

Эксперимент АТЛАС

Физические результаты

Ю.Г. Нарышкин

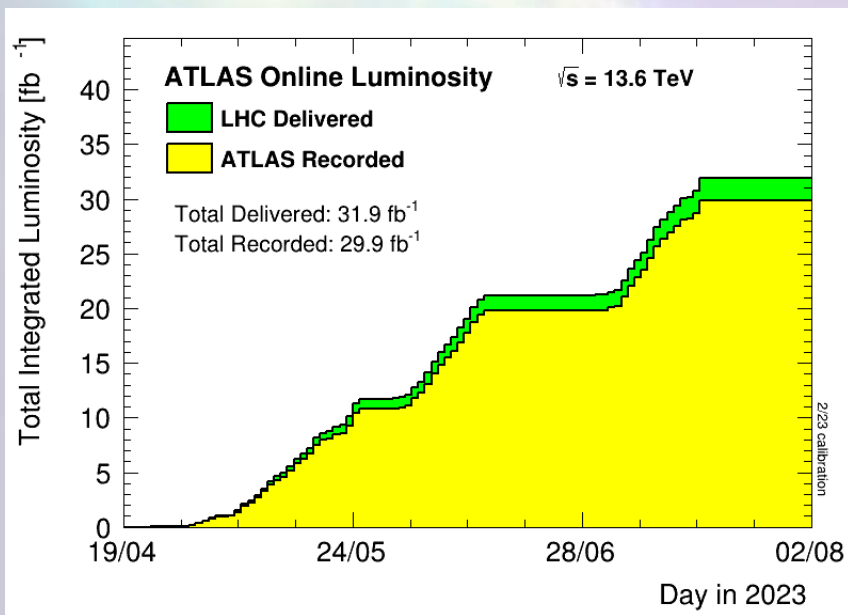
Научная сессия ОФВЭ ПИЯФ, 27.12.2023



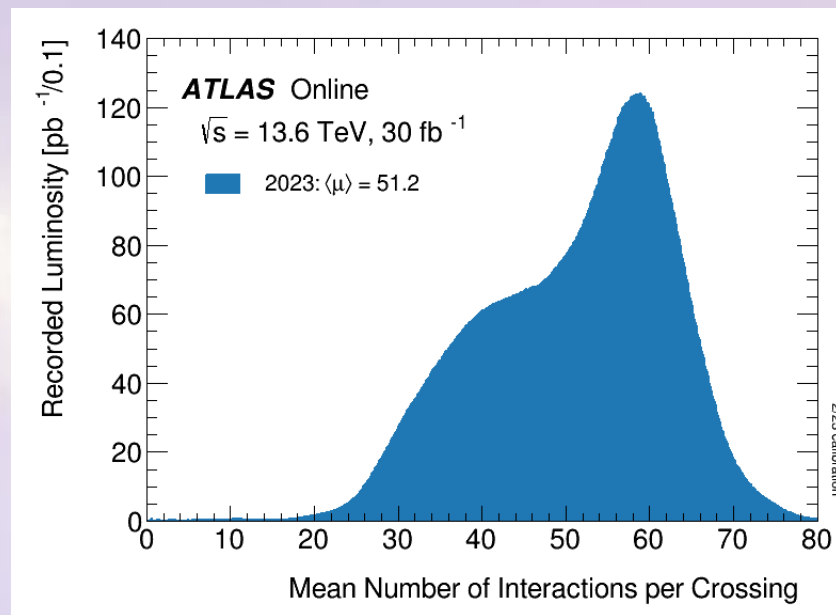
ATLAS operations in 2023



Luminosity 2023



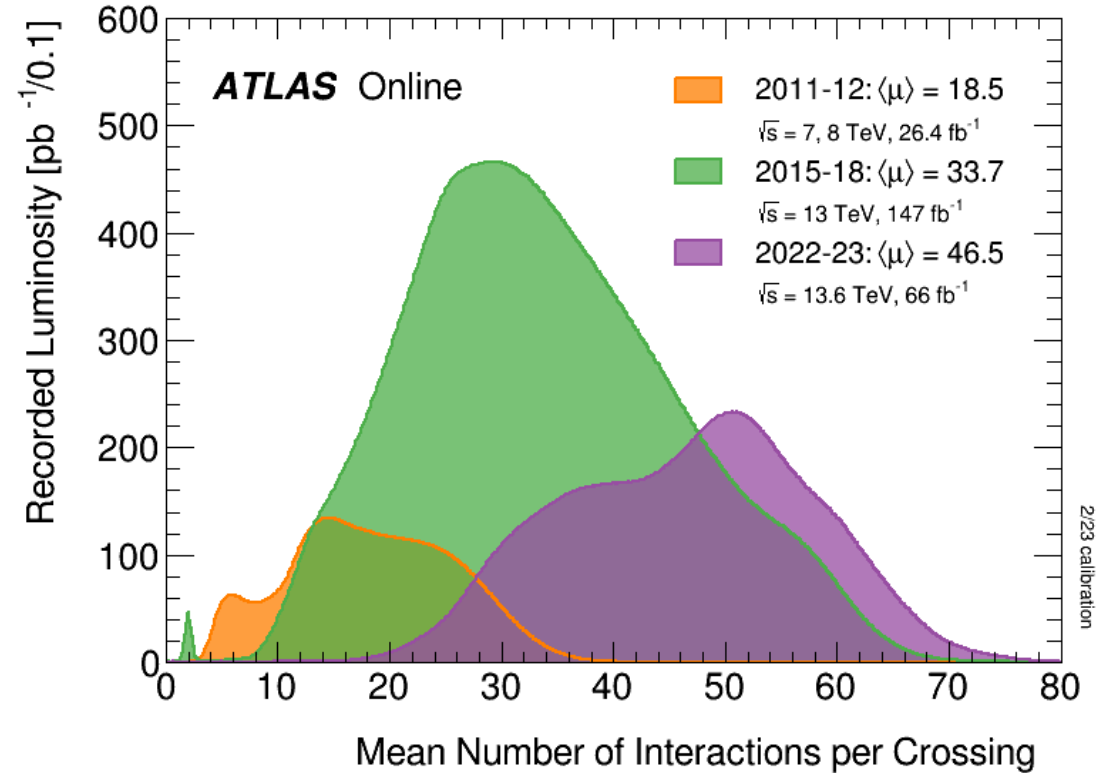
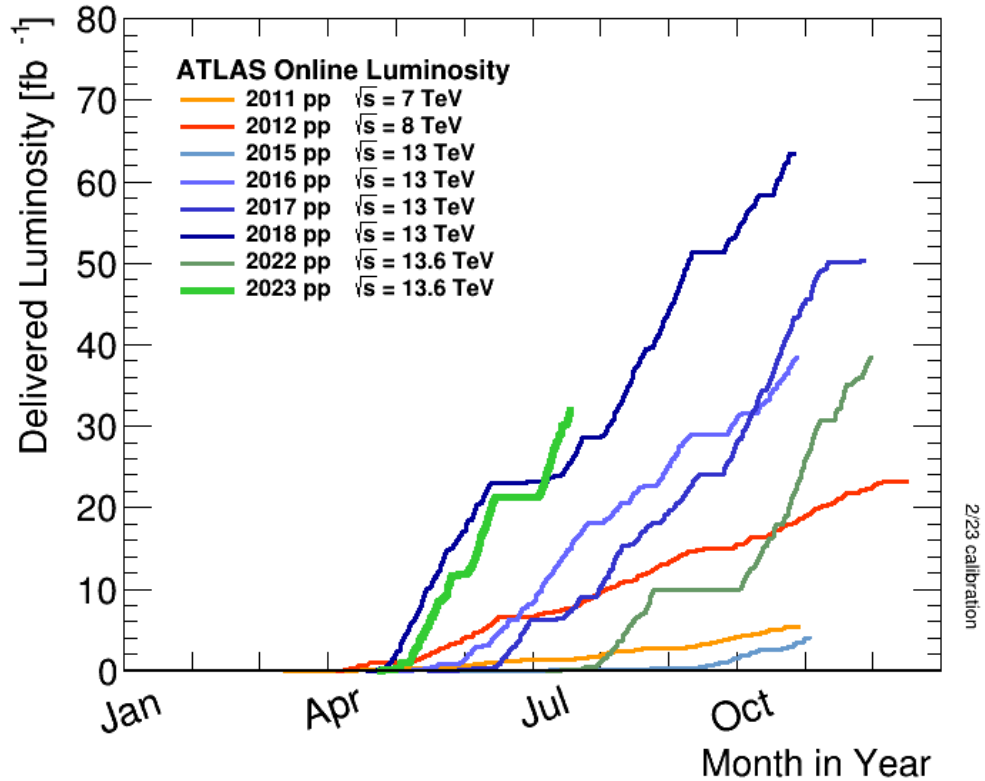
pileup 2023



- 2023 data recorded by ATLAS:
- pp 13.6 TeV : 29.9 fb^{-1} , pp high beta* run at 13.6 TeV : $\sim 0.3 \text{ nb}^{-1}$
- PbPb 5.36 TeV : 1.75 nb^{-1}



ATLAS operations Run 3



- ~52 fb⁻¹ of data recorded by ATLAS in Run 3 (2022+2023): 93(94)% data taking efficiency in 2022(2023)
- Great muon, electron, photon, jet reconstruction performance with Run 3 data
- Good luminosity calibration with 31.4 ± 0.7 fb⁻¹ with 2.2.% uncertainty



Физическая программа эксперимента АТЛАС.



Основные направления исследований:

- Стандартная модель
- Свойства Бозона Хиггса
- Физика топ кварка
- Физика b - кварка
- Физика тяжелых ионов
- Экзотика: темная материя, дополнительные измерения, квантовые черные дыры и т.д.



First results of Run 3 data (13.6 TeV)



