

# Поиск тяжелых резонансов на детекторе CMS Большого Адронного Коллайдера



18.04.2023

Семинар ОФВЭ, ПИЯФ

Мурзин В.А.

# План доклада

- Массивные резонансы в двухлептонных конечных состояниях
- Физика за пределами СМ в массивных двухфотонных событиях
- Первый поиск эксклюзивного рождения пары фотонов высокой массы с тагированными протонами
- Поиск узких резонансов в спектрах масс пар струй
- Резонансное и нерезонансное рождение пар двуструйных резонансов
- Тяжелые резонансы распадающиеся в бозонные пары в струйных конечных состояниях
- Тяжелый резонанс с распадом в  $t$ -кварк и  $W$ -бозон в конечном состоянии с лептоном и струями
- Парное рождение векторно-подобных лептонов
- Парное рождение векторно-подобных кварков
- Тяжелые резонансы и квантовые черные дыры в лептонных конечных состояниях

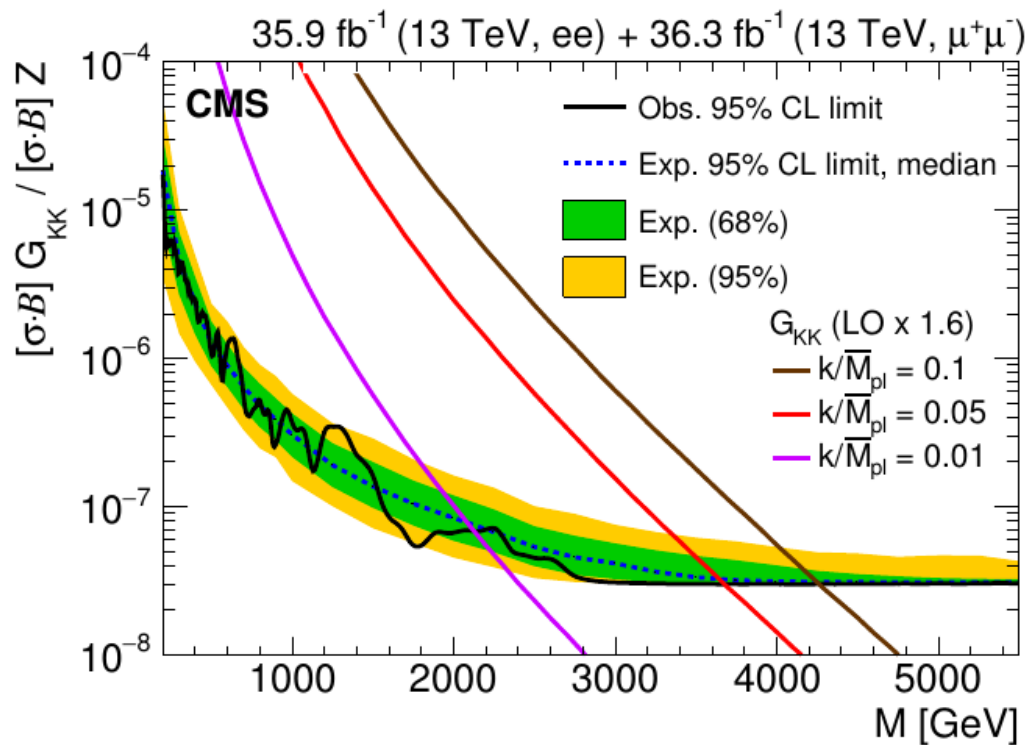
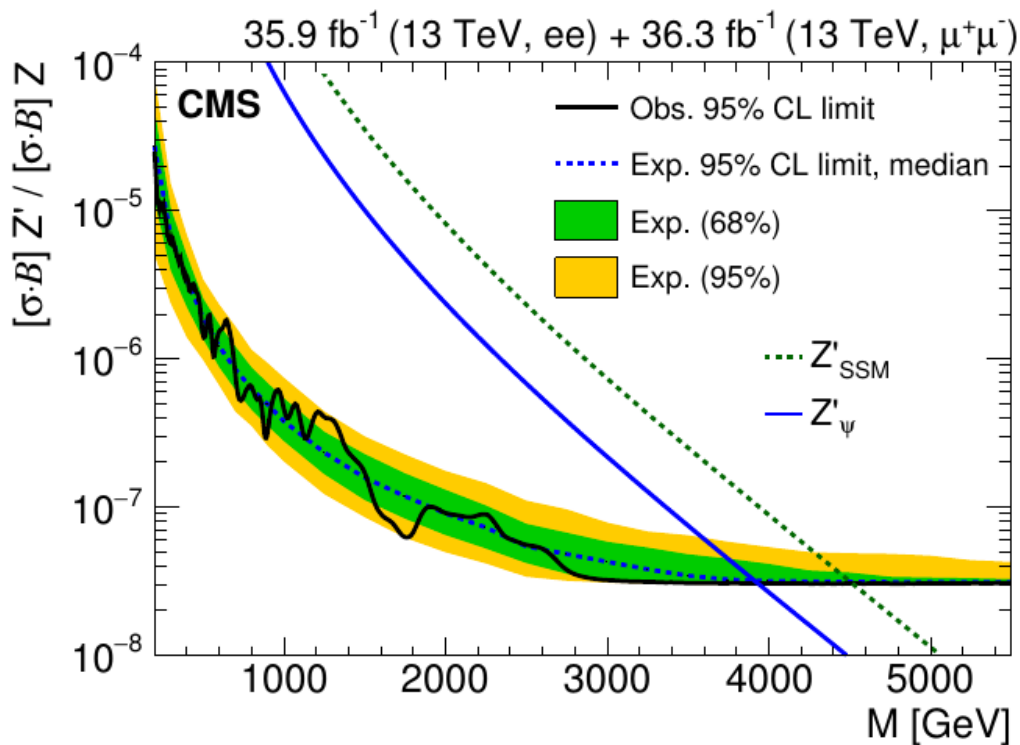
# Мотивация

- Нет прямых значимых указаний на отклонения от предсказаний Стандартной Модели в пределах имеющихся неопределенностей в области доступных масштабов и энергий
- Однако, в ней нет ответов на такие вопросы, как например, барионная асимметрия, проблема иерархии, частицы темной материи и т. п.
- Теоретические модели за пределами СМ предсказывают существование тяжелых резонансов, распадающихся в частицы Стандартной Модели
- Большой адронный коллайдер позволяет проводить поиски прямых указаний на проявления Новой физики в области новых энергий

# Массивные резонансы в двухлептонных конечных состояниях

- CMS, [JHEP 06 \(2018\) 120](#)
- Данные CMS, pp@13 ТэВ, 2016,  $\sim 36 \text{ fb}^{-1}$
- Частицы:
  - $Z'$  или  $Z'_\psi$  бозоны из моделей Sequential Standard Model (SSM) или superstring inspired  $E_6$  models
  - $G_{KK}$  гравитон из модели Randall-Sundrum (RS)
- Наблюдаемый сигнал:  $e^+e^-$  или  $\mu^+\mu^-$

# Массивные резонансы в двухлептонных конечных состояниях



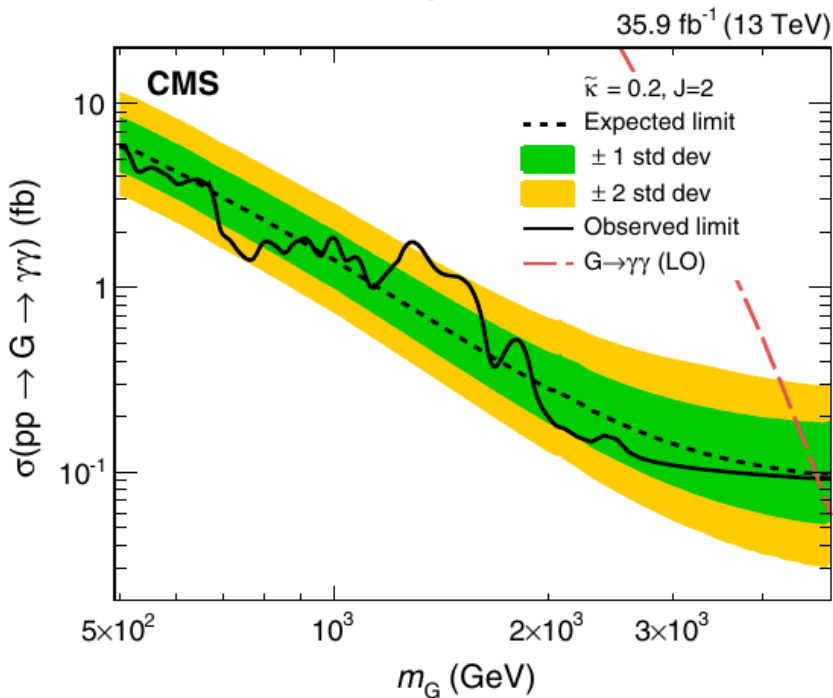
# Массивные резонансы в двухлептонных конечных состояниях

