

# **АНАЛИЗ РОЖДЕНИЯ ДВУХМЮОННОГО РЕЗОНАНСА С МАССОЙ 28 ГЭВ, ОБНАРУЖЕННОГО НА УСТАНОВКЕ CMS, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ RUN 1 И RUN 2**

Студент: Ильиных С. Д., М25-112

Научный руководитель, д.ф.-м.н.: Никитенко А. Н.

22.06.2026

# Цели и задачи

## Цель:

**Целью** данной научно-исследовательской работы является исследование событий с двухмюонным резонансом массой около 28 ГэВ в данных эксперимента CMS Run 1 и Run 2, изучение их кинематических характеристик, включая недостающий поперечный импульс, проверка устойчивости наблюдаемого избытка при различных критериях отбора и сравнение полученных распределений с феноменологической моделью рождения потенциально новой частицы.

## Задачи:

1. Анализ критериев отбора событий для различных областей поиска (SR1, SR2 и SR2<sup>mod</sup>) для данных Run 1.
2. Построение и фитирование распределения по инвариантной массе пары мюонов ( $m_{\mu\mu}$ ) для выделения сигнальной области.
3. Проведение выбора модели фона с использованием F-теста и проверка устойчивости фитирующей функции с помощью игрушечных экспериментов.
4. Исследование распределения недостающего поперечного импульса ( $p_T^{\text{miss}}$ ) в событиях с  $m_{\mu\mu} \approx 28$  ГэВ.
5. Изучение вклада основных фоновых процессов (Дрелла-Яна,  $t\bar{t}$ ,  $W$ +jets).
6. Определение числа событий с одной и двумя  $b$ -струями для области поиска SR2<sup>mod</sup>.
7. Исследование и анализ данных Run 2 при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ, а также оптимизация отборов  $p_T^{\mu 2}$  и  $p_T^{\mu\mu} / m_{\mu\mu}$ .
8. Сравнение полученных распределений  $p_T^{\text{miss}}$  с феноменологической моделью рождения потенциально новой частицы.
9. Реализация графического интерфейса пользователя для удобного задания параметров отбора и снижения риска ошибок при многократном запуске анализа.

# Схема экспериментальной установки

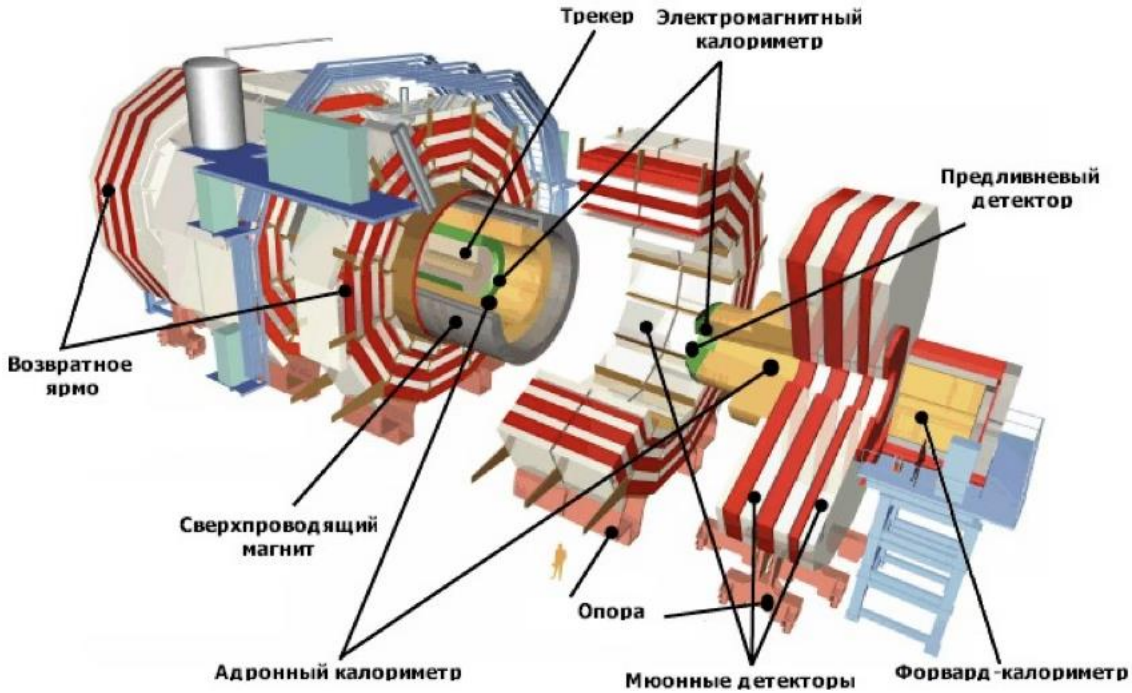
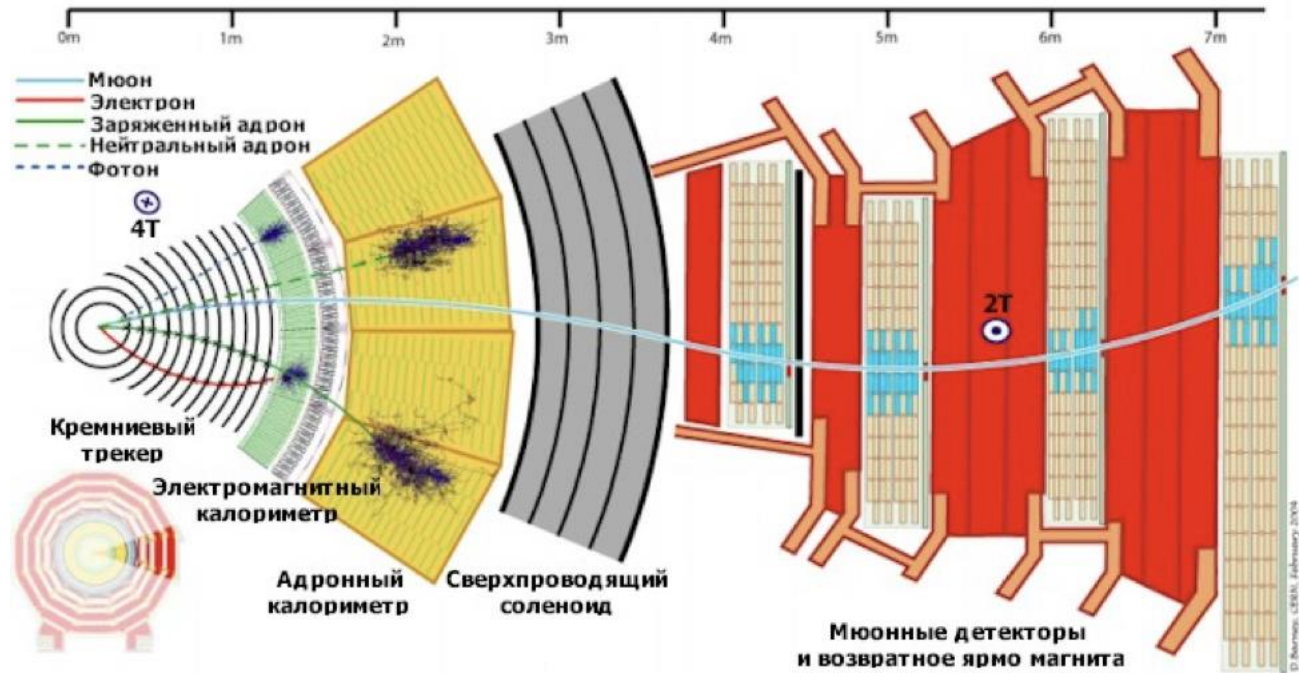


Схема детектора CMS



Сечение детектора CMS

# Критерии отбора событий



Критерий	SR1	SR2	SR2 <sup>mod</sup>
<b>Мюоны</b> $m_{\mu\mu}$ <b>Струи</b> <b>b-струя</b>	OS, $p_T > 25$ ГэВ, $ \eta  < 2.1$	$> 12$ ГэВ $p_T > 30$ ГэВ $ \eta  \leq 2.4$	OS, $p_T > 31, 26$ ГэВ, $ \eta  < 2.1$
<b>Доп. струи</b> $ \eta  \leq 2.4$	только 1 центральная струя (b-струя)	ровно 2 центральные струи (хотя бы одна b-струя)	ровно 2 центральные струи (хотя бы одна b-струя)
<b>Доп. струи</b> $2.4 <  \eta  < 4.7$	$\geq 1$ струя	0 струй	0 струй
$p_T^{miss}$ $\Delta\phi(\mu\mu, jj)$ $\frac{p_T}{m_{\mu\mu}}$	–	$< 40$ ГэВ $> 2.5$ рад. –	– – $> 2.0$

Критерии отбора в трех областях поиска для Run 1

# Анализ инвариантной массы. Метод максимального правдоподобия.

Функция правдоподобия:

$$\mathcal{L}(m_X, \Gamma_{\mu\mu}, a_1, a_2) = \frac{(N_S + N_B)^N}{N!} e^{-(N_S + N_B)} \times \prod_{i=1}^N \left[ \frac{N_S}{N_S + N_B} p_i^S(m_X, \Gamma_{\mu\mu}) + \frac{N_B}{N_S + N_B} p_i^B(a_1, a_2) \right]$$

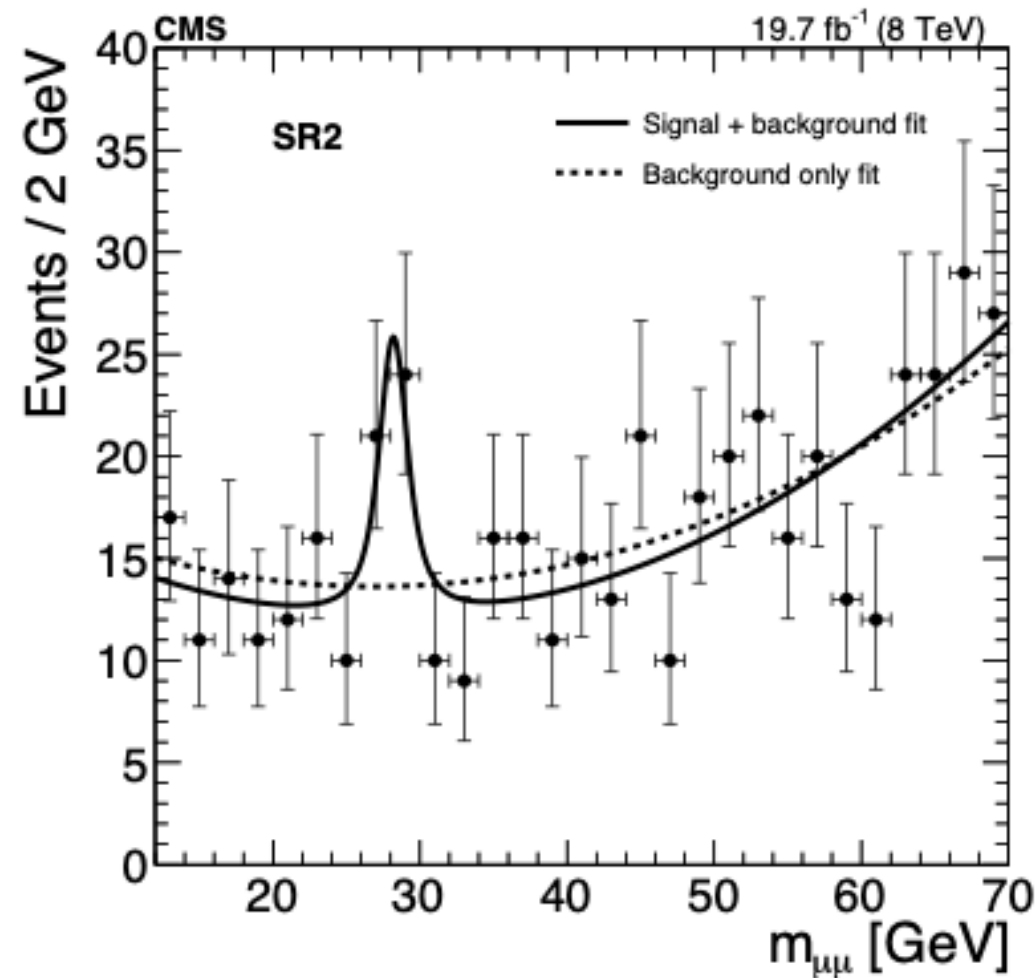
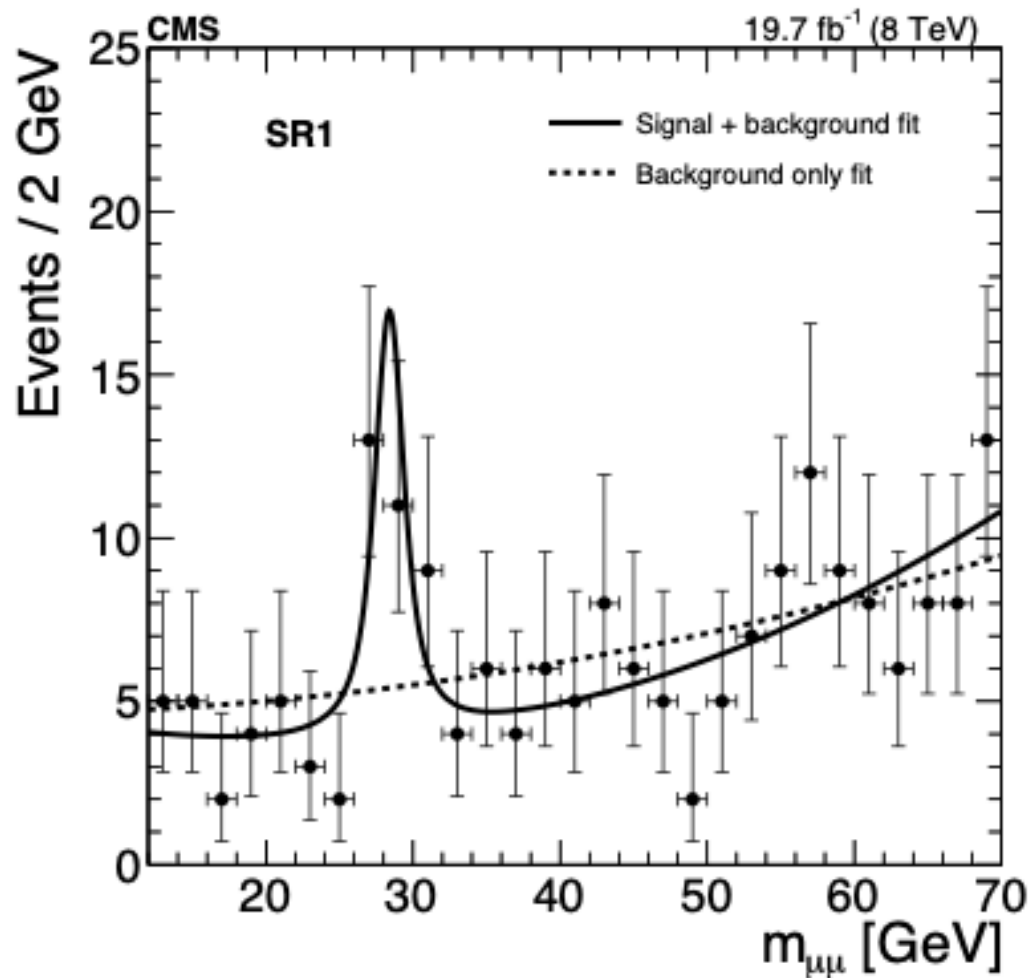
Сигнальная компонента:

