



ИССЛЕДОВАНИЕ НЕДОСТАЮЩЕГО ПОПЕРЕЧНОГО ИМПУЛЬСА В СОБЫТИЯХ РОЖДЕНИЯ ДВУХМЮОННОГО РЕЗОНАНСА С МАССОЙ 28 ГЭВ, ОБНАРУЖЕННОГО НА УСТАНОВКЕ CMS, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ RUN 1

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

Студент: Ильиных С. Д.

26.12.2025

Цели и задачи



Цель:

Целью данной научно-исследовательской работы является исследование кинематических характеристик, в частности недостающего поперечного импульса, в событиях с рождением двухмюонного резонанса с массой около 28 ГэВ, обнаруженного в данных эксперимента CMS (Run 1).

Задачи:

1. Анализ критериев отбора событий для различных областей поиска (SR1 и SR2).
2. Построение и фитирование распределения по инвариантной массе пары мюонов $m_{\mu\mu}$ для выделения сигнальной области.
3. Исследование распределения недостающего поперечного импульса (p_{miss}^T) в событиях с $m_{\mu\mu} \approx 28$ ГэВ.
4. Определение числа событий с одной и двумя b-струями для области поиска SR2^{mod}.

Схема экспериментальной установки

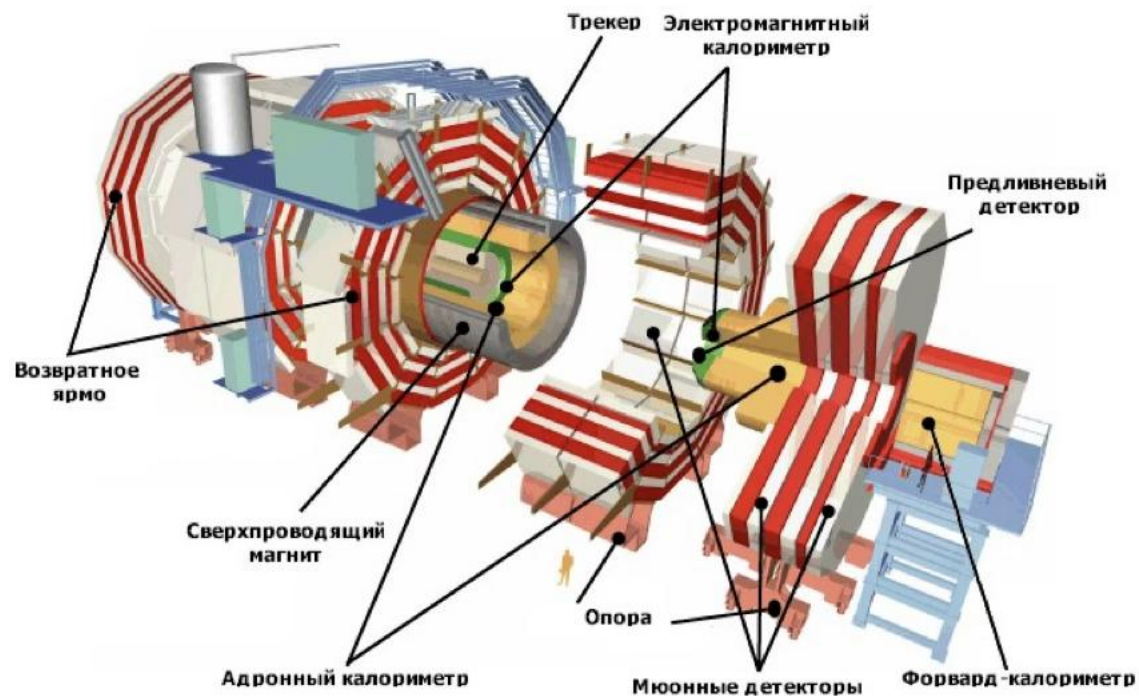
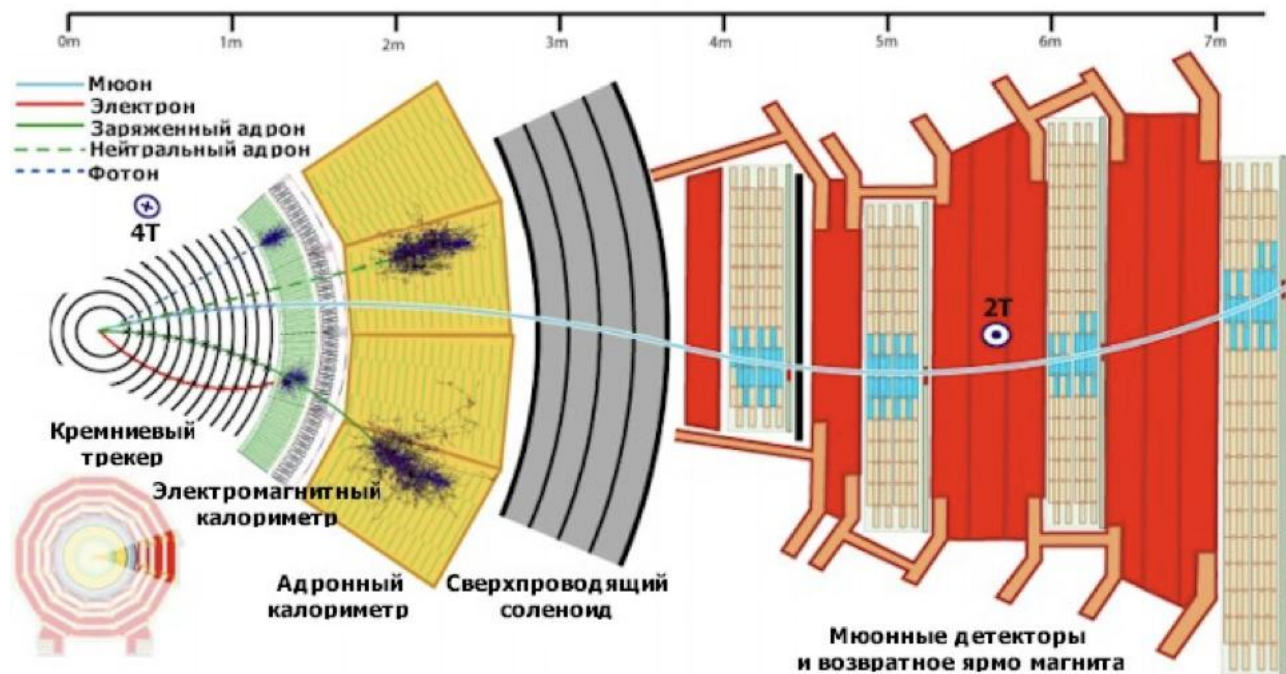


