

# ПОСЛЕ ХИГСА



Лидија Живковић

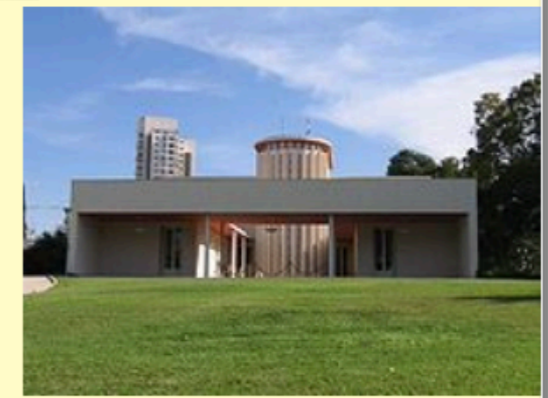
Институт за Физику, Београд

SUSRET FIZIČARA BOSNE I HERCEGOVINE

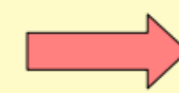
SARAJEVO, 25. I 26. OKTOBAR 2018. GODINE

# About

- Born in Belgrade, Serbia
- 1988-1993 - BSc Physics faculty, University of Belgrade
- 1993-1998 - MSc Physics faculty, University of Belgrade and VINCA
- 2000-2006 - PhD Weizmann Institute, Rehovot, Israel
- 2006-2010 - PostDoc Columbia University, New York
- 2010-2012 - PostDoc Brown University, Providence
- 2012- 2013 - Researcher, LPNHE
- Since 2013 - Institute of Physics Belgrade - ATLAS experiment