$$p^S(m_X, \Gamma_{\mu\mu}) = \int \frac{\Gamma_{\mu\mu}/2\pi}{(m' - m_X)^2 + (\Gamma_{\mu\mu}/2)^2} \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(m_X - m')^2}{2\sigma^2}} dm'$$

Фоновая компонента:

$$p^B(m; \vec{a}) = 1 + \sum_{k=1}^2 a_k \left( \frac{m - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}} \right)^k$$

# Анализ распределения инвариантной массы. Результаты фитирования 8 TeV SR1/SR2



Распределение инвариантной массы пары мюонов для SR1 и SR2.

# Реализация графического интерфейса пользователя (GUI)



Analysis parameters

Use default parameters

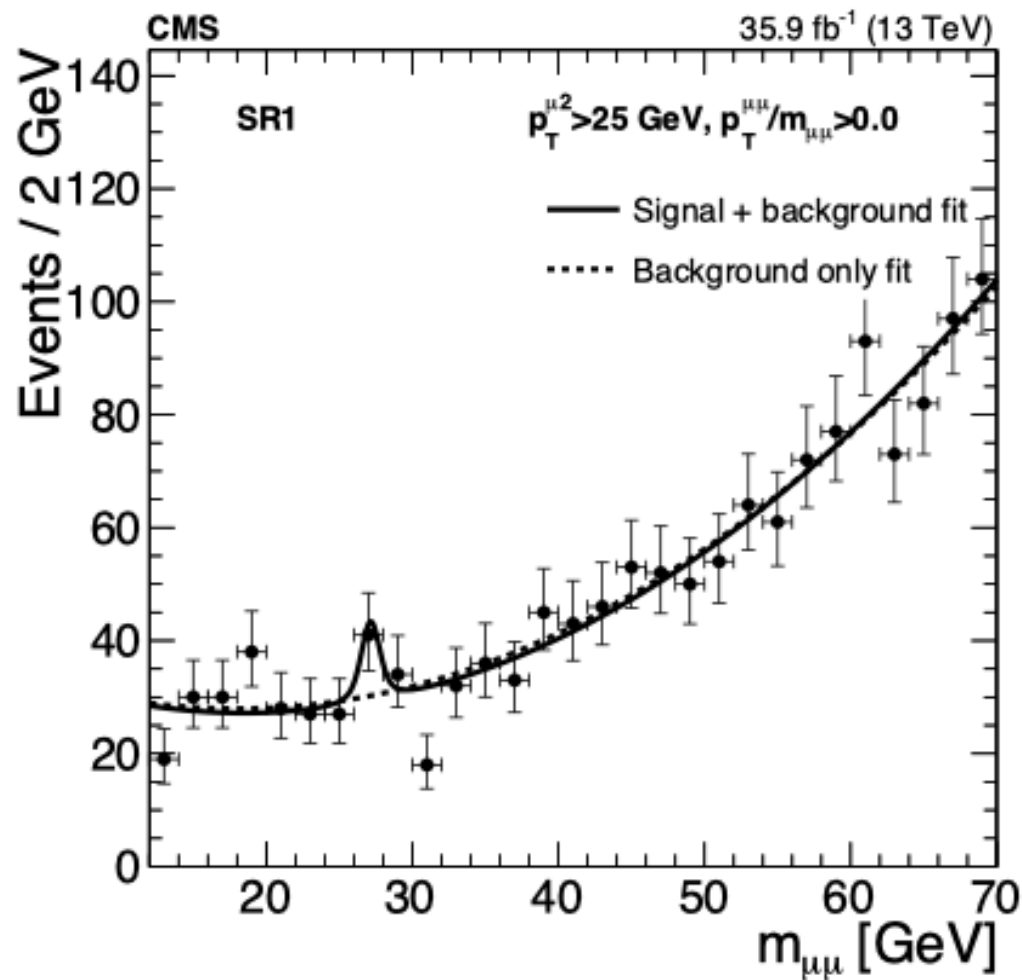
Output ROOT file:

Muons | Dimuon | Jets | PU ID | b-tagging | Background | Additional | VBF

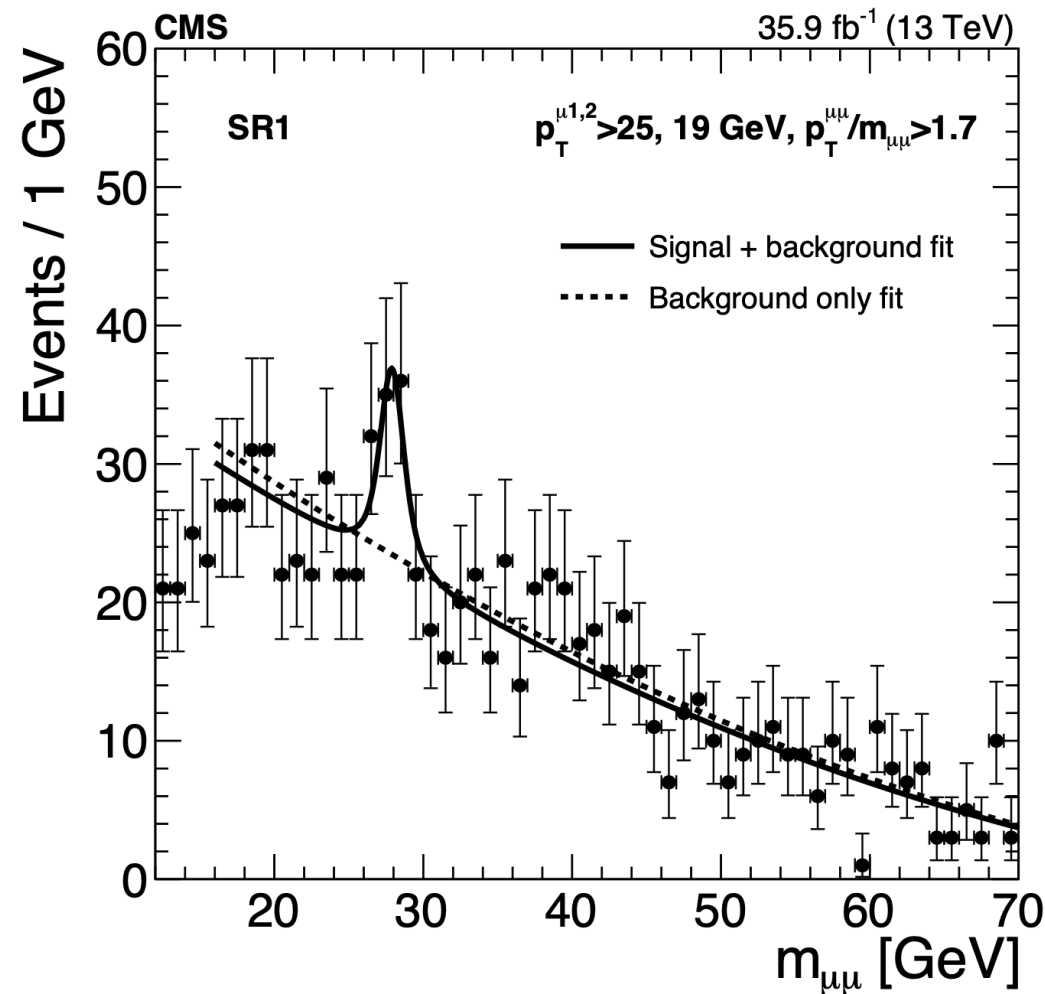
pT 1st muon [GeV]	<input type="text" value="25.00"/>
pT 2nd muon [GeV]	<input type="text" value="25.00"/>
l <sub>etal</sub> 1st muon	<input type="text" value="2.10"/>
l <sub>etal</sub> 2nd muon	<input type="text" value="2.10"/>
Muon pT for jet cleaning [GeV]	<input type="text" value="20.00"/>
Relative isolation	<input type="text" value="0.10"/>

GUI. Первая вкладка с настройкой параметров.