Схема детектора CMS



Сечение детектора CMS

Критерии отбора событий



Критерий	SR1	SR2	SR2 ^{mod}
Мюоны $m_{\mu\mu}$ b-струя	OS, $p_T > 25$ ГэВ, $ \eta < 2.1$	$p_T > 31, 26$ ГэВ	
		> 12 ГэВ	
		$p_T > 30$ ГэВ, $ \eta \leq 2.4$	
Доп. струя	$p_T > 30$ ГэВ $2.4 < \eta < 4.7$	$p_T > 30$ ГэВ $ \eta \leq 2.4$	$p_T > 30$ ГэВ $ \eta \leq 2.4$
Вето	Нет др. струй $ \eta \leq 2.4$	Нет др. струй $2.4 < \eta < 4.7$	Нет др. струй $2.4 < \eta < 4.7$
p_T^{miss}	—	< 40 ГэВ	—
$\Delta\phi(\mu\mu, jj)$	—	> 2.5 рад	—
$\frac{m_{\mu\mu}}{p_T}$	—	—	> 2.0

Критерии отбора в трех областях поиска

Анализ инвариантной массы. Метод максимального правдоподобия.

Функция правдоподобия:

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

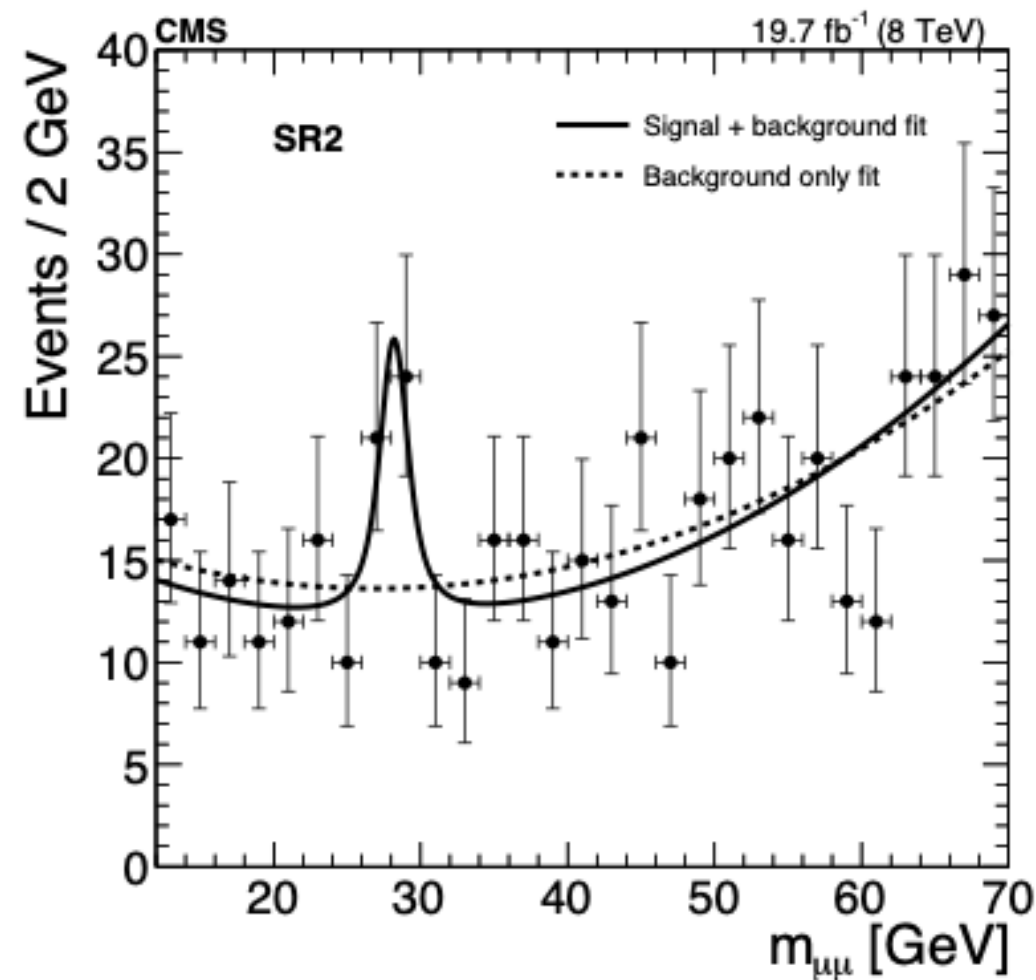
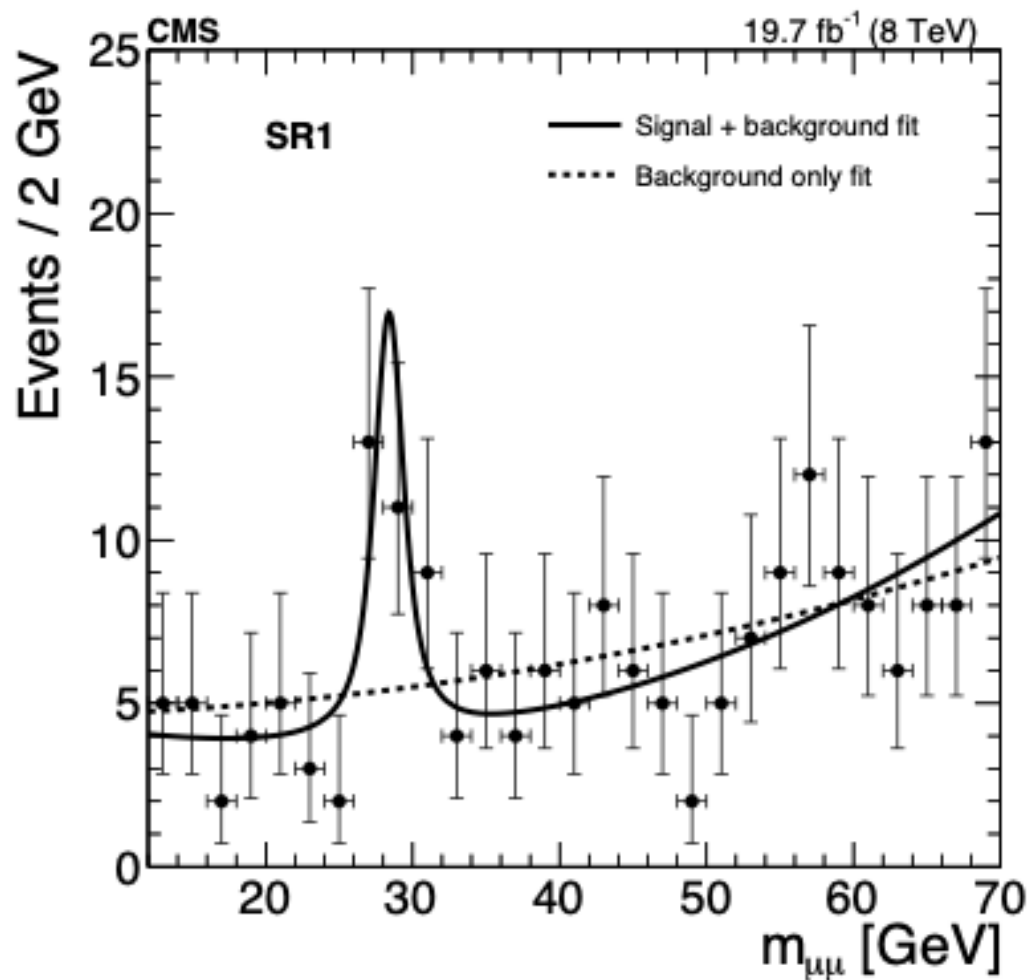
Сигнальная компонента:

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

Фоновая компонента:

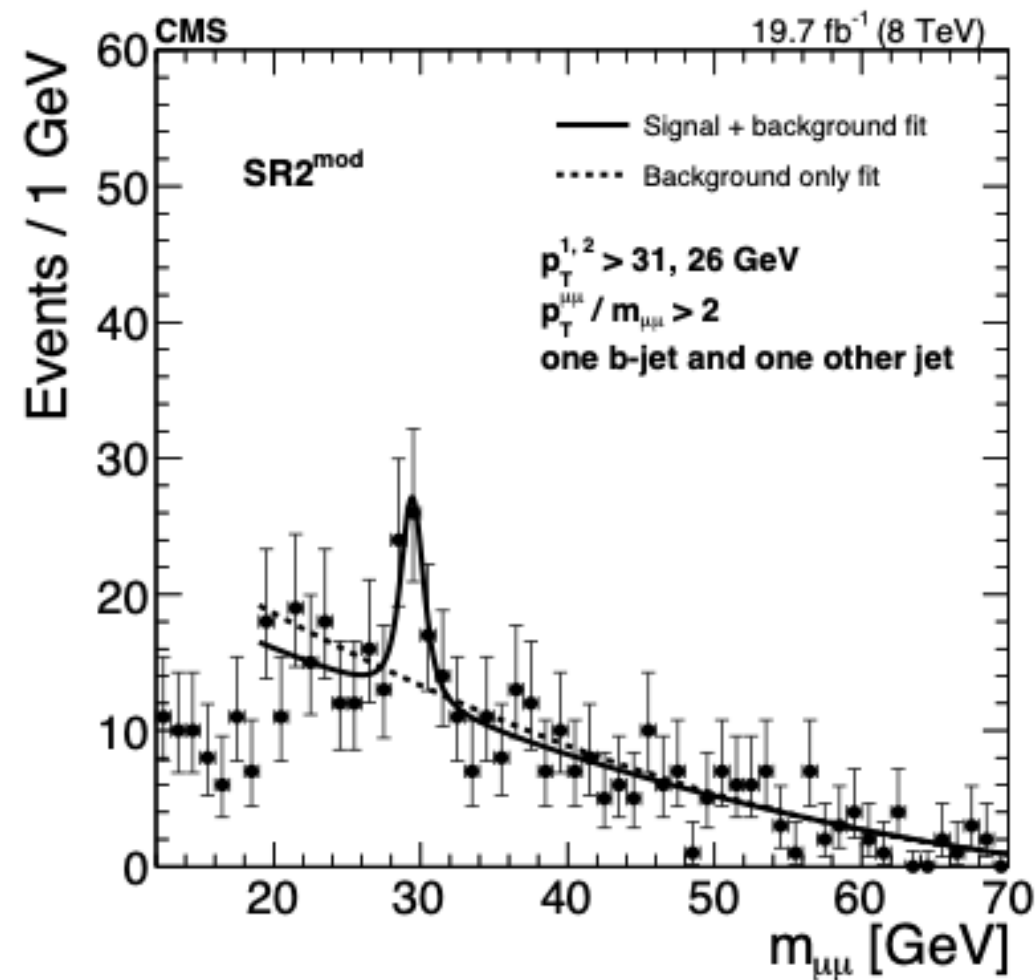
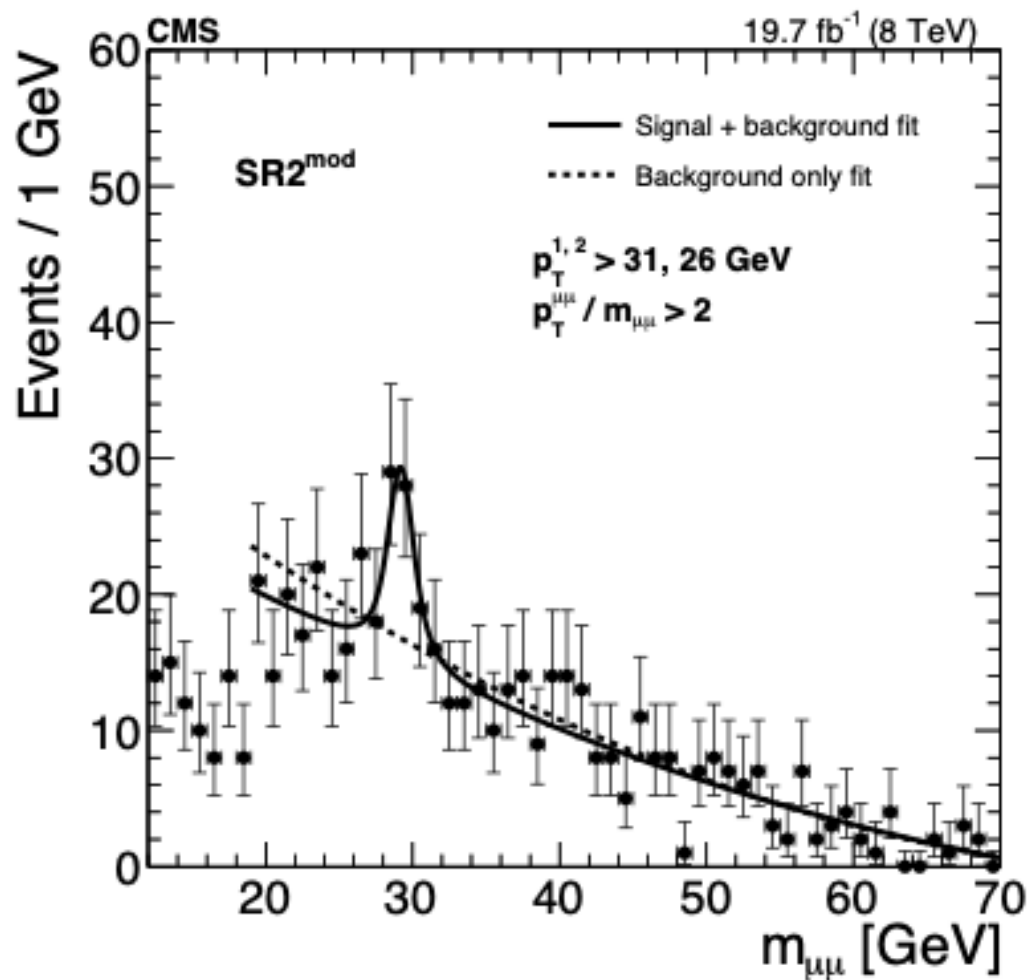
$$\mathcal{P}_2(m; \vec{a}) = 1 + \sum_{k=1}^2 a_k \left(\frac{m - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}} \right)^k$$