Missing ET group convener  
V+jets convener  
L3/DAQ leader



Higgs group convener

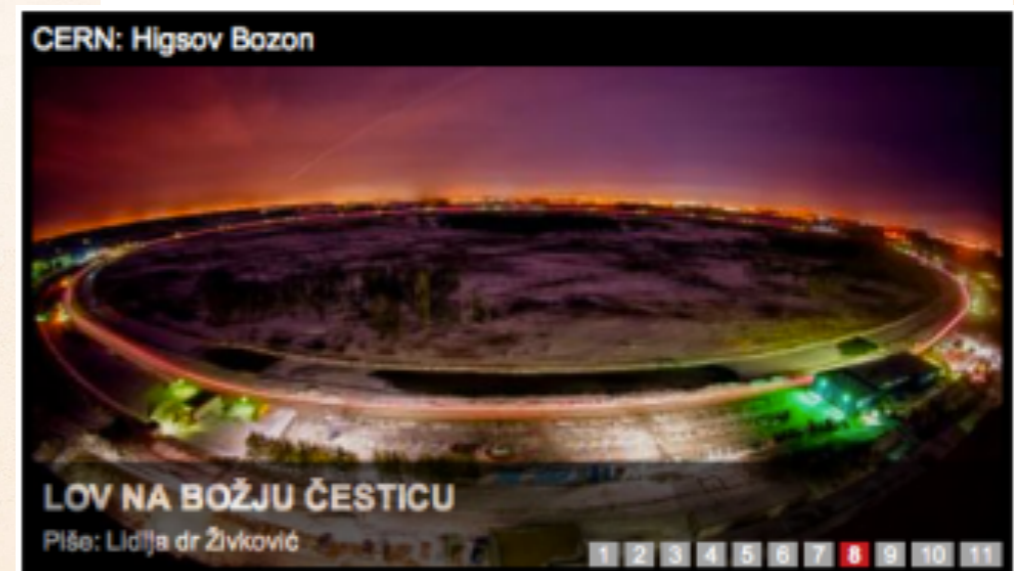


Pupin



# НОВА ЧЕСТИЦА

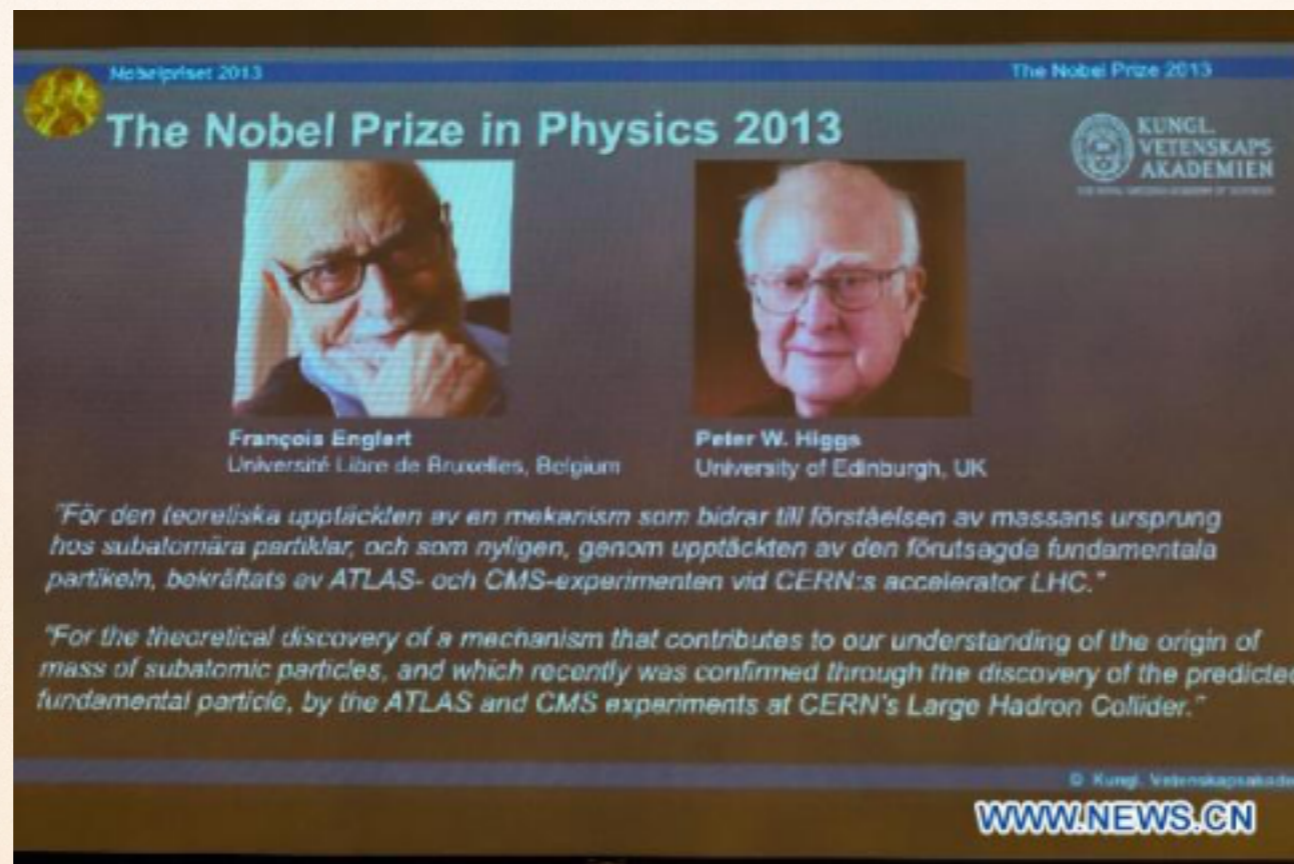
- ❖ У јулу 2012 ударна вест на свим светским медијима била је из науке, физике
  - Откривена је нова честица - Хигсов бозон
- ❖ Резултати су објављени у Церну уз директан пренос који су пратили научници широм света



# НОБЕЛОВА НАГРАДА ЗА ФИЗИКУ 2013

- ❖ Додељена за **теоријски рад** који описује механизам који доприноси нашем разумевању порекла маса
- ❖ Потврђено открићем **нове честице** у Церну