# Анализ распределения инвариантной массы. Результаты фитирования 13 TeV SR1

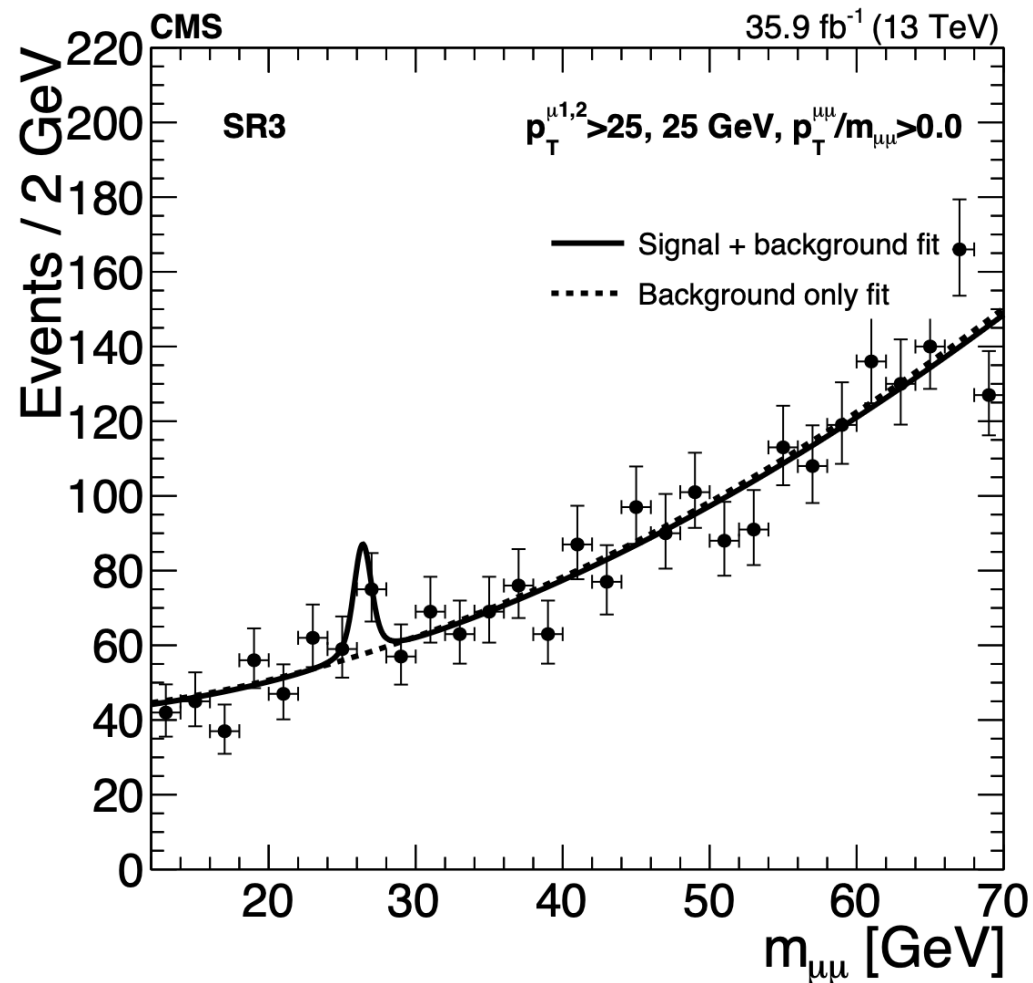


Z = 2,0

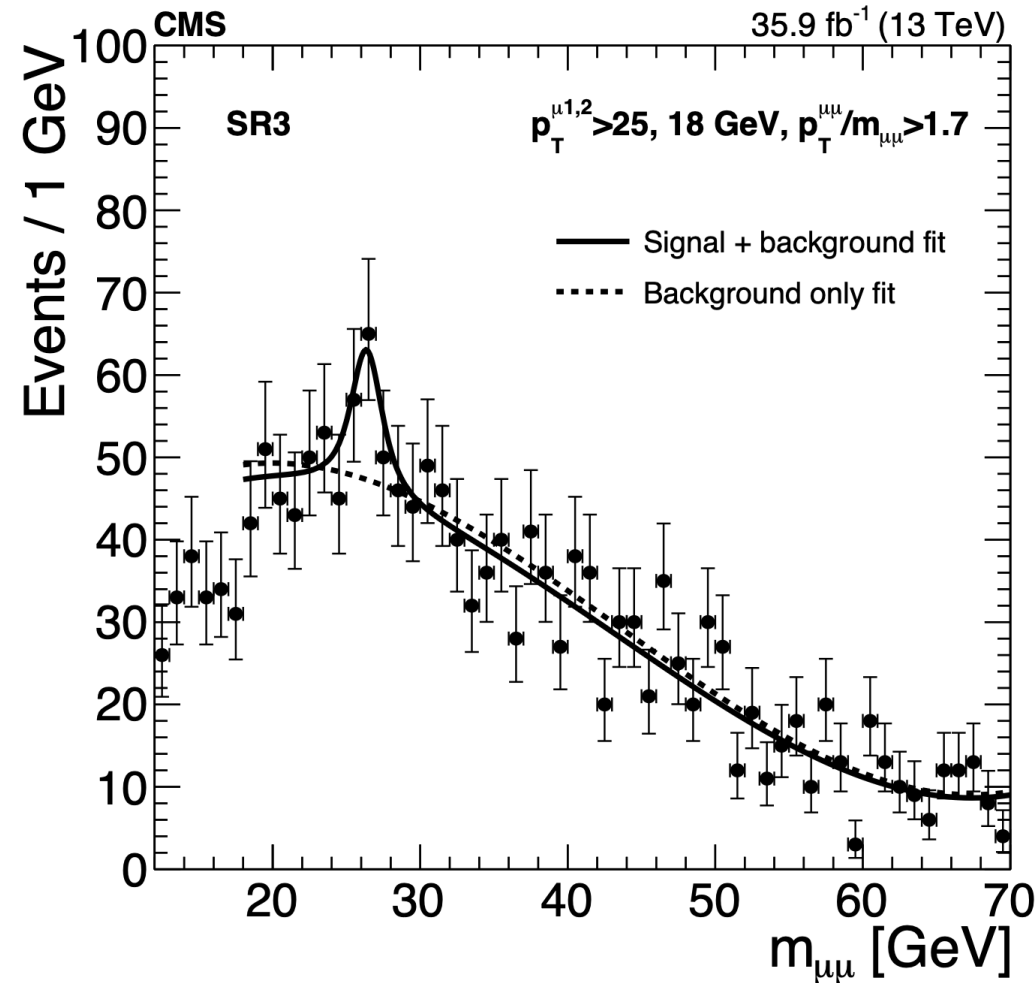


Z = 3,2

# Анализ распределения инвариантной массы. Результаты фитирования 13 TeV SR3

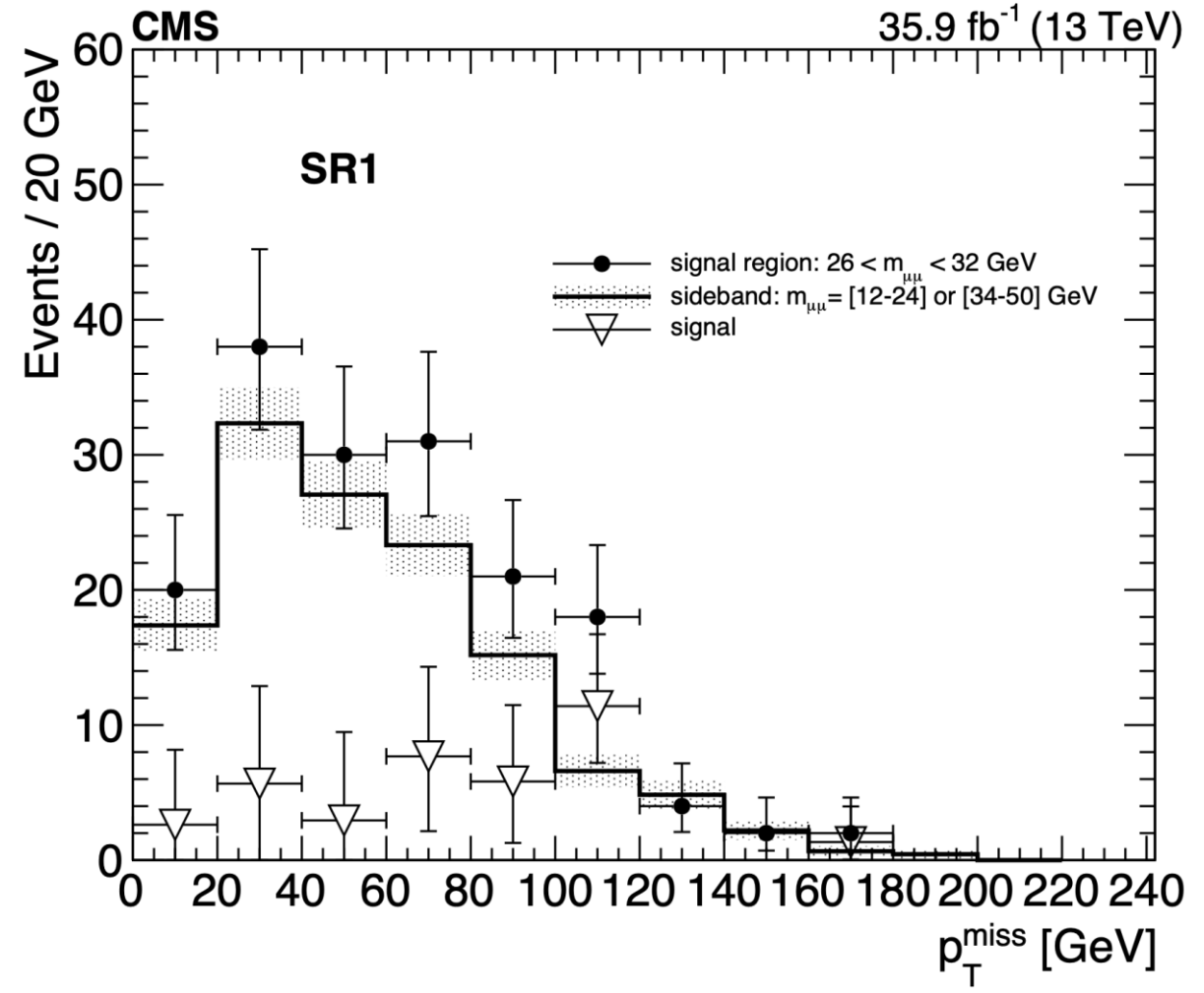
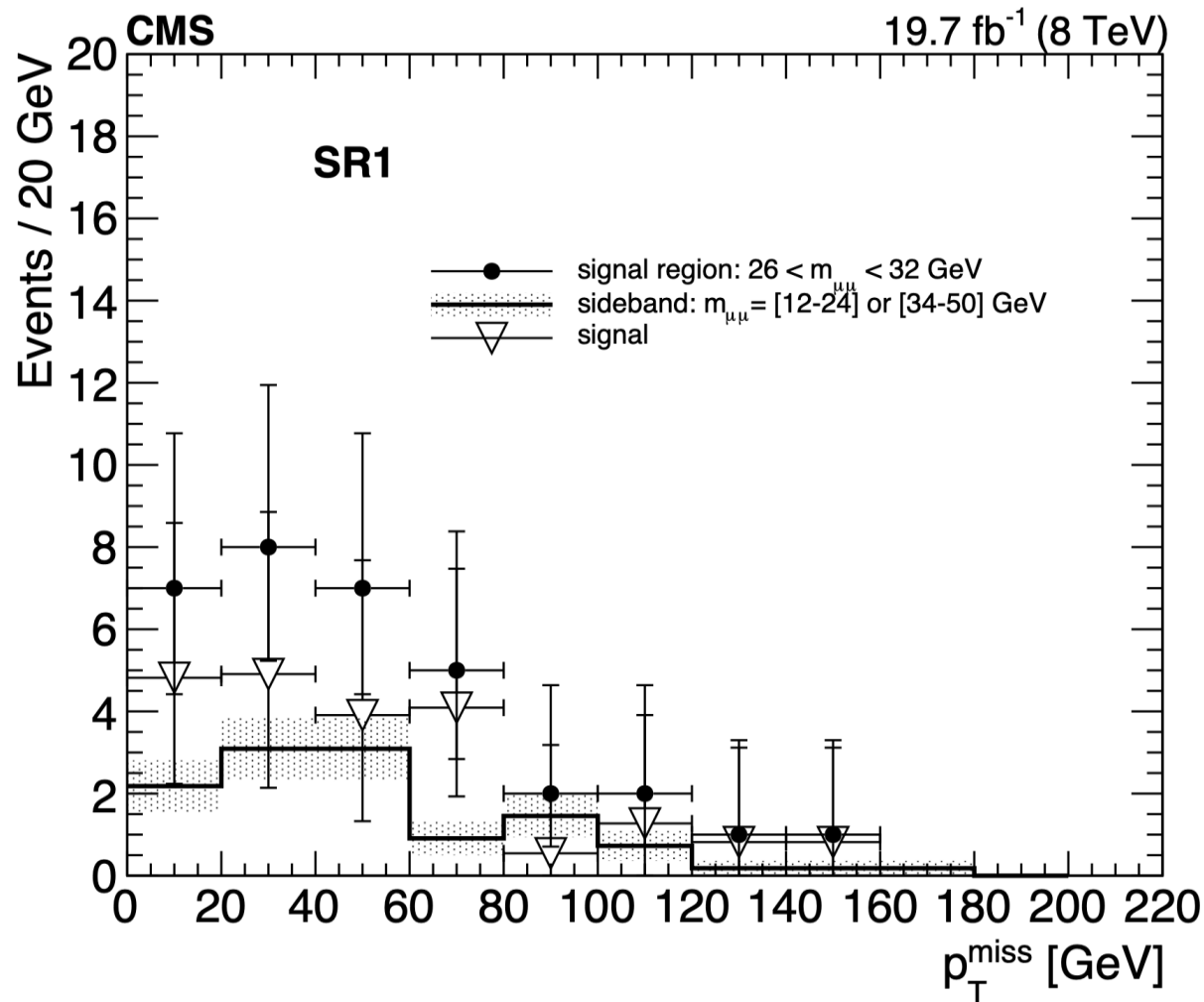


