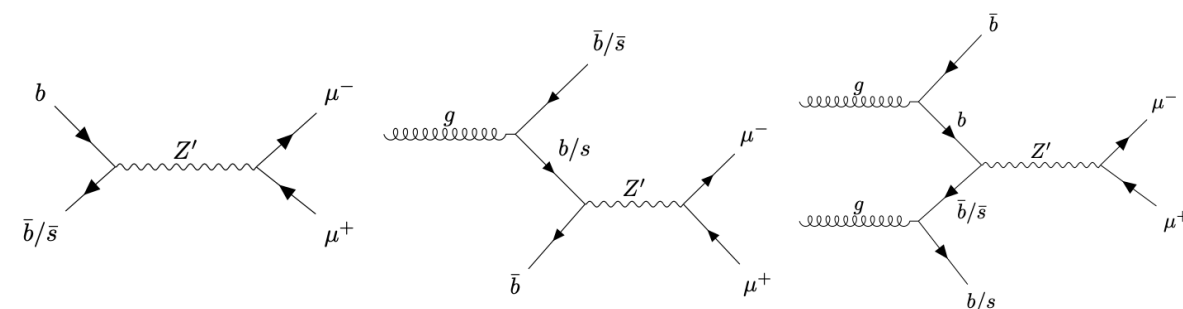
$$R(J/\psi) = \frac{\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \tau^+ \nu_\tau)}{\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \mu^+ \nu_\mu)}$$



$$R(J/\psi) = 0.17_{-0.17}^{+0.18} (\text{stat})_{-0.22}^{+0.21} (\text{syst})_{-0.18}^{+0.19} (\text{theo}) = 0.17 \pm 0.33$$

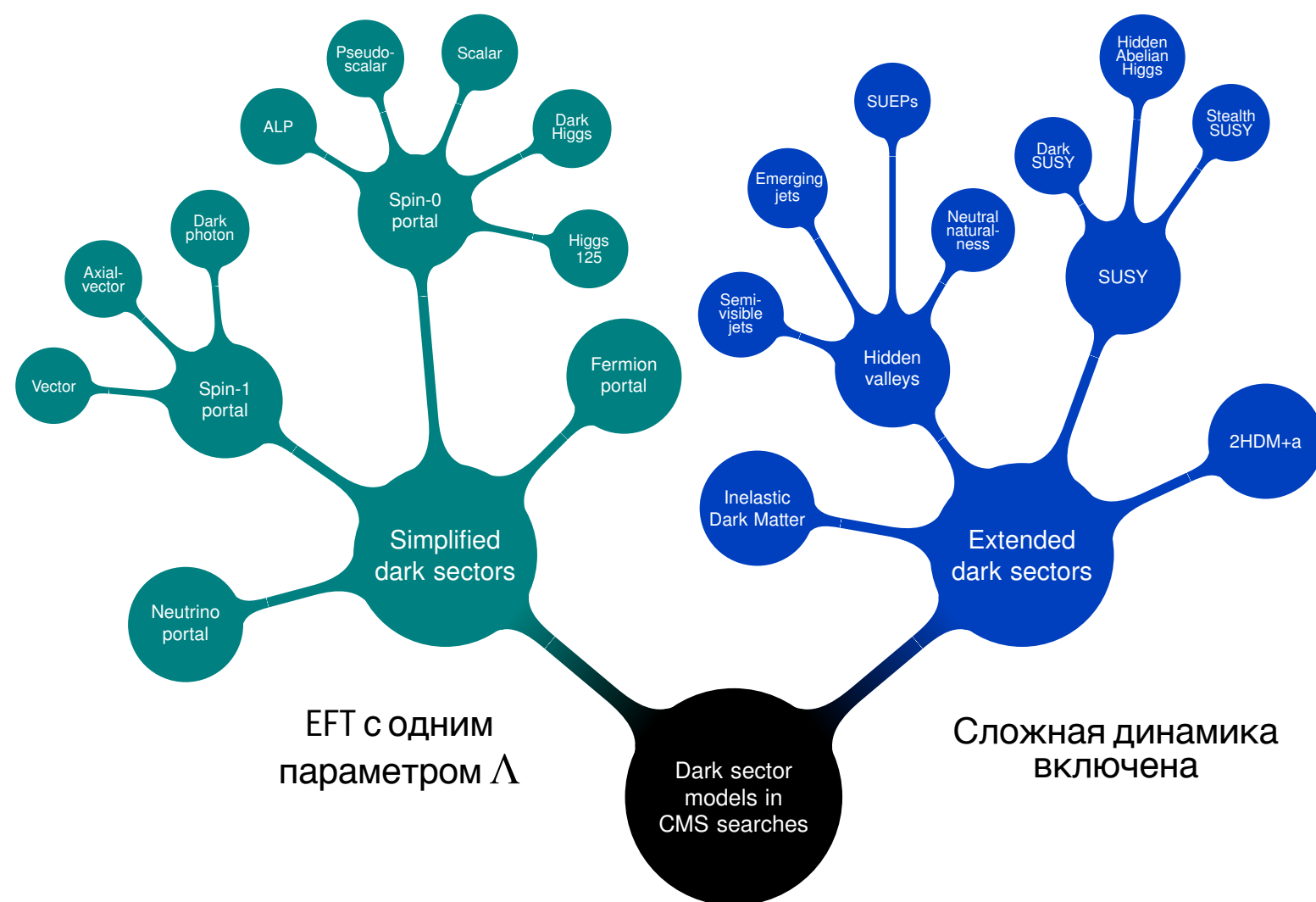
Согласуется со Стандартной Моделью

CMS [[arXiv:2408.00678](https://arxiv.org/abs/2408.00678)] LFU нарушение через НОВЫЙ калибровочный бозон