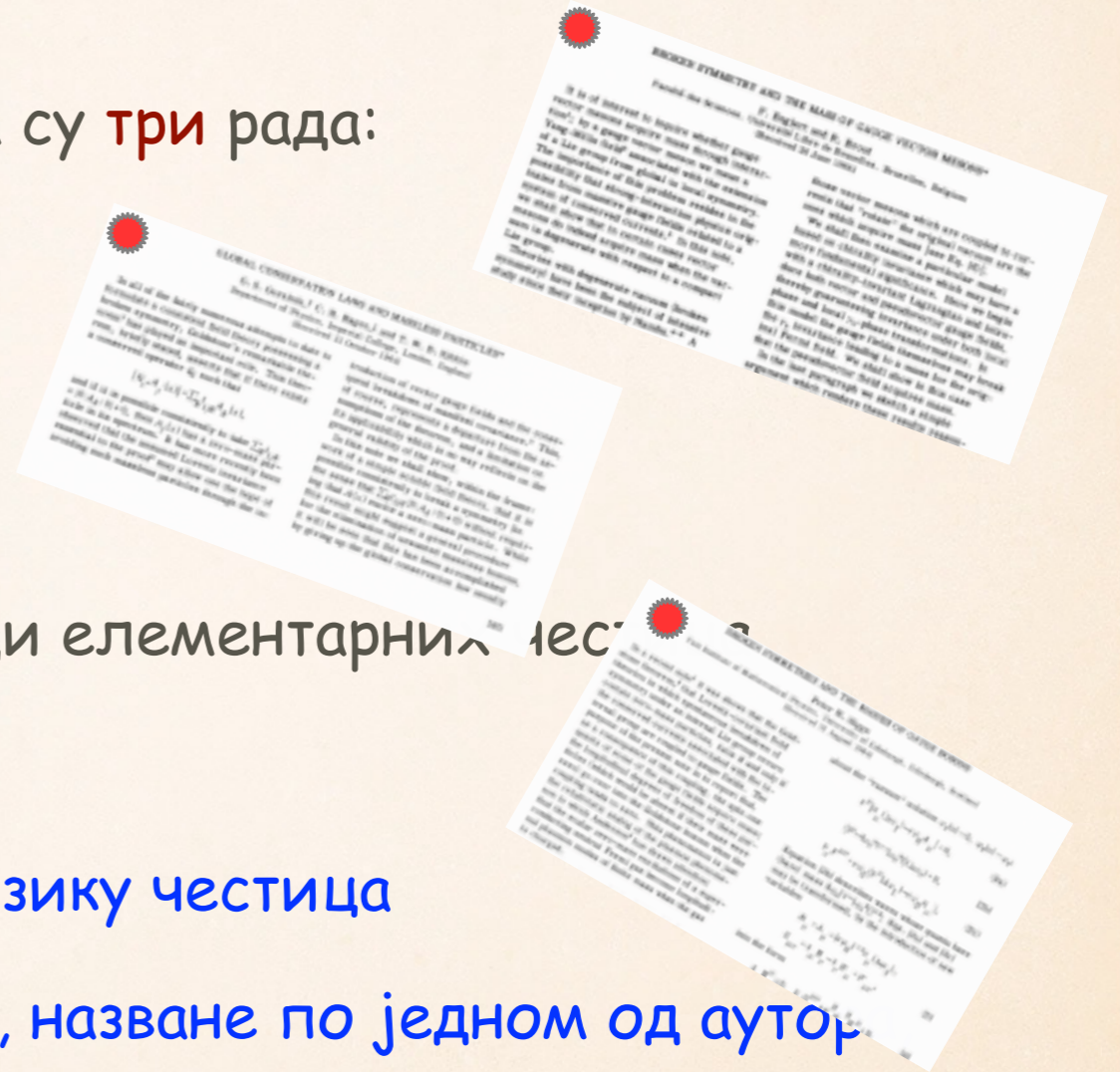
Франсоа Англер



Питер Хигс

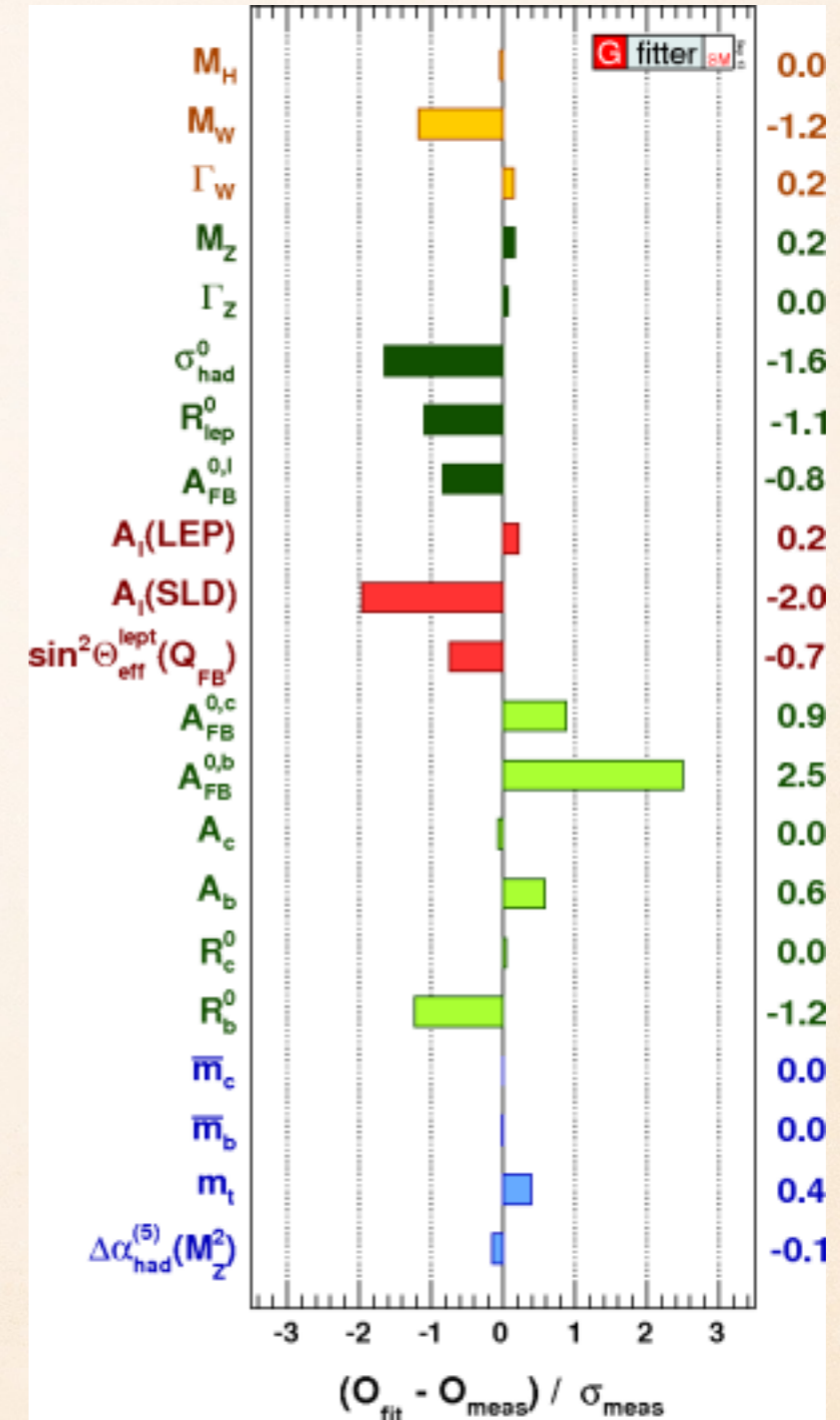
# СВЕ ЈЕ ПОЧЕЛО ШЕЗДЕСЕТИХ

- ❖ Отприлике у исто време, 1964, објављена су **три** рада:
- ❖ Роберт Броут и Франсоа Енглерт;
- ❖ Џералд Гуралник, Карл Хаген и Том Кибл
- ❖ Питер Хигс
- ❖ Радови представљају револуцију у физици елементарних честица