Анализ распределения инвариантной массы. Результаты фитирования (1).



Распределение инвариантной массы пары мюонов для SR1 и SR2.

Анализ распределения инвариантной массы. Результаты фитирования (2).



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

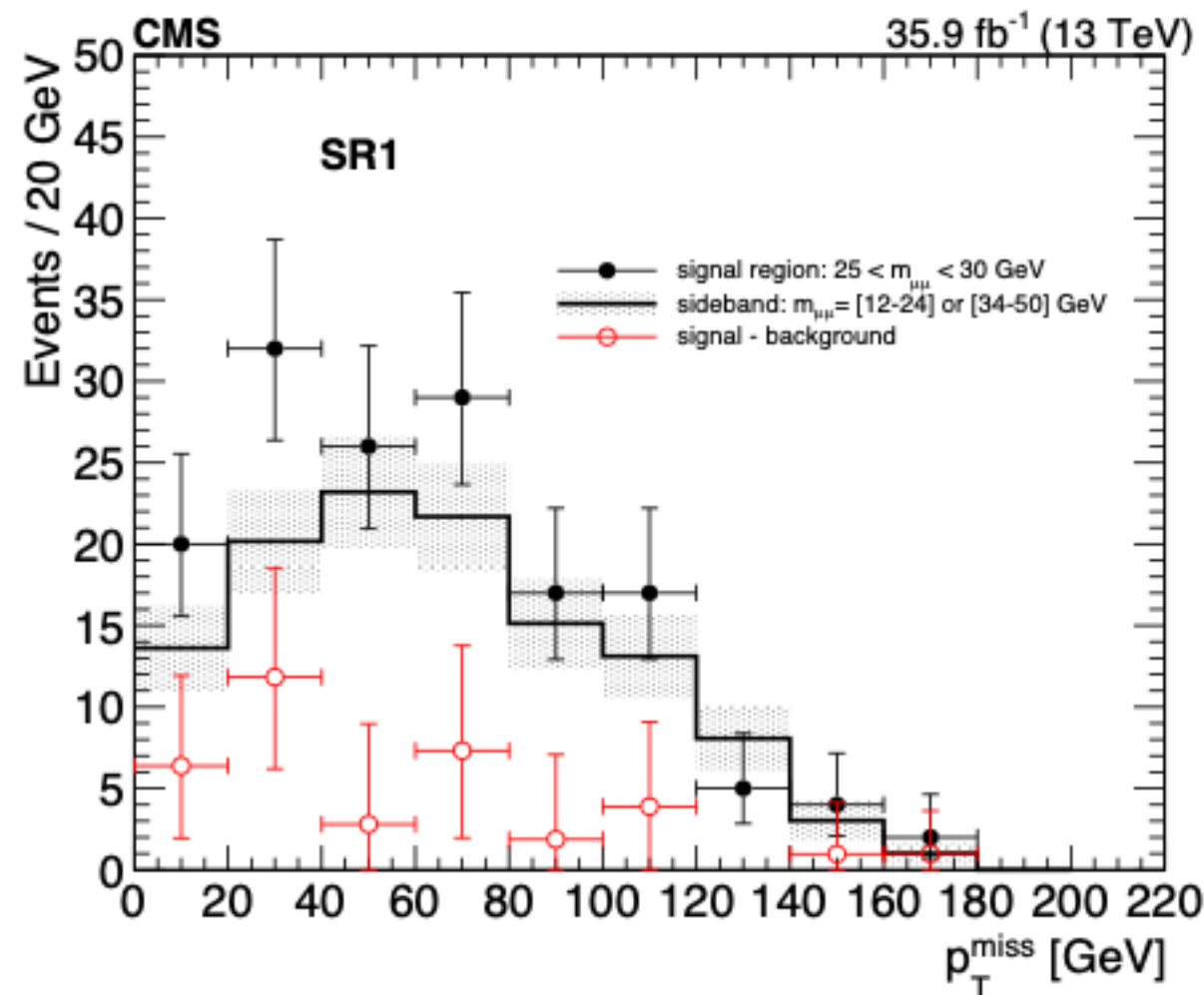
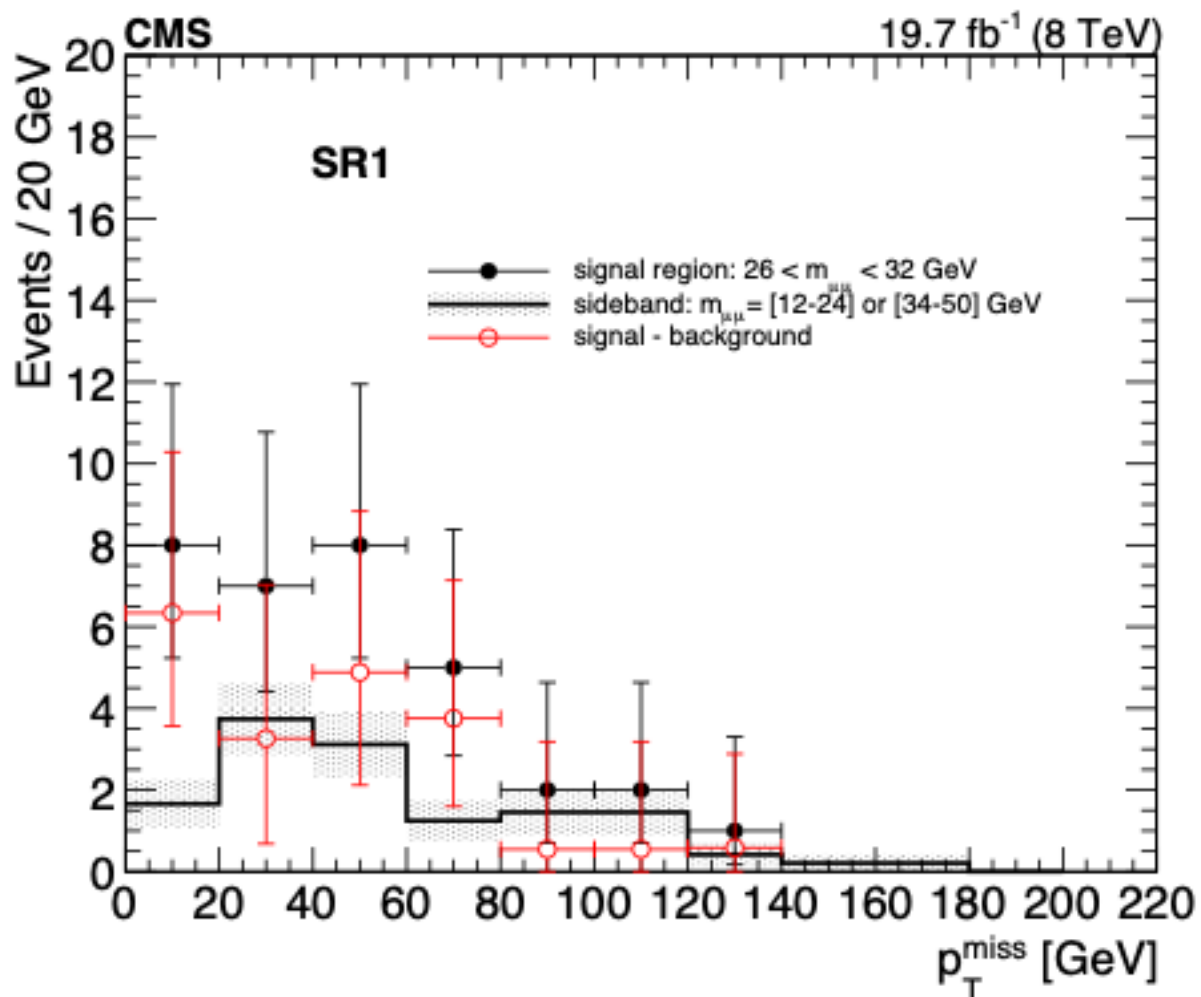
$$\begin{cases} N_{bl}P_1(bl) + N_{bb}P_1(bb) = 44 \pm 13, \\ N_{bl}P_2(bl) + N_{bb}P_2(bb) = 39 \pm 11. \end{cases}$$