Z = 1,9



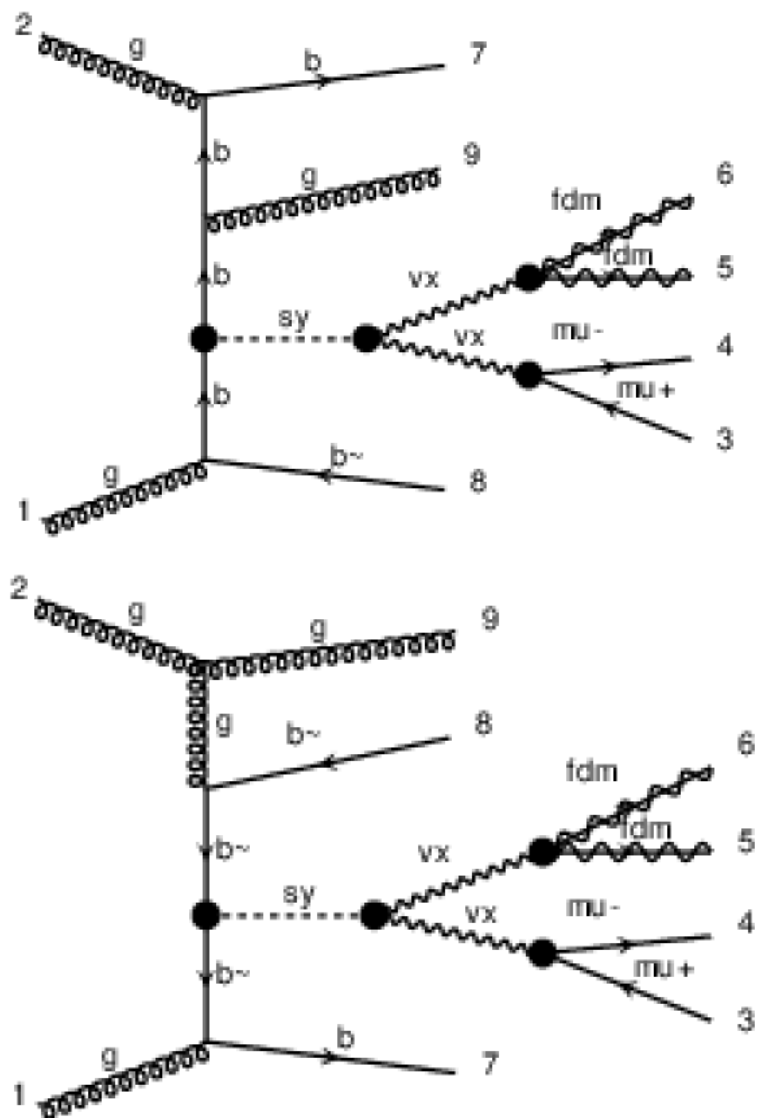
Z = 2,9

# Исследование недостающего поперечного импульса

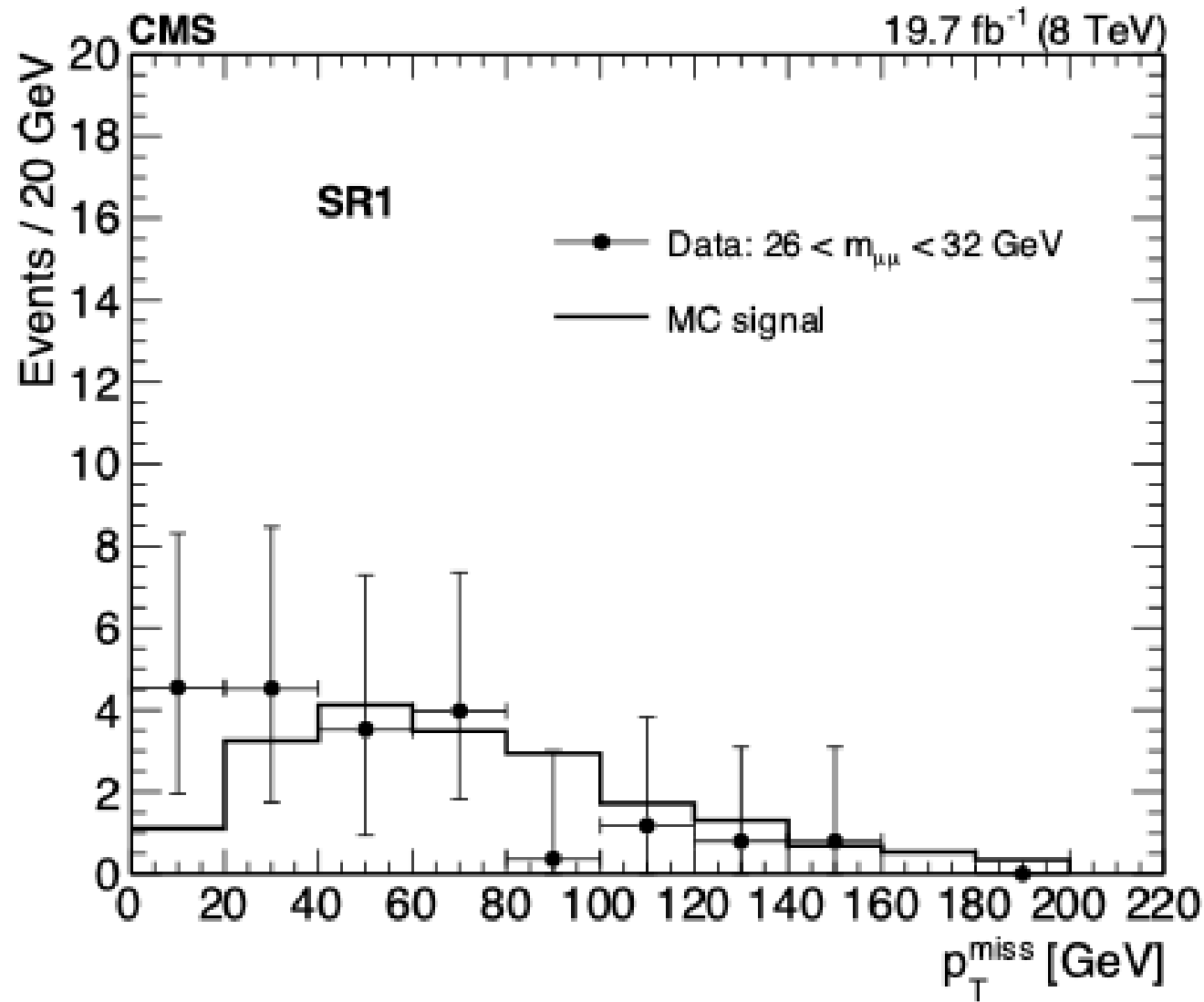


Распределение недостающего поперечного импульса  $p_T^{\text{miss}}$  в событиях с  $m_{\mu\mu} \approx 28$  ГэВ для данных Run 1 (8 ТэВ) и Run 2 (13 ТэВ) в области поиска SR1.

# Теоретическая модель



$$pp \rightarrow Y_S(250) b \bar{b} j, \quad Y_S(250) \rightarrow X_V(28) X_V^*(28), \quad X_V(28) \rightarrow \mu^+ \mu^-, \quad X_V^*(28) \rightarrow dm_f(70) dm_f(70)$$



# Заключение

## Результаты работы:

1. Для данных Run 2 (13 ТэВ) выполнена оптимизация отборов по поперечному импульсу второго мюона и бусту димюонной системы. Максимальная статистическая значимость составила  $3.2\sigma$  для области поиска SR1 и  $2.9\sigma$  для области SR3.
2. Показано наличие ненулевого недостающего поперечного импульса в событиях сигнальной области, что отличает их от ожидаемого фона Дрелла–Яна.
3. Выполнено сравнение экспериментальных распределений с феноменологической моделью рождения нового состояния. Получено качественное согласие формы распределения  $p_T^{\text{miss}}$  с модельными предсказаниями.
4. Разработан графический интерфейс пользователя, позволяющий автоматизировать выбор параметров отбора и ускорить проведение анализа.

## Планы:

В будущем планируется провести моделирование рождения пары мюонов для предложенной теоретической модели и сравнить результат с экспериментальными данными.



**Спасибо за  
внимание!**

# Алгоритм Анти- $k_t$



Расстояние между двумя частицами:

$$d_{ij} = \min(p_{Ti}^{-2}, p_{Tj}^{-2}) \frac{R_{ij}^2}{R^2}$$

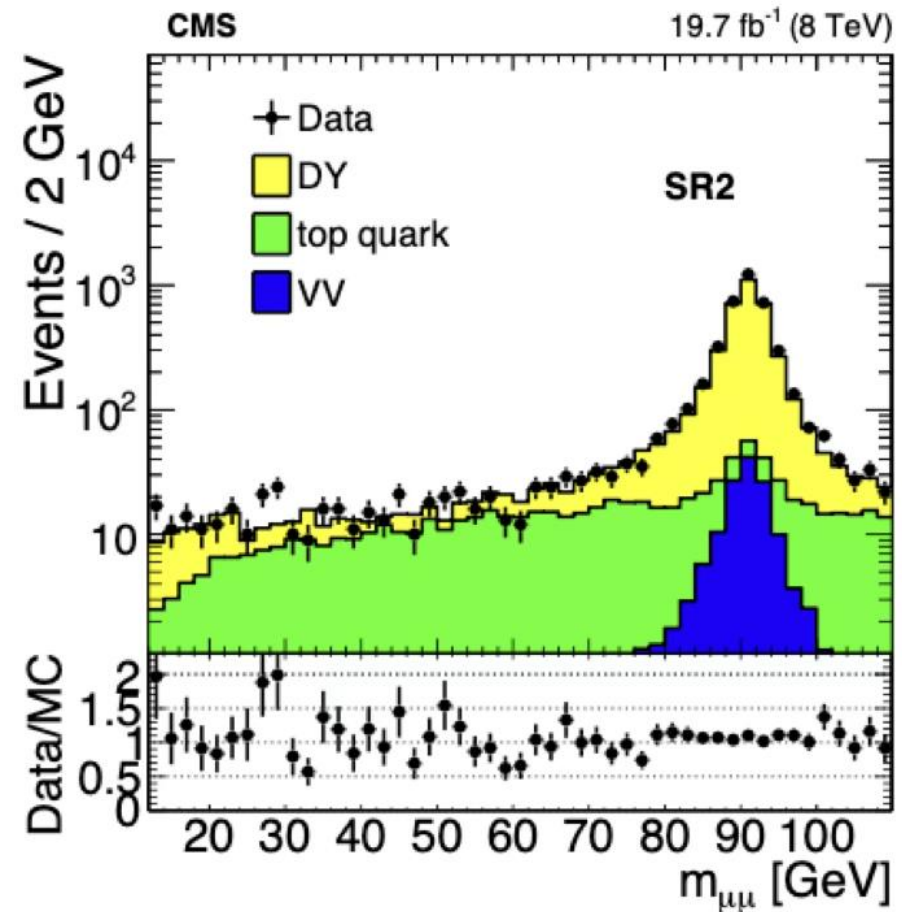
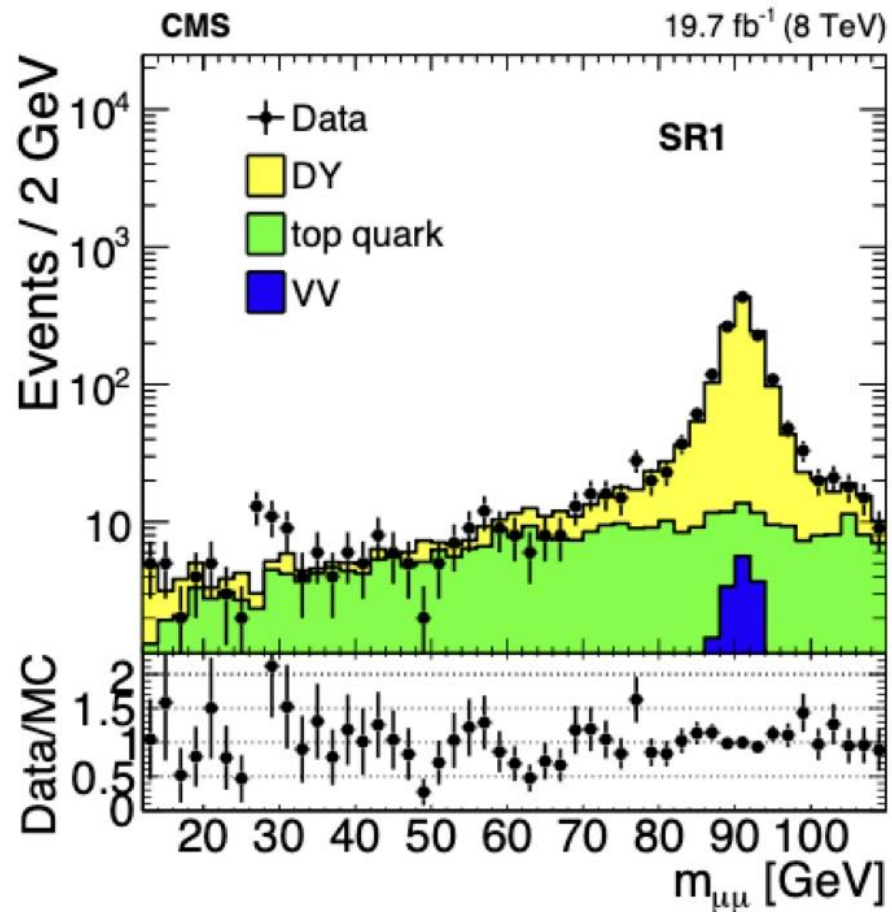
где  $R = 0,5$  — параметр размера струи, а  $R_{ij}^2$  определяется следующим образом:

$$R_{ij}^2 = (\eta_i - \eta_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2$$