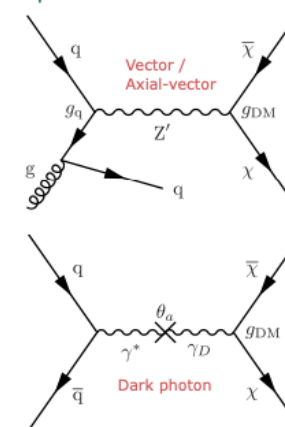
Темный сектор и скрытые долины (1)

CMS большой обзор [[arXiv:2405.13778](https://arxiv.org/abs/2405.13778)], CMS [[Phys. Lett. B 852 \(2024\) 138582](https://arxiv.org/abs/2405.13778)]

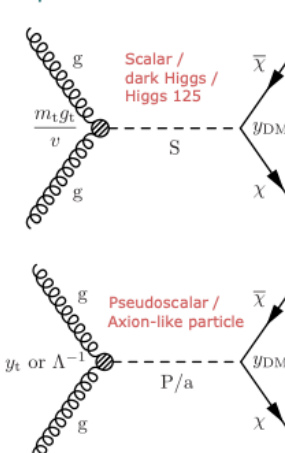


Simplified dark sectors

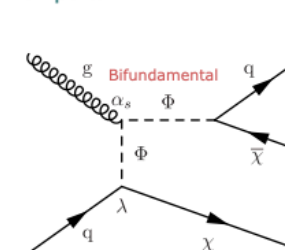
Spin-1 portal



Spin-0 portal

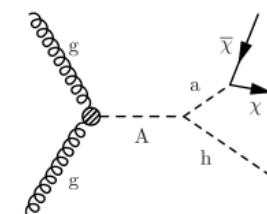


Fermion portal

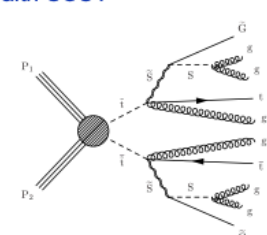


Extended dark sectors

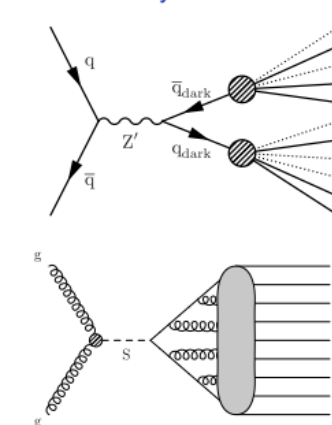
2HDM+a



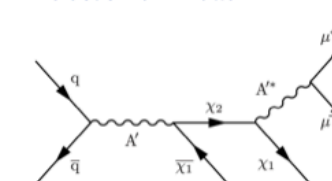
Stealth SUSY



Hidden valleys

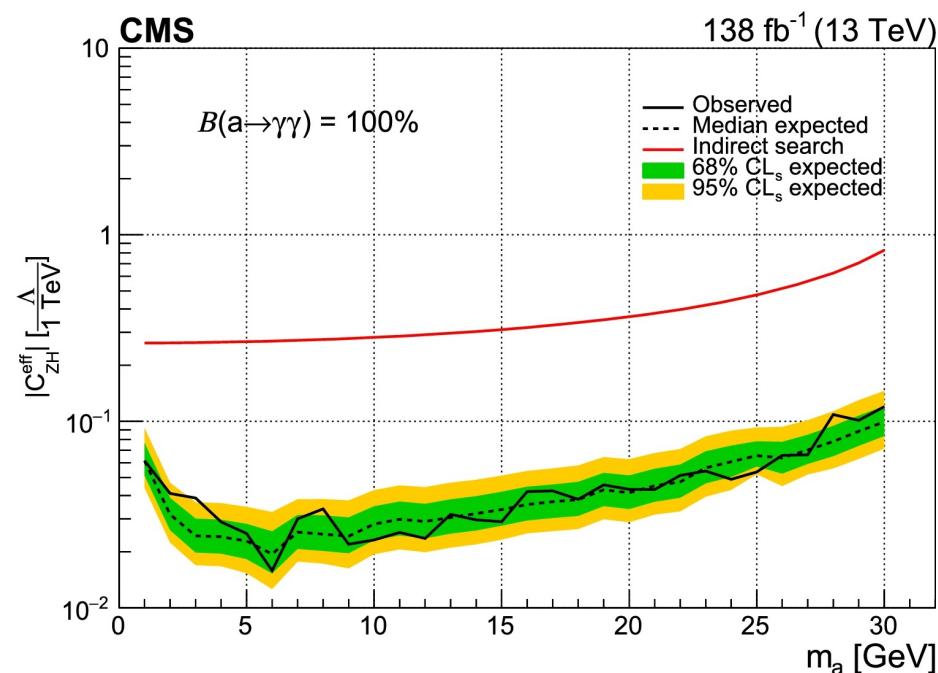
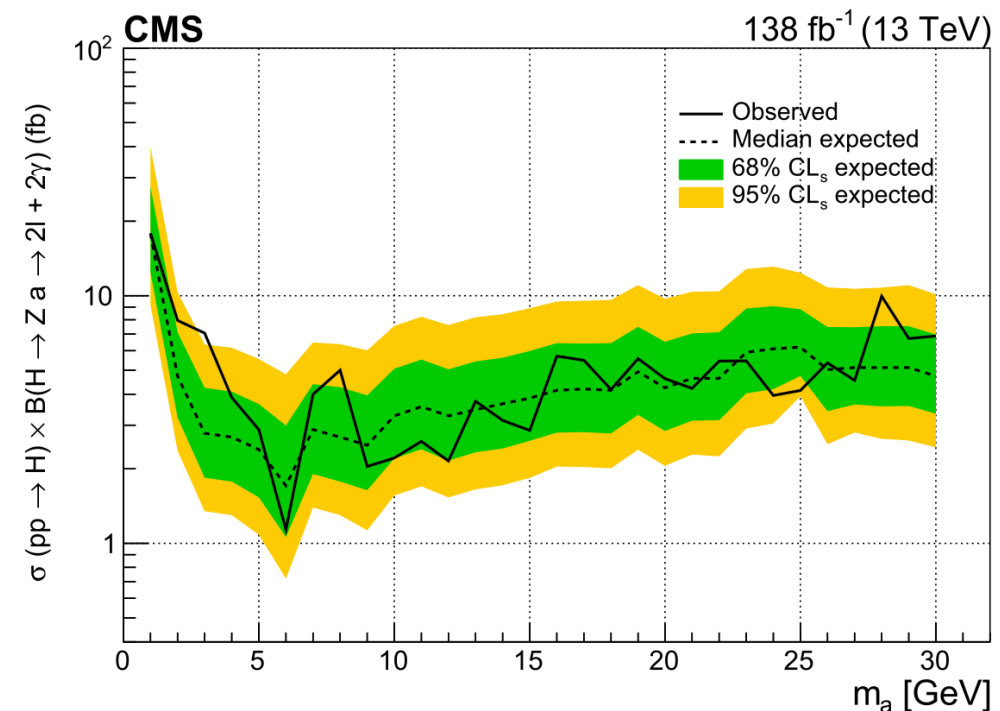
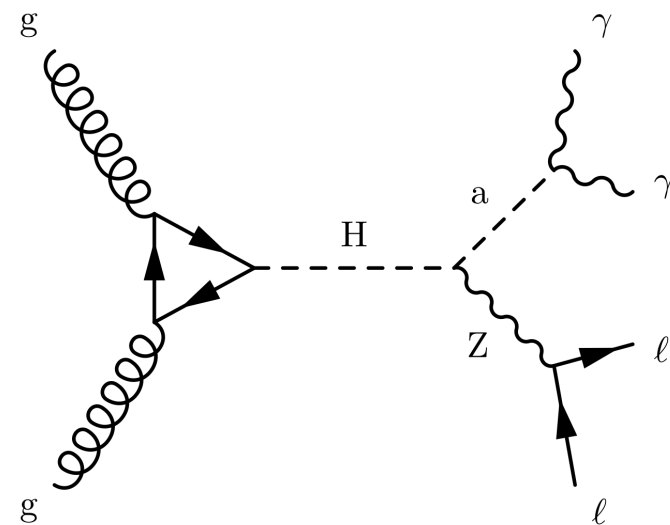