ZZ→4l cross section arXiv:2311.09715

H→γγ, H→ZZ*→4l cross sections arXiv: 2306:11379

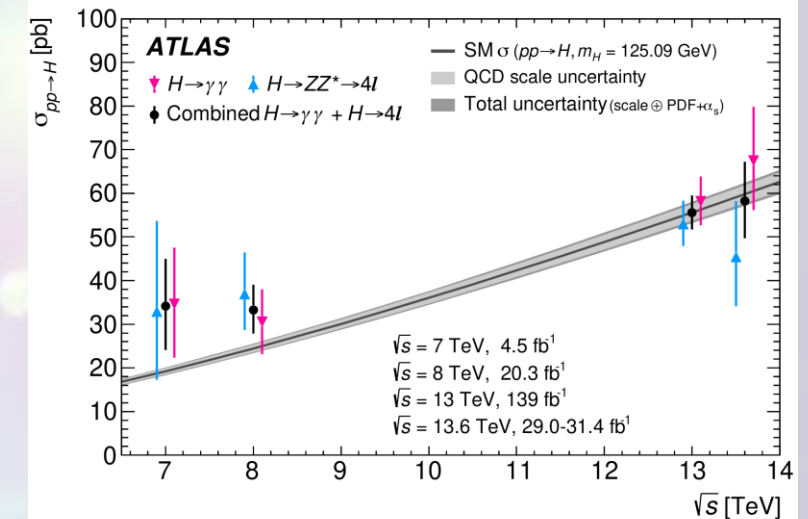
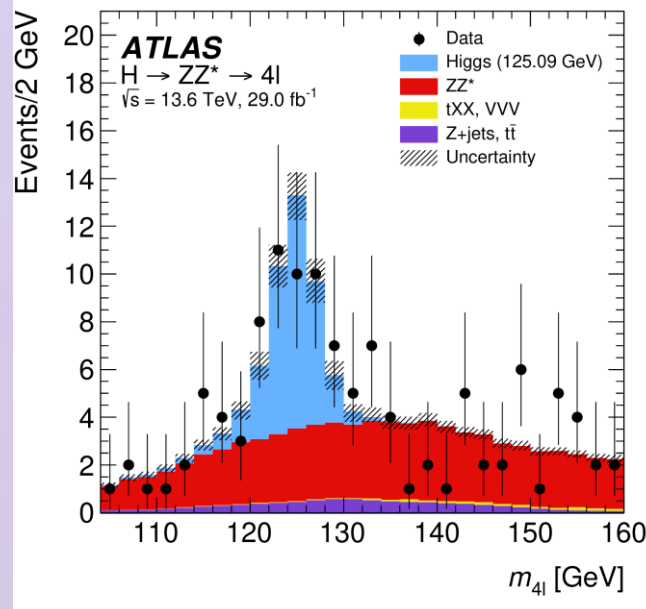
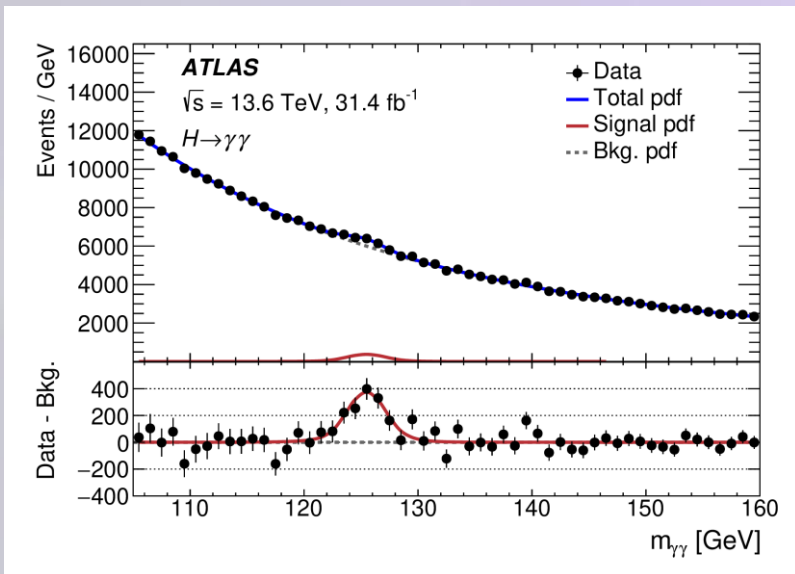
tt cross section Phys. Let. B 848 (2024) 138376

tt/Z cross sections ratio: Phys. Let. B 848 (2024) 138376

Combination of **H→γγ, H→ZZ*→4l**

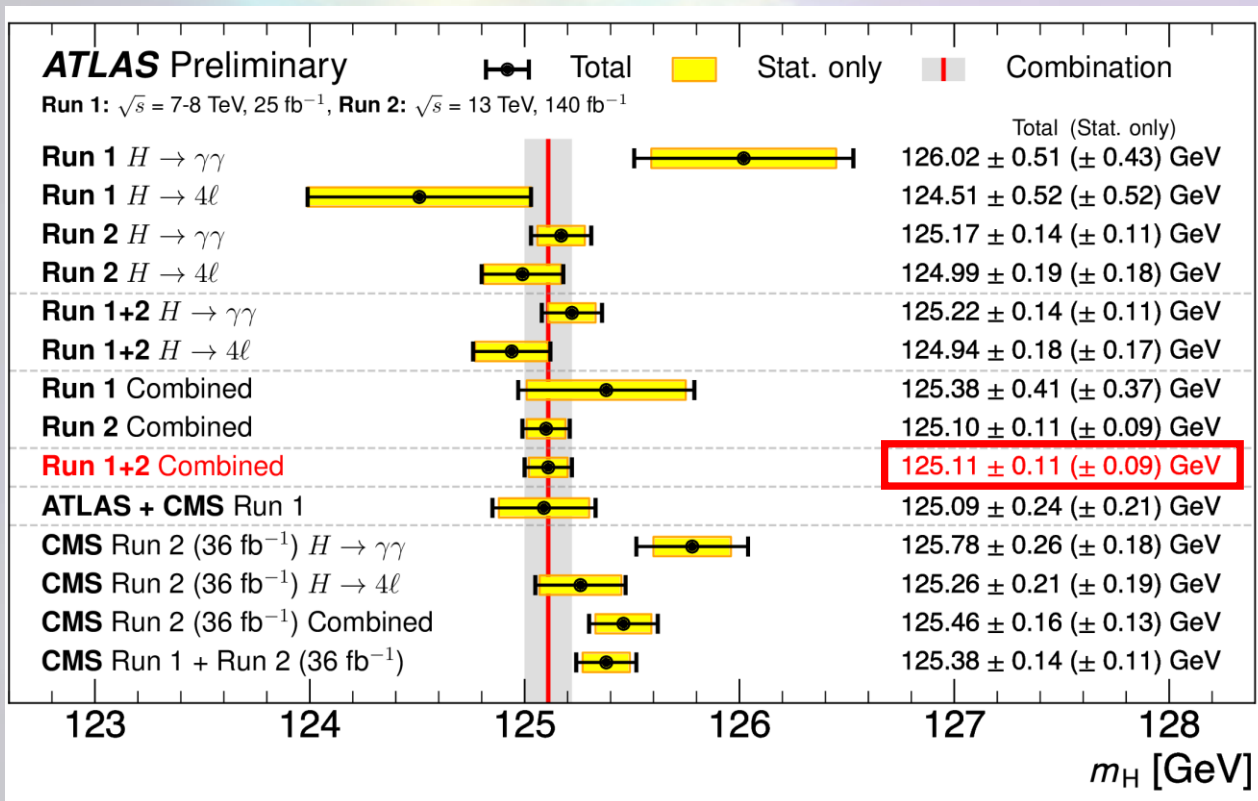
$$\sigma_{(pp \rightarrow H)} = 58.2 \pm 7.5(\text{stat.}) \pm 4.5(\text{syst.}) \text{ pb}$$

Compatible with SM $59.9 \pm 2.6 \text{ pb}$





Precise measurement of the Higgs mass



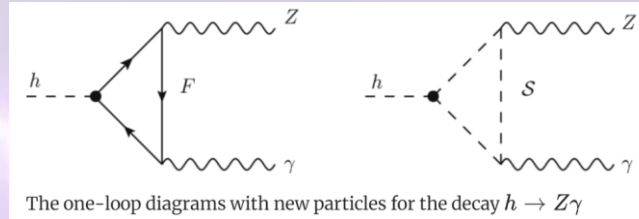
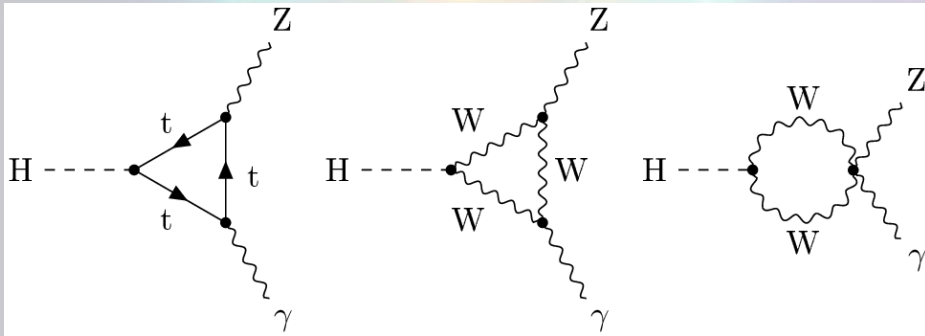
- Based on full Run 1 $\sqrt{s}=7.8$ (25 fb⁻¹) and Run 2 $\sqrt{s}=13$ TeV (140 fb⁻¹) data
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow (4\mu, 2e2\mu, 2\mu2e, 4e)$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels combined
- The most precise measured value at the moment:

$$m_H = 125.11 \pm 0.11 \text{ GeV}$$

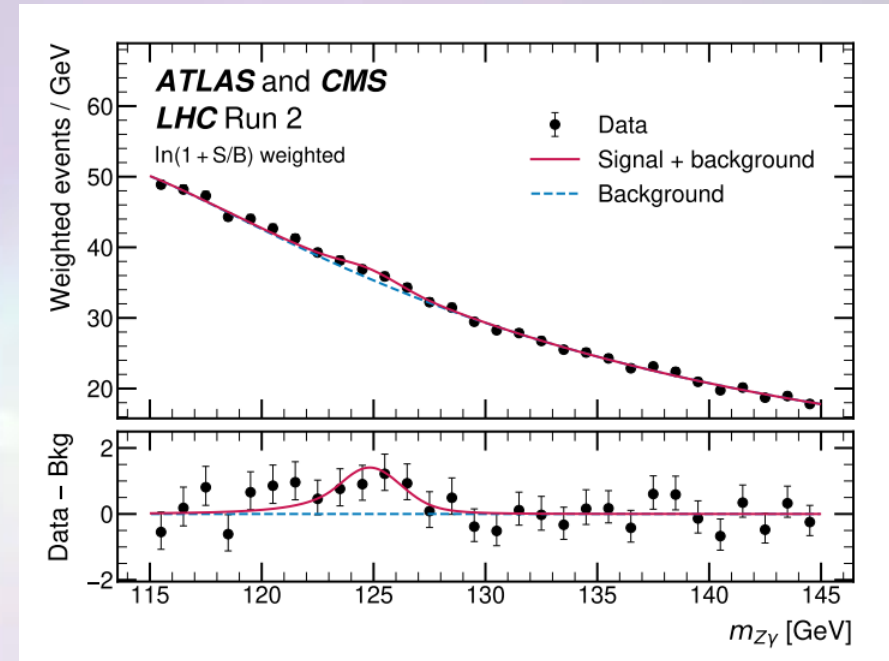
Phys.Rev.Lett. 131 (2023) 251802



First evidence for Higgs boson decay into two different bosons $H \rightarrow Z\gamma$ (ATLAS+CMS)



- In the SM, the $H \rightarrow Z\gamma$ branching fraction is $(1.5 \pm 0.1) \times 10^{-3}$
- $H \rightarrow Z\gamma$ sensitive to modifications in several BSM scenarios (e.g. MSSM charginos, sleptons, squarks), Eur. Phys. J. C (2022) 82:977)
- pp collision data $\sqrt{s} = 13$ TeV by the **ATLAS** and **CMS** with integrated luminosities of 139 fb^{-1} and 138 fb^{-1} respectively
- Observed **significance** is 3.4σ
- The measured $H \rightarrow Z\gamma$ branching fraction is $(3.4 \pm 1.1) \times 10^{-3}$
- The observed signal yield is 2.2 ± 0.7 times the SM prediction
- Agrees with the SM prediction within 1.9σ

