

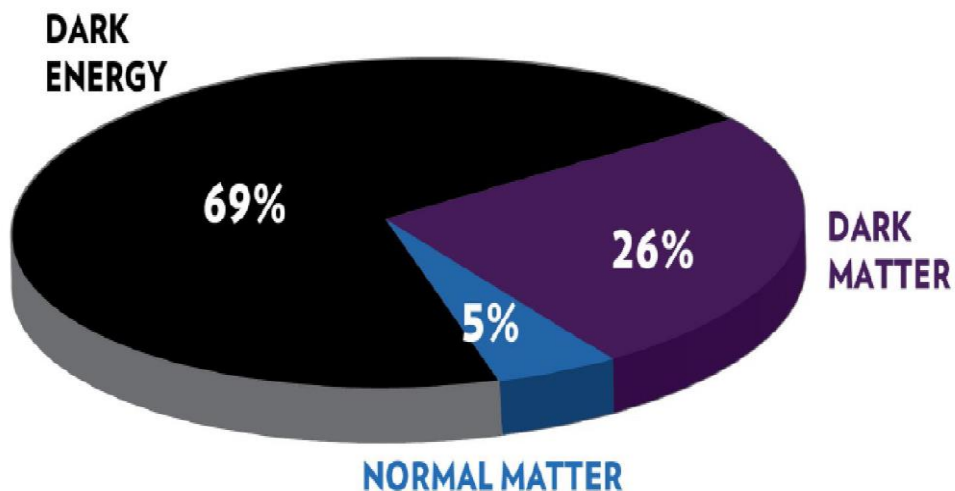
Поиск темной материи в канале ассоциированном с лептонным распадом Z бозона в эксперименте CMS на LHC

Доклад на Конкурс на соискание грантов молодых ученых и
специалистов ОИЯИ стипендий им. М.Г. Мещерякова и
Н.Н. Говоруна на 2024 год

Стажер-исследователь ЛИТ ОИЯИ, аспирант 2 года
государственного университета “Дубна”: Слижевский К.В.
Научный руководитель Шматов С.В.



Введение: Темная материя



Dark matter (DM) is

- Not interacting (very weakly interacting) with ordinary matter
- Electrically neutral
- Stable in terms of cosmological time (14 bill. years)
- Initiated in the early stage of the Universe (till the change of the regimes, from radiation-dominant epoch to epoch of matter domination)

That's all we know.

Arguments for dark matter existence

Astrophysical

- Curved rotation of galaxies, virial theorem “violation”, ultra diffuse galaxies and satellites of galaxies, spiral structures of galaxies
- Gravitational lensing, evaluation of potentials and masses of galaxies/clusters of galaxies (“Bullet” cluster etc.)

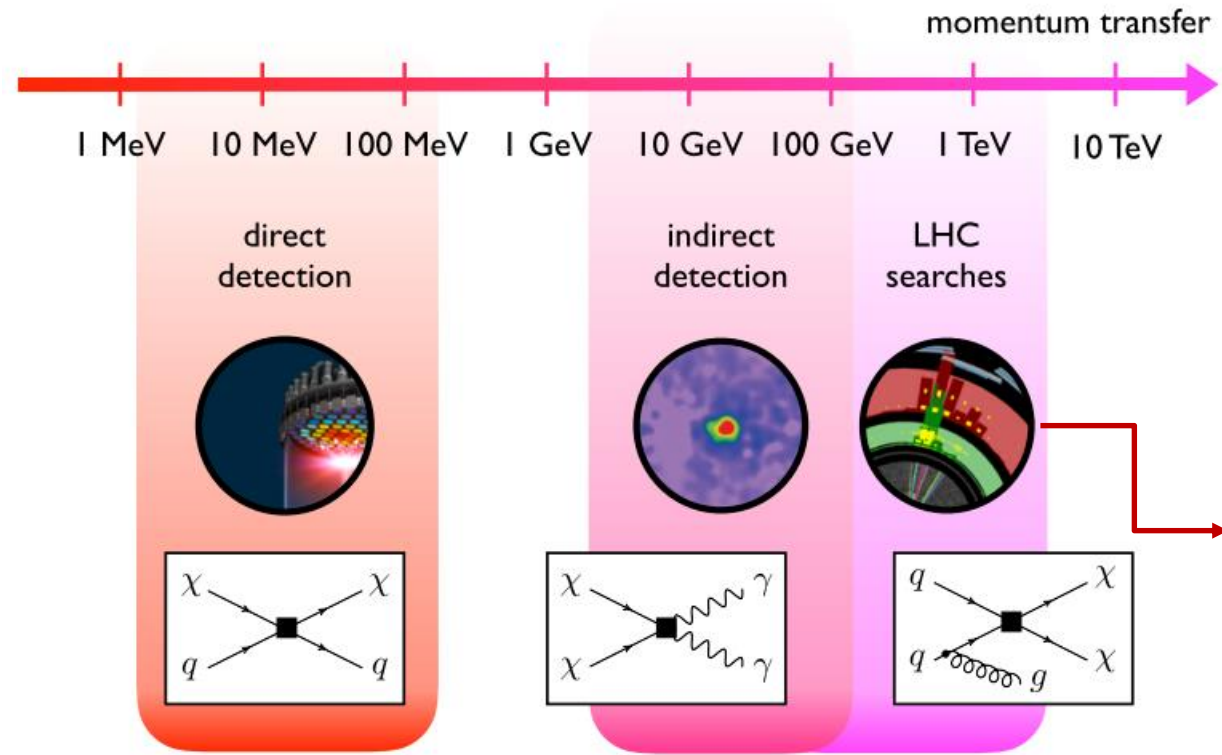
Cosmological

- Anisotropy of cosmic microwave background, flatness of the Universe, the prevalence of the elements and necessity of DM.
- Forming of the early Universe structure, the growth of the initial inhomogeneities

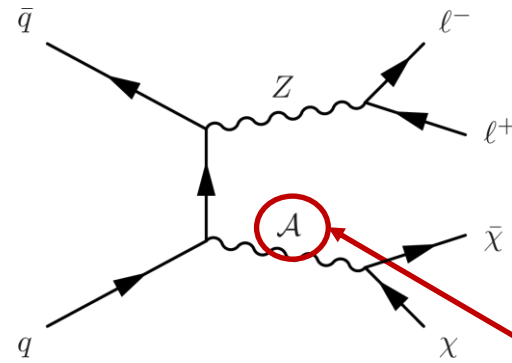
DM candidates

- Baryonic matter (massive astrophysical compact halo objects - MACHO)
- Non-baryonic matter (sterile neutrinos, weakly interacting massive particles – WIMPs, axions, supersymmetric particles, etc.)