Inelastic Dark Matter



Темный сектор и скрытые долины (2): ALP

13 TeV: CMS [[Phys. Lett. B 852 \(2024\) 138582](#)] Поиск аксионоподобных частиц ALP



Red line is indirect invisible decay search by CMS [[Eur. Phys. J. C 83 \(2023\) 933](#)]



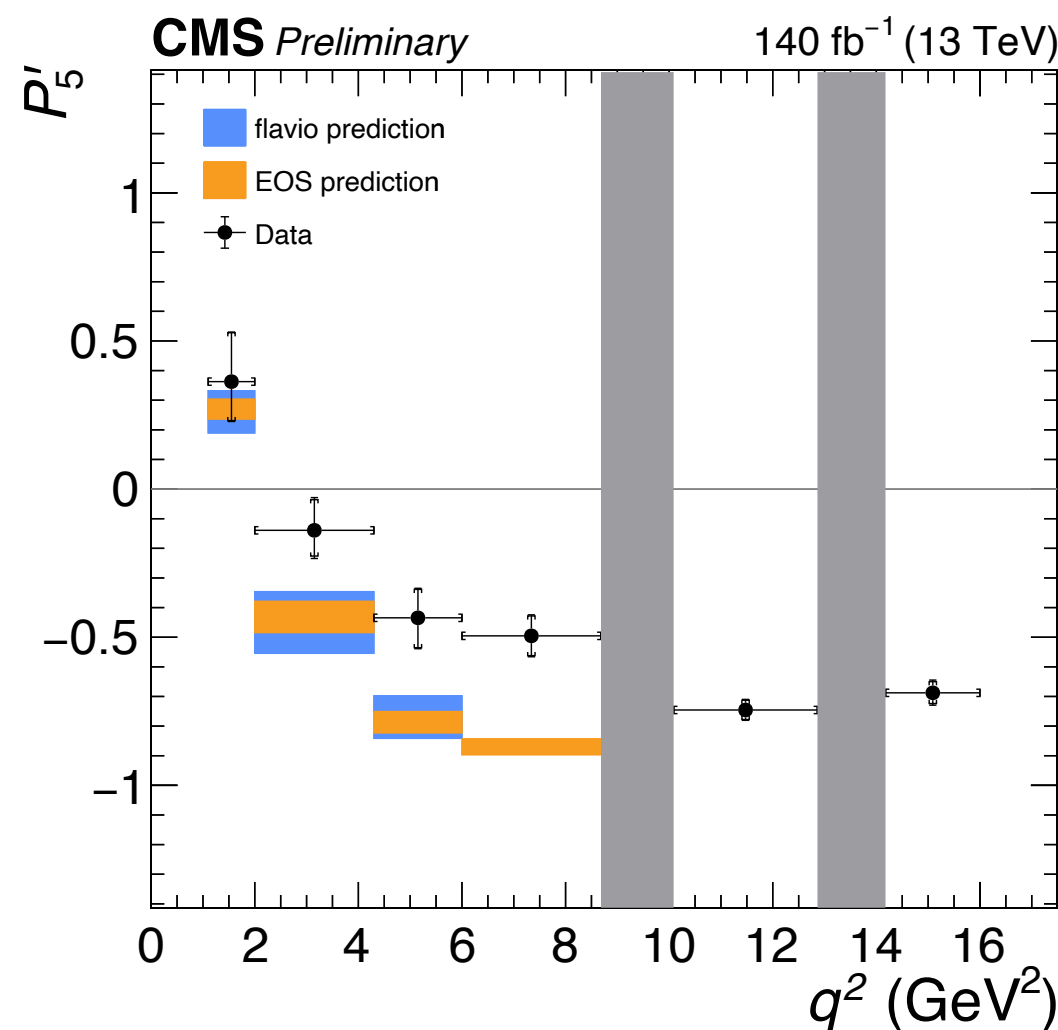
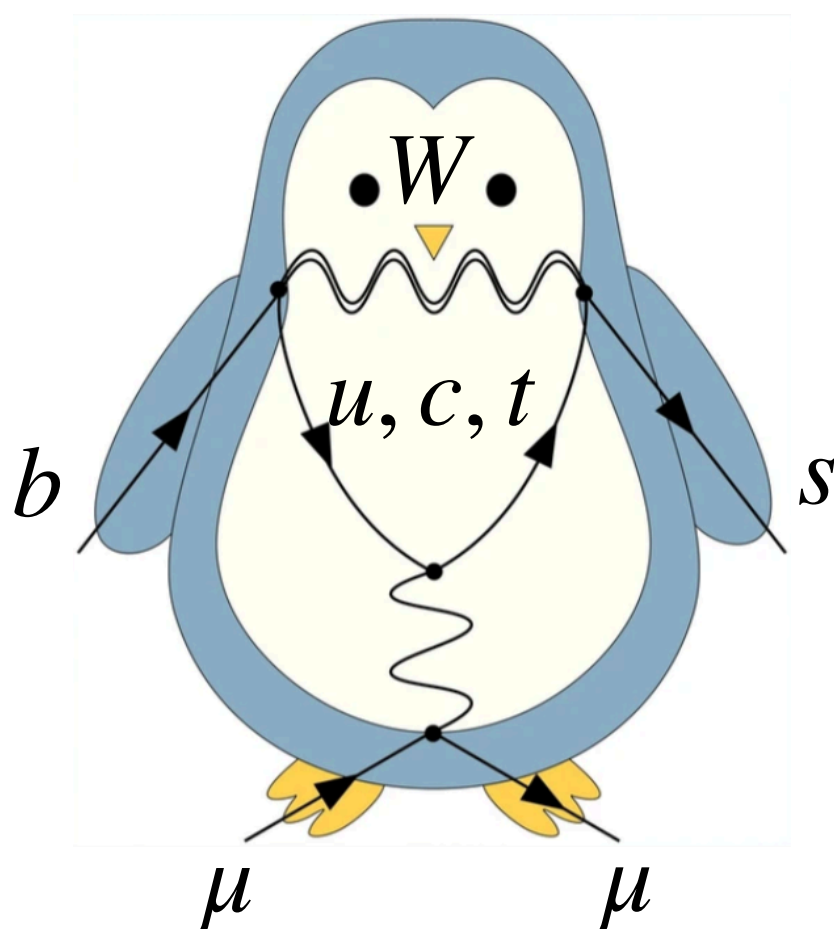
13 TeV: CMS большой обзор [[arXiv:2405.13778](https://arxiv.org/abs/2405.13778)], CMS [[Phys. Lett. B 852 \(2024\) 138582](https://arxiv.org/abs/2405.13778)]