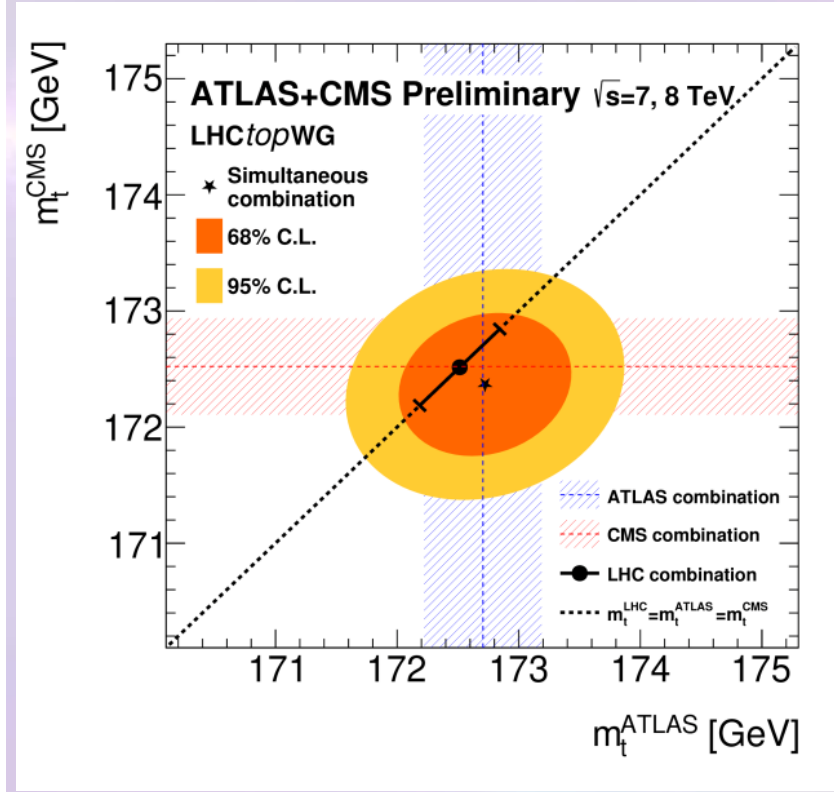
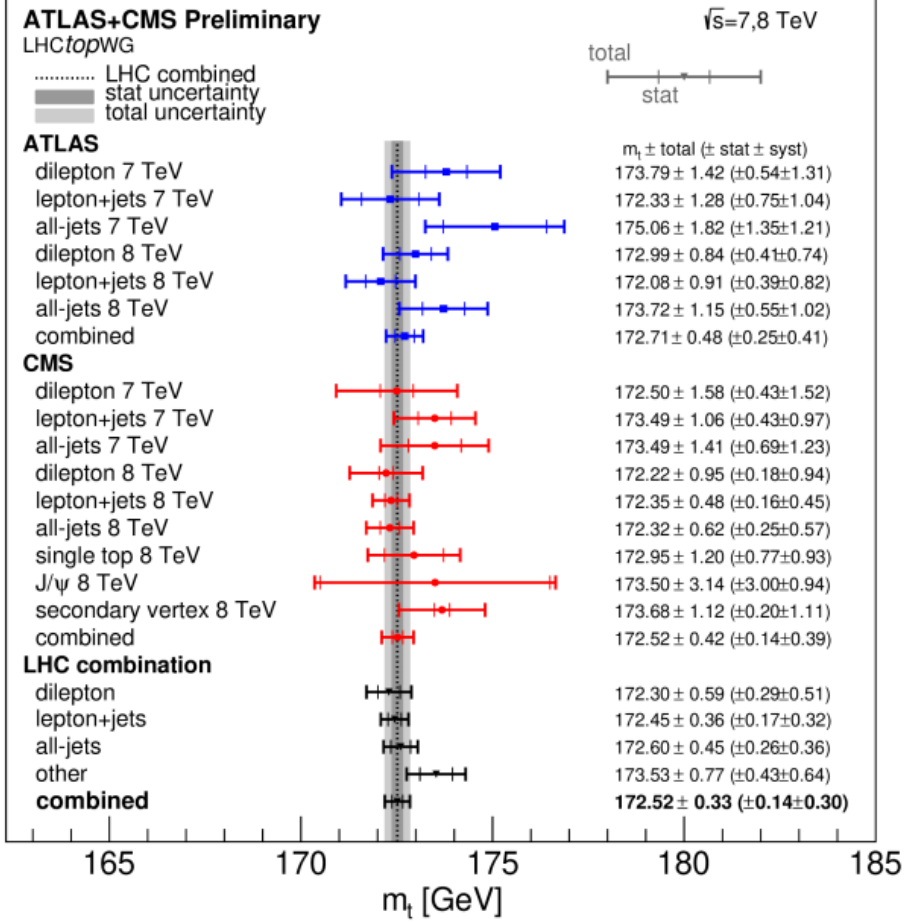


	Obs.(Exp.)	Signal strength μ
ATLAS	2.2σ (1.2σ)	$2.0^{+1.0}_{-0.9}$
CMS	2.6σ (1.1σ)	$2.4^{+1.0}_{-0.9}$
comb.	3.4σ (1.6σ)	2.2 ± 0.7

[arXiv:2309.03501](https://arxiv.org/abs/2309.03501)



Top quark mass measurement ATLAS+CMS



- ATLAS+CMS Run 1 data $\sqrt{s} = 7,8$ TeV (5 and 20 fb⁻¹)
- Combination of fifteen top quark mass measurements by ATLAS and CMS (Run1)
- Most precise top mass measurement to date thanks to the combination

$m_t = 172.52 \pm 0.14$ (stat.) ± 0.30 (syst.) GeV, total uncertainty 0.33 GeV

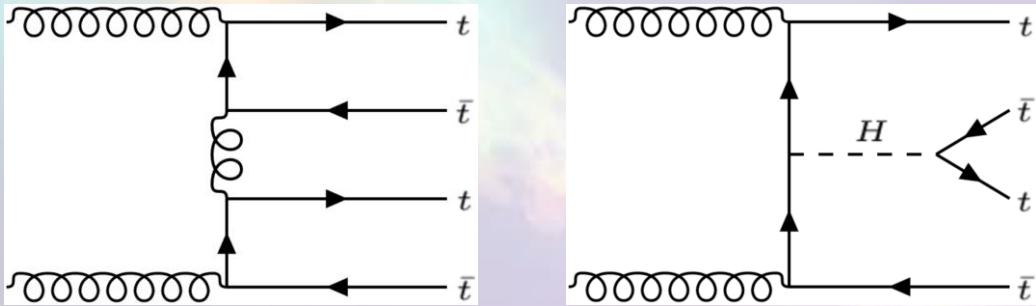
ATLAS-CONF-2023-066
 CMS-PAS-TOP-22-001
 CERN-LPCC-2023-02



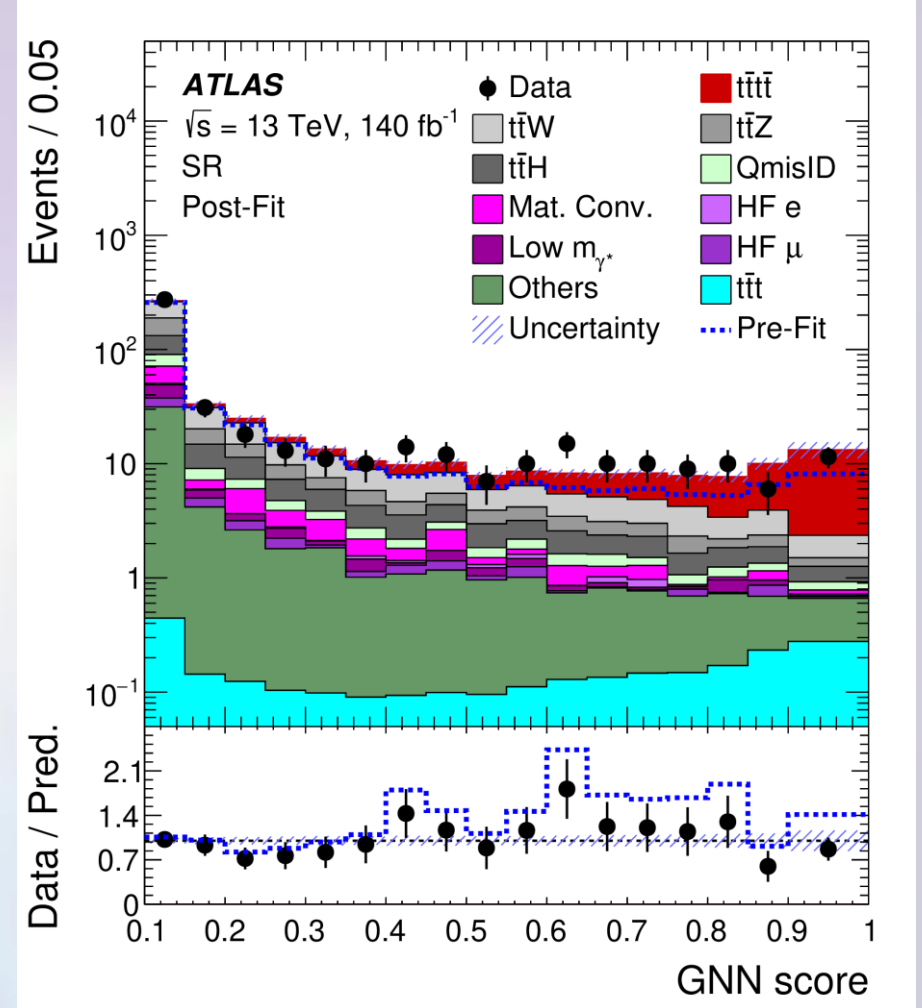
4-tops production



SM



- The $t\bar{t}t\bar{t}$ cross section could be enhanced in many BSM models, including gluino pair production in supersymmetric theories, scalar-gluon pair production, the associated production of a heavy scalar or pseudoscalar boson with a top-quark pair in two-Higgs-doublet models
- Full Run 2 data @ $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ 140 fb^{-1}
- Events with two leptons with the same electric charge or at least three leptons (electrons or muons)
- 6.1 (4.3) σ observed (expected) significance
- Measured cross section $22.5^{+6.6}_{-5.5} \text{ fb}$, compatible with SM prediction $12.0 \pm 2.4 \text{ fb}$ within 1.8σ