Расстояние в импульсном пространстве между осью пучка и регистрируемой частицей:

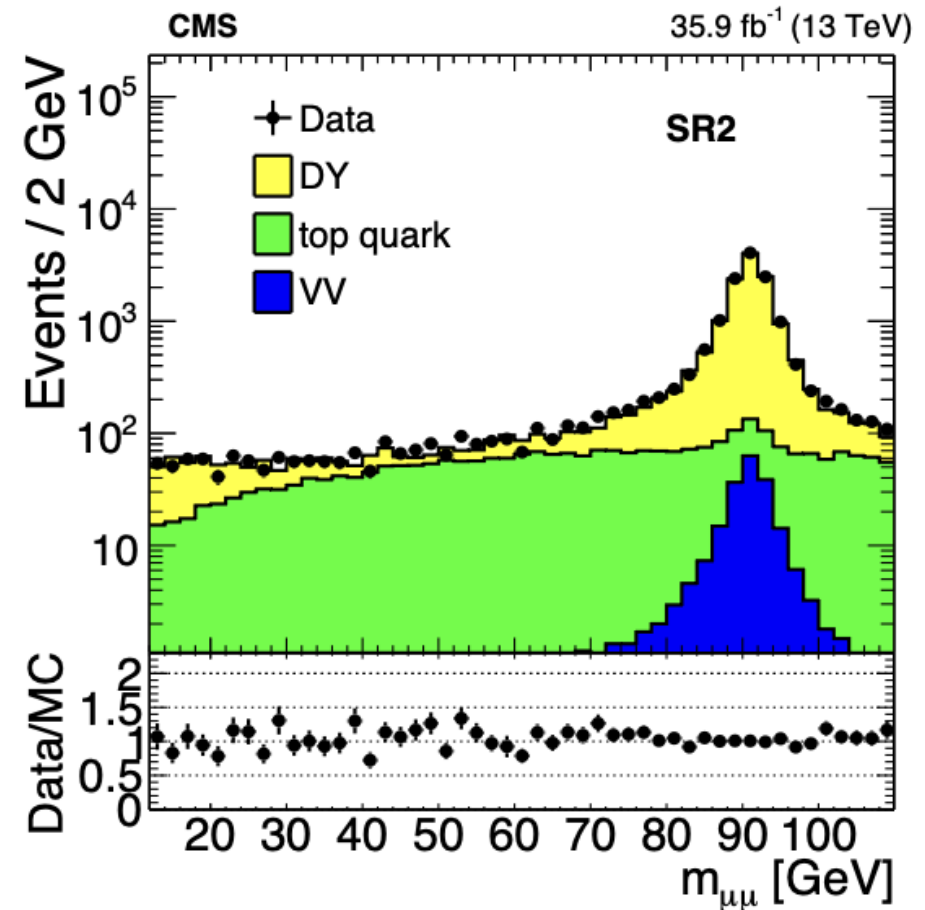
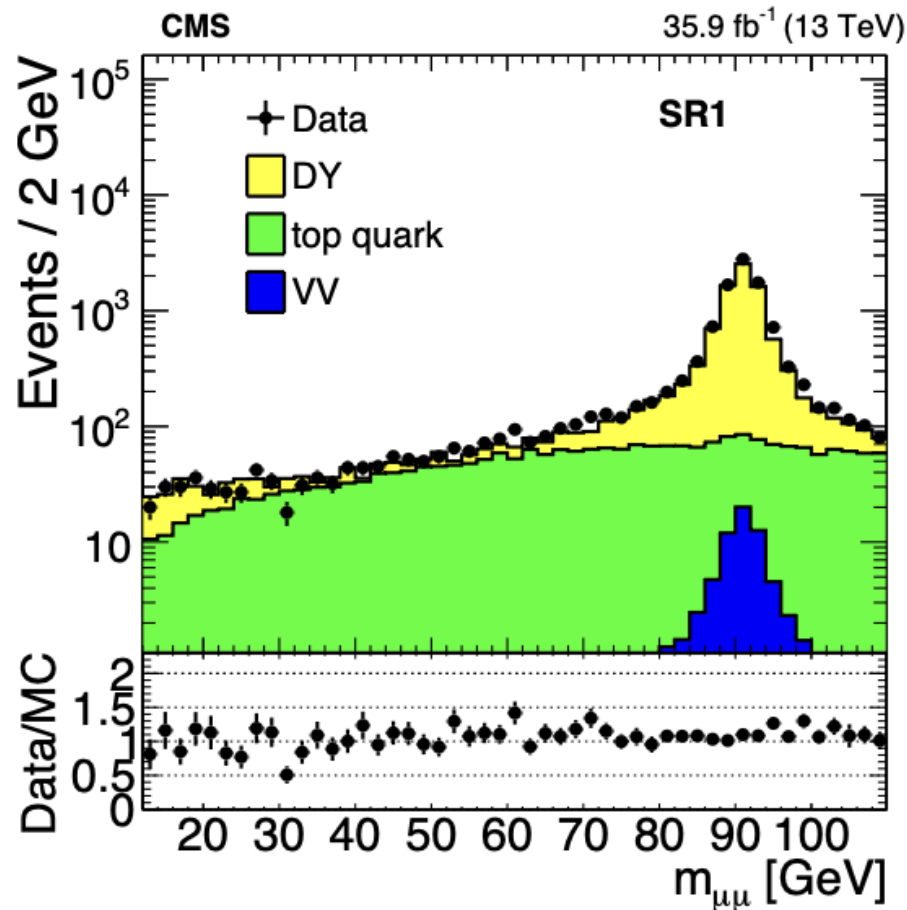
$$d_{iB} = p_{TB}^{-2}$$

# Моделирование фоновых событий



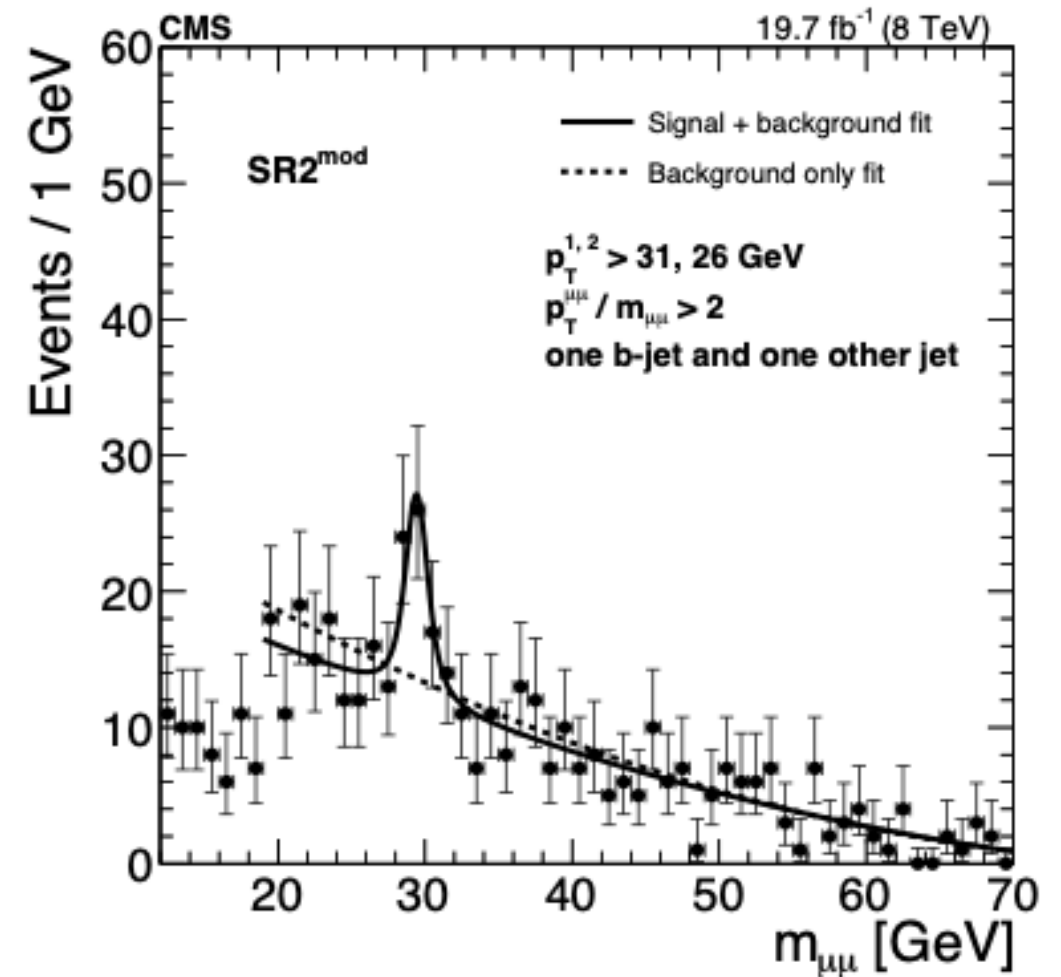
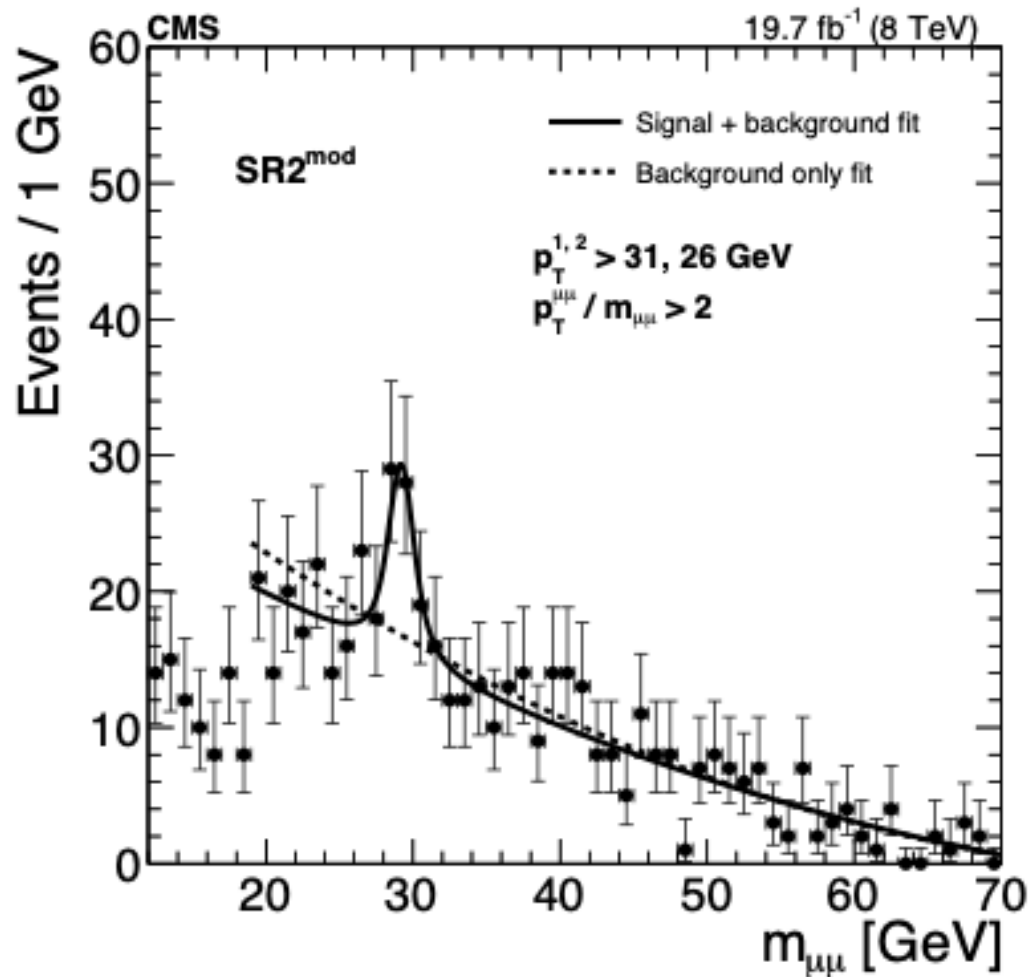
Распределение инвариантной массы пары мюонов  $m_{\mu\mu}$  в SR1 (слева) и SR2 (справа) при энергии 8 ТэВ, с ожидаемыми фоновыми процессами, основанными на моделировании.