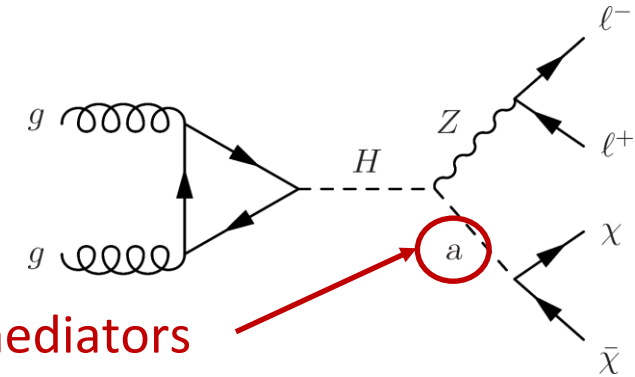
Поиск темной материи



Simplified DM Models



2HDM+a



mediators

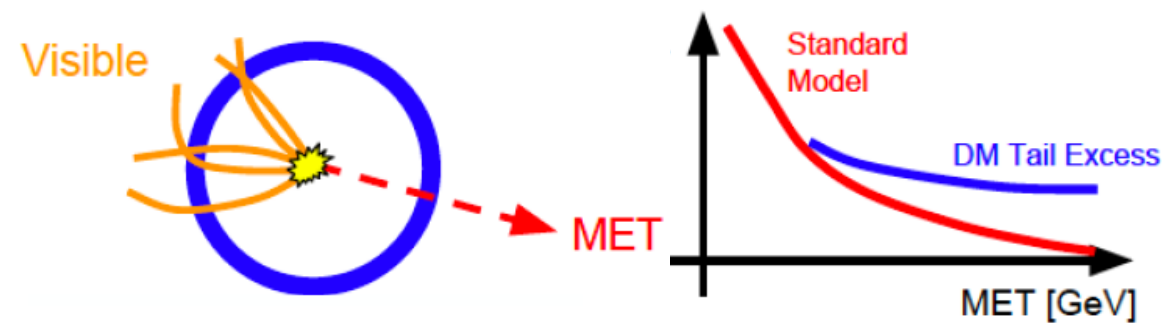
Простейшая модель ТМ: одна частица ТМ + один медиатор.

Видимый сектор:
SM
H, q, l, V ...

mediator: S = 0, 1...

Скрытый сектор: ТМ
Только одна частица ТМ

Свободные параметры модели: масса медиатора, масса ТМ-частицы, связи с видимым и скрытым сектором.



The two-Higgs-doublet model (2HDM)

- нейтральный CP-четные скаляры h, H
- нейтральный CP-нечетный псевдоскаляр A
- заряженный H^\pm, H^\pm

2HDM+s [arXiv:1612.03475](https://arxiv.org/abs/1612.03475)

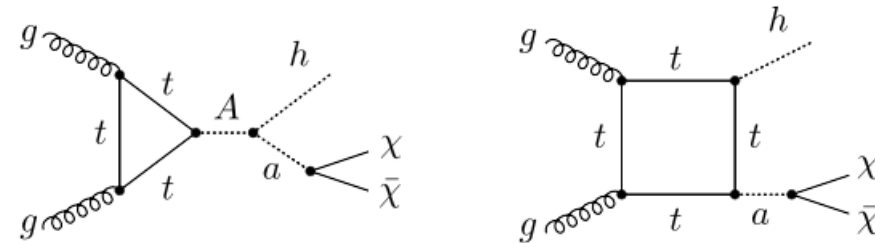
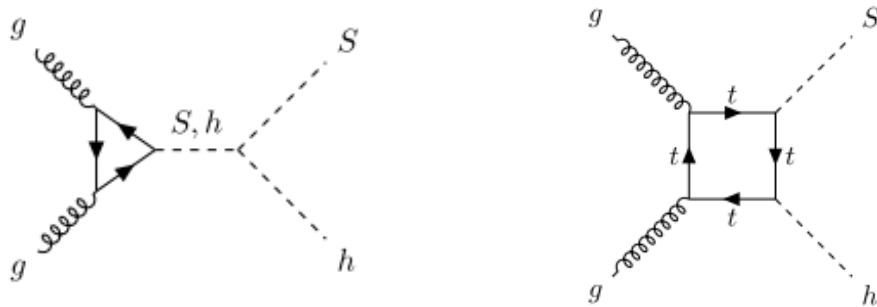
2HDM+a [arXiv:1701.07427](https://arxiv.org/abs/1701.07427)

2HDM + S (нейтральный скалярный синглет)

2HDM + a (нейтральный псевдоскалярный синглет)

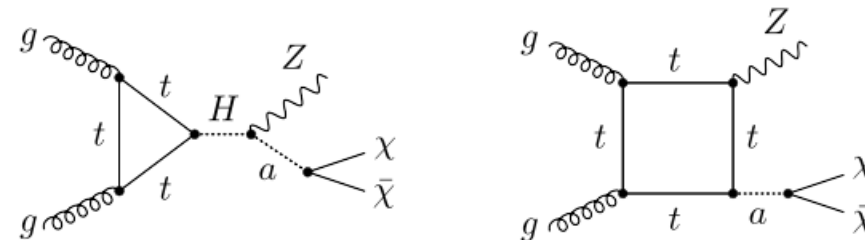
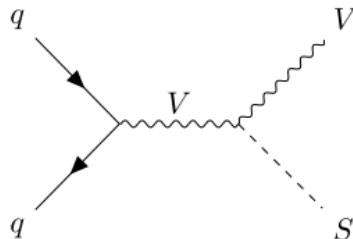
$h(\text{bbar}) + S(\chi\chi) = \text{bbar} + \text{MET}$

$h(\text{bbar}) + a(\chi\chi) = \text{bbar} + \text{MET}$



$V(W/Z) + S(\chi\chi) = Z(\text{ll}) + \text{MET}$

$Z + a(\chi\chi) = Z(\text{ll}) + \text{MET}$



<http://feynrules.irmp.ucl.ac.be/wiki/DMGISM0>

https://github.com/LHC-DMWG/model-repository/tree/master/models/Pseudoscalar_2HDM

Генератор: MadGraph5MC@NLO.2.9.2
(PS, frag./hadr. - Pythia 8)

Модели: 2HDM+s or 2HDM+a + NNPDF 3.1 NNLO

Процесс: $p p \rightarrow Z \chi \chi$ (16 диаграмм)

Свободные параметры для 2HDM + a:

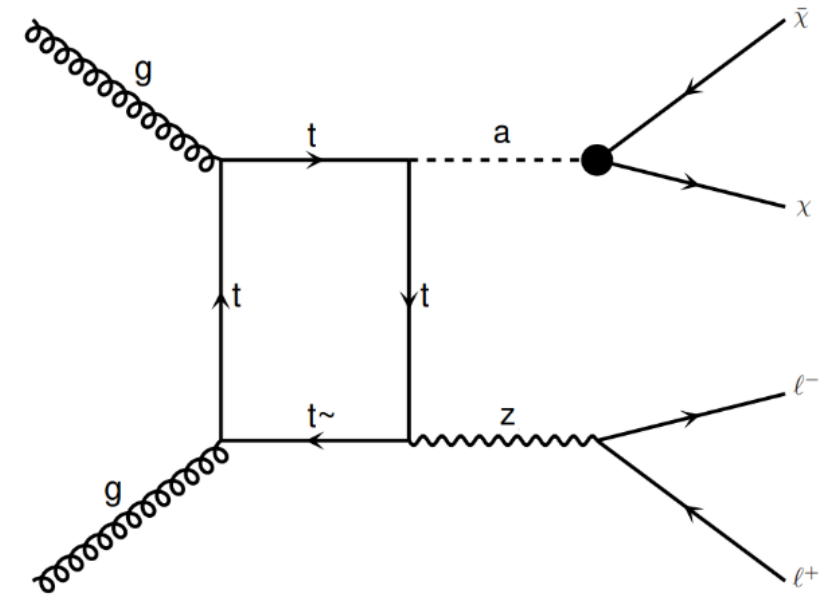
- Массы тяжелых хиггсов, $m_{H^{\pm}} = m_H = m_A = [600:2000]$ GeV
- Масса частицы темной материи, $m_\chi = [1:2000]$ GeV
- Массы легких скалярных/псевдоскалярных скаляров, $m_a = m_s = [300:1000]$ GeV
- Отношение вакуумных средних двух хиггсовских дублетов, $\tan(\beta) = [0.5:50]$
- Угол смешивания между двумя CP-четными состояниями (a/A), $\sin(\Theta) = [0.15:0.7]$
- Угол смешивания между двумя CP-нечетными состояниями (h/H), $\sin(\beta\Theta\alpha) = 1$

Свободные параметры для 2HDM + S:

$$H = \cos \theta S_1 - \sin \theta S_2,$$

$$S = v_S + \sin \theta S_1 + \cos \theta S_2.$$

- Юкавские константы связи
- Константы связи между ТМ и медиатором (a/S)
- Массы, ширины распада и углы смешивания ...