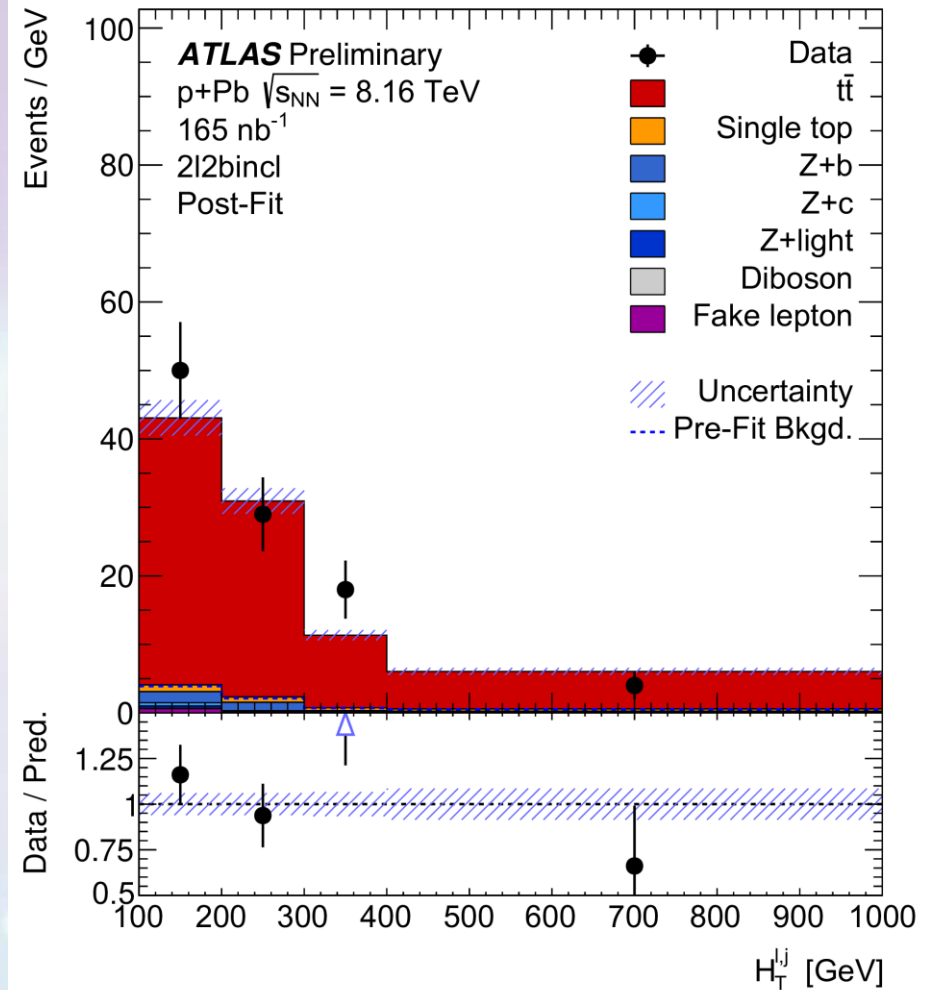
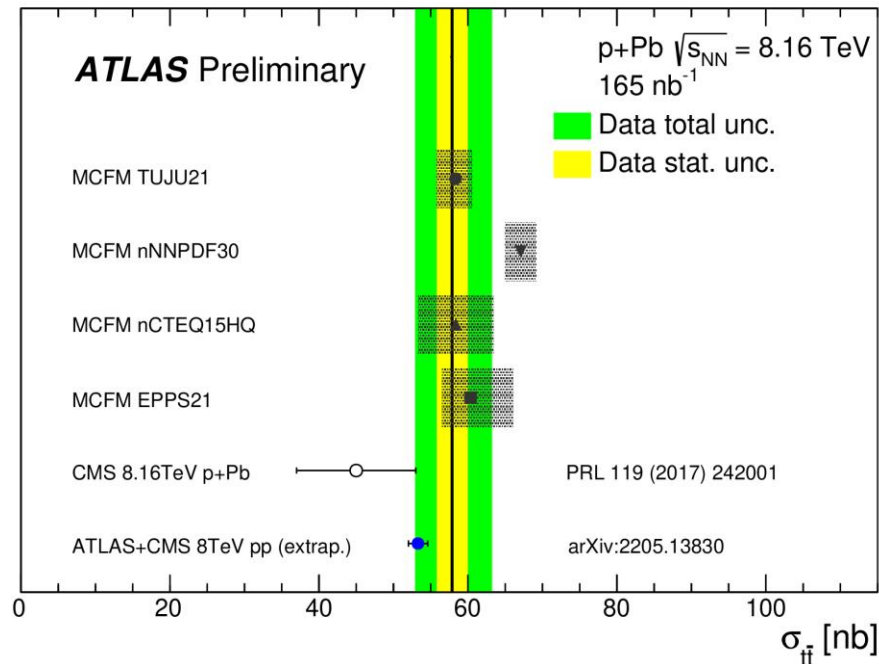


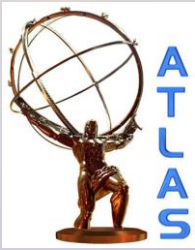


Observation of top-pair Production in p-Pb

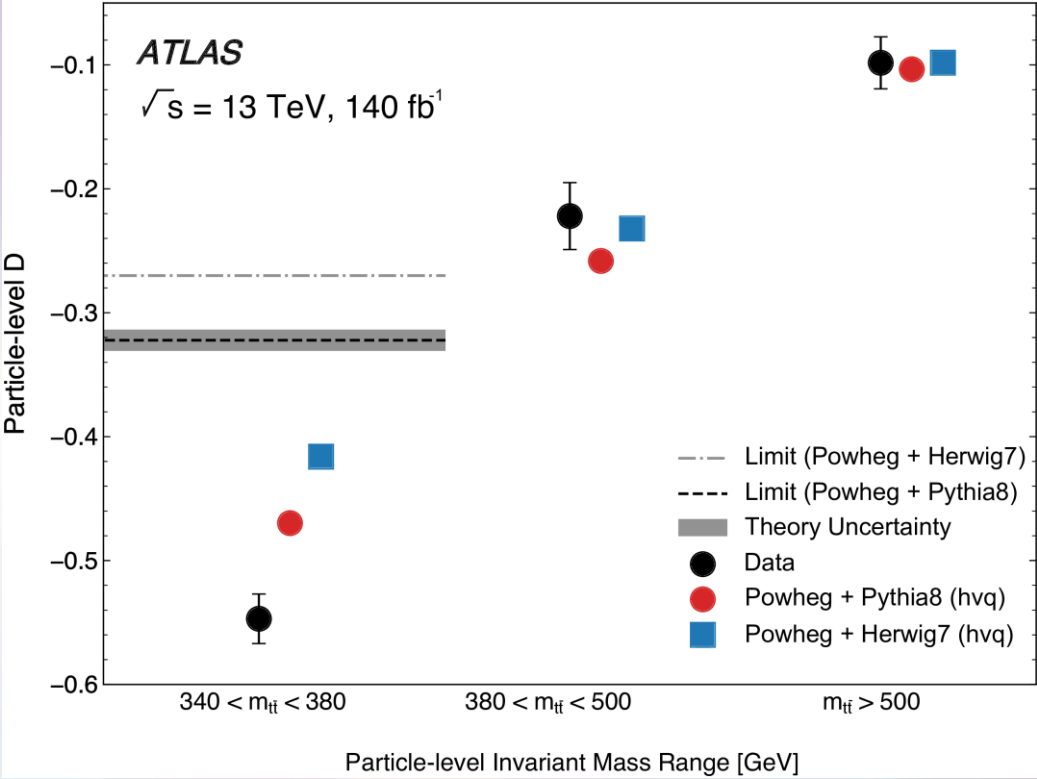
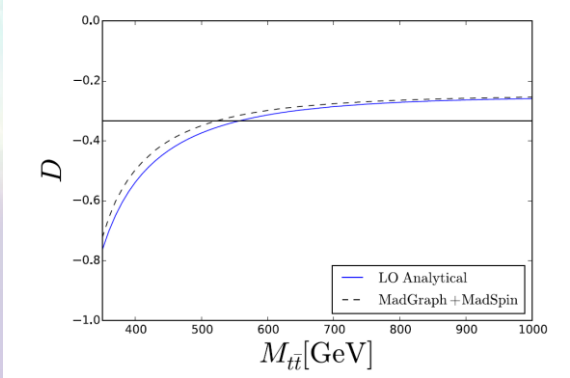
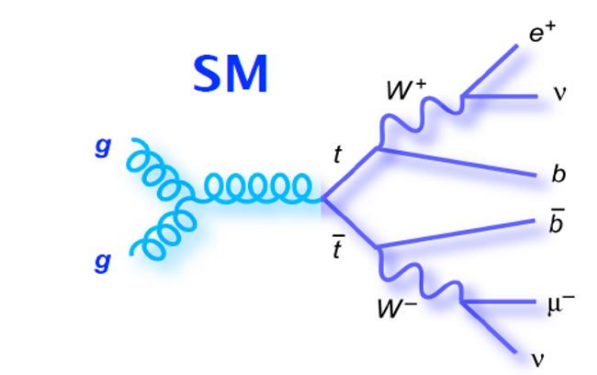


- top quarks provide novel probes of nuclear modifications to parton distribution functions (nPDF) (arXiv:1711.03105)
- Run 2 data (2016) $\sqrt{s} = 8.16$ TeV, luminosity 165 nb^{-1}
- lepton+jets and the dilepton channels
- significance over 5 standard deviations in both channels
- $\sigma_{t\bar{t}} = 57.9 \pm 2.0 \text{ (stat.)}_{-4.5}^{+4.9} \text{ (syst.) nb}$, good agreement with SM





Quantum Entanglement in $t\bar{t}$ system

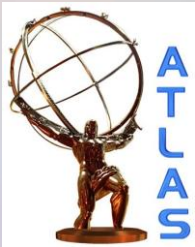


- $\rho^{AB} \neq \sum_i p_i \rho_i^A \otimes \rho_i^B$ - система находится в "запутанном" состоянии, например синглетное состояние: $|0,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)$
 - Исследовались спиновые корреляции $t\bar{t}$
 - Для проверки запутанности использовался Критерий Переса-Городецкого
- $$D = \frac{\text{tr}[C]}{3} < -\frac{1}{3}$$
- Дилептонный канал распада ($t \rightarrow Wb \rightarrow \ell\nu b$)
 - $t\bar{t}$ – в синглетном состоянии в области $340 < m_{t\bar{t}} < 380 \text{ GeV}$
 - $D = -0.547 \pm 0.002(\text{стат.}) \pm 0.0196(\text{сист.})$, отличие 3.9σ и 3.3σ от PP8 и PH7 генераторов.

arXiv:2311.07288
Submitted to Nature



Участие ПИЯФ В физической программе эксперимента АТЛАС



- **Физика топ кварков**

- Измерение коэффициентов спиновой матрицы плотности в парном рождении $t\bar{t}$
- Проверка квантовой запутанности в процессе парного рождения $t\bar{t}$ (Quantum Entanglement)

- **Физика за пределами Стандартной модели (BSM):**

- поиски новых "невидимых" каналов распада бозона Хиггса SM ("Higgs portal" model)
- поиски магнитных монополей (HIP)