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

Исследование недостающего поперечного импульса



Распределение недостающего поперечного импульса p_T^{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.

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 _{eta} 1st muon	<input type="text" value="2.10"/>
l _{eta} 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.

Заключение

Результаты работы:

1. Исследована и применена последовательность критериев отбора для выделения сигнальных событий на фоне основных процессов Дрелла-Яна, $\tilde{t}t$ и рождения пары бозонов.
2. Построено распределение инвариантной массы пары мюонов и выполнено его фитирование с использованием метода максимального правдоподобия. Сигнал моделировался сверткой Брейта-Вигнера и Гаусса, фон — полиномом 2-й степени.
3. Проведен анализ распределения недостающего поперечного импульса (p_{miss}^T) в сигнальной области. Обнаружено, что в событиях с $m_{\mu\mu} \approx 28$ ГэВ наблюдается ненулевой p_{miss}^T , что свидетельствует о наличии в конечном состоянии частиц, не регистрируемых детектором.
4. Полученные распределения p_{miss}^T для данных Run 1 и Run 2 указывают на воспроизводимость эксперимента при разных энергиях столкновений.
5. Реализован графический интерфейс пользователя для улучшения пользовательского опыта при многократном запуске скрипта с одинаковым функционалом, но разными параметрами отбора.

Планы:

В будущем планируется провести более подробный анализ с данными Run 2 при большей статистике.



**Спасибо за
внимание!**

Алгоритм Анти- k_t



Расстояние между двумя частицами:

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

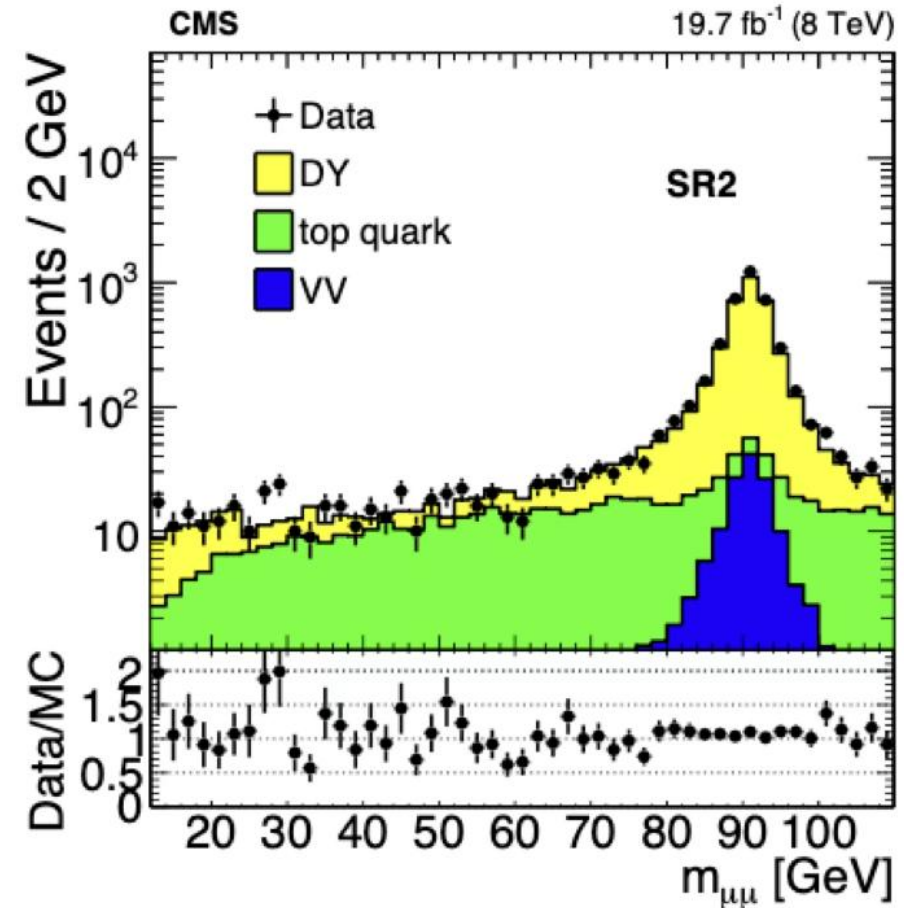
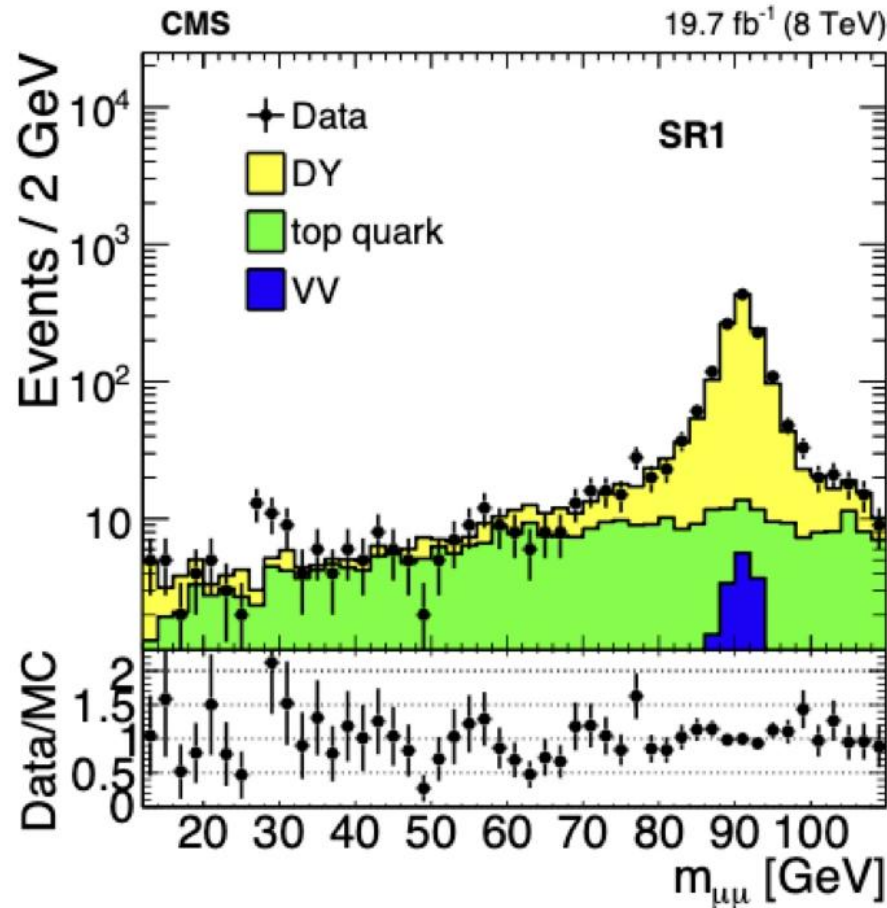
где $R = 0,5$ — параметр размера струи, а R_{ij}^2 определяется следующим образом:

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

Расстояние в импульсном пространстве между осью пучка и регистрируемой частицей:

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

Моделирование основных 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.

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:

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

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:

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

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:

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