Цепочка полного моделирования включает следующие шаги:
 GEN, SIM, DIGI, L1, DIGI2RAW, HLT, RAW2DIGI, L1Reco,
 RECO, RECO SIM.

Генератор: MadGraph5MC@NLO.2.9.2
 (PS, frag./hadr. - Pythia 8)

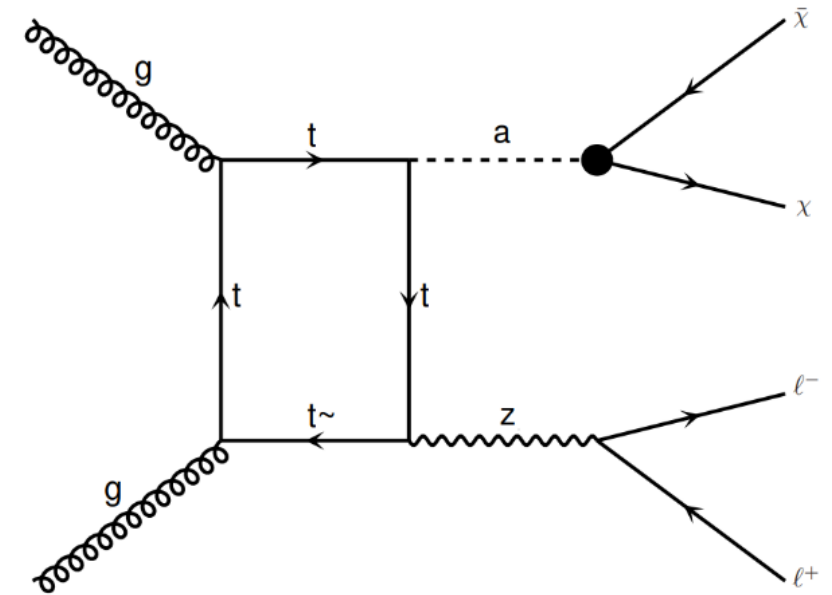
Модели: 2HDM+s или 2HDM+a + NNPDF 3.1 NNLO

Симуляция отклика детектора: CMSSW_12_4_5
 (Geant4, с использованием HTCondor)

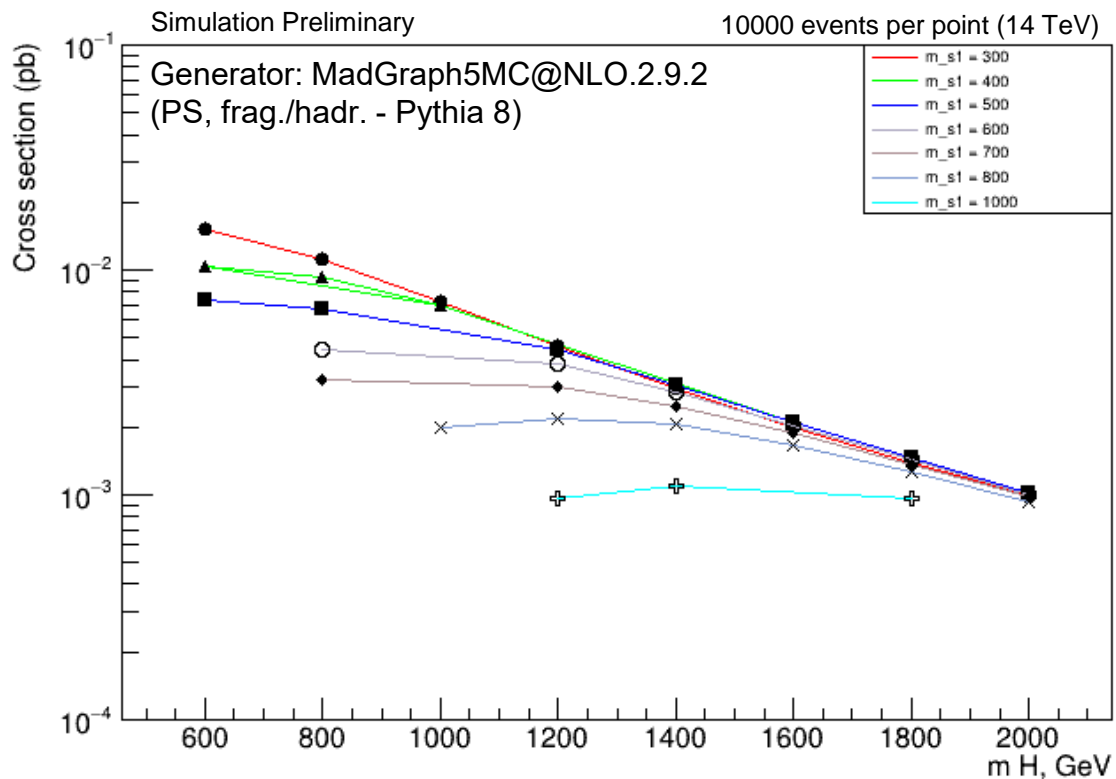
Анализ: CERN ROOT

В дальнейшем планируется:

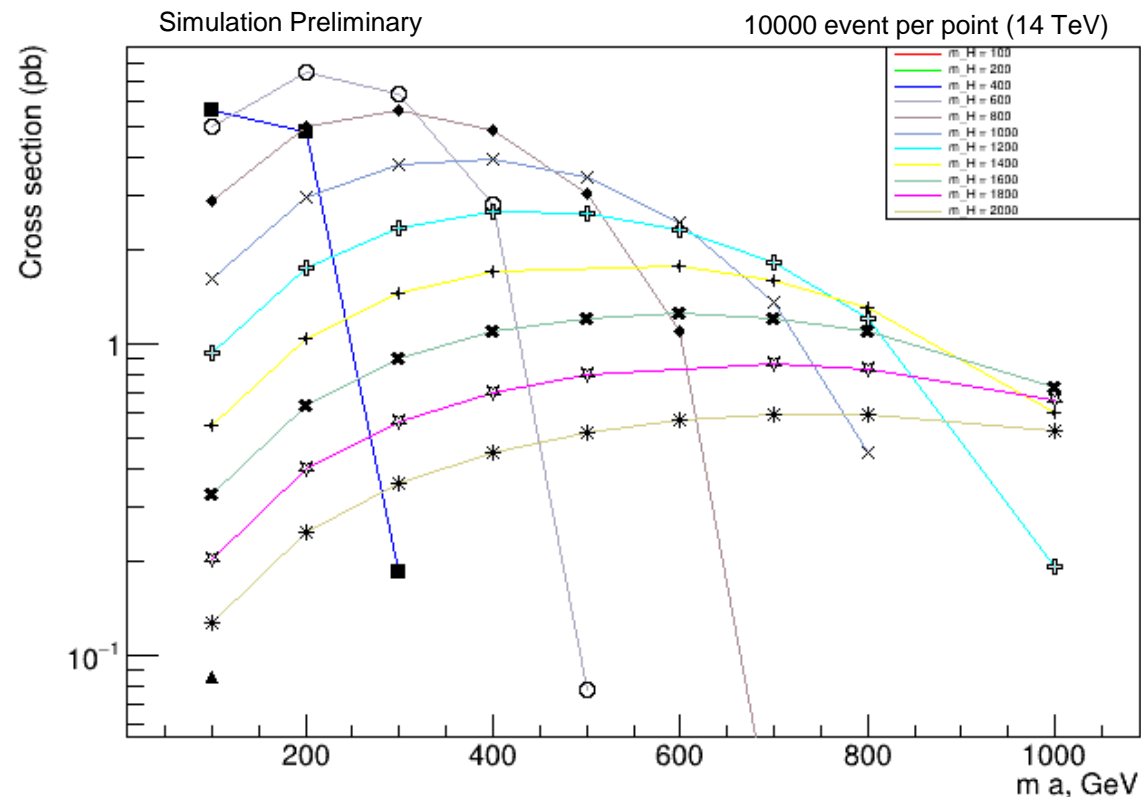
1. Оптимизация цепочки полного моделирования
2. Перейти на вычислительные мощности ЛИТ.