Руководитель – О.Л. Федин

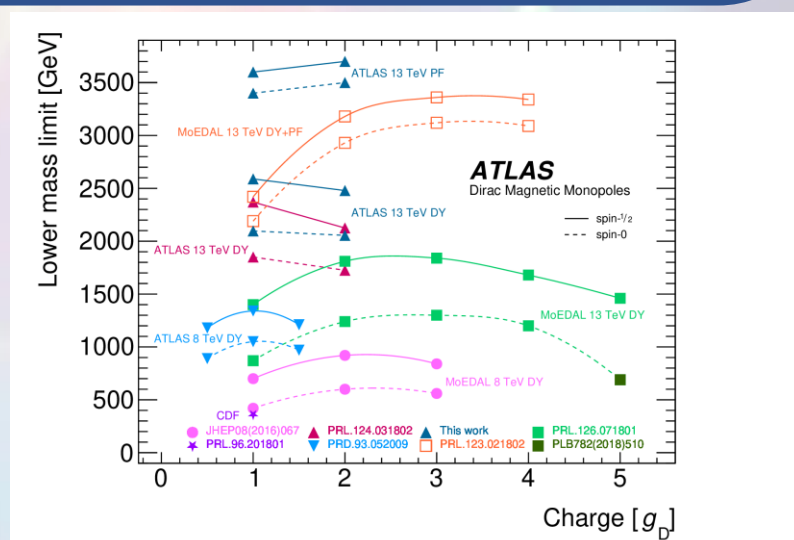
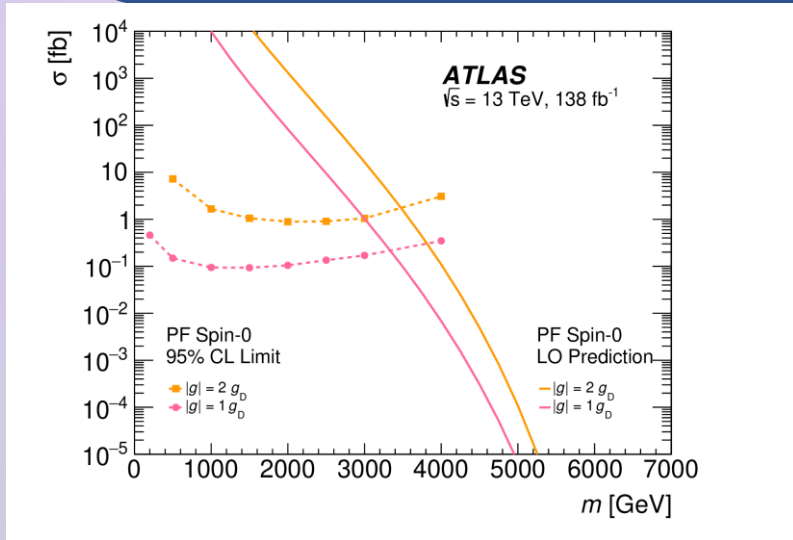
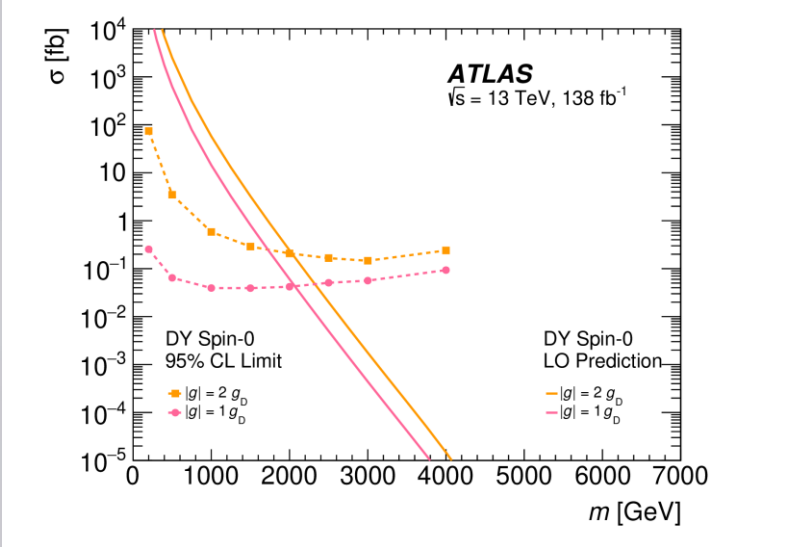
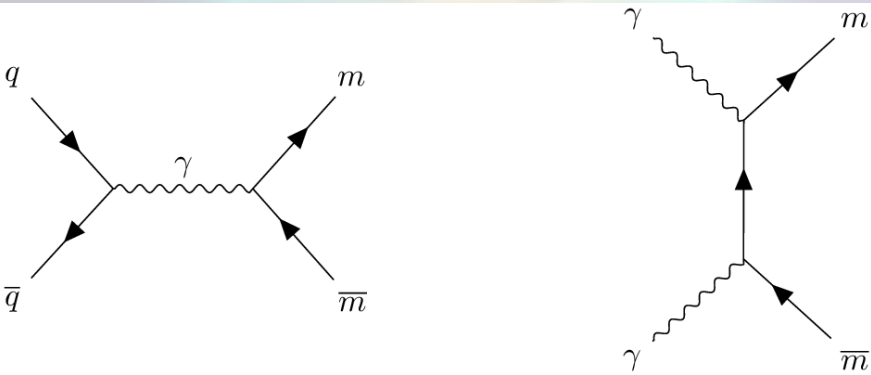
В.П. Малеев, С.Г. Барсов, Ю.Г. Нарышкин, В.А. Щегельский, А.Е. Ежилов, М.П. Левченко, Д. Пуджа, М.В. Покидова

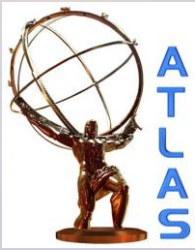


Search for magnetic monopoles



- Considering the Drell-Yan and photon-fusion pair production mechanisms as benchmark models
- many TRT HT hits in a region aligned with a narrow high-energy deposit in the LAr EM calorimeter.
- No HIPs candidate was observed.
- Spin -0 and spin 1/2 monopoles with magnetic charge $1g_D$ and $2g_D$ and high electric charge $20 \leq |z| \leq 100$ for masses between 200 GeV and 4000 GeV
- The ATLAS monopole searches $|\eta| < 1.75$ sensitive to $1g_D$ and $2g_D$ are complementary to those performed using the dedicated MoEDAL ($2 < \eta < 5$) experiment at the LHC

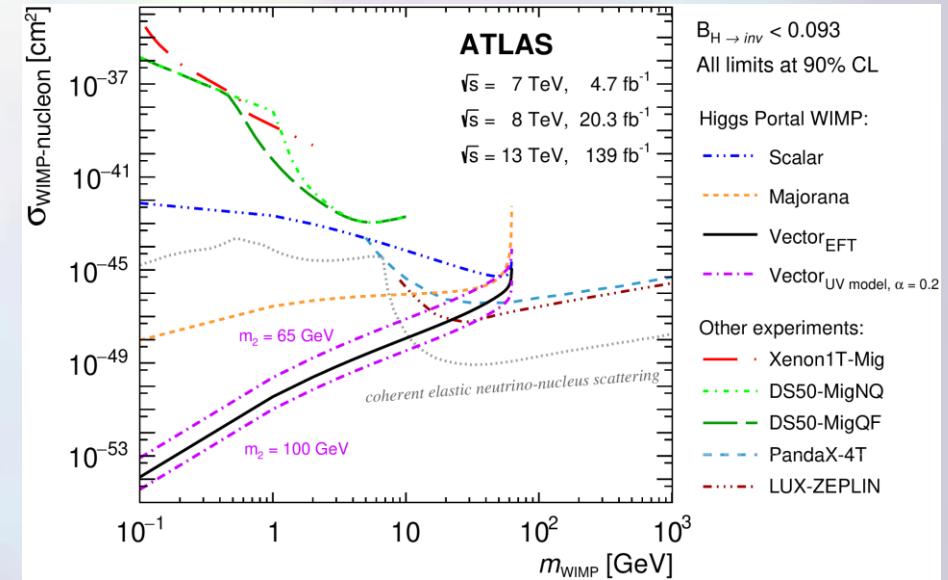
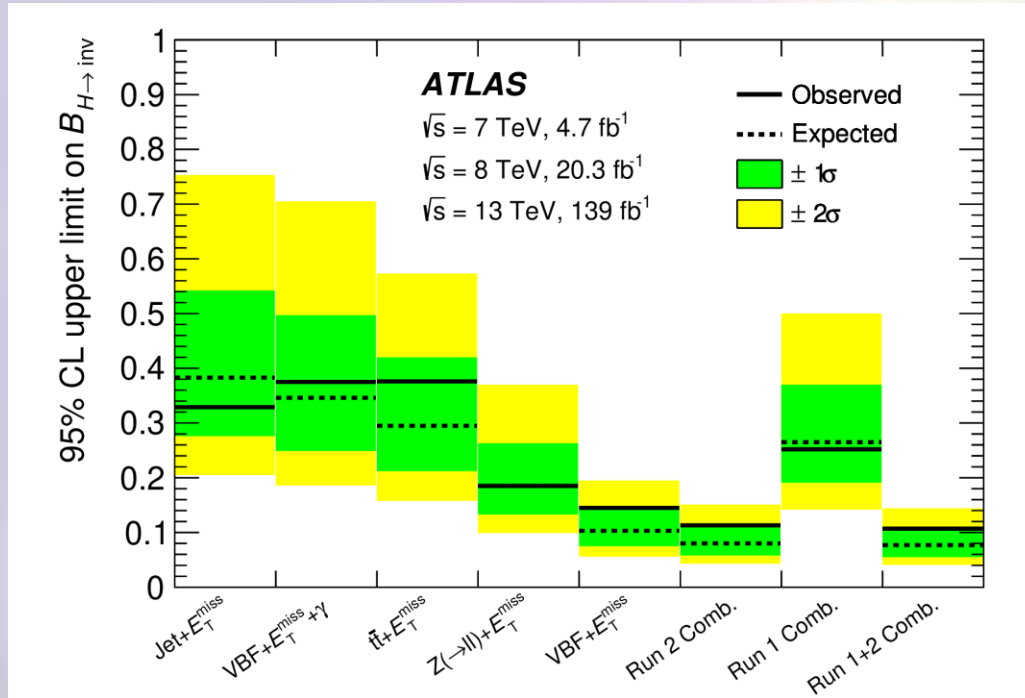




H → inv combinations

- Higgs portal model: Higgs decay to Dark matter particles
- LHC Run 1 + Run 2 data, different channels combination
- H → invisible branching ratio of $0.11(0.11^{+0.04}_{-0.03})$ full Run 2, limited number of channels

Analysis	Best fit $\mathcal{B}_{H \rightarrow inv}$	Observed 95% U.L.	Expected 95% U.L.
Jet +	$-0.09^{+0.19}_{-0.20}$	0.329	$0.383^{+0.157}_{-0.107}$
VBF + γ	$0.04^{+0.17}_{-0.15}$	0.375	$0.346^{+0.151}_{-0.097}$
$t\bar{t}$ +	0.08 ± 0.15	0.376	$0.295^{+0.125}_{-0.083}$
$Z(\rightarrow \ell\ell)$ +	0.00 ± 0.09	0.185	$0.185^{+0.078}_{-0.052}$
VBF +	0.05 ± 0.05	0.145	$0.103^{+0.041}_{-0.028}$
Run 2 Comb.	0.04 ± 0.04	0.113	$0.080^{+0.031}_{-0.022}$
Run 1 Comb.	$-0.02^{+0.14}_{-0.13}$	0.252	$0.265^{+0.105}_{-0.074}$
Run 1+2 Comb.	0.04 ± 0.04	0.107	$0.077^{+0.030}_{-0.022}$