# Моделирование фоновых событий



Распределение инвариантной массы пары мюонов  $m_{\mu\mu}$  в SR1 (слева) и SR2 (справа) при энергии 13 ТэВ, с ожидаемыми фоновыми процессами, основанными на моделировании.

# Анализ распределения инвариантной массы. Результаты фитирования для $SR2^{mod}$ .



Распределение инвариантной массы пары мюонов для  $SR2^{mod}$  в случае отборов согласно таблице и в случае с одной b-струей

## Анализ распределения инвариантной массы. Определение числа сигнальных событий с одной и двумя $b$ -струями

$$\begin{cases} N_{bl}P_1(bl) + N_{bb}P_1(bb) = 44 \pm 13, \\ N_{bl}P_2(bl) + N_{bb}P_2(bb) = 39 \pm 11. \end{cases}$$

Решая систему, находим истинное количество сигнальных событий с одной и двумя  $b$ -струями:

$$\begin{cases} N_{bl} = 93 \pm 26, \\ N_{bb} = 8 \pm 28. \end{cases}$$

$N_{bl}$  и  $N_{bb}$  - истинное число событий с одной и двумя  $b$ -струями соответственно

# Расчет истинного числа сигнальных событий с одной и двумя b-струями (1)

Эффективность b-тагирования  $\varepsilon_b = 0,42$ , вероятность ложного тагирования струи как содержащей b-кварк  $f_{\text{mistag}} = 0,0005$ .

Тогда для истинной bl-пары:

- Вероятность того, что для двух струй первая правильно помечается как b-струя, а вторая ложно помечается как b-струя:  $P(n=2) = \varepsilon_b \cdot f_{\text{mistag}}$ .
- Вероятность того, что b-струя помечается, а вторая не помечается:  $P = \varepsilon_b \cdot (1 - f_{\text{mistag}})$ .
- Вероятность того, что b-струя не помечается, а вторая ложно помечается как b-струя:  $P = (1 - \varepsilon_b) \cdot f_{\text{mistag}}$ . Тогда  $P(n=1) = \varepsilon_b \cdot f_{\text{mistag}} + (1 - \varepsilon_b) \cdot f_{\text{mistag}}$
- Вероятность того, что обе струи не помечаются как b-струи:  $P(n=0) = (1 - \varepsilon_b) \cdot (1 - f_{\text{mistag}})$

Для нашего отбора (две струи, хотя бы одна из них b-струя) вероятность получается равной:

$$P_1(\mathbf{bl}) = 1 - P(n=0) = 1 - (1 - \varepsilon_b) \cdot (1 - f_{\text{mistag}})$$

Аналогично для истинной bb-пары:

- $P(n=2) = \varepsilon_b^2$
- $P(n=1) = 2 \cdot \varepsilon_b \cdot (1 - \varepsilon_b)$
- $P(n=0) = (1 - \varepsilon_b)^2$

Для нашего отбора (две струи, хотя бы одна из них b-струя) вероятность:

$$P_1(\mathbf{bb}) = 1 - P(n=0) = 1 - (1 - \varepsilon_b)^2 = 2 \varepsilon_b - \varepsilon_b^2$$

## Расчет истинного числа сигнальных событий с одной и двумя $b$ -струями (2)

Аналогично для нового отбора (одна  $b$ -струя и одна другая струя):

$$P_2(bl) = \varepsilon_b(1 - f_{\text{mistag}}) + (1 - \varepsilon_b) f_{\text{mistag}}$$

$$P_2(bb) = 0$$

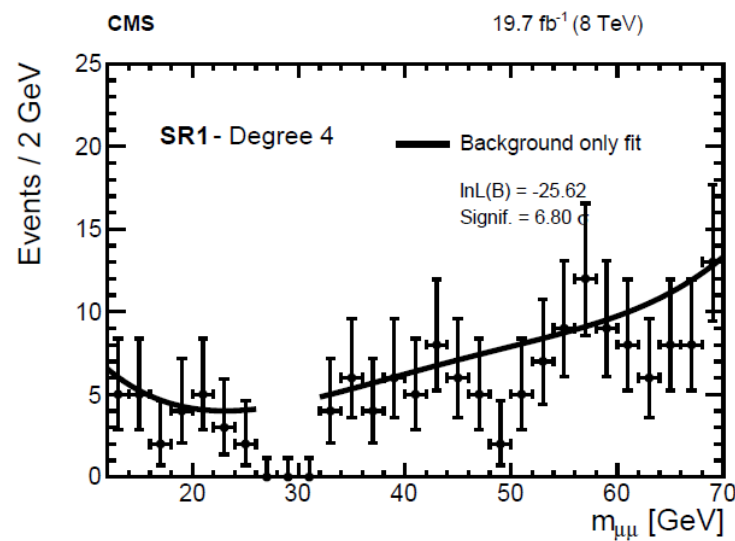
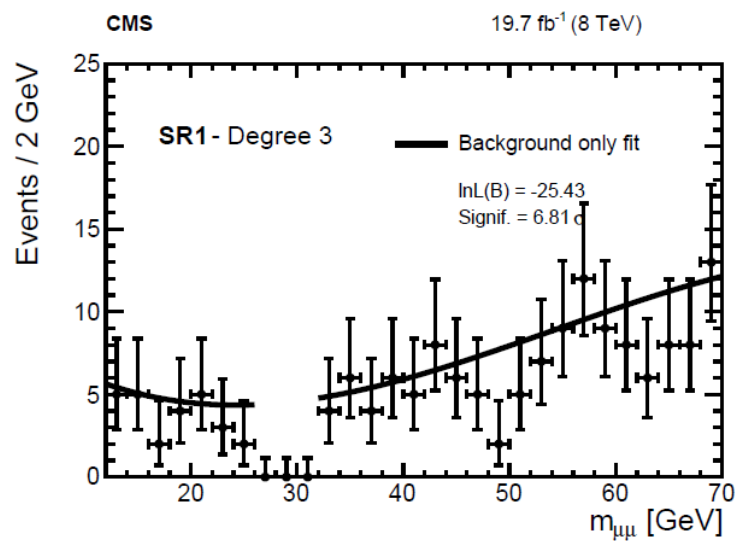
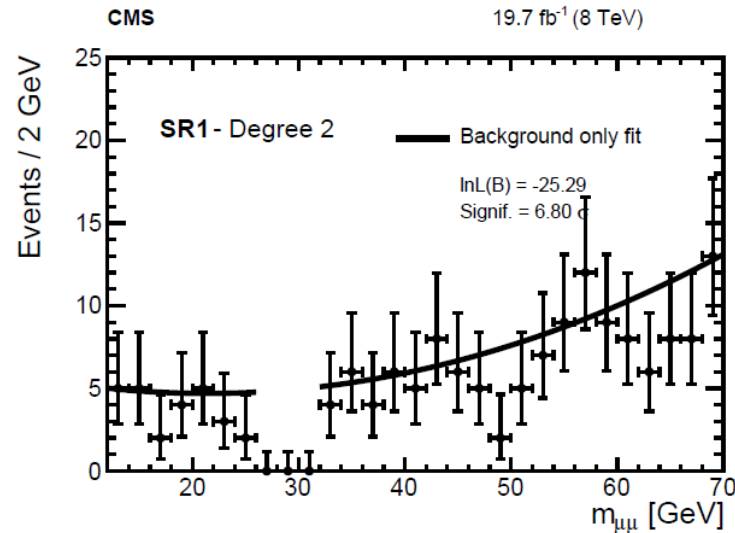
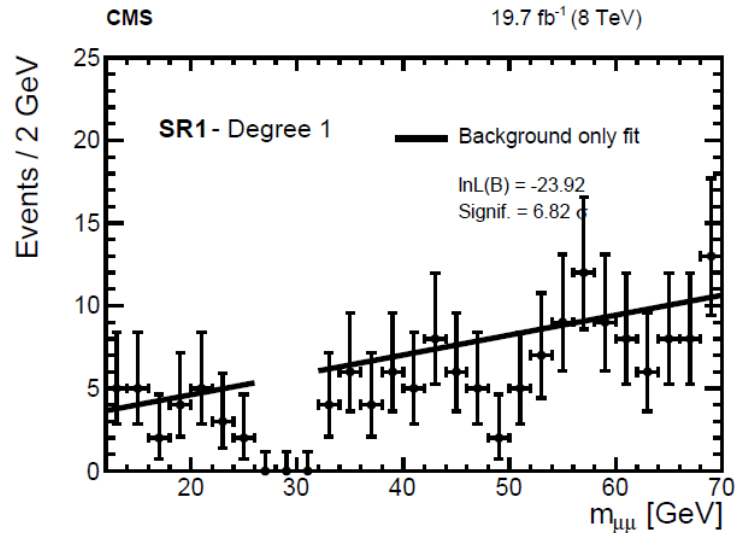
Получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} N_{bl}P_1(bl) + N_{bb}P_1(bb) = 44 \pm 13, \\ N_{bl}P_2(bl) + N_{bb}P_2(bb) = 39 \pm 11. \end{cases}$$

Решая систему, находим истинное количество сигнальных событий с одной и двумя  $b$ -струями:

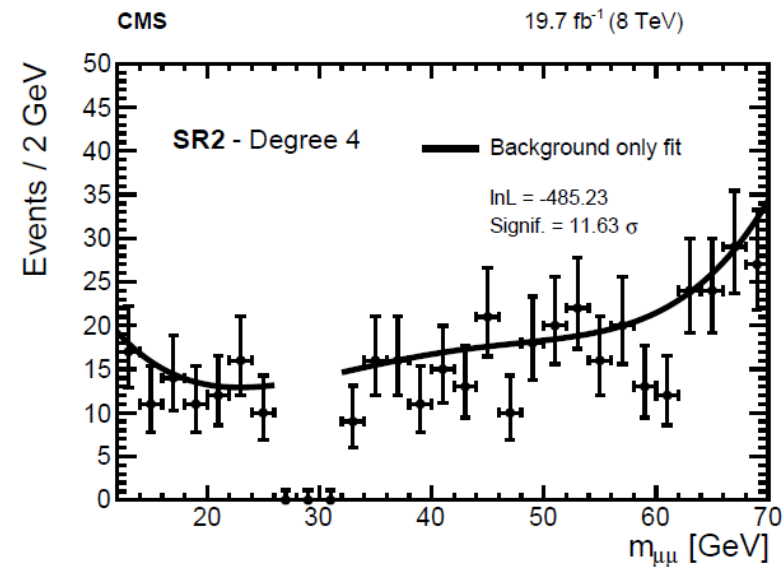
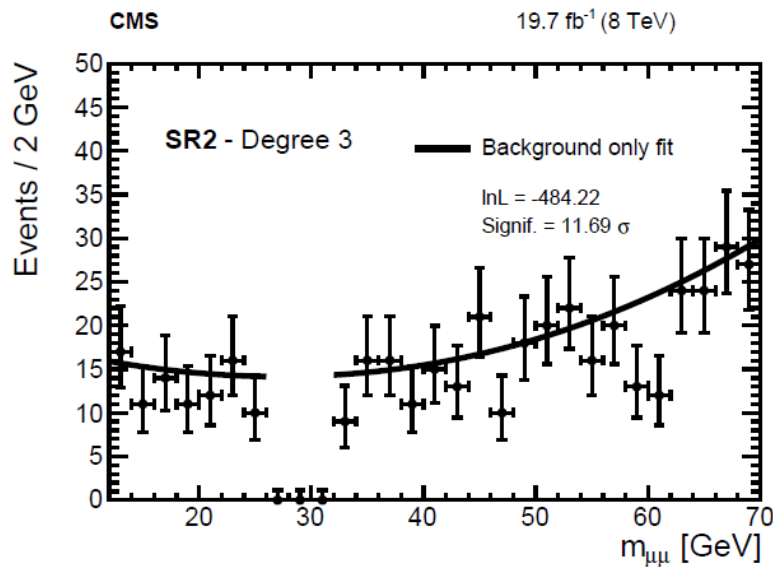
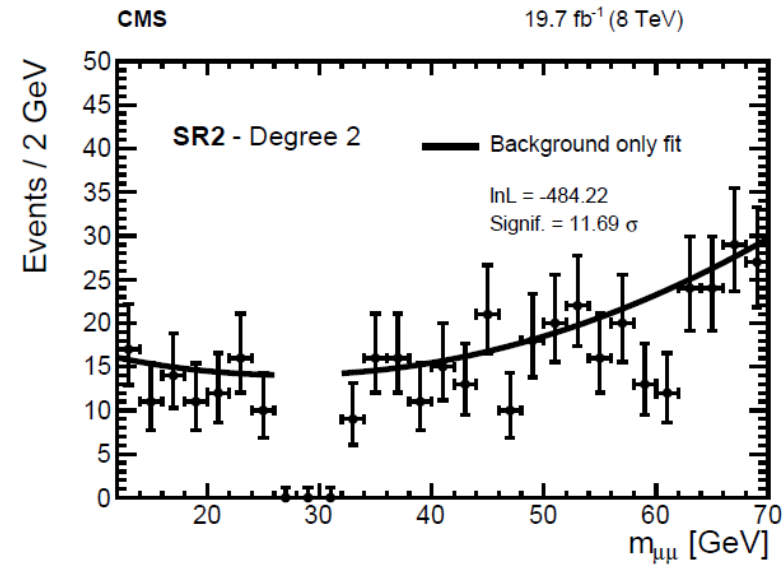
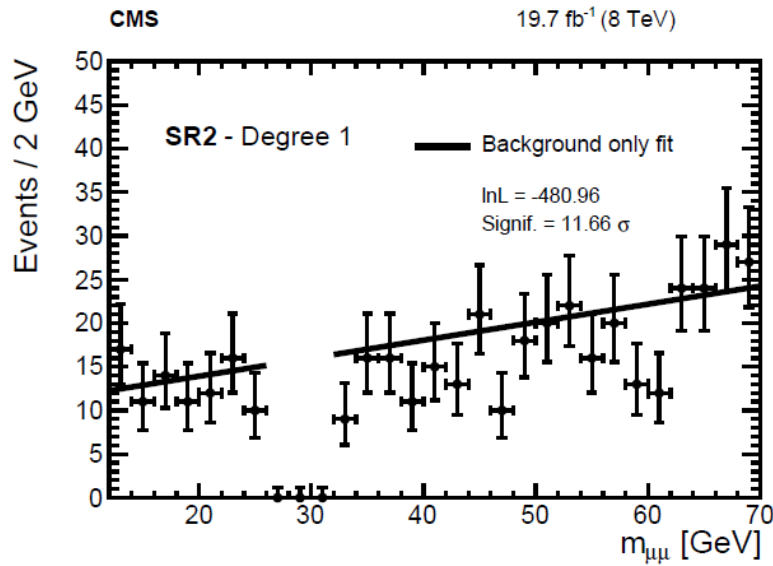
$$\begin{cases} N_{bl} = 93 \pm 26, \\ N_{bb} = 8 \pm 28. \end{cases}$$