2HDM+S



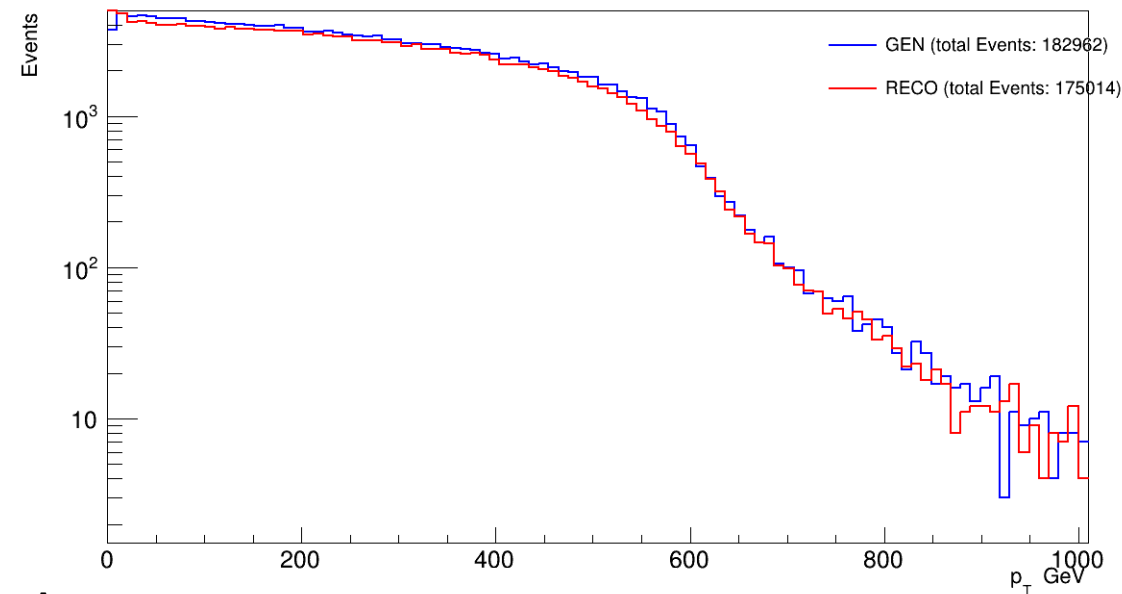
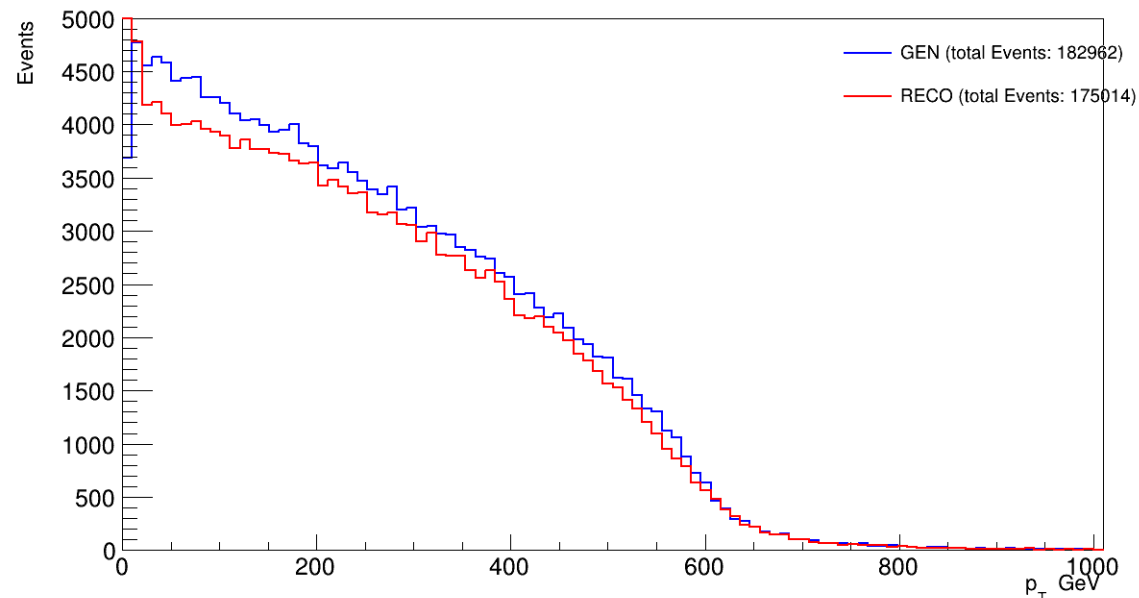
2HDM+a