Редкий пингвин $B^0 \rightarrow K^* \mu \mu$: непрямая новая физика

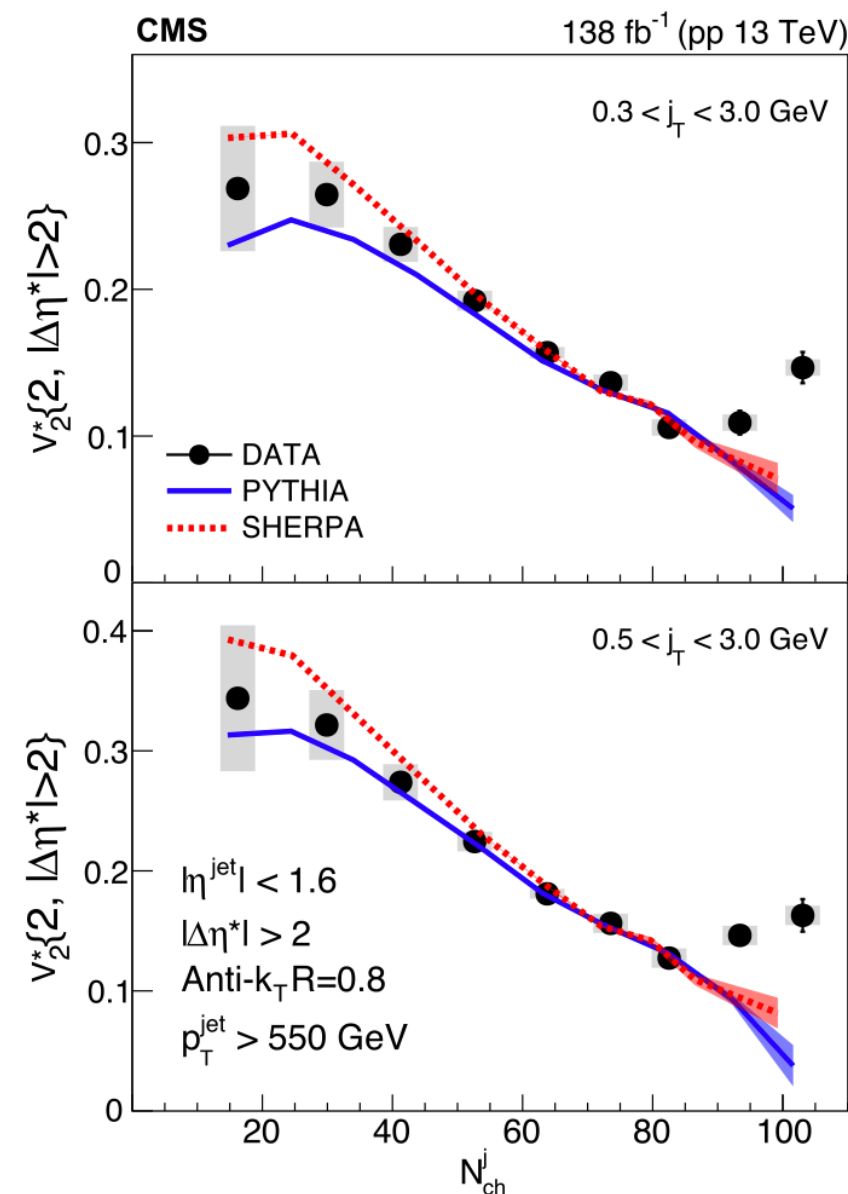
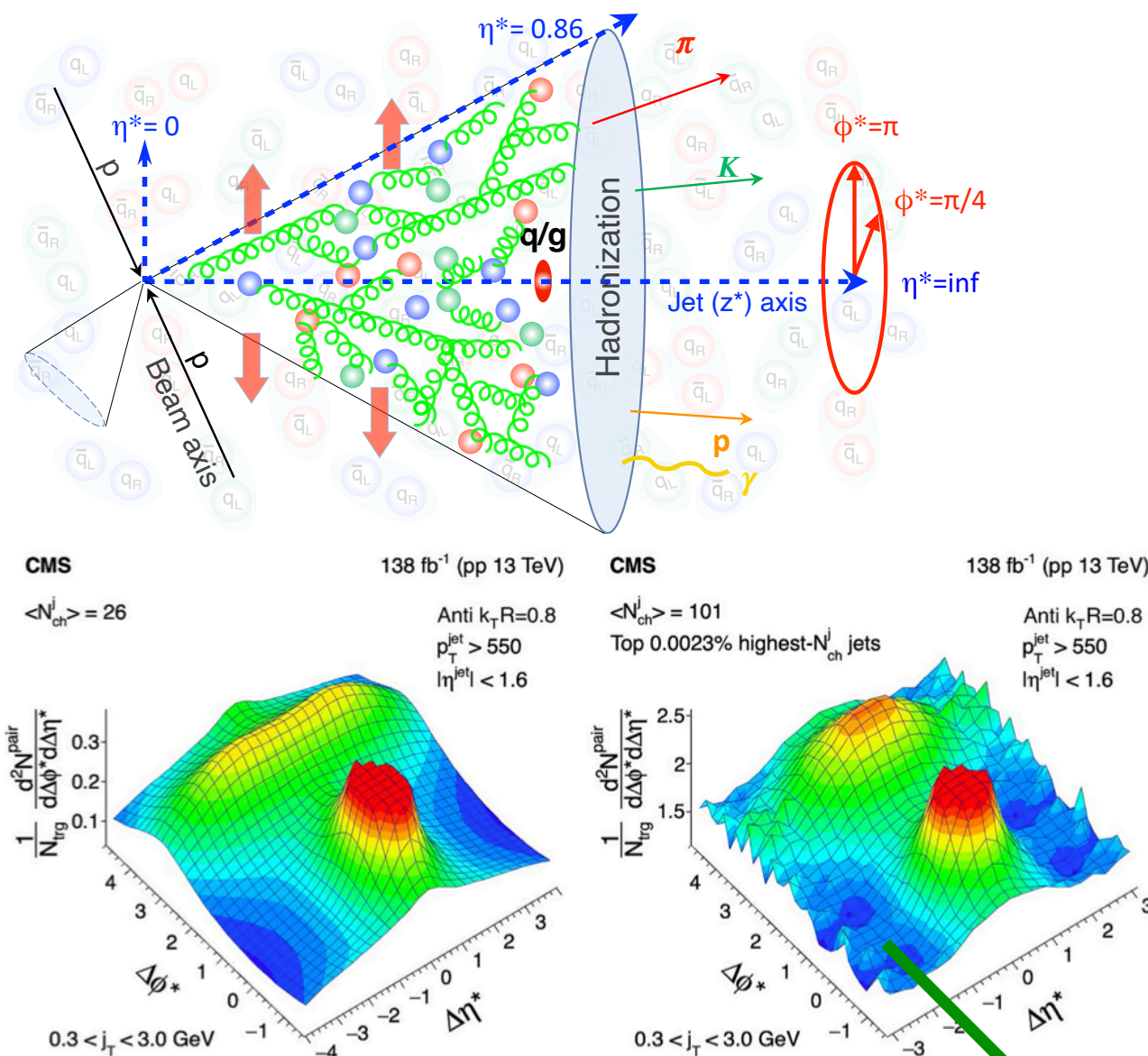
13 TeV: CMS [[CMS-PAS-BPH-21-002](#)]

$$\frac{1}{d\Gamma/dq^2} \frac{d^4\Gamma}{dq^2 d\cos\theta_l d\cos\theta_K d\phi} = \frac{9}{32\pi} \left[\frac{3}{4}(1-F_L)\sin^2\theta_K + F_L\cos^2\theta_K \right. \\ + \left(\frac{1}{4}(1-F_L)\sin^2\theta_K - F_L\cos^2\theta_K \right) \cos 2\theta_l \\ + \frac{1}{2}P_1(1-F_L)\sin^2\theta_K \sin^2\theta_l \cos 2\phi \\ + \sqrt{(1-F_L)F_L} \left(\frac{1}{2}P'_4 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_l \cos \phi + P'_5 \sin 2\theta_K \sin \theta_l \cos \phi \right) \\ - \sqrt{(1-F_L)F_L} \left(P'_6 \sin 2\theta_K \sin \theta_l \sin \phi - \frac{1}{2}P'_8 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_l \sin \phi \right) \\ \left. + 2P_2(1-F_L)\sin^2\theta_K \cos \theta_l - P_3(1-F_L)\sin^2\theta_K \sin^2\theta_l \sin 2\phi \right] \quad (1)$$