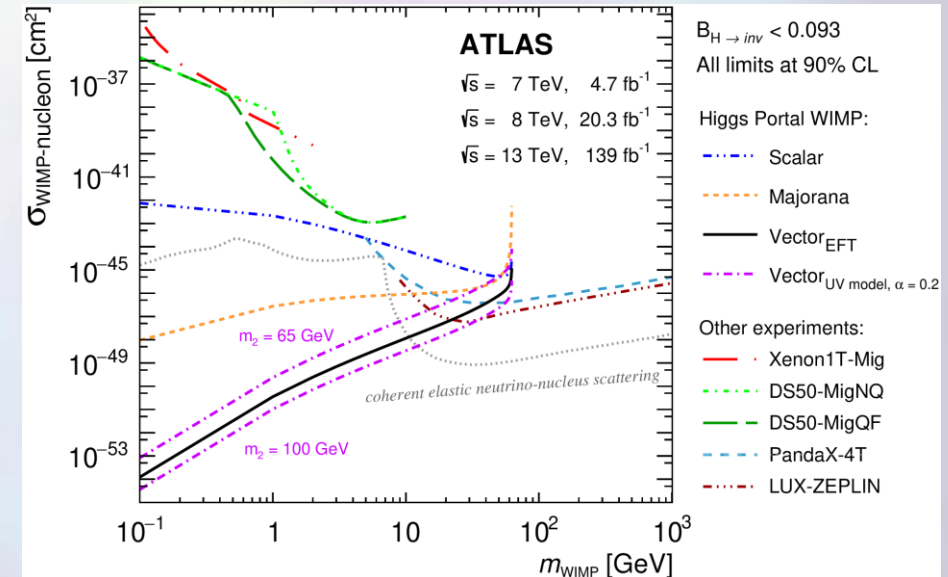
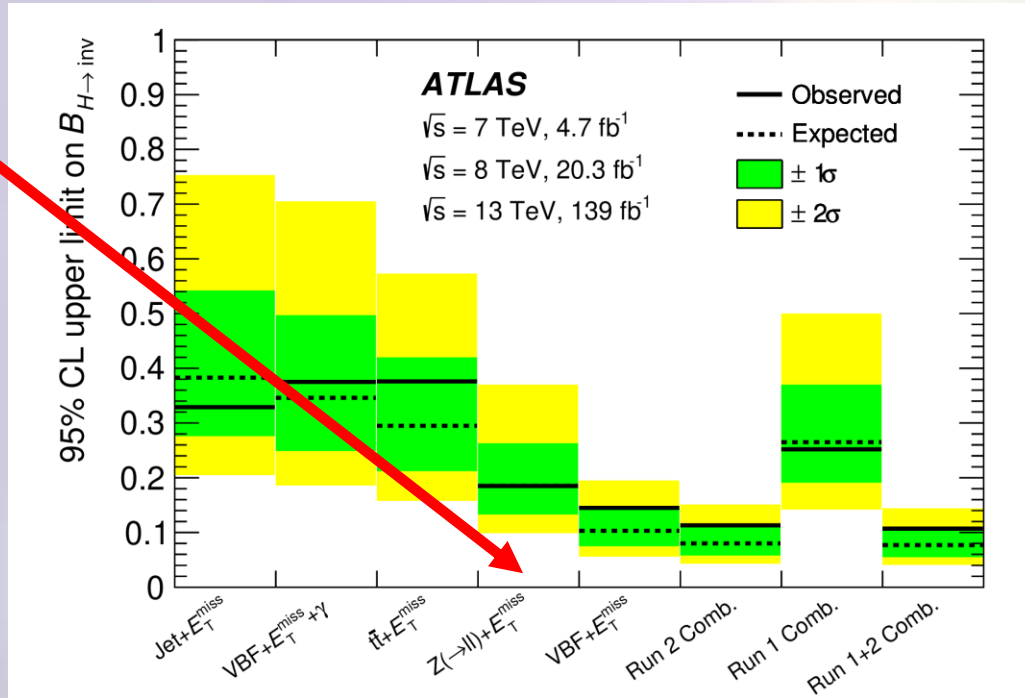
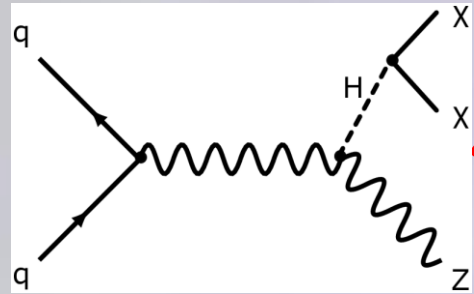




H → inv combinations

- Higgs portal model: Higgs decay to Dark matter particles
- LHC Run 1 + Run 2 data, different channels combination
- H → invisible branching ratio of $0.11(0.11^{+0.04}_{-0.03})$ full Run 2, limited number of channels

Analysis	Best fit $\mathcal{B}_{H \rightarrow inv}$	Observed 95% U.L.	Expected 95% U.L.
Jet +	$-0.09^{+0.19}_{-0.20}$	0.329	$0.383^{+0.157}_{-0.107}$
VBF + γ	$0.04^{+0.17}_{-0.15}$	0.375	$0.346^{+0.151}_{-0.097}$
$t\bar{t}$ +	0.08 ± 0.15	0.376	$0.293^{+0.125}_{-0.083}$
$Z(\rightarrow \ell\ell)$ +	0.00 ± 0.09	0.185	$0.185^{+0.078}_{-0.052}$
VBF +	0.05 ± 0.05	0.145	$0.103^{+0.041}_{-0.028}$
Run 2 Comb.	0.04 ± 0.04	0.113	$0.080^{+0.031}_{-0.022}$
Run 1 Comb.	$-0.02^{+0.14}_{-0.13}$	0.252	$0.265^{+0.105}_{-0.074}$
Run 1+2 Comb.	0.04 ± 0.04	0.107	$0.077^{+0.030}_{-0.022}$

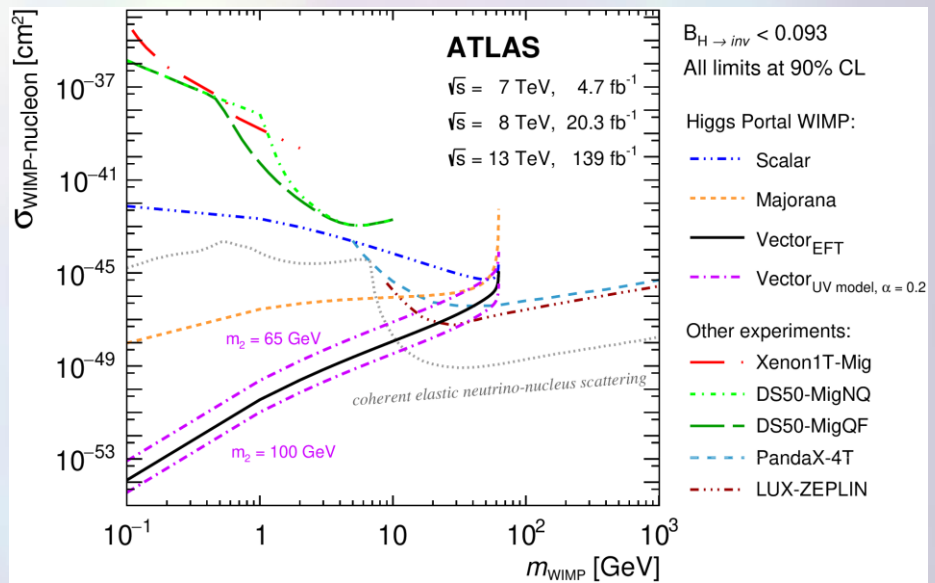
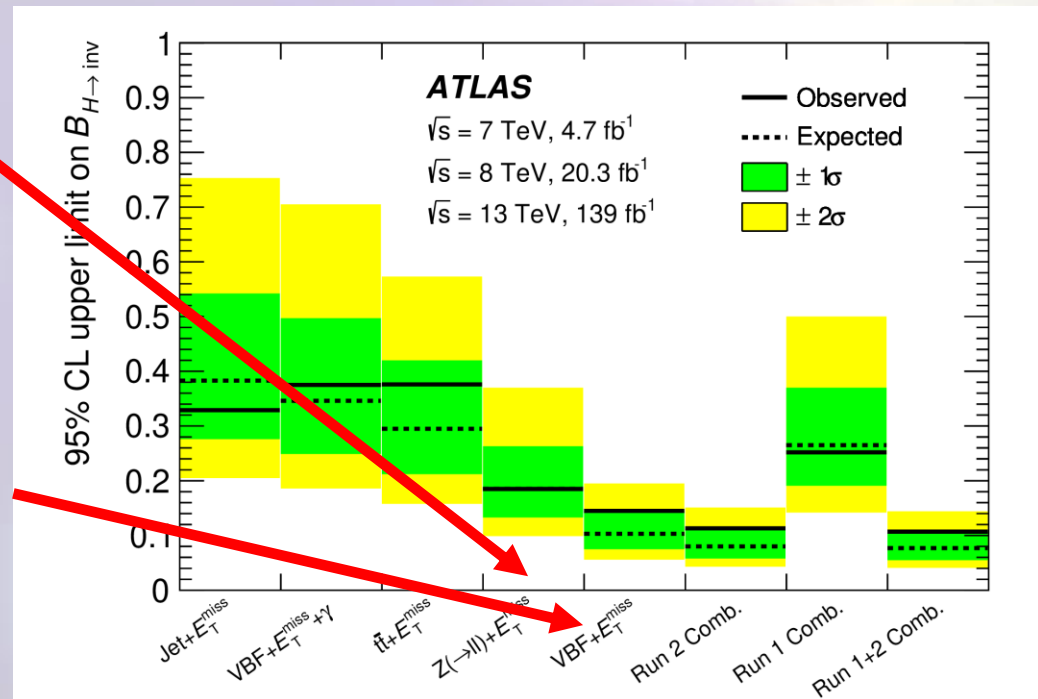
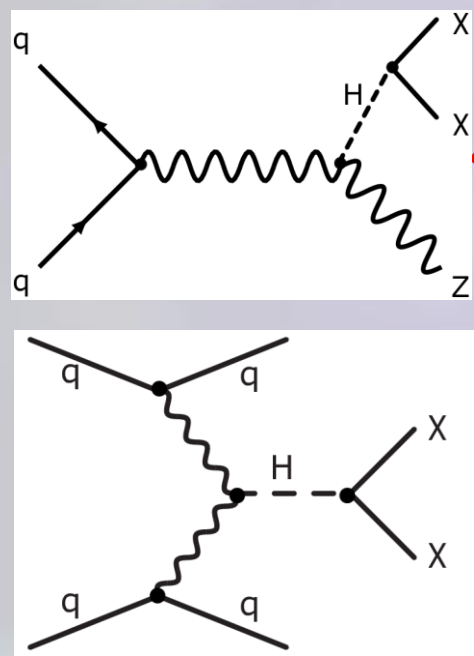




H → inv combinations

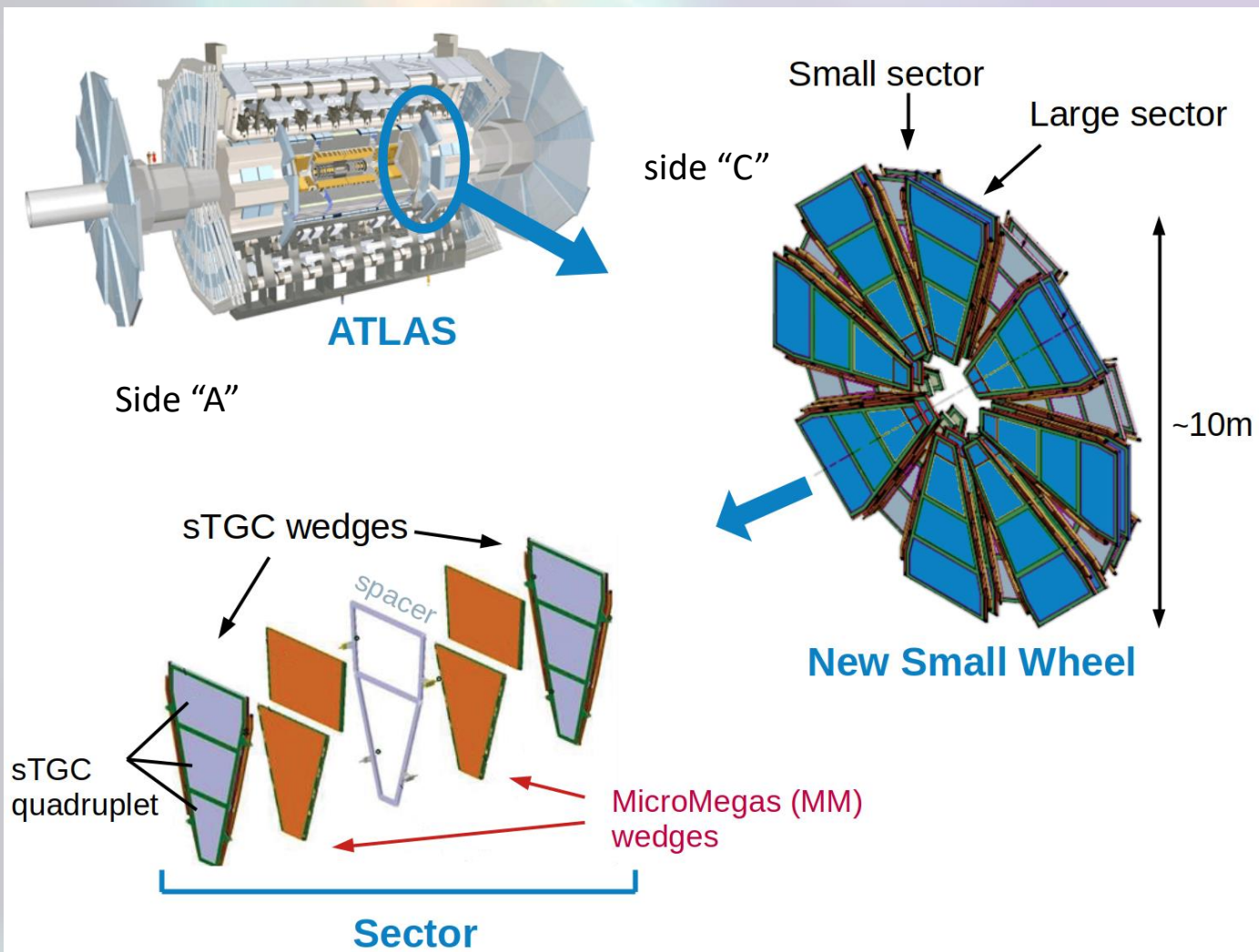
- Higgs portal model: Higgs decay to Dark matter particles
- LHC Run 1 + Run 2 data, different channels combination
- H → invisible branching ratio of $0.11(0.11^{+0.04}_{-0.03})$ full Run 2, limited number of channels