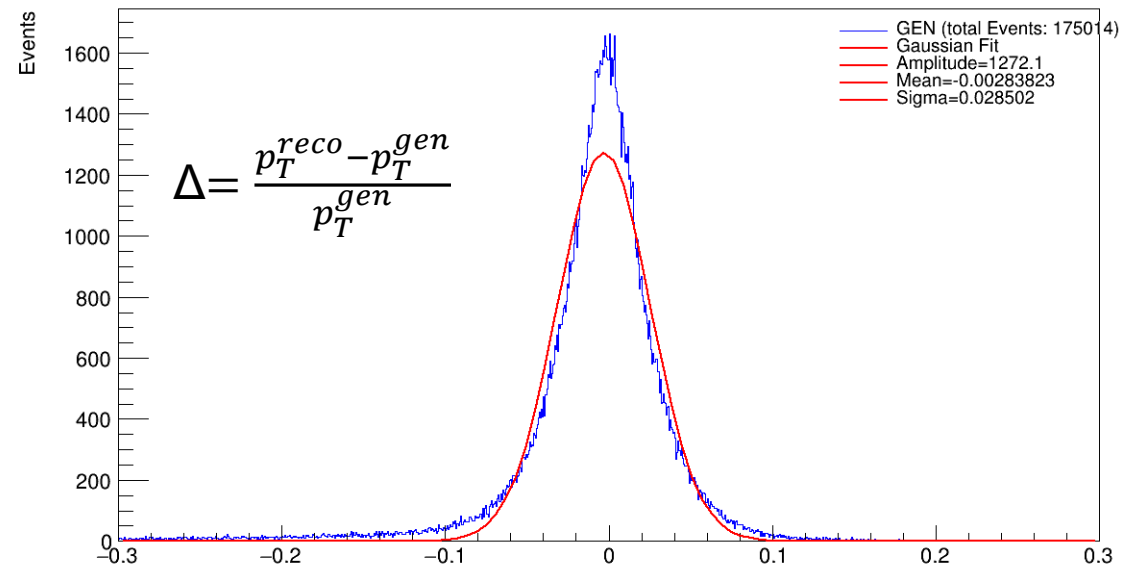
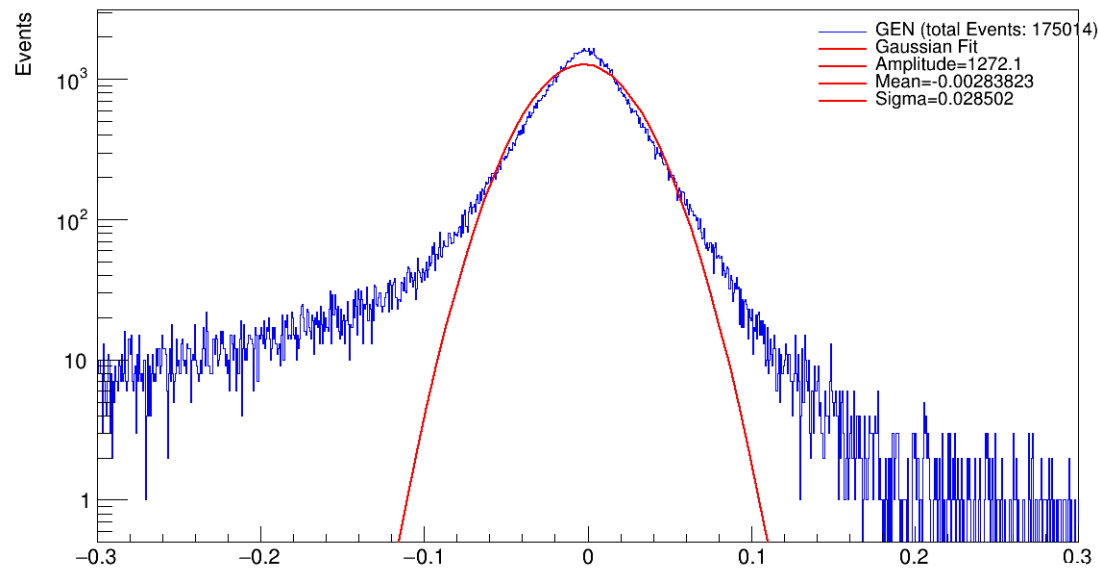
Сечение рассчитано для процесса $pp \rightarrow Z \chi \bar{\chi}$ для модели 2HDM+s (слева) и 2HDM+a модели(справа).