- CMS, [JHEP 06 \(2018\) 120](#)
- Результаты согласуются с предсказаниями Стандартной модели в пределах имеющихся неопределенностей
- Установлены ограничения на массу частиц:
  - $m_{Z'} > 4.50$  ТэВ
  - $m_{Z'\psi} > 3.9$  ТэВ
  - Для различных значений констант взаимодействия (0.01 / 0.05 / 0.1)  $m_G > 2.10, 3.65$  или  $4.25$  ТэВ

# Физика за пределами СМ в массивных двухфотонных событиях

- CMS, [Phys. Rev. D 98 \(2018\) 092001](#)
- Данные CMS, pp@13 ТэВ, 2016,  $\sim 36 \text{ fb}^{-1}$
- Поиск проявлений Новой физики:
  - модель Randall-Sundrum (RS) гравитон ( $G_{RS}$ ) – резонансное рождение
  - модель Arkani-Hamed, Dimopoulos and Dvali (ADD) – нерезонансное рождение
- Наблюдаемый сигнал: 2 фотона в конечном состоянии

# Физика за пределами СМ в массивных двухфотонных событиях

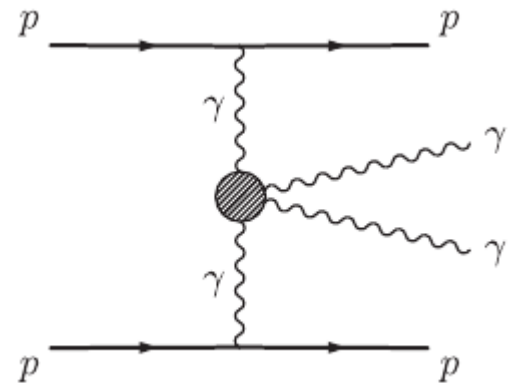


- CMS, [Phys. Rev. D 98 \(2018\) 092001](#)
- Результаты согласуются с предсказаниями Стандартной Модели в пределах имеющихся неопределенностей
- Указаний на Новую физику в рамках имеющихся неопределенностей не обнаружено:
  - Для  $G_{RS}$  установлено ограничение на минимальную массу: 2.3, 4.1 и 4.6 ТэВ для констант взаимодействия 0.01, 0.1 и 0.2
  - Для ADD-модели ограничения  $M_S > 9.7$  ТэВ



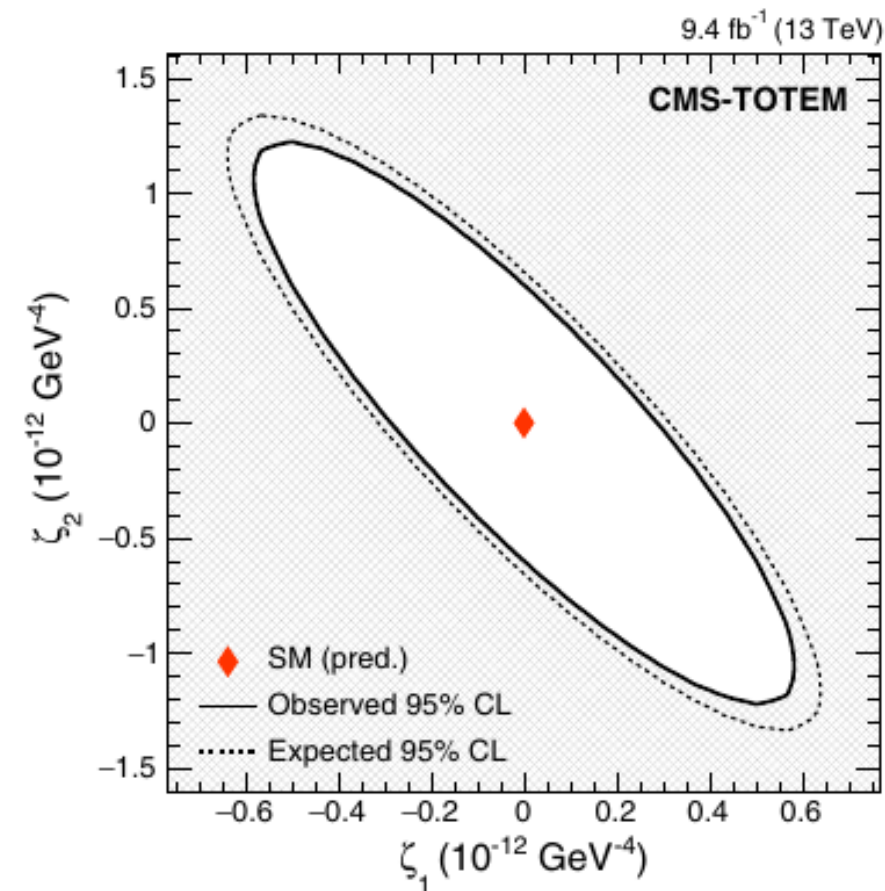
# Первый поиск эксклюзивного рождения пары фотонов высокой массы с тагированными протонами

- CMS+TOTEM,  
[Phys. Rev. Lett. 129 \(2022\) 011801](#)
- Данные CMS+TOTEM,  
pp@13 ТэВ, 2016, 9.4 fb<sup>-1</sup>
- Наблюдаемый сигнал: pp (в TOTEM) +  $\gamma\gamma$   
(ECAL CMS),  $m_{\gamma\gamma} > 350$  ГэВ
- Что измеряется:
  - Параметры  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$  4-фотонной константы связи в эффективном dimension-8 расширении СМ для описания процесса рассеяния света на свете



$$L_8^{\gamma\gamma\gamma\gamma} = \zeta_1 F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} F_{\rho\sigma} F^{\rho\sigma} + \zeta_2 F_{\mu\nu} F^{\mu\rho} F_{\rho\sigma} F^{\sigma\nu}.$$