# Выбор модели фона (F-тест) для SR1

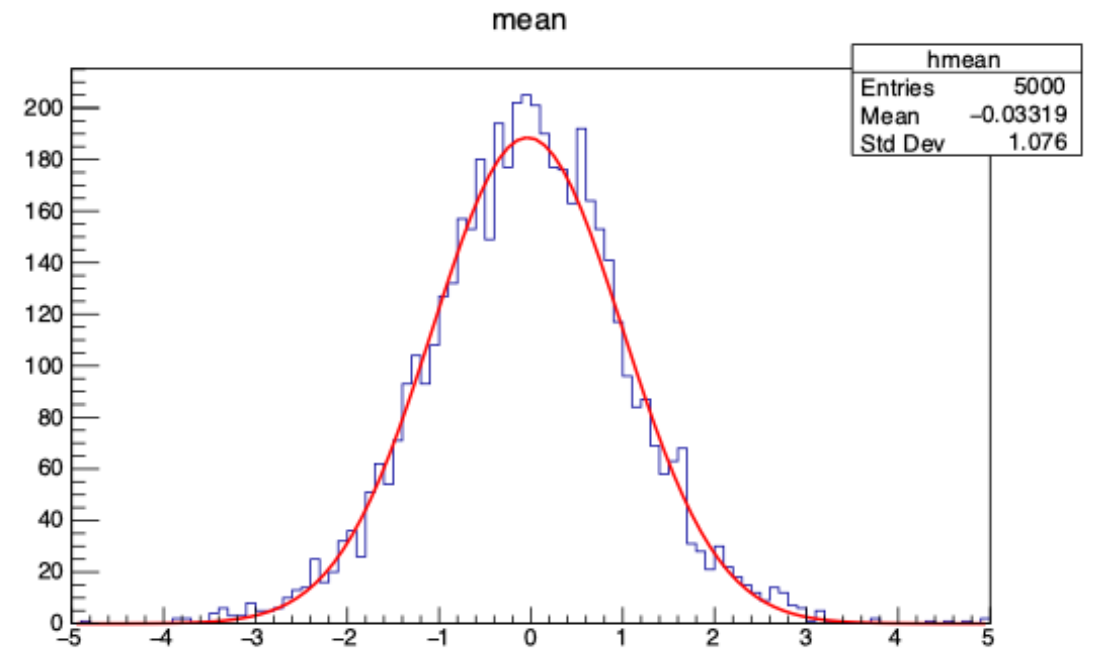
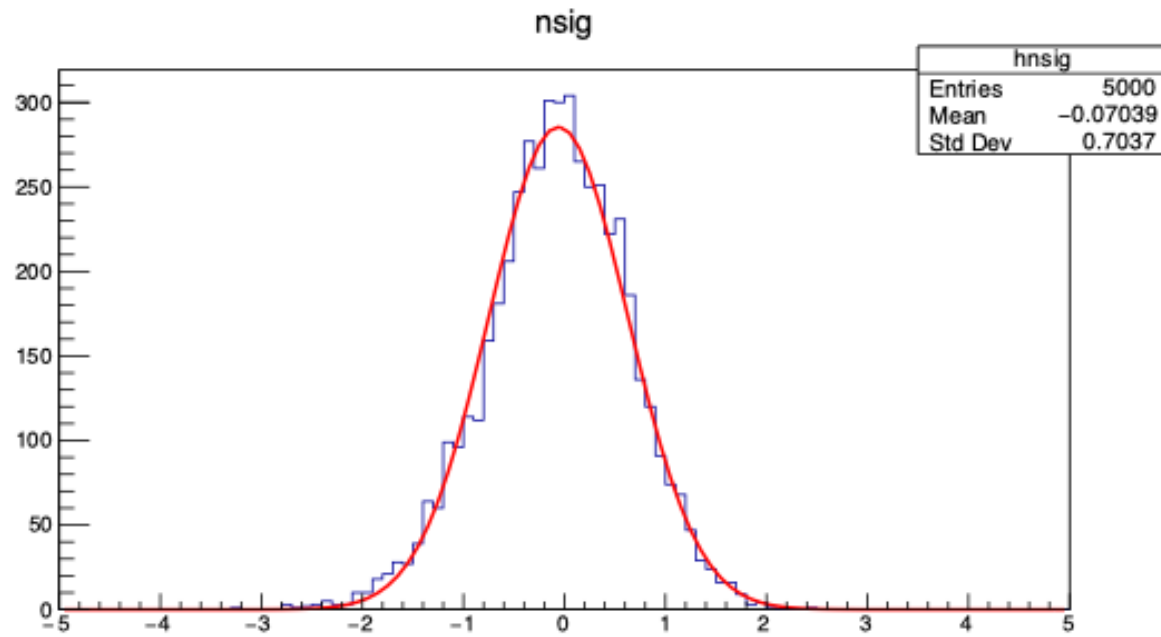


Степень полинома	SR1		SR2	
	$-\ln \mathcal{L}$	$\Delta(-\ln \mathcal{L})$	$-\ln \mathcal{L}$	$\Delta(-\ln \mathcal{L})$
1	23,92	–	480,96	–
2	25,29	1,37	484,22	3,26
3	25,43	0,14	484,22	0,00
4	25,62	0,19	485,23	1,01

# Выбор модели фона (F-тест) для SR2



# Байес тест



$$pull(N_{sig}) = \frac{N_{sig}^{fit} - N_{sig}^{true}}{\sigma_{N_{sig}}}, \quad pull(m) = \frac{m^{fit} - m^{true}}{\sigma_m}$$

# Байес тест



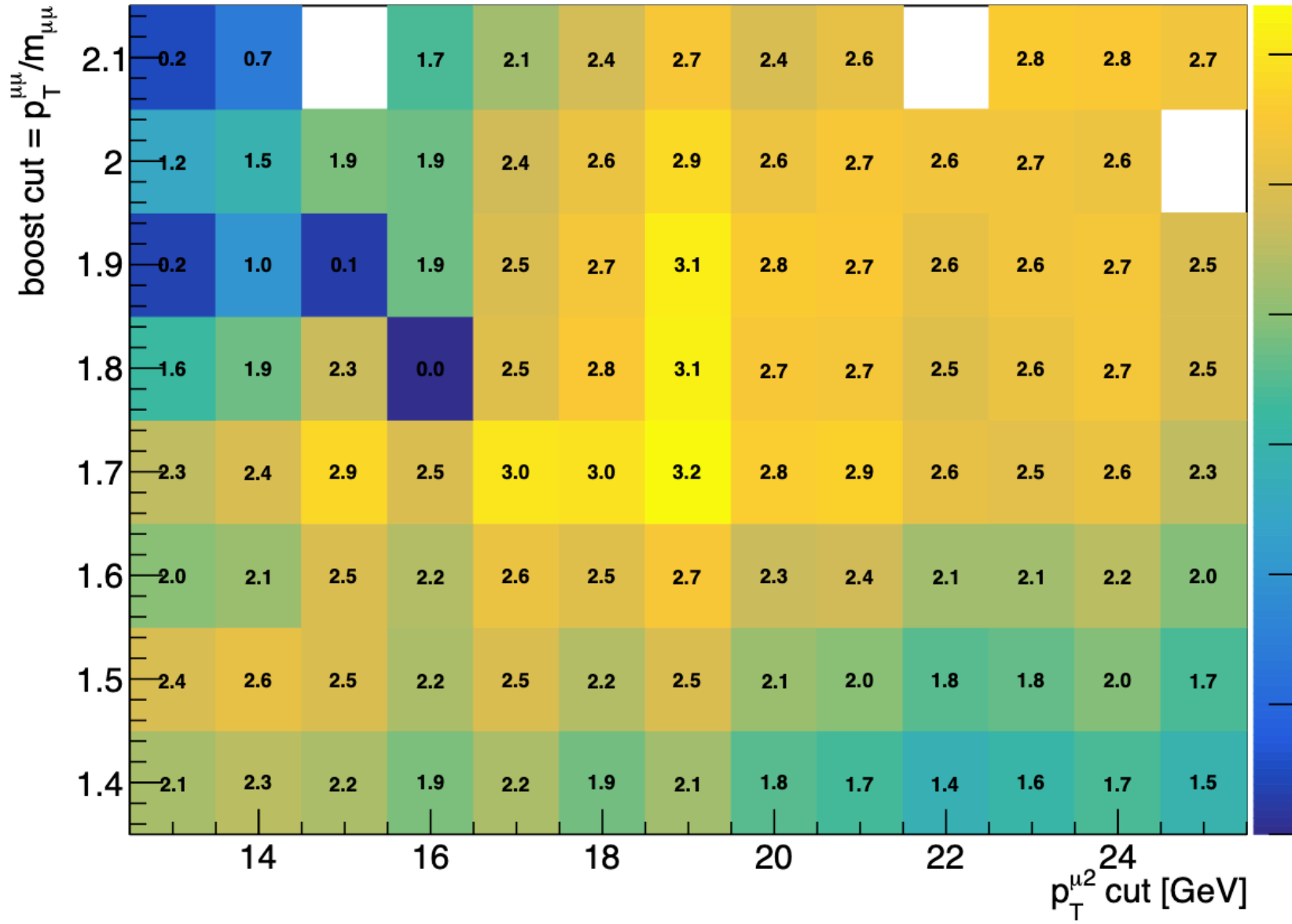
Модель фона (SR / CR)	$N_{sig}$	$m$ , ГэВ	$\mu_{pull}(N_{sig})$	$\mu_{pull}(m)$
<i>Chebyshev(2) / Chebyshev(2)</i>	$24.23 \pm 7.04$	$28.84 \pm 0.41$	0.0217	-0.0269
<i>Chebyshev(2) / exp(<math>P_2</math>)</i>	$25.35 \pm 6.63$	$28.84 \pm 0.40$	-0.0704	-0.0332
<i>exp(<math>P_2</math>) / Chebyshev(2)</i>	$20.75 \pm 6.50$	$28.62 \pm 0.38$	0.0861	-0.0244
<i>exp(<math>P_2</math>) / exp(<math>P_2</math>)</i>	$21.10 \pm 6.49$	$28.62 \pm 0.38$	0.0194	-0.0288

Результаты фитирования и средние значения распределений pull-величин для сигнальной области SR1 (5000 событий, 8 ТэВ).