Более 100 наборов модельных параметров

Распределение мюонов по p_T

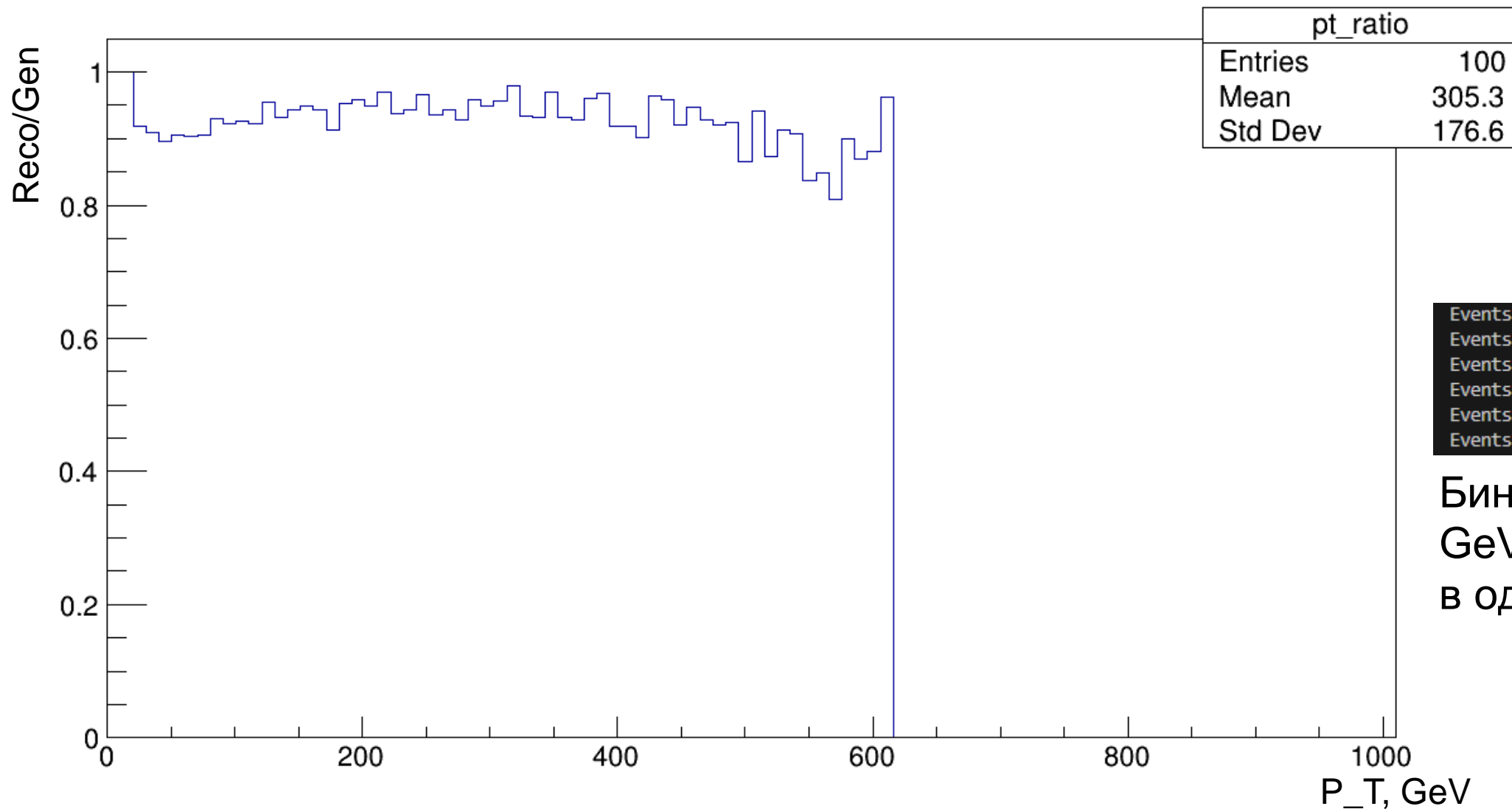


Распределение Δ мюонов



Распределение мюонов по P_T

Эффективность реконструкции мюонов

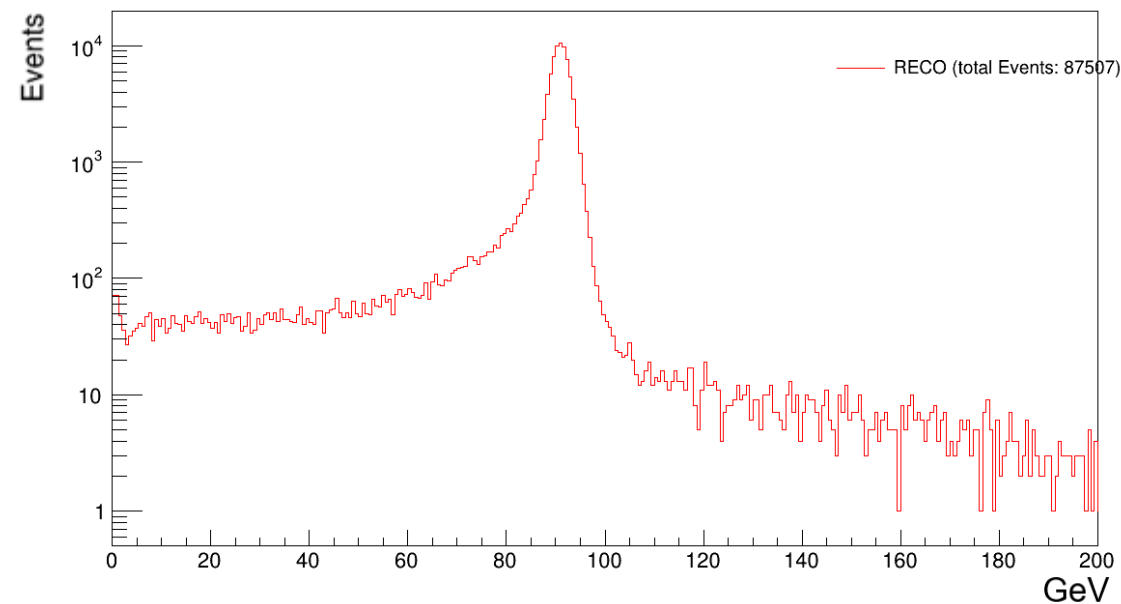


Events in range 0-100: 40970
 Events in range 100-200: 37760
 Events in range 200-300: 33233
 Events in range 300-400: 27586
 Events in range 400-600: 31718
 Events in range 600-1000: 3636

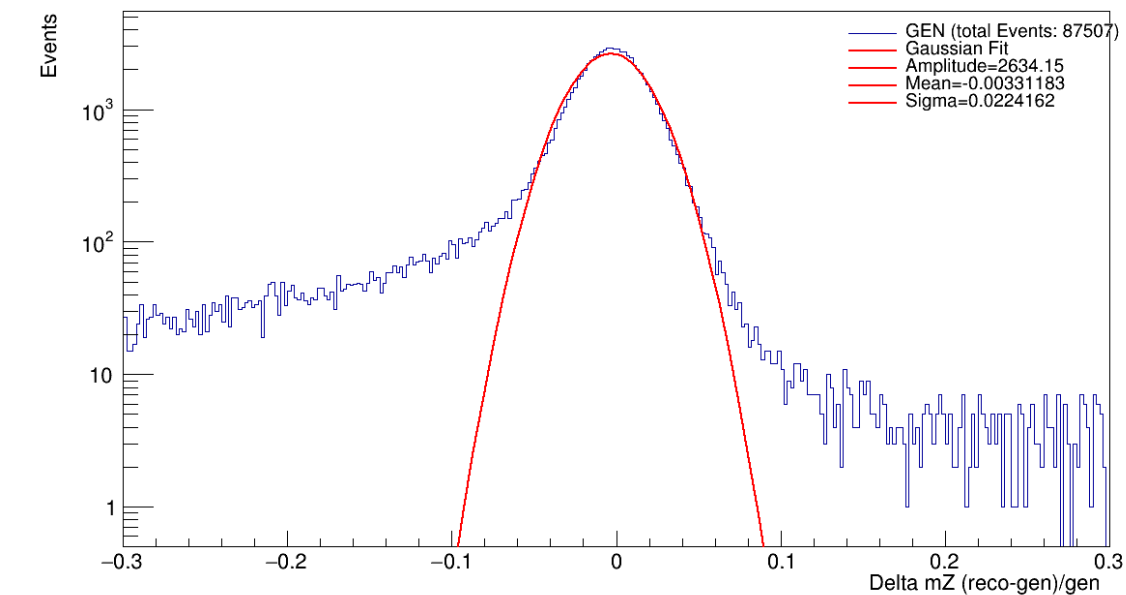
**Бины 600-1000
 GeV объединены
 в один**



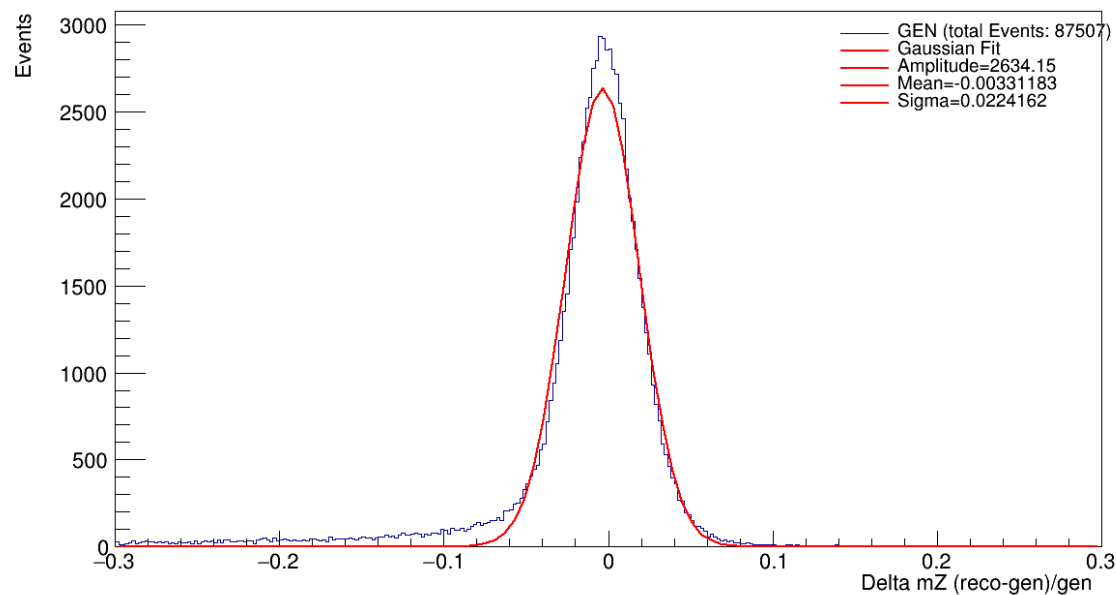
Распределение пары мюонов по инвариантной массе