# Первый поиск эксклюзивного рождения пары фотонов высокой массы с тагированными протонами



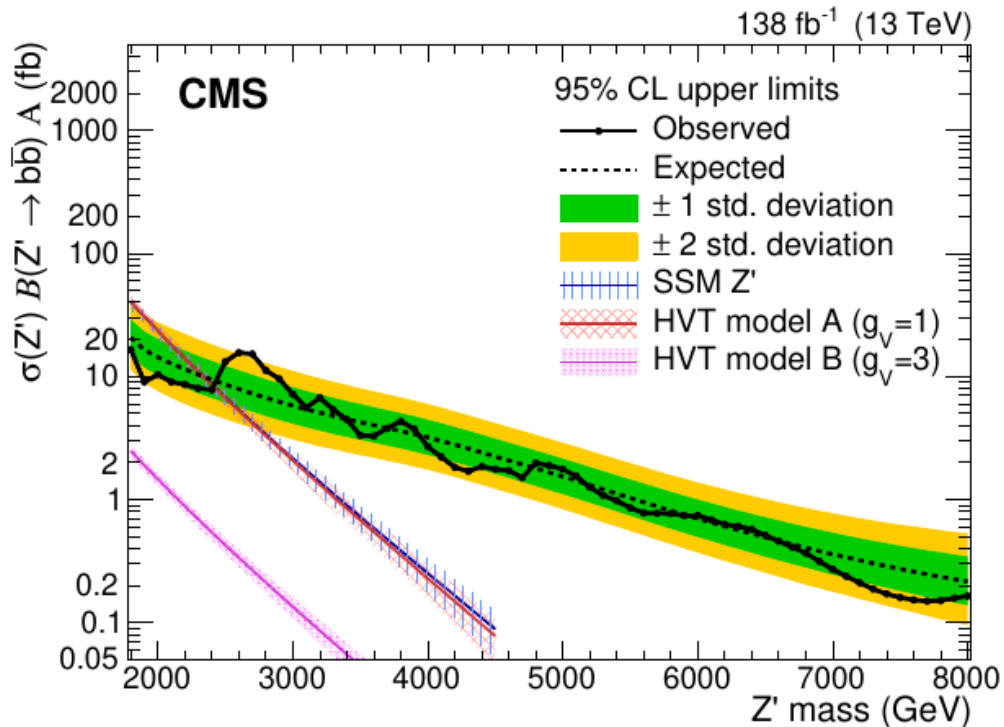
- CMS+TOTEM,  
[Phys. Rev. Lett. 129 \(2022\) 011801](#)
- Результаты согласуются с предсказаниями Стандартной Модели в пределах имеющихся неопределенностей
- Получены ограничения:
  - $|\zeta_1| < 2.9 \times 10^{-13} \text{ GeV}^{-4} \quad |\zeta_2| = 0$
  - $|\zeta_2| < 6.0 \times 10^{-13} \text{ GeV}^{-4} \quad |\zeta_1| = 0$

# Поиск узких резонансов в спектрах масс пар струй

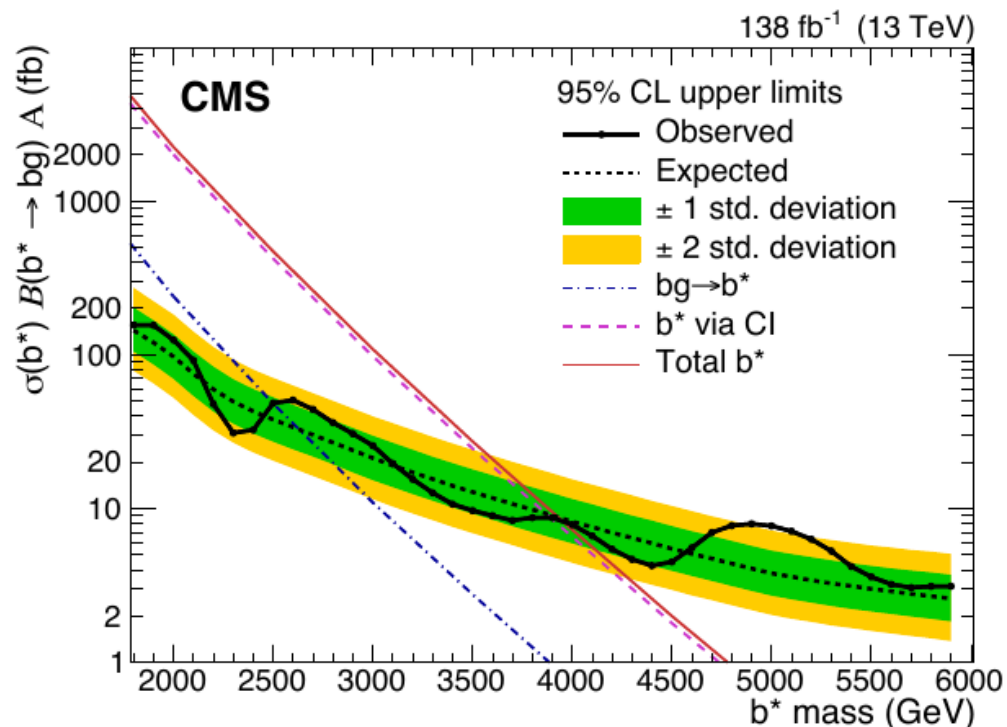
- CMS, [arXiv:2205.01835](https://arxiv.org/abs/2205.01835), направлено в Phys. Rev. D
- Данные CMS 2016 – 2018 годов, pp@13 ТэВ, 138 fb<sup>-1</sup>
- Поиск резонансов
  - $Z'$  из моделей sequential standard model (SSM) или heavy vector triplet (HVT)
    - $qq \rightarrow Z' \rightarrow bb$
  - $b^*$  – возбужденный b-кварк
    - $bg \rightarrow b^* \rightarrow bg$
- Наблюдаемый сигнал:
  - 2 «широких» струи в конечном состоянии  
В событии выбирают 2 струи наибольшим pT.  
К этим струям добавляют 4-импульс остальных струй в  $\Delta R < 1.1$
  - Минимум одна из лидирующих струй должна быть ассоциирована с b-кварком (DeepJet discriminator)

# Поиск узких резонансов в спектрах масс пар струй

arXiv:2205.01835



Z': 2 широких b-струи



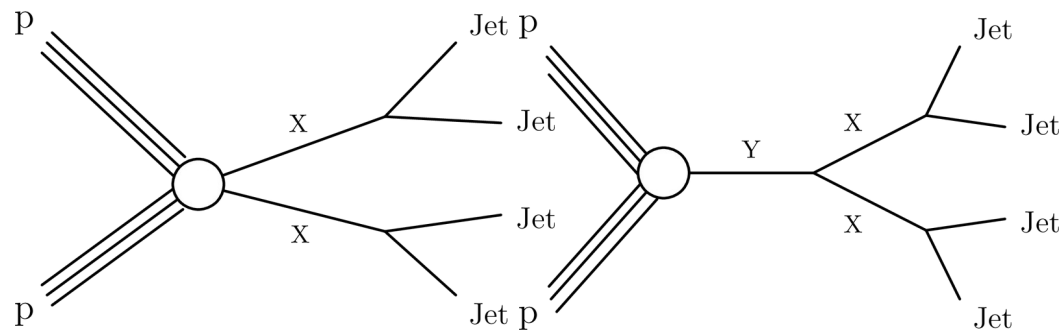
$b^*$ : 2 широких струи (одна из b кварка)

# Поиск узких резонансов в спектрах масс пар струй

- Предыдущий анализ CMS [JHEP 05 \(2020\) 033](#)
- Новый анализ CMS [arXiv:2205.01835](#), направлено в Phys. Rev. D
- Данные CMS 2016 – 2018 годов, 13 ТэВ, 138 fb<sup>-1</sup>
- Результаты согласуются с предсказаниями Стандартной модели в пределах имеющихся неопределенностей
- Ограничения на массу  $Z'$ :  $m_{Z'} > 2.4$  ТэВ (было 1.8 ТэВ)
- Ограничения на массу  $b^*$ :  $m_{b^*} > 4.0$  ТэВ (было 1.8 ТэВ)