Analysis	Best fit $\mathcal{B}_{H \rightarrow inv}$	Observed 95% U.L.	Expected 95% U.L.
Jet +	$-0.09^{+0.19}_{-0.20}$	0.329	$0.383^{+0.157}_{-0.107}$
VBF + γ	$0.04^{+0.17}_{-0.15}$	0.375	$0.346^{+0.151}_{-0.097}$
$t\bar{t}$ +	0.08 ± 0.15	0.376	$0.295^{+0.125}_{-0.083}$
$Z(\rightarrow \ell\ell)$ +	0.00 ± 0.09	0.185	$0.185^{+0.078}_{-0.052}$
VBF +	0.05 ± 0.05	0.145	$0.103^{+0.041}_{-0.028}$
Run 2 Comb.	0.04 ± 0.04	0.113	$0.080^{+0.031}_{-0.022}$
Run 1 Comb.	$-0.02^{+0.14}_{-0.13}$	0.252	$0.265^{+0.105}_{-0.074}$
Run 1+2 Comb.	0.04 ± 0.04	0.107	$0.077^{+0.030}_{-0.022}$





Поддержка детектора NSW мюонной системы детектора АТЛАС



- ПИЯФ принимает участие в поддержке мюонной системы детектора АТЛАС.
- В рамках модернизации детектора АТЛАС во время LS2 была произведена замена малых мюонных дисков на новые NSW, основными компонентами которых являются тонко-зазорные камеры sTGC и микро-мегас ММ.
- NSW используются в мюонном триггере первого уровня L1 и при реконструкции треков мюонов



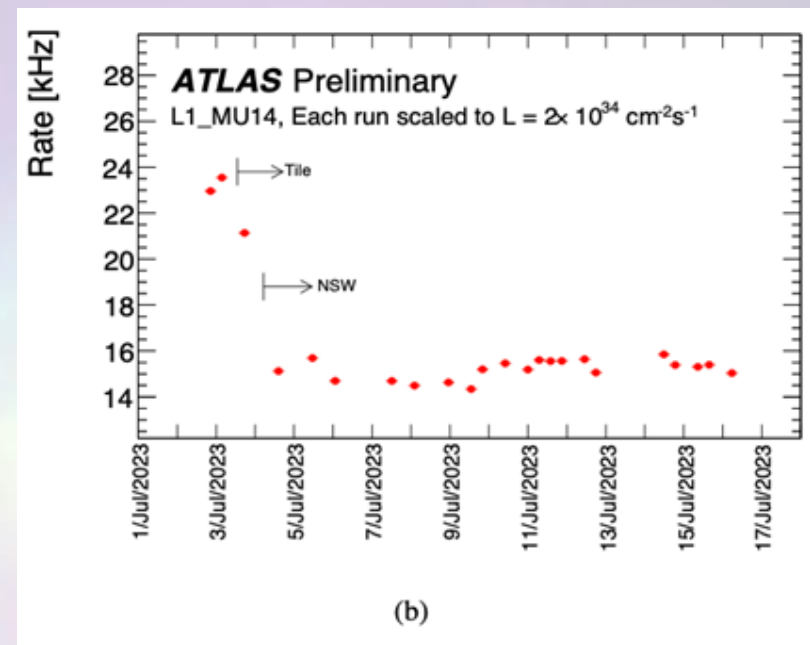
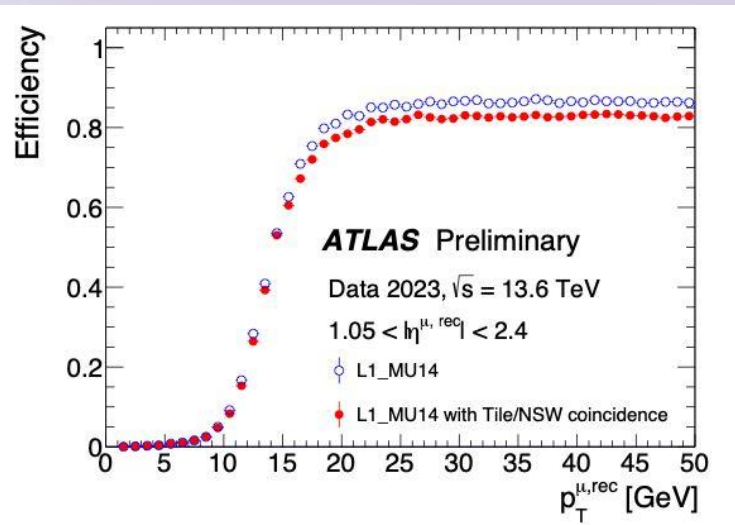
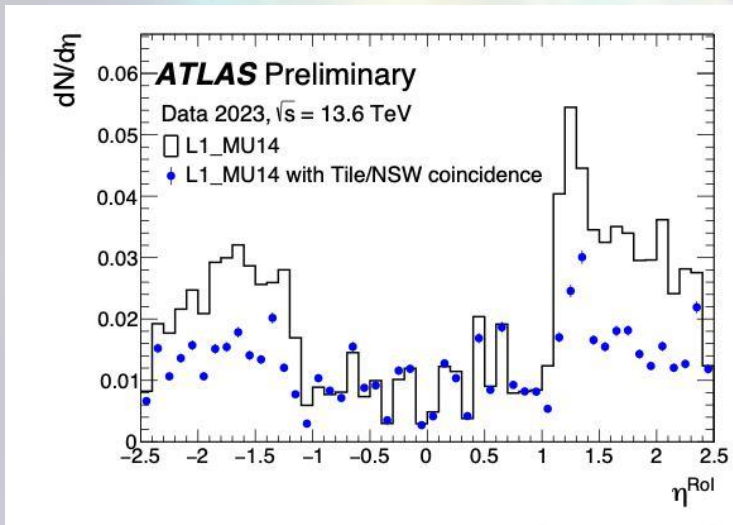
NSW commissioning & performance



- После успешной интеграции детекторов NSW в 2022 году, сотрудники НИЦ КИ - ПИЯФ продолжили работу по обслуживанию всех систем NSW детектора, а также в подготовке программного обеспечения необходимого для успешной эксплуатации NSW детектора.
- С начала сеанса Run III, NSW были включены в сбор данных в ATLAS. Для обеспечения работоспособности детектора сотрудники НИЦ КИ - ПИЯФ принимают участие в сменах STG Primary On-call Expert.
- Сотрудники НИЦ КИ - ПИЯФ смогли сохранить количество работающих высоковольтных каналов на высоком уровне (~95%), а также обеспечить высокую эффективность всей системы в целом в течение сбора данных детектором ATLAS.
- В настоящее время полная цепочка триггера успешно интегрирована в триггер первого уровня (L1), что позволило снизить частоту ложных срабатываний и увеличить эффективность триггера в торцевых областях детектора.



NSW trigger efficiency



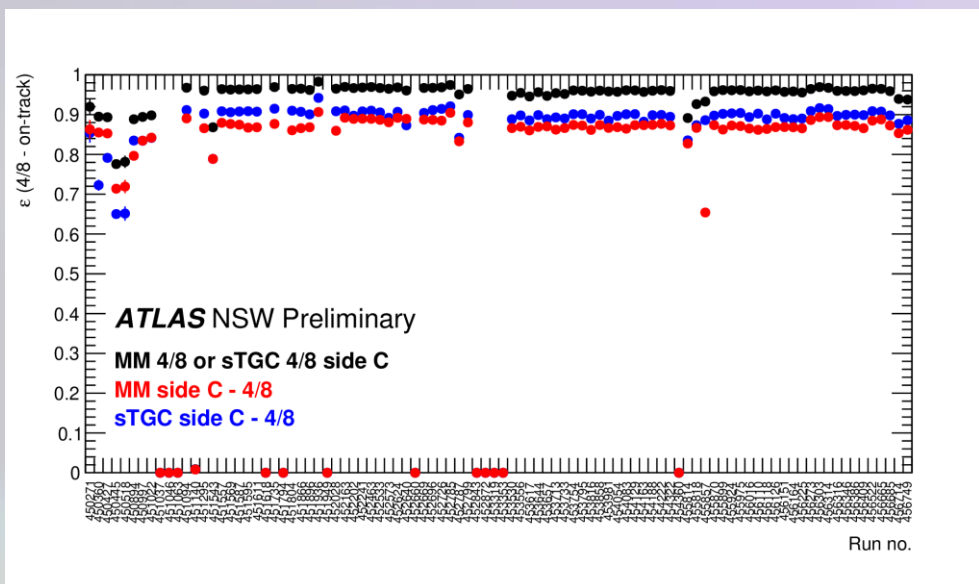
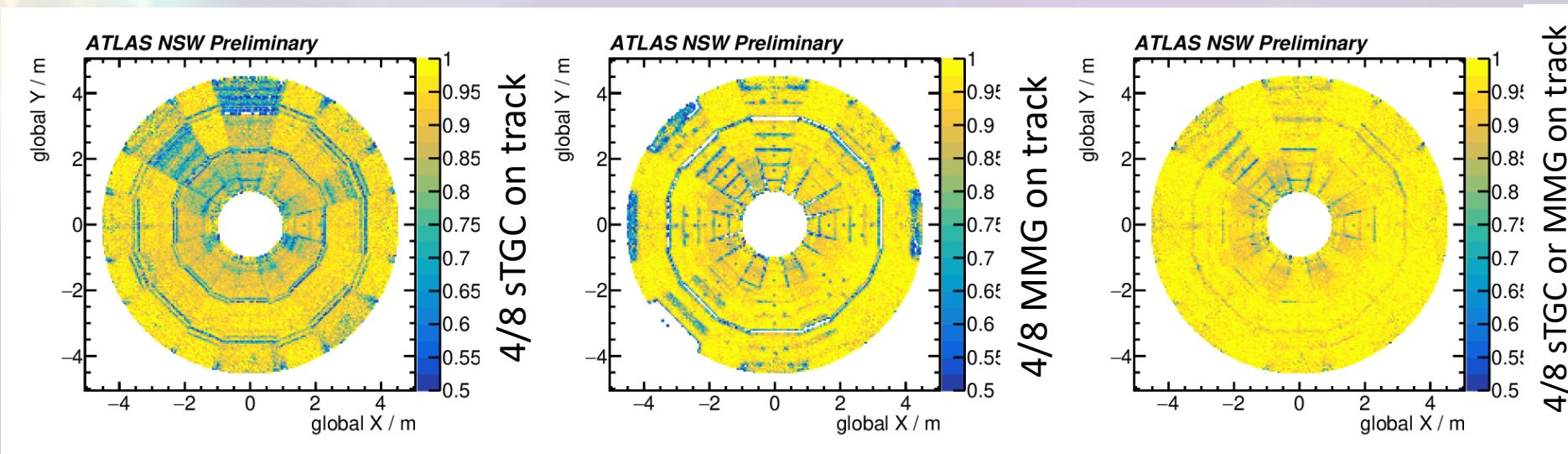
- Распределение количества треков по псевдобыстроте (η) в зонах интереса (ROI), которые соответствуют триггеру первого уровня (L1) с пороговым значением поперечного импульса 14 ГэВ до и после включения в схему совпадений адронного калориметра Tile и NSW. Для совпадений используются только данные с sTGC-Pad.