Коллективные эффекты внутри адронной струи

13 TeV: CMS [[Phys. Rev. Lett. 133 \(2024\) 142301](#)]

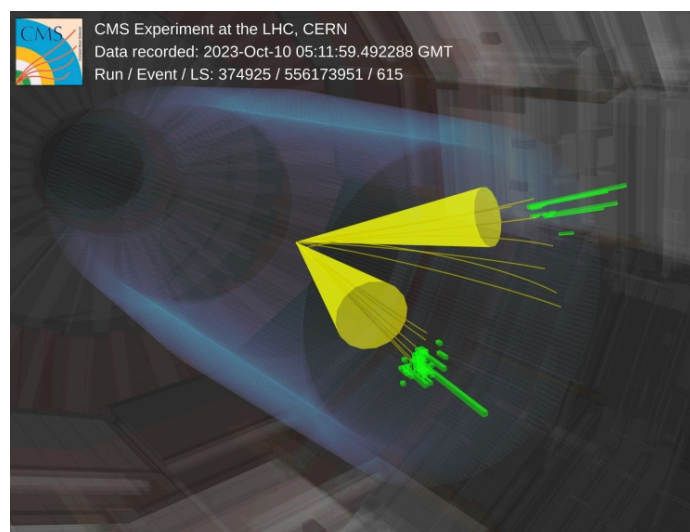


В системах частиц с большой множественностью образуются сходные **ridge структуры**:

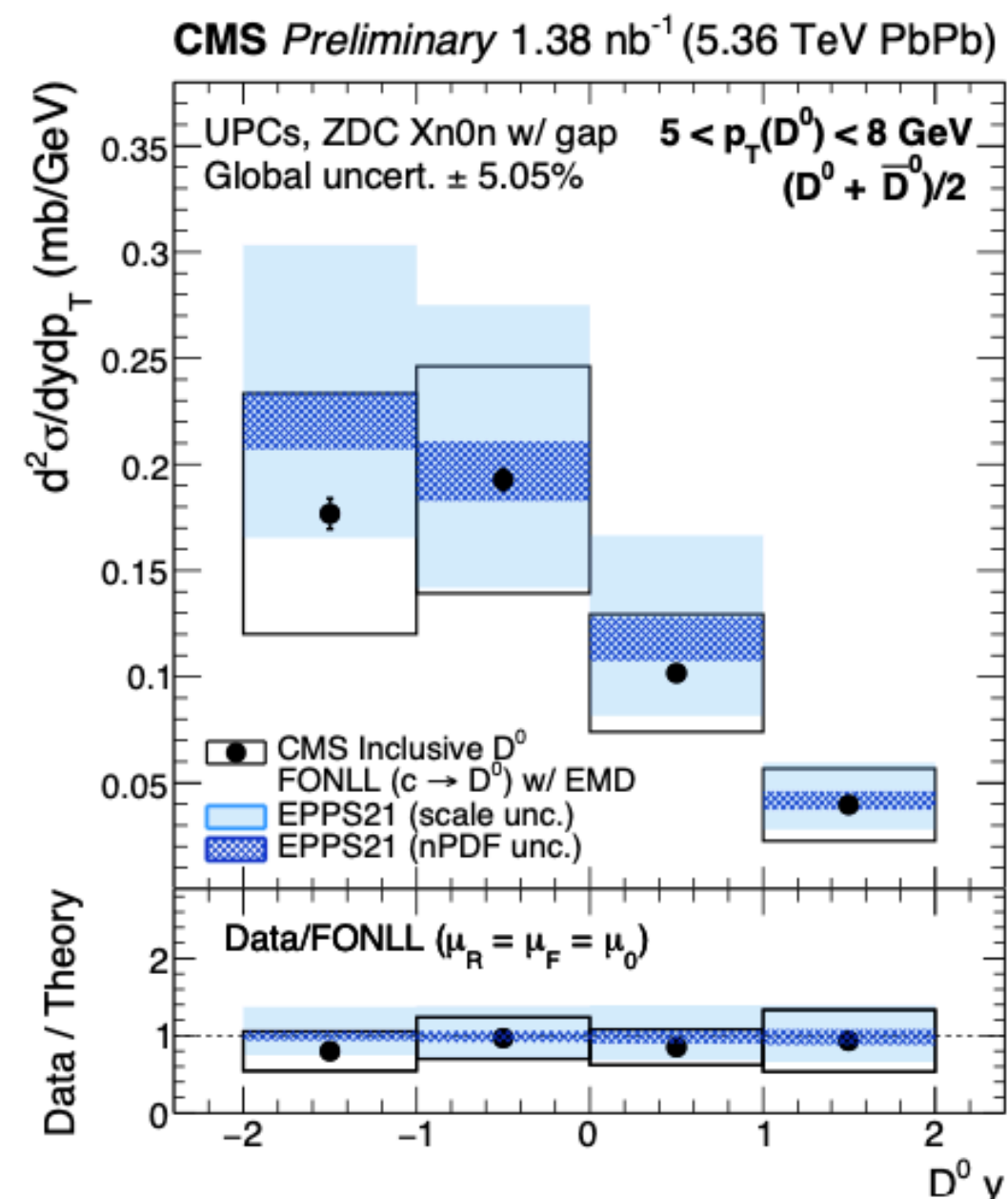
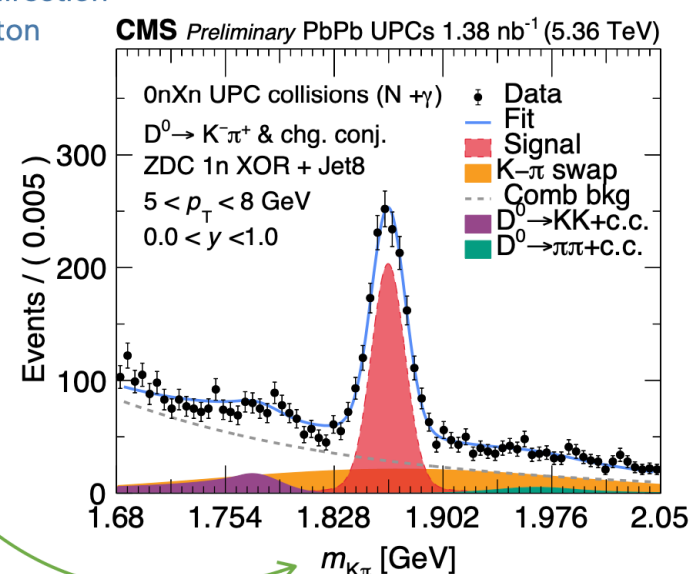
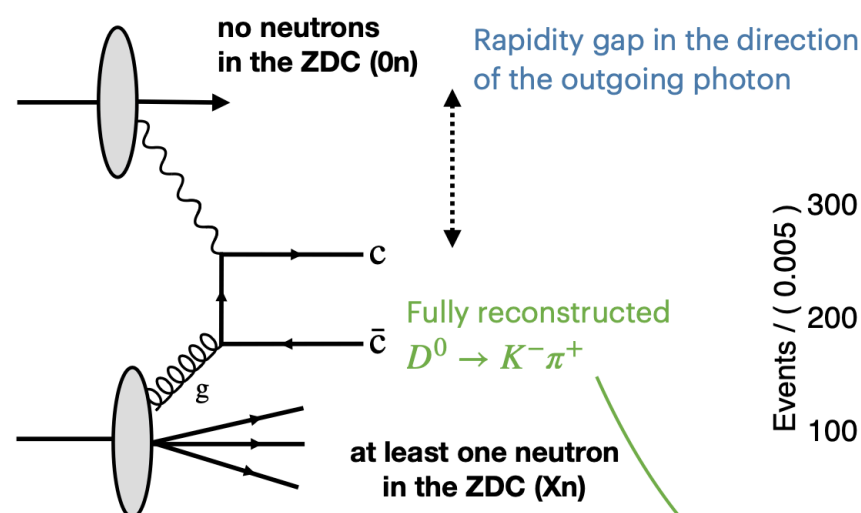
- столкновения тяжелых ионов
- pp столкновениях
- **внутри струи**