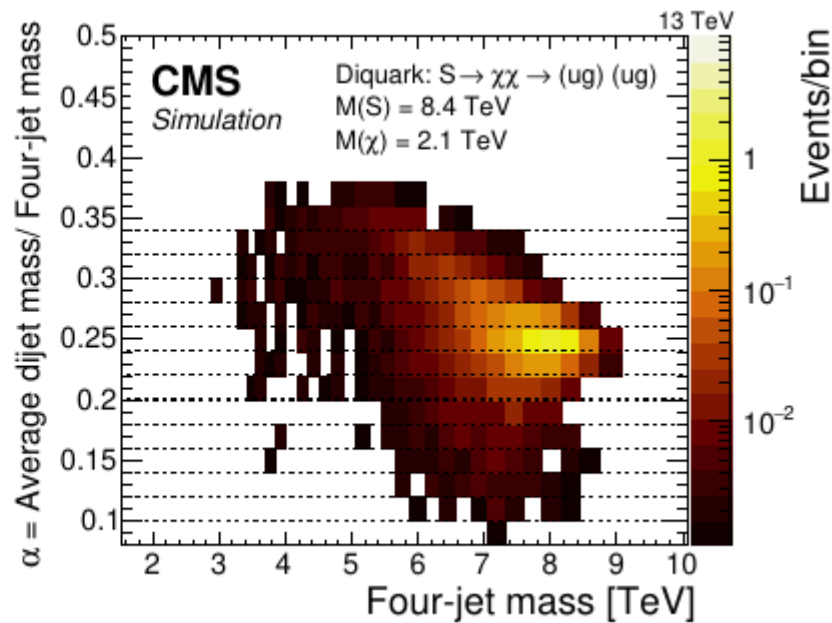
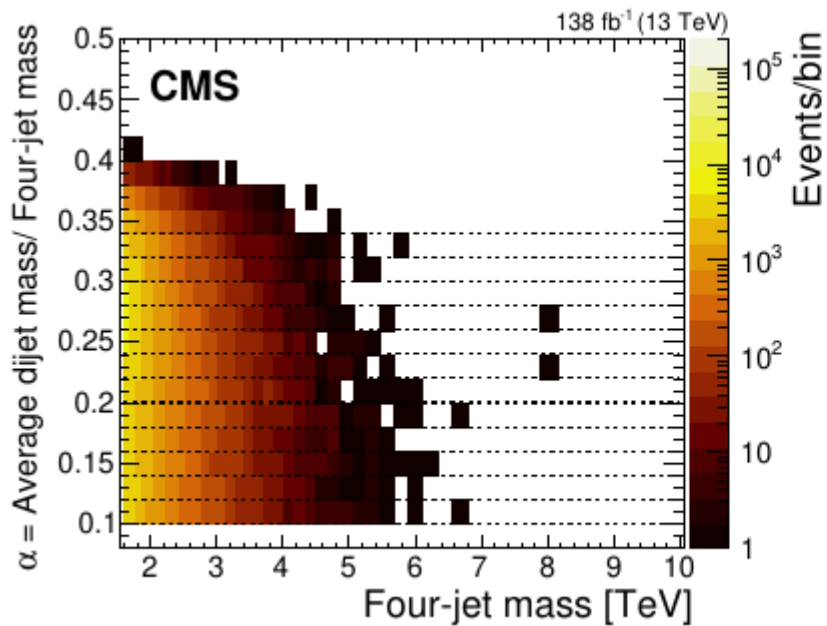
# Резонансное и нерезонансное рождение пар двуструйных резонансов

- CMS [arXiv:2206.09997](https://arxiv.org/abs/2206.09997), направлено в JHEP
- Данные CMS,  $pp@13$  ТэВ,  $138 \text{ fb}^{-1}$
- 4 струи в конечном состоянии
- Резонансы:



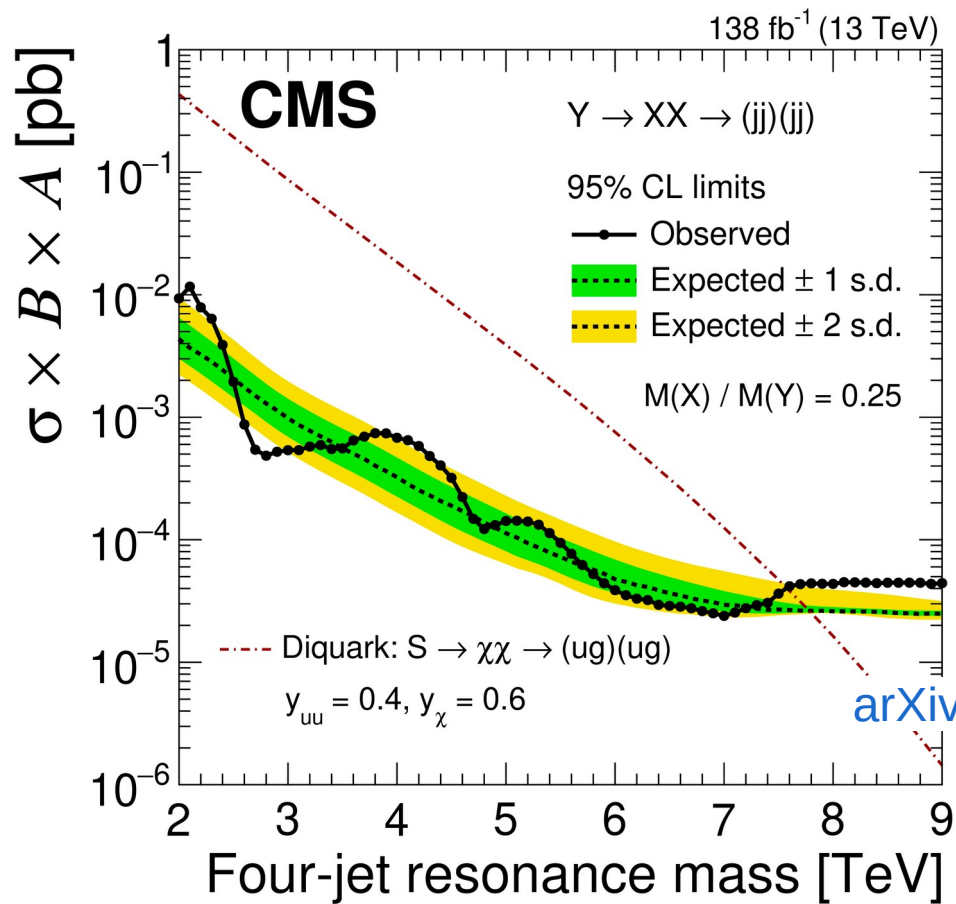
- $u\bar{u} \rightarrow S \rightarrow \chi\chi \rightarrow (u\bar{g})(u\bar{g})$  – резонансное рождение дикварка  $S$  с распадом в векторно-подобные кварки  $\chi$
- $pp \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^* \rightarrow (\bar{d}\bar{s})(ds)$  – нерезонансное рождение в модели суперсимметрии с нарушением R-четности

# Резонансное и нерезонансное рождение пар двуструйных резонансов

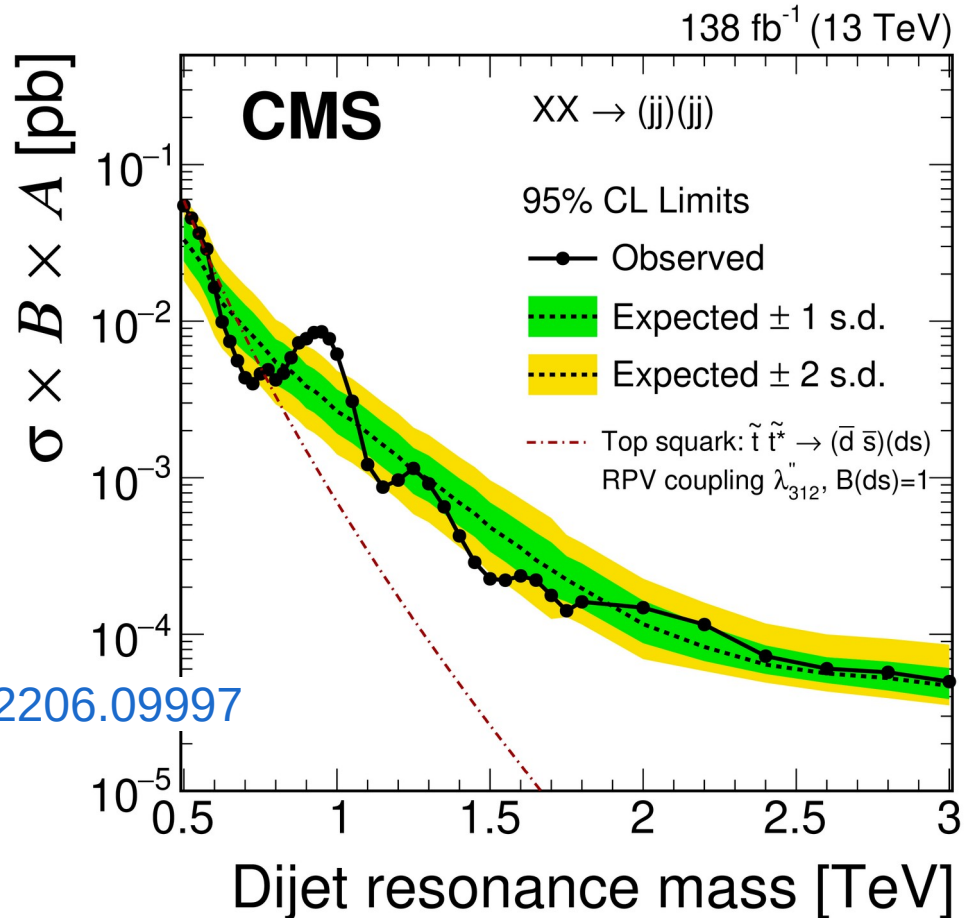


- В данных  $m_{jjjj} \sim 8 \text{ ТэВ}$  имеются точки, положение которых могло быть объяснено наличием дикваркового резонанса  $S$  с массой 8.4 ТэВ