Средняя эффективность каждого слоя MicroMegas/sTGC составляет примерно 65 - 80% в зависимости от области где она расположена и постоянна во времени.

- Частота срабатывания триггера L1 с пороговым значением поперечного импульса 14 ГэВ (L1 MU14), нормированный на светимость ускорителя $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, в зависимости от времени в 2023 году.



NSW efficiency



Efficiency for having at least four out of eight layers of Micromegas (red), sTGC strips (blue), or of either of the two (black) to a muon track with $p_T > 15$ GeV passing through the NSW on the A side for all physics runs taken in 2023 with pp collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV.

По результатам работы в 2022 г. :

- Опубликовано:

внутренних препринтов	1
-----------------------	---

статей	3
--------	---

• доклады на конференциях	6
---------------------------	---

Публикации по результатам работы в 2023 г.

- 1. G. Aad, ..., A. Ezhilov, O. Fedin, M. Levchenko, V. Maleev, Yu. Naryshkin, Y. Ryabov, V. Schegelsky, et.al., ATLAS Collaboration, "Combination of searches for invisible decays of the Higgs boson using 139 fb⁻¹ of proton-proton collision data at $\sqrt{s}=13$ TeV collected with the ATLAS experiment", Phys.Lett.B 842 (2023) 137963.
- 2. G. Aad, ..., A. Ezhilov, O. Fedin, M. Levchenko, V. Maleev, Yu. Naryshkin, Y. Ryabov, V. Schegelsky, et.al., ATLAS Collaboration, "Observation of quantum entanglement in top-quark pair production", ATLAS-CONF-2023-069, submitted to Nature
- 3. G. Aad, ..., A. Ezhilov, O. Fedin, M. Levchenko, V. Maleev, Yu. Naryshkin, Y. Ryabov, V. Schegelsky, et.al., ATLAS Collaboration, "Search for magnetic monopoles and stable particles with high electric charges in $\sqrt{s}=13$ TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector", CERN-EP-2023-150, JHEP 11 (2023) 112

Выступления на конференциях в 2023 г.

- Всероссийская конференция «Неделя науки ФизМех», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия, 3 - 7 апреля 2023, «Статистическая комбинация поисков невидимых распадов бозона Хиггса в эксперименте ATLAS», М.В. Покидова, Я.А. Бердников, Ю.Г. Нарышкин.
- X Всероссийский с международным участием молодежный научный форум «Open Science 2023», НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ Гатчина, Россия, 15 - 17 ноября 2023, «Результаты поисков распадов Бозона Хиггса на частицы Темной Материи в эксперименте ATLAS», Покидова М.В., Бердников Я.А. Нарышкин Ю.Г
- Всероссийская конференция «Неделя науки ФизМех», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия, 4 - 9 апреля 2022, «Поиск частиц Темной Материи в канале $mono-Z$ в эксперименте ATLAS», М.В. Покидова.
- Всероссийская конференция «Неделя науки ФизМех», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия, 4 - 9 апреля 2022, «Измерение спиновых корреляций в процессе рождения пар t -кварк- t -антикварк в эксперименте ATLAS», О.В. Лосева.
- ATLAS DCS Operation meeting, CERN, Switzerland, 10 March 2023, "Changes in LHC main panel and underlying DDC/OLC changes", S.Khomutnikov, S.Schlenker.
- ATLAS DCS Operation meeting, CERN, Switzerland, 29 July 2023, "Tool of Consistency Inspection of COOL Folder Definition", S.Khomutnikov.



BACKUP



H → inv combinations



- Model "Higgs Portal"
- Limits for $H \rightarrow \text{inv}$ BR obtained with different Higgs production channels
- The purpose of the channel combination is to improve the sensitivity (upper limit)

* VBF+MET

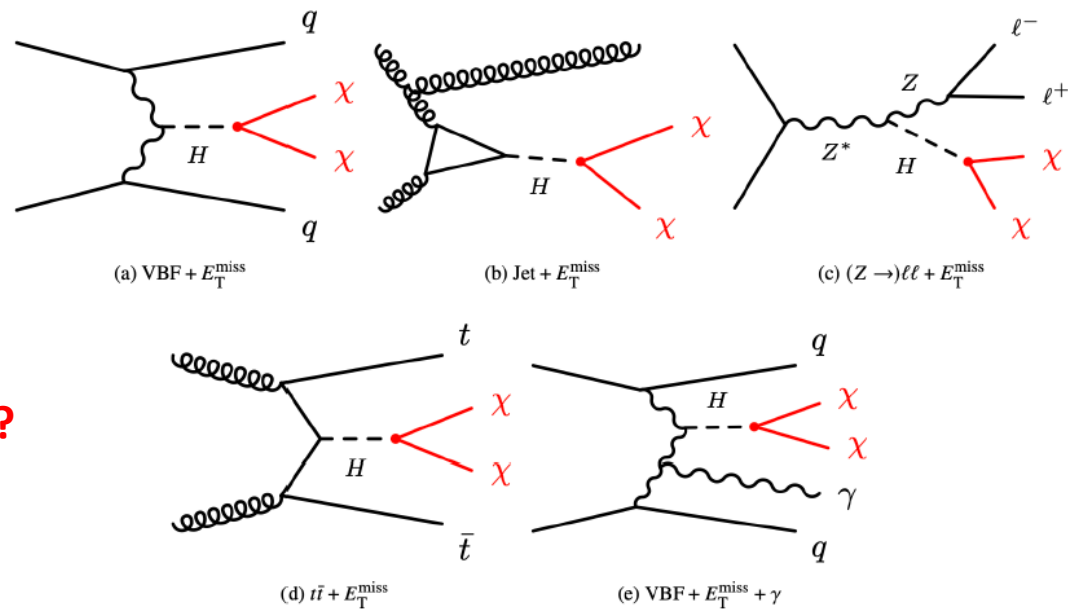
* MET+Z(l)

* tt+MET

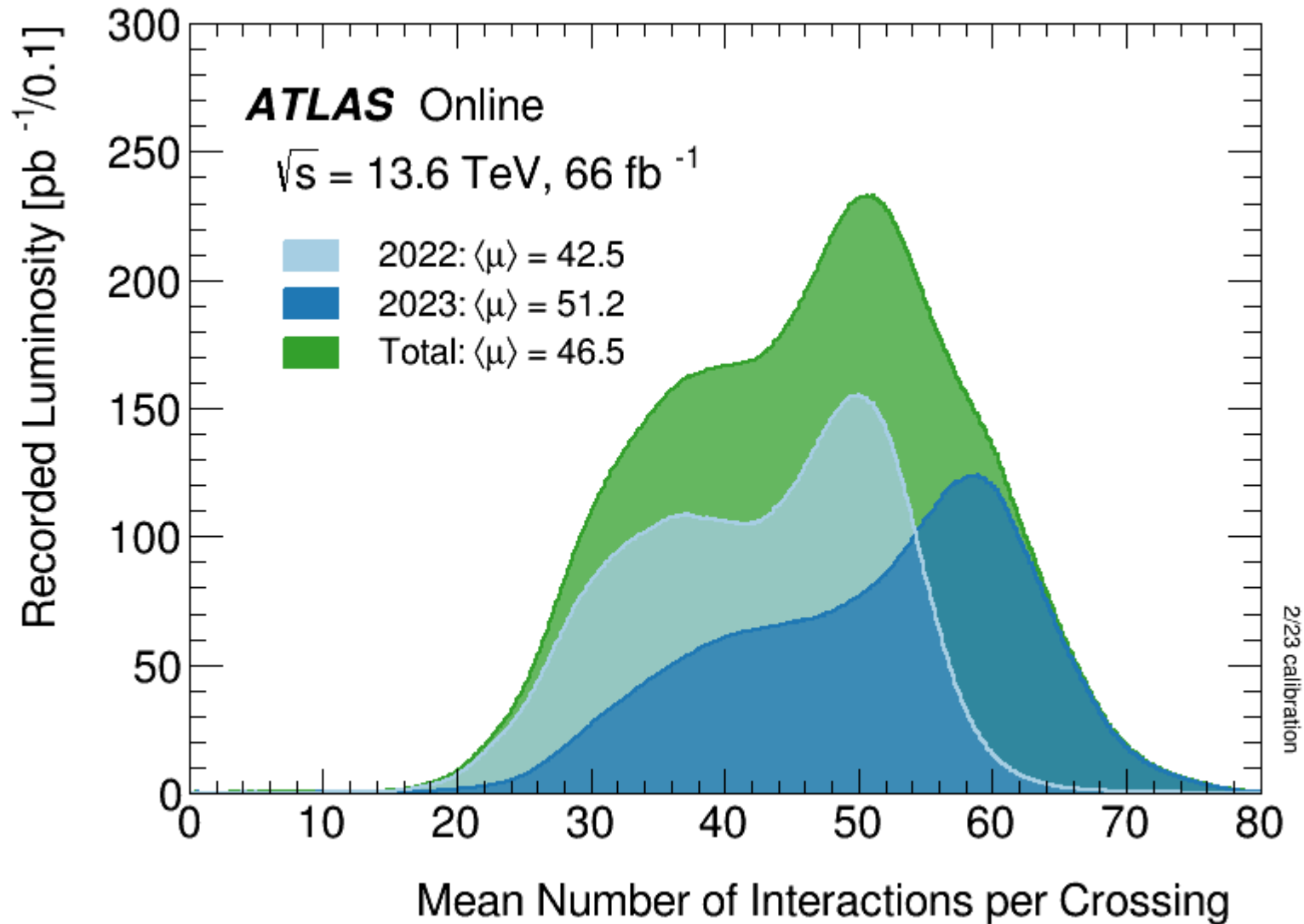
* VBF+MET+ γ

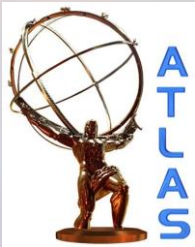
* monojet

* Run-1



Pileup2022-2023





NSW trigger efficiency

- Для подавления фоновых частиц накладывается дополнительный отбор по поперечному импульсу $p_T > 15$ ГэВ.
- Средняя эффективность каждого слоя MicroMegas/sTGC составляет примерно 65 - 80% в зависимости от области где она расположена и постоянна во времени.