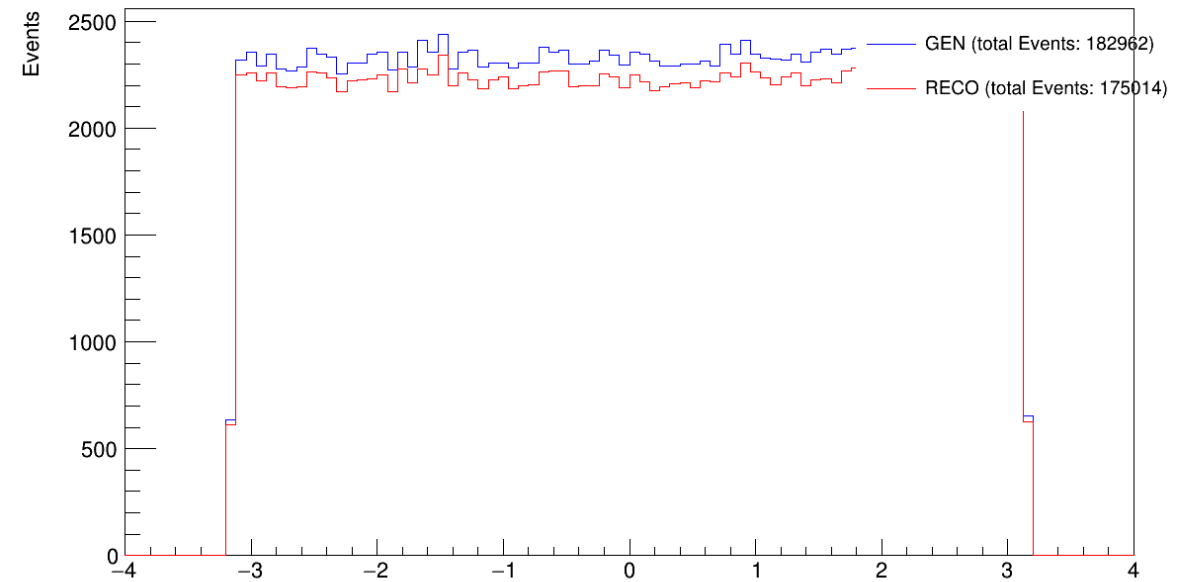
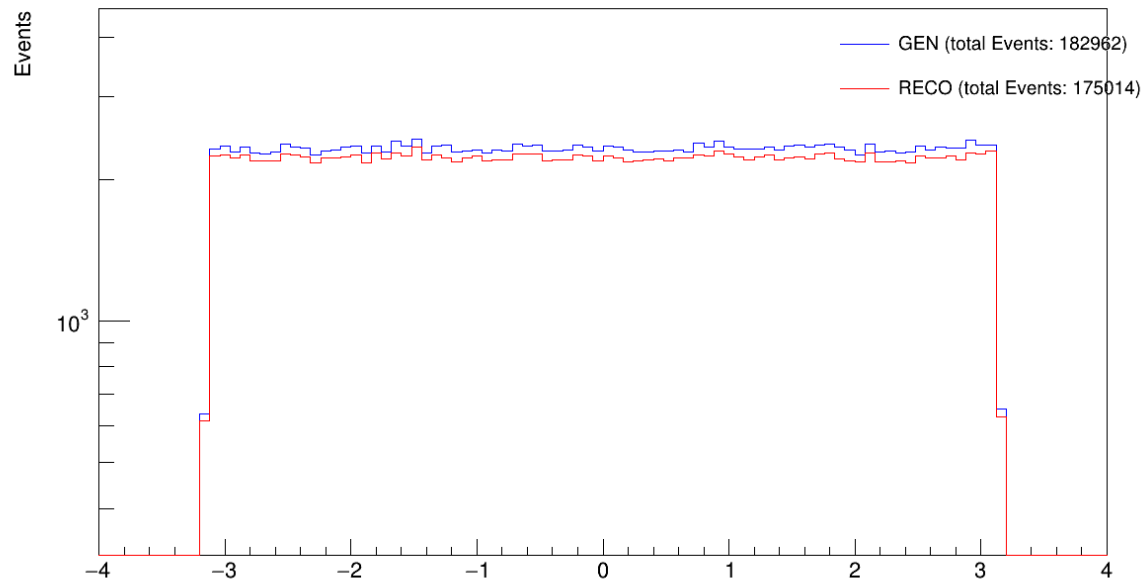
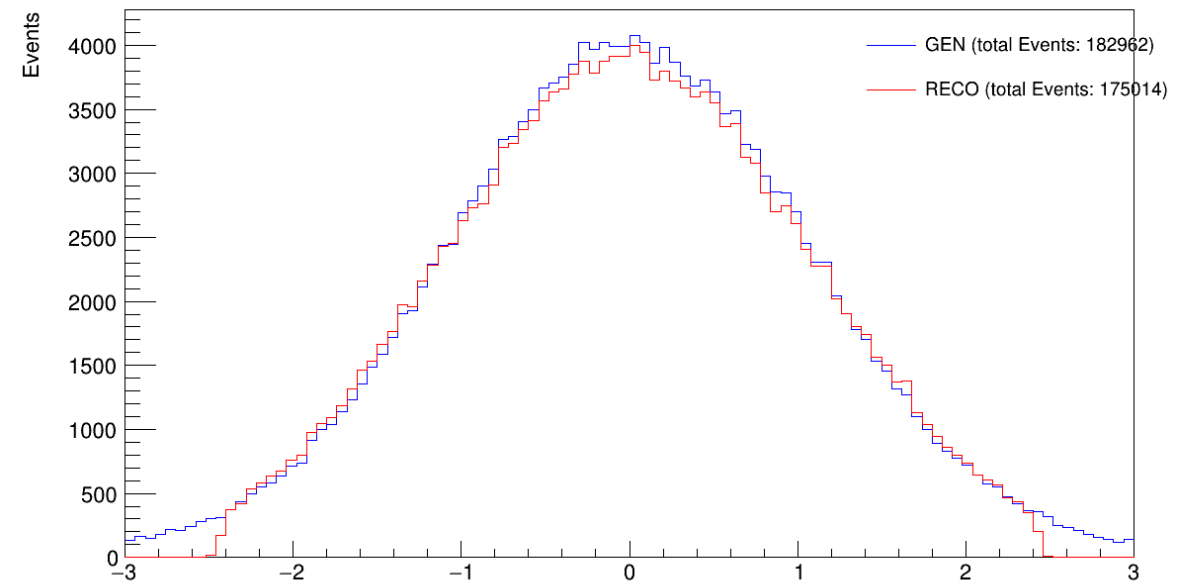
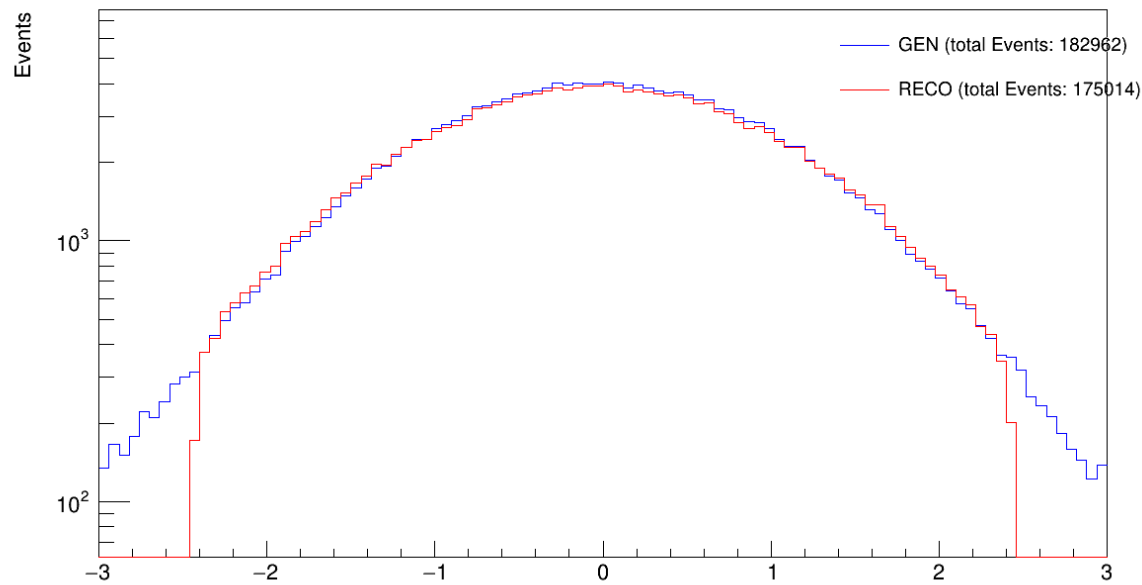
$$\Delta = \frac{m_Z^{reco} - m_Z^{gen}}{m_Z^{gen}}$$