# Резонансное и нерезонансное рождение пар двуструйных резонансов



[arXiv:2206.09997](https://arxiv.org/abs/2206.09997)





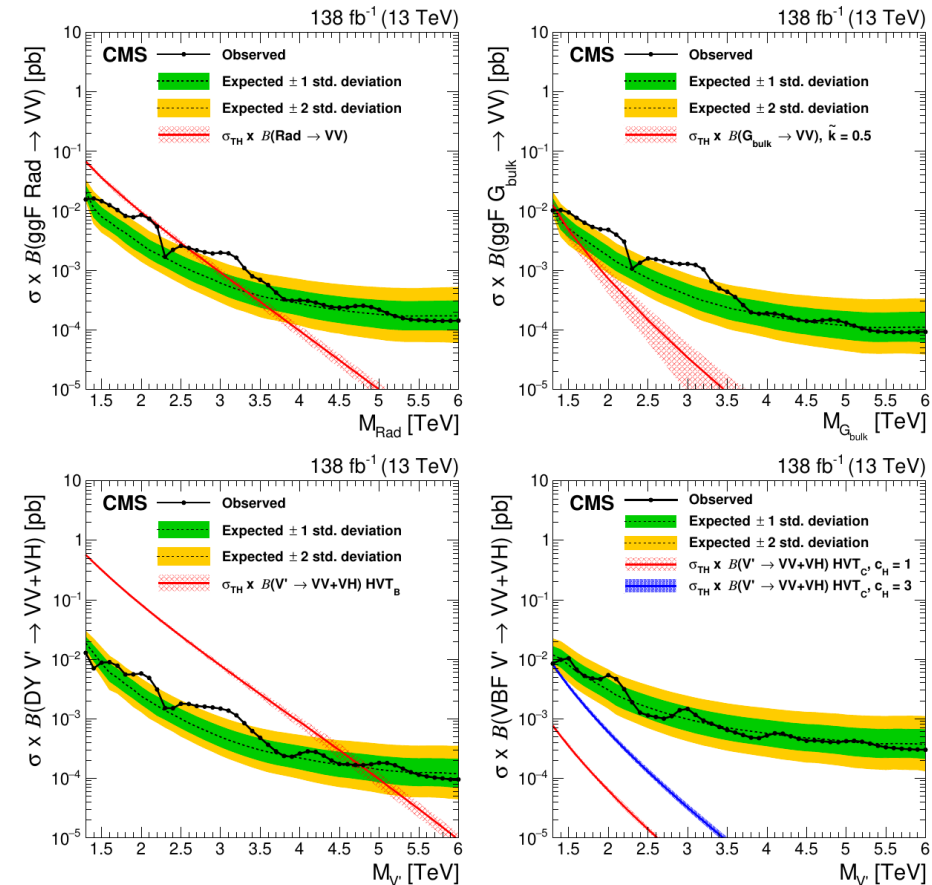
# Резонансное и нерезонансное рождение пар двуструйных резонансов

- CMS [arXiv:2206.09997](https://arxiv.org/abs/2206.09997)
- Данные CMS, pp@13 ТэВ, 138 fb<sup>-1</sup>
- Результаты согласуются с предсказаниями Стандартной модели в пределах имеющих неопределенностей
- В поисках резонансного рождения дикваркового резонанса S были поставлены пределы  $m_S > 7.6$  ТэВ
  - Указание на наибольшее отклонение для  $m_S \sim 8.4$  ТэВ
- Для нерезонансного рождения  $pp \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^* \rightarrow (\bar{d}\bar{s})(ds)$  суперсимметричных частиц получено ограничение  $m > 0.77$  ТэВ
  - Наиболее заметное указание наблюдается для массы 0.95 ТэВ со значимостью 3.6/2.5  $\sigma$  (локально/глобально)

# Тяжелые резонансы распадающиеся в бозонные пары в струйных конечных состояниях

- CMS [arXiv:2210.00043](https://arxiv.org/abs/2210.00043), направлено в Phys. Lett. B
- Данные CMS, pp@13 ТэВ, 138 fb<sup>-1</sup>
- Поиск резонансов, распадающихся в WW, WZ, ZZ, WH, или ZH пары
- Резонансы:
  - Radion (R), Graviton (G) (модель Рэндалла-Сандрума)
  - Тяжелые бозоны Z` и W` из HVT
- Наблюдаемый сигнал:
  - 2 «широких» струи

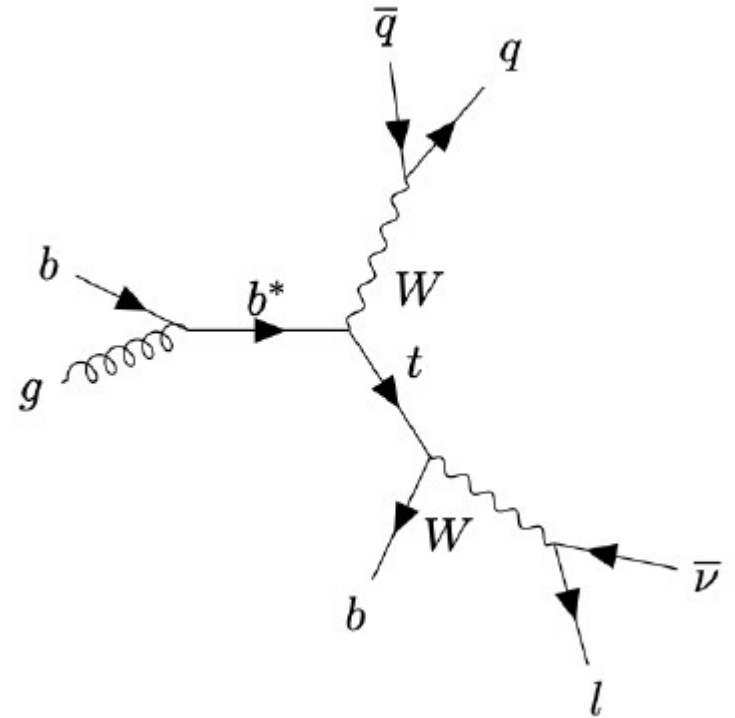
# Тяжелые резонансы распадающиеся в бозонные пары в струйных конечных состояниях