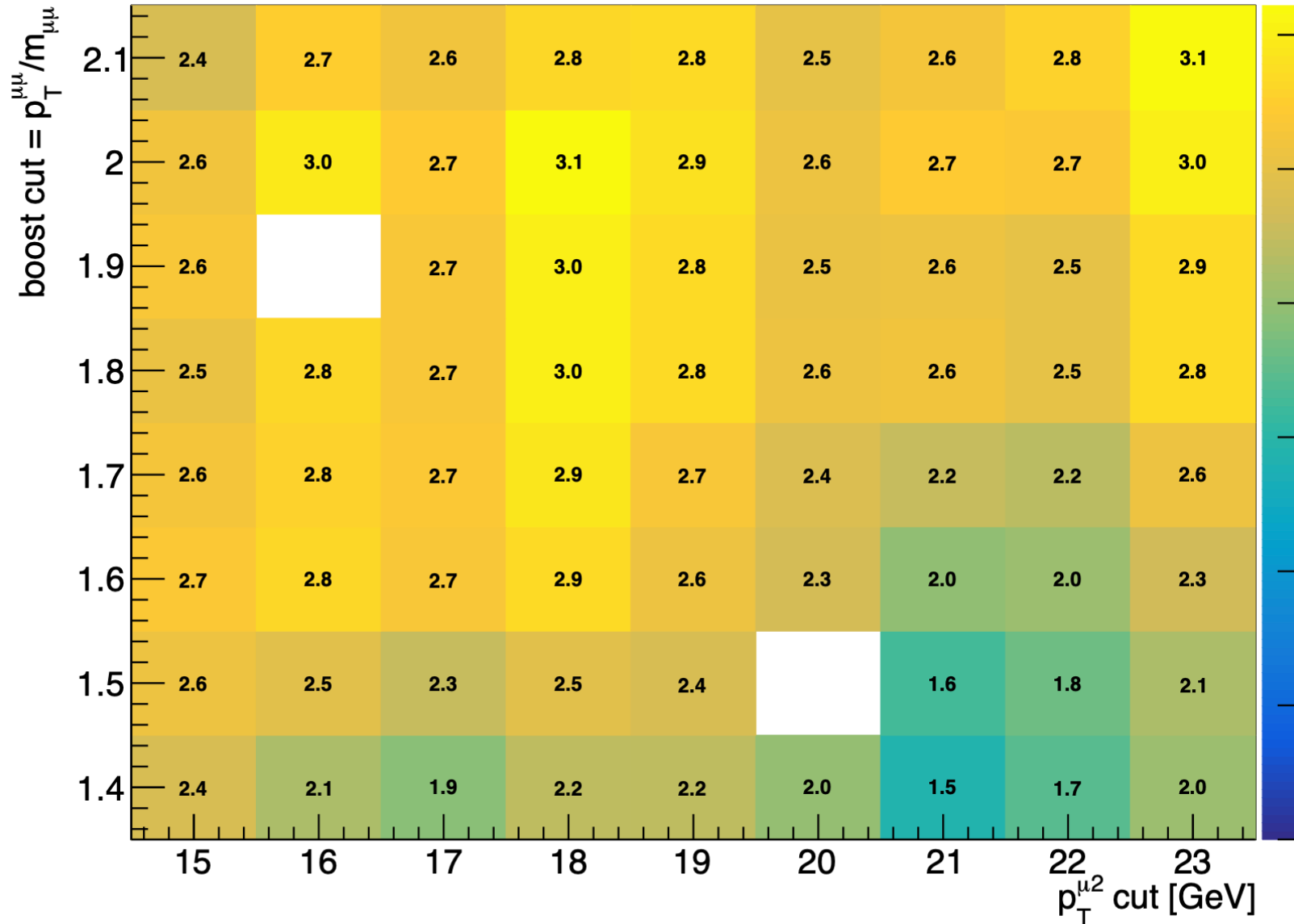
Модель фона (SR / CR)	$N_{sig}$	$m$ , ГэВ	$\mu_{pull}(N_{sig})$	$\mu_{pull}(m)$
<i>Chebyshev(2) / Chebyshev(2)</i>	$24.33 \pm 8.34$	$27.96 \pm 0.33$	0.0771	-0.0086
<i>Chebyshev(2) / exp(<math>P_2</math>)</i>	$23.80 \pm 7.82$	$27.95 \pm 0.33$	-0.0508	-0.0168
<i>exp(<math>P_2</math>) / Chebyshev(2)</i>	$19.85 \pm 8.25$	$28.06 \pm 0.50$	0.1932	0.0626
<i>exp(<math>P_2</math>) / exp(<math>P_2</math>)</i>	$19.77 \pm 7.68$	$28.05 \pm 0.50$	0.0752	0.0442

Результаты фитирования и средние значения распределений pull-величин для сигнальной области SR2 (5000 событий, 8 ТэВ).

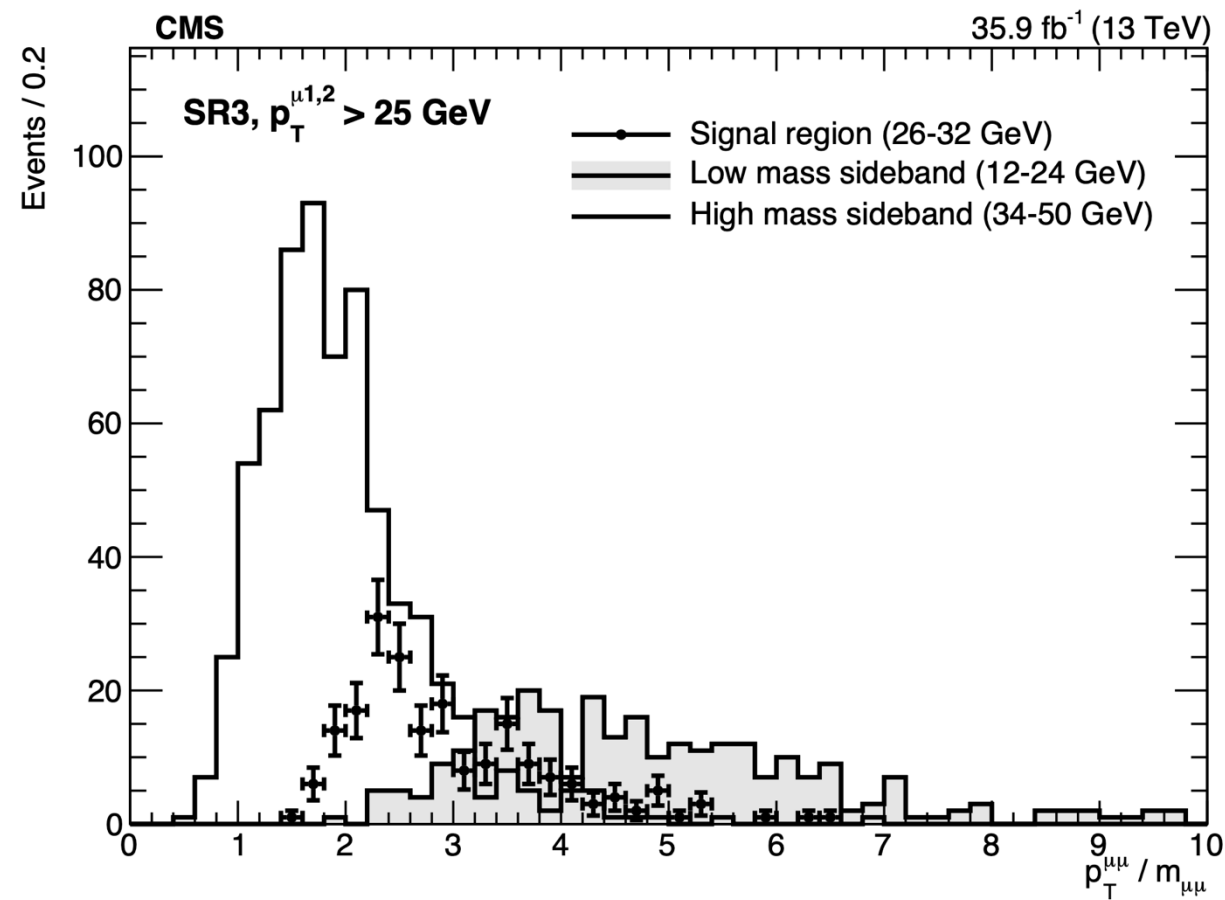
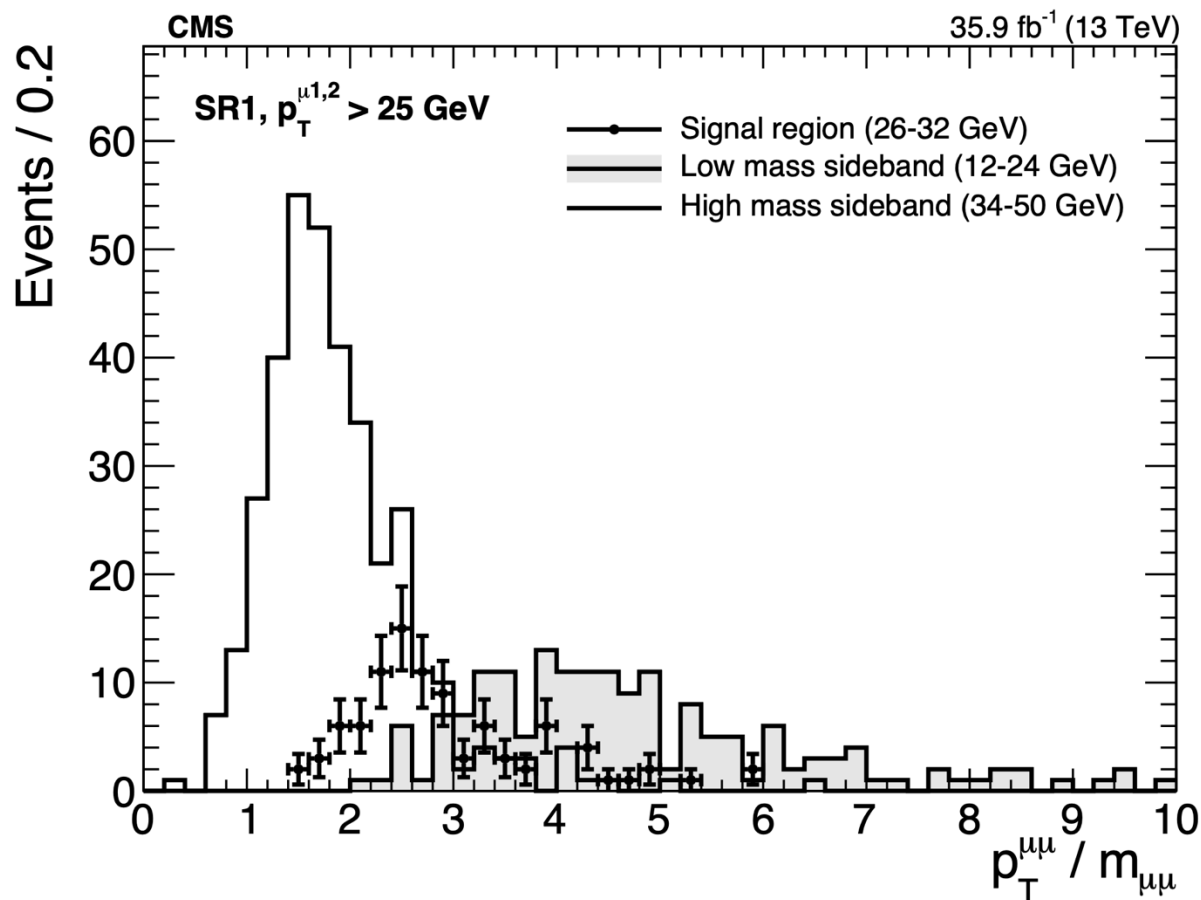
# Оптимизация отборов для Run 2 (13 ТэВ) SR1



# Оптимизация отборов для Run 2 (13 ТэВ) SR3



# Распределение по бусту для Run 2 (13 ТэВ) SR1/SR3



# Распределение по поперечному импульсу второго мюона для Run 2 (13 ТэВ) SR1/SR3