- ❖ Објашњавају порекло масе
- ❖ Уводе принцип нарушења симетрије у физику честица
- ❖ Предвиђају постојање још једне честице, назване по једном од аутора Хигсов бозон (или БЕХ, или БЕГХКХ)
- ❖ Позната је и као "Божија честица", "кум" је Леон Ледерман, требало је "Проклета честица"

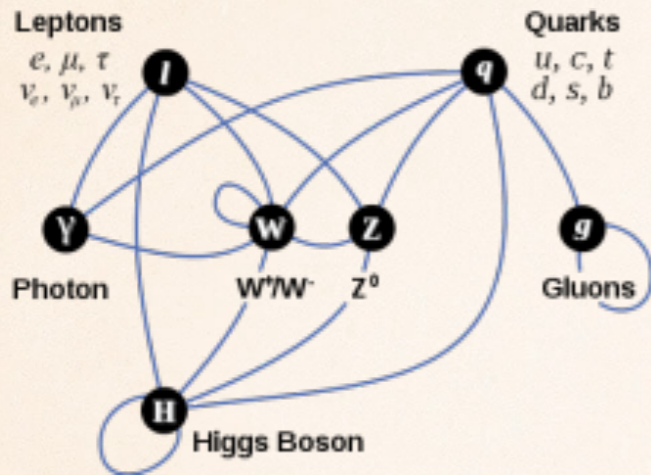


# СТАНДАРДНИ МОДЕЛ

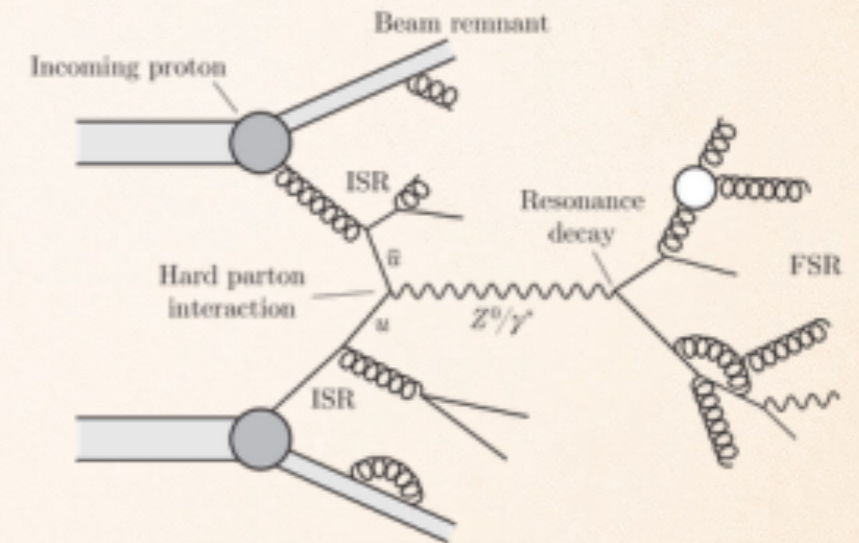
- ❖ Стандардни модел описује материју и интеракције
- ❖ Описан је теоријом са 18 параметара:
  - ❖ Све је измерено са великом прецизношћу
  - ❖ Све може да се предвиди и израчуна
- ❖ Откриће Хигсовог бозона је кулминација стандардног модела