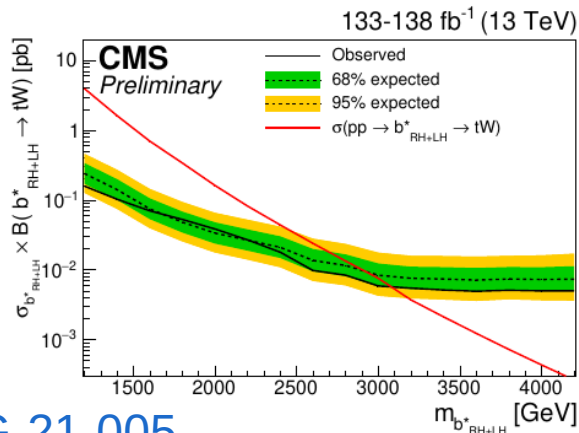
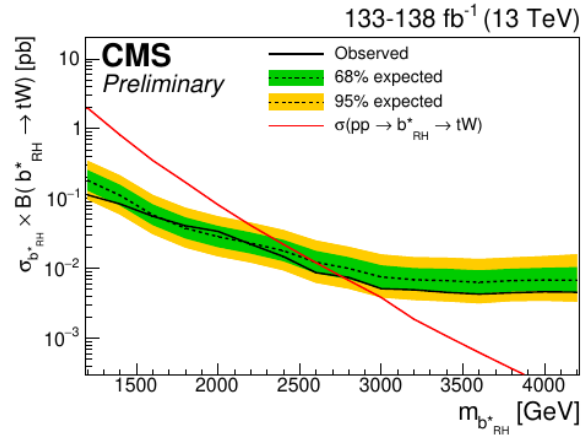
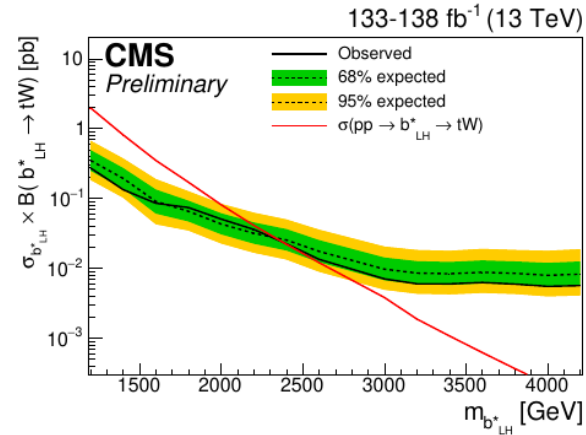
- CMS [arXiv:2210.00043](https://arxiv.org/abs/2210.00043), направлено в Phys. Lett. B
- Свидетельств существования новых тяжелых резонансов не обнаружено в пределах имеющихся неопределенностей
- Ограничение на массу  $Z'$  и  $W'$  бозонов:  $m_{V'} > 4.8 \text{ ТэВ}$
- Ограничения массы гравитона и радиона:  $m_G > 1.4. \text{ ТэВ}$ ,  $m_R > 2.7 \text{ ТэВ}$

# Тяжелый резонанс с распадом в t-кварк и W-бозон в конечном состоянии с лептоном и струями

- CMS talk, Infinite2023 Conf., Kyoto  
27-30 March 2023,  
[CMS PAS B2G-21-005](#)
- Данные CMS, 13 ТэВ, 2016 –  
2018, 138 fb<sup>-1</sup>
- Резонанс: возбужденный кварк  $b^*$
- Конечные состояния:
  - W-бозон – широкая струя
  - t-кварк – лептон, missing  $p_T$  и b-струя



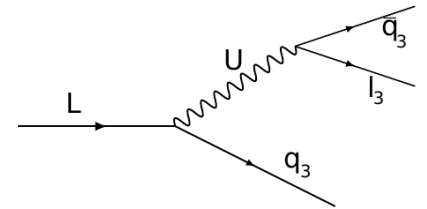
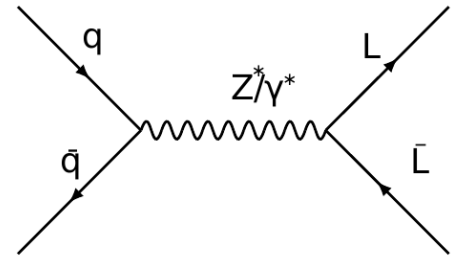
# Тяжелый резонанс с распадом в t-кварк и W-бозон в конечном состоянии с лептоном и струями



- Данные 13 ТэВ, 2016 – 2018, 138 fb<sup>-1</sup>
- Результаты согласуются с предсказаниями Стандартной модели в пределах имеющихся неопределенностей
- Ограничения на массу b\*: 2.4, 2.8 и 3.1 ТэВ  
для левой, правой или вектороподобной киральностей

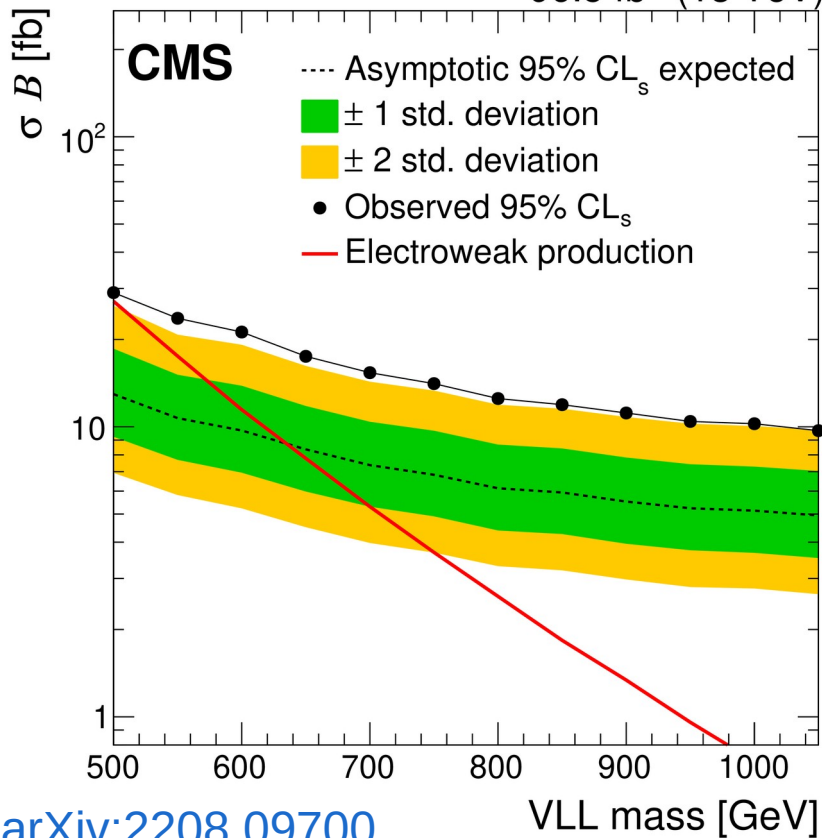
# Парное рождение векторно-подобных лептонов

- CMS, [arXiv:2208.09700](https://arxiv.org/abs/2208.09700), направлено в Phys. Lett. B
- CMS Данные 2017 и 2018 годов, 13 ТэВ, 96.5 fb<sup>-1</sup>
- Поиск векторно-подобных лептонов (VLL), распадающихся через лептокварк – расширение SM калибровочным сектором  $SU(4) \times SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)$
- Конечные состояния:  $\geq 3$  b-кварковых струи + 2 лептона ( $\tau\tau$ ,  $\nu_\tau \nu_\tau$ ,  $\nu_\tau \nu_\tau$ )