Ultra-Peripheral collisions (UPCs) ядер

5.36 TeV PbPb CMS [[CMS-PAS-HIN-24-003](#)],



Small-x
gluon nuclear PDF



ПИЯФ @ CMS

ПИЯФ @ CMS

Анализ:

В.Т. Ким
Е.В. Кузнецова
В.А. Мурзин
Д.Е. Соснов
В.А. Орешкин
А.Ю. Егоров

- асимптотические БФКЛ эффекты в струйных процессах
- дифракционные процессы pA
- электрослабое образование резонансов (VBF): Z , H , BSM
- бозон Хиггса при больших pT

Cathode Strip Chambers (CSC):

П.М. Левченко	С.С. Волков
В.В. Сулимов	В.Л. Головцов
Ю.М. Иванов	И.Б. Смирнов
М.Ю. Иванов	Е.В. Кузнецова
Ю.А. Гавриков	В.Т. Ким
С.А. Вавилов	В.А. Мурзин
Л.Н. Уваров	В.А. Орешкин
Г.Е. Гаврилов	Д.Е. Соснов
Л. Сергеев	А.Ю. Егоров
Л.А. Щипунов	

- поддержка
- модернизация
- участие в сменах
- исследования по радиационной стойкости
- исследование газовых смесей
- HV и LV системы

ПИЯФ @ CSC

- Обслуживание систем:
 - размещение и замена датчиков температуры
- Низковольтная система (LV):
 - внедрение системы считывания состояния LV
- Высоковольтная система (HV):
 - калибровка модулей
- Анализ данных систем CSC:
 - мониторинг температур системы охлаждения оборудования
 - мониторинг стабильности системы HV
- Исследование радиационной стойкости CSC на GIF++
- Исследование газовых смесей для CSC
- Работа по проверке, ремонту и поддержке систем CSC
- Работы включены в существующие рабочие планы CMS



Публикации с участием группы ПИЯФ

- асимптотические БФКЛ эффекты в двухструйных процессах:

- 7 ТэВ: CMS [[Eur. Phys. J. C 72 \(2012\) 2216](#)] - отношения двухструйных сечений
CMS [[JHEP 08 \(2016\) 139](#)] - азимутальные декорреляции в двухструйных сечениях
- 2.76 ТэВ: CMS [[JHEP03\(2022\)189](#)] - двухструйные сечения и отношений двухструйных сечений
A.Iu.E. & V.T.K. [[Phys. Rev. D 108 \(2023\) 014010](#)] - NLL BFKL расчеты для двухструйных сечений и отношений двухструйных сечений (новые указания на проявление БФКЛ эффектов)
A.Iu.E. & V.T.K. [[Phys.Atom.Nucl. 86 \(2023\) 6, 1461-1466](#)] - Next-to-Leading BFKL for Mueller–Navelet Dijets with Large Rapidity Separation and Jet Veto (расчет влияния условия струйного вето на двухструйные сечения)

- дифракционные процессы pA:

- pPb 8.16 ТэВ: CMS [[Phys. Rev. D 108 \(2023\)092004](#)] - первое измерение форвардных быстротных интервалов в pPb процессах на LHC.
(предыдущие измерения при энергии менее чем в 300 раз в c.m.s.)