$\sigma = 0.0224$

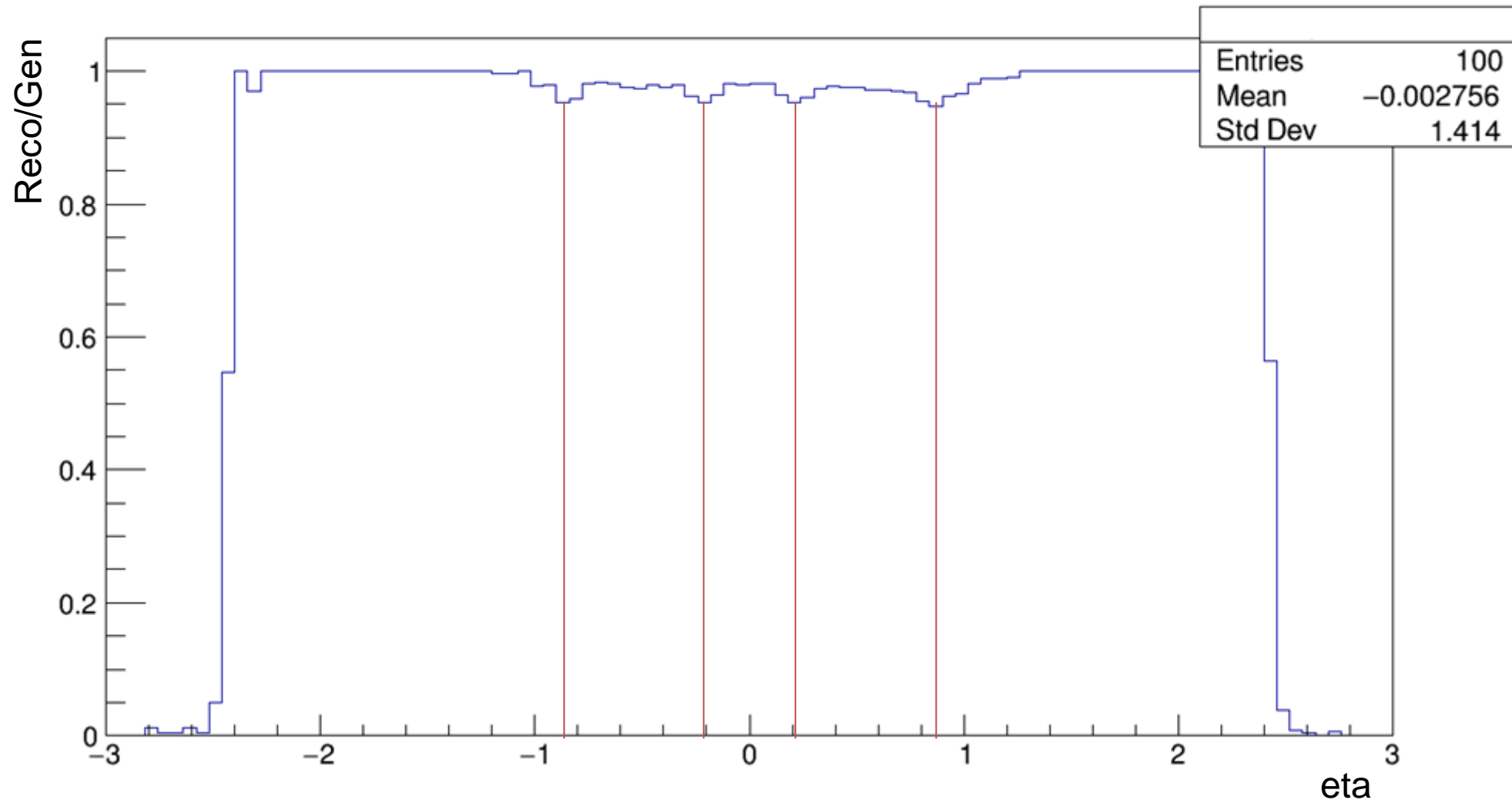


Угловое распределение мюонов



Угловое распределение мюонов

Эффективность реконструкции мюонов





SUMMARY



Работа проделанная за прошедший год:

1. Дана оценка на величины сечений ассоциированного рождения калибровочного бозона Z^0 и частиц темной материи при столкновении протонов с $\sqrt{s} = 14$ ТэВ.
2. Проведено полное моделирование отклика детекторных систем эксперимента CMS и сравнение основных кинематических характеристик на уровне физического генератора и реконструированного сигнала.
3. Оценена эффективность процедуры полного моделирования события, включая отклик детектора и реконструкцию.

Планы на 2024 г. :

1. Актуализация пространства модельных параметров и моделирование соответствующих процессов с условиями RUN3 LHC с $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ.
2. Проведение полного моделирования (GEANT4) отклика детектора эксперимента CMS с условиями набора данных в RUN3 LHC.
3. Оффлайн отбор событий и оптимизация кинематических порогов отбора пары мюонов и по заданной величины потерянной энергии E_T^{miss} .



SUMMARY



Работа представлена на научных мероприятиях:

1. The XXVI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists. 24 – 28 October 2022.
2. 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics. 29.11 - 02.12 2023
3. 23rd JINR-ISU Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics. July 11 to 18, 2023
4. The XV-th International School-Conference "The Actual Problems of Microworld Physics« at Minsk, Belarus, 27 August – 3 September, 2023

Список публикаций:

"Search for dark matter produced in association with a leptonically decaying Z boson with the CMS Experiment at the LHC", ЯФ 86 № 6, 2023 (принято к печати).



THANK YOU FOR YOUR ATTENTION!

Summary of the kinematic selections for the signal region



Quantity	Requirement	Target backgrounds
N_ℓ	=2 with additional lepton veto	WZ, VVV
p_T^ℓ	>25/20 GeV for leading/subleading	Multijet
Dilepton mass	$ m_{\ell\ell} - m_Z < 15 \text{ GeV}$	WW, top quark
Number of jets	≤ 1 jet with $p_T^j > 30 \text{ GeV}$	DY, top quark, VVV
$p_T^{\ell\ell}$	>60 GeV	DY
b tagging veto	0 b-tagged jet with $p_T > 30 \text{ GeV}$	Top quark, VVV
τ lepton veto	0 τ_h cand. with $p_T^\tau > 18 \text{ GeV}$	WZ
$\Delta\phi(\vec{p}_T^j, \vec{p}_T^{\text{miss}})$	>0.5 radians	DY, WZ
$\Delta\phi(\vec{p}_T^{\ell\ell}, \vec{p}_T^{\text{miss}})$	>2.6 radians	DY
$ p_T^{\text{miss}} - p_T^{\ell\ell} / p_T^{\ell\ell}$	<0.4	DY
$\Delta R_{\ell\ell}$	<1.8	WW, top quark
p_T^{miss} (all but 2HDM+a)	>100 GeV	DY, WW, top quark
p_T^{miss} (2HDM+a only)	>80 GeV	DY, WW, top quark
m_T (2HDM+a only)	>200 GeV	DY, WW, ZZ, top quark