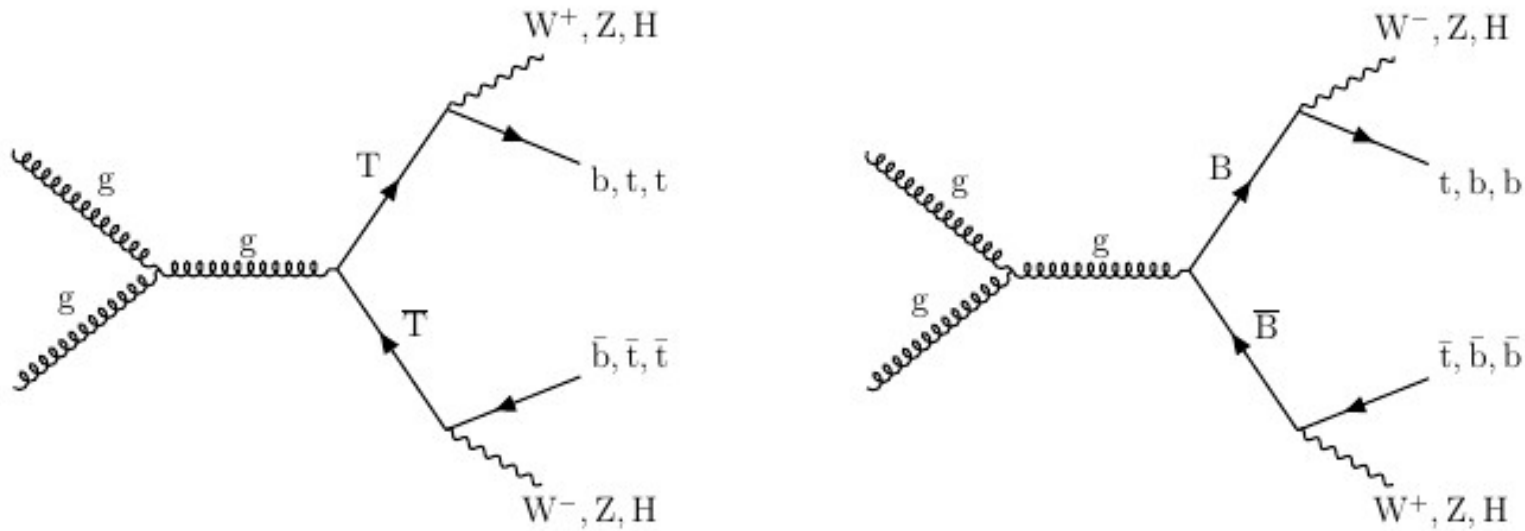
# Парное рождение векторно-подобных лептонов

96.5 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)



- CMS, [arXiv:2208.09700](https://arxiv.org/abs/2208.09700)
- Данные 2017 и 2018 годов, pp@13 ТэВ, 96.5 fb<sup>-1</sup>
- Результаты согласуются с предсказаниями Стандартной модели в пределах имеющихся неопределенностей
- Ограничение на массу VLL:  $m_{\text{VLL}} > 640$  ГэВ

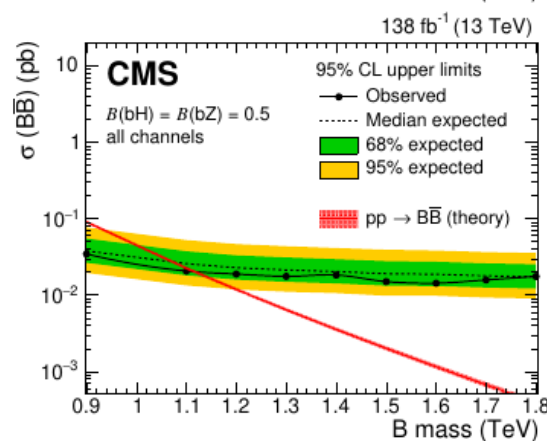
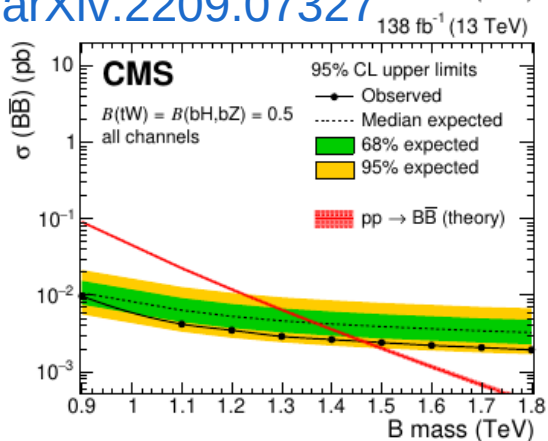
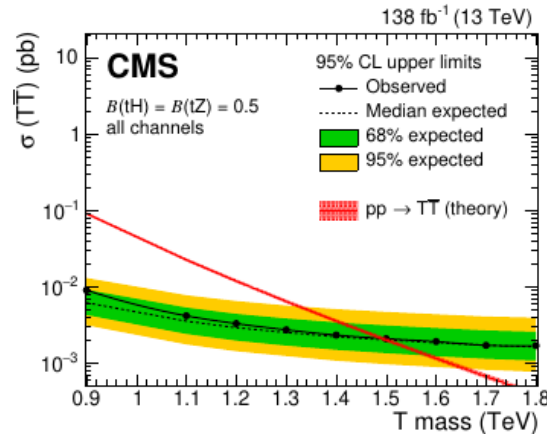
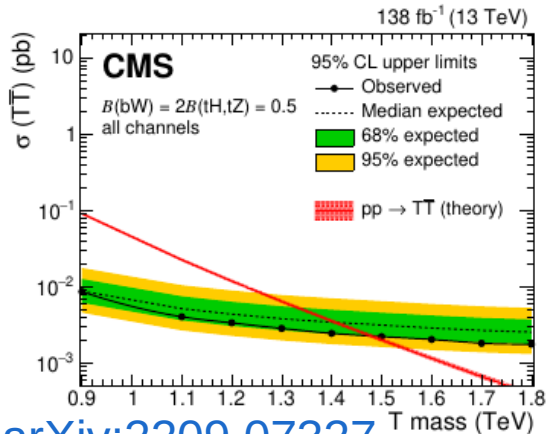
# Парное рождение векторно-подобных кварков



- CMS [arXiv:2209.07327](https://arxiv.org/abs/2209.07327), направлено в J. High Energy Phys
- Данные CMS, 13 ТэВ, 2016 – 2018, 138 fb<sup>-1</sup>
- Поиск векторно-подобных кварков (LVQ) T и B в лептонных конечных состояниях (с 1, 2 или 3 лептонами и струями) 24



# Парное рождение векторно-подобных кварков



- В минимальных моделях VLQ T и B могут составлять **синглет** или **дублет**
- В синглетном сценарии:
  - Бренчинг 50% для  $T \rightarrow bW$  и  $B \rightarrow tW$ , и 25% для  $T \rightarrow tH$ ,  $T \rightarrow tZ$ ,  $B \rightarrow bH$ , и  $B \rightarrow bZ$
- В дублетном сценарии:
  - T с равной вероятностью (50%) распадается только в tH или tZ
  - B распадается в bH или bZ с вероятностью 50 %