- электрослабое образование резонансов:

- 7 ТэВ: CMS [[JHEP 10 \(2013\) 062](#)] - (Zjj) - первое измерение ассоциированного рождения Z с парой струй
8 ТэВ: CMS [[Eur. Phys. J. C 75 \(2015\) 66](#)] - Zjj
13 ТэВ: CMS [[Eur. Phys. J. C 78 \(2018\) 589](#)] - Zjj

- методы реконструкции в CSC:

- I.B. Smirnov [[Nucl.Instrum.Meth.A 1055 \(2023\) 168496](#)] - Алгебраические методы реконструкции координат в CSC
I.B. Smirnov [[JINST 18 \(2023\) 06, C06001](#)] - Алгебраические методы реконструкции координат в стриповых детекторах

Публикации 2024

- асимптотические БФКЛ эффекты в двухструйных процессах:

2.76 и 7 ТэВ: A.Iu.E. & V.T.K. [[Phys.Atom.Nucl. 86 \(2023\) 6, 1461-1466](#)] - Next-to-Leading BFKL for Mueller–Navelet Dijets with Large Rapidity Separation and Jet Veto (расчет влияния условия струйного вето на двухструйные сечения)

Защиты 2024

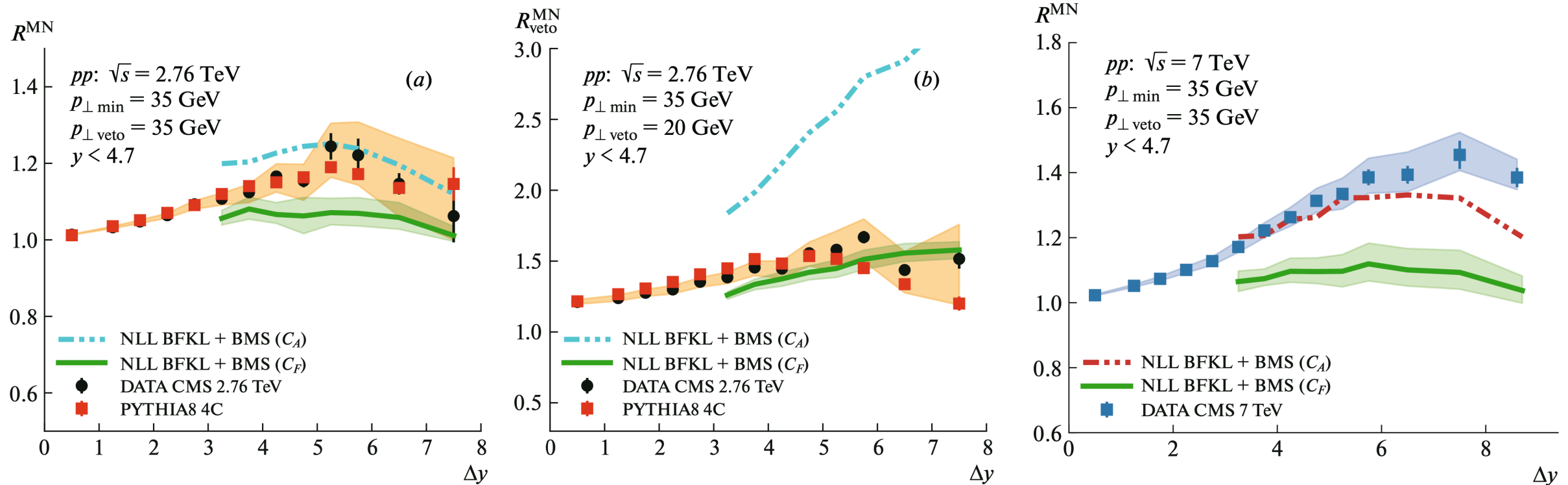
- А.Ю. Егоров, кандидат физико-математических наук,
Научная специальность 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий,
26.03.2024 (СПбГУ) "Поиск эффектов БФКЛ эволюции при образовании пар адронных струй с большим разделением по быстроте при энергиях Большого адронного коллайдера"

Доклады на конференциях 2024:

- 56-я Зимняя школа ПИЯФ 2024 (Луга, Россия):
 - В.Т. Ким “Физика Большого адронного коллайдера: Стандартная Модель и поиски Новой физики”
 - Д.Е. Соснов “Первое измерение сечений процессов с быстротными провалами при энергиях БАК в CMS”
- Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН (Дубна, ОИЯИ, Россия):
 - А.Ю. Егоров “Проявление БФКЛ эволюции в двухструйных событиях при энергиях БАК”
 - Д.Е. Соснов “Первое измерение событий с провалами в быстротных распределениях в pA-взаимодействиях на БАК в эксперименте CMS”
- HSFI (Гатчина, Россия):
 - В.Т. Ким “Higgs boson and naturalness domain of the standard model”
 - В.Т. Ким “Manifestations of BFKL evolution at high energies”
 - В.А. Орешкин “Search for BFKL evolution effects in dijet production with CMS at LHC”
 - Д.Е. Соснов “First measurement of forward rapidity gap events in pA collisions at the LHC with CMS experiment”
- ICPPA 2024 (Москва, Россия):
 - А.Ю. Егоров “ATLAS+CMS physics highlights”

Эффекты БФКЛ в двухструйных процессах со струйным вето при больших быстротах

2.76 и 7 ТэВ: A.Iu.E. & V.T.K. [[Phys.Atom.Nucl. 86 \(2023\) 6, 1461-1466](#)] - Next-to-Leading BFKL for Mueller–Navelet Dijets with Large Rapidity Separation and Jet Veto (расчет влияния условия струйного вето на двухструйные сечения)



Модели цветовой когерентности, (угловое упорядочение (HERWIG), дипольная модель (PYTHIA), эволюция Банфи-Маркезини-Самя (БМС)) не стабильны при больших быстротах, что указывает на необходимость использования эволюции БФКЛ в этой кинематической области

Выводы

- Большинство процессов Стандартной Модели (SM) измерено на CMS с высокой точностью
- Все еще не обнаружены значимые сигналы физики за пределами SM (BSM)
- Достижения в области машинного обучения (ML) выводят анализы на новый уровень точности измерений, увеличивая их потенциал к открытиям
- Разработанные новейшие техники анализа (ML, Parking/Scouting) позволяют наблюдать интересные и сложные эффекты динамики в рамках SM (Квантовая запутанность, Редкие процессы, Коллективные многочастичные эффекты)
- С ведущим участием группы ПИЯФ получены новые результаты по поиску эффектов БФКЛ при образовании двух струй с большим разделением быстрот и струйным вето в pp соударениях
- Группа ПИЯФ завершила большую работу по поддержке и совершенствованию CSC

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!