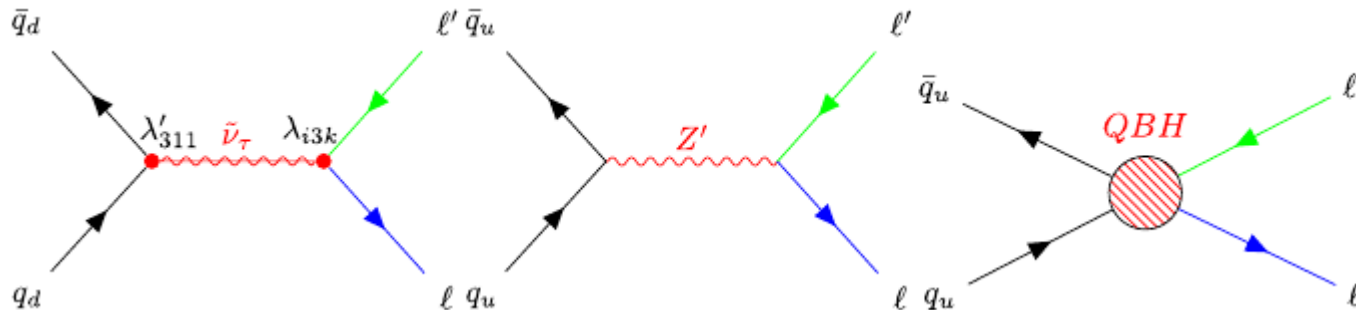
arXiv:2209.07327

# Парное рождение векторно-подобных кварков

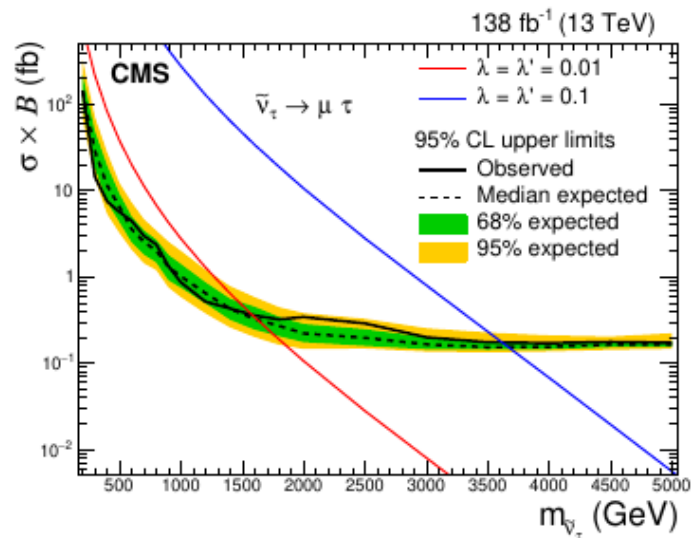
- CMS [arXiv:2209.07327](https://arxiv.org/abs/2209.07327), направлено в J. High Energy Phys
- Данные CMS 2016 – 2018, 13 ТэВ, 138 fb<sup>-1</sup>
- Результаты согласуются с предсказаниями Стандартной модели в пределах имеющихся неопределенностей
- Ограничение на массу кварков (синглет/дублет)
  - $m_T > 1.48/1.54$  ТэВ для T
  - $m_B > 1.56/1.12$  ТэВ для B

# Тяжелые резонансы и квантовые черные дыры в лептонных конечных состояниях

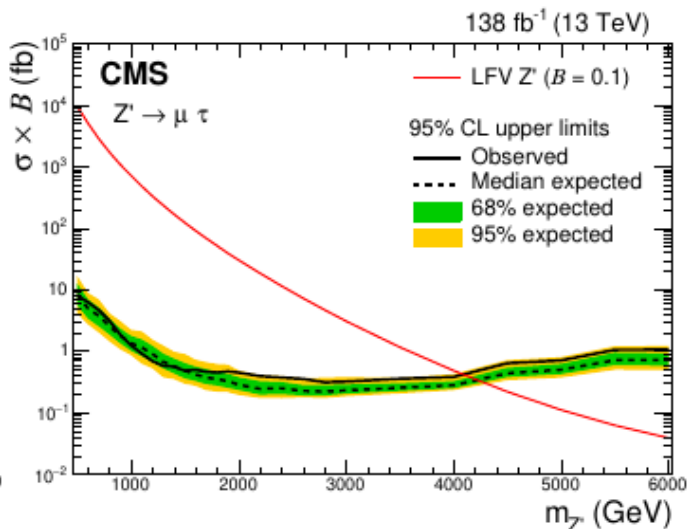
- CMS [arXiv:2205.06709](https://arxiv.org/abs/2205.06709), направлено в JHEP
- Данные CMS 13 ТэВ, 2016–2018, 138 fb<sup>-1</sup>
- Поиск:
  - $\tau$  sneйттино – RPV SUSY
  - $Z'$ -бозон в распаде с несохранением лептонного флейвора
  - Квантовые черные дыры (QBH)
- Конечное состояние:  $e\mu$ ,  $e\tau$ ,  $\mu\tau$



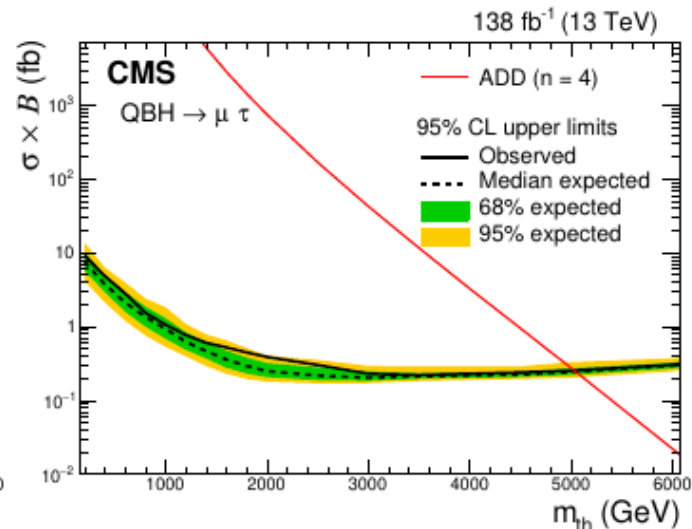
# Тяжелые резонансы и квантовые черные дыры в лептонных конечных состояниях



•  $\tau$  sneutrino



•  $Z'$



• QВН

# Тяжелые резонансы и квантовые черные дыры в лептонных конечных состояниях

- CMS [arXiv:2205.06709](https://arxiv.org/abs/2205.06709), направлено в JHEP
- Данные CMS 13 ТэВ, 2016–2018, 138 fb<sup>-1</sup>
- Отклонений от Стандартной Модели не обнаружено в пределах имеющихся неопределённостей
- Установлены ограничения на минимальные массы частиц (eμ/et/μt каналы распада):
  - τ нейтрино: 4.2 / 3.7 / 3.6 ТэВ
  - Z′ : 5.0 / 4.3 / 4.1 ТэВ
  - QBN: 5.6 / 5.2 / 5.0 ТэВ

# Заключение

- В данных CMS Run 2 продолжается поиск сигналов, предсказываемых различными теоретическими моделями тяжелых резонансов в различные конечные состояния (лептонные, фотонные, струйные, лептонные+струйные)
- Значимых отклонений от предсказаний Стандартной Модели в пределах неопределенностей на данный момент не обнаружено

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!**

BACKUP



# Заключение

- Массивные резонансы в двухлептонных конечных состояниях
  - $m(Z^{\prime}) > 4.50$  ТэВ;  $m(Z^{\prime}_{\psi}) > 3.9$  ТэВ,  $m(G) > 2.10, 3.65, 4.25$  ТэВ ( $\kappa=0.01/0.05/0.1$ )
- Физика за пределами СМ в массивных двухфотонных событиях
  - $m(G_{RS}) > 2.3, 4.1$  и  $4.6$  ТэВ ( $\kappa=0.01, 0.1, 0.2$ );  $5.6 < M_S < 9.7$  ТэВ
- Первый поиск эксклюзивного рождения пары фотонов высокой массы с тагированными протонами
  - $|\zeta_1| < 2.9 \times 10^{-13} \text{ GeV}^{-4}$   $|\zeta_2| = 0$ ;  $|\zeta_2| < 6.0 \times 10^{-13} \text{ GeV}^{-4}$   $|\zeta_1| = 0$
- Поиск узких резонансов в спектрах масс пар струй
  - $m(Z^{\prime}) > 2.4$  ТэВ,  $m(b^*) > 4.0$  ТэВ
- Резонансное и нерезонансное рождение пар двухструйных резонансов
  - $m(\text{diquark } S) > 7.6$  ТэВ,  $m(\text{t squark}) > 0.77$  ТэВ
- Тяжелые резонансы распадающиеся в бозонные пары в струйных конечных состояниях
  - $m(V^{\prime}) > 4.8$  ТэВ;  $m(G) > 1.4$  ТэВ;  $m(R) > 2.7$  ТэВ
- Тяжелый резонанс с распадом в t-кварк и W-бозон в конечном состоянии с лептоном и струями
  - $m(b^*) > 2.4, 2.8$  и  $3.1$  ТэВ
- Парное рождение векторно-подобных лептонов
  - $m_{\nu_{LL}} > 640$  ГэВ
- Парное рождение векторно-подобных кварков
  - $m_T > 1.48/1.54$  ТэВ,  $m_B > 1.56/1.12$  ТэВ
- Тяжелые резонансы и квантовые черные дыры в лептонных конечных состояниях
  - $m_{\text{тнейтрино}} > 4.2 / 3.7 / 3.6$  ТэВ,  $m_{Z^{\prime}} > 5.0 / 4.3 / 4.1$  ТэВ,  $m_{\text{QВН}} > 5.6 / 5.2 / 5.0$  ТэВ