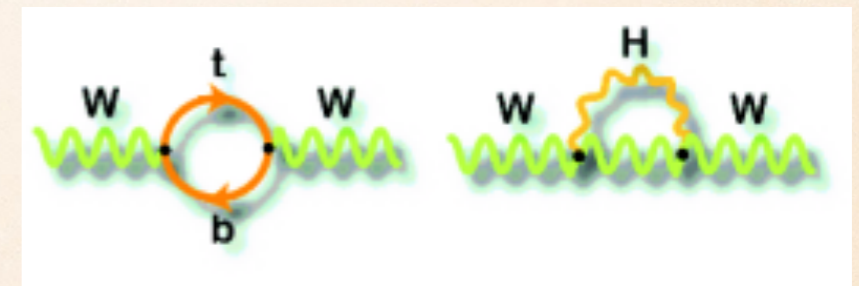
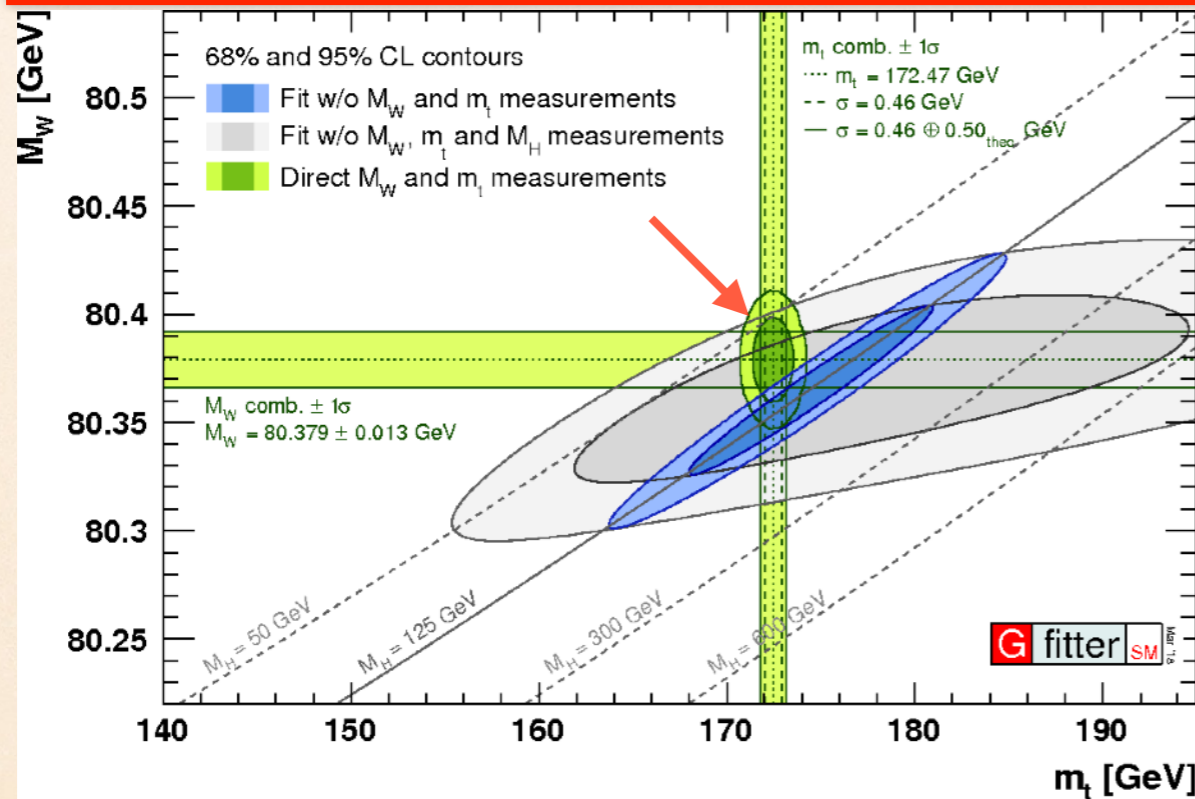
# СТАНДАРДНИ МОДЕЛ



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



Описан је теоријом са 18 параметара



# НЕДОСТАТЦИ СТАНДАРДНОГ МОДЕЛА

❖ Хијерархија, природност, фино подешавање

❖ Скала је енергија на којој нека физика постаје значајна

❖ Електрослаба – спонтано нарушење симетрије – 246 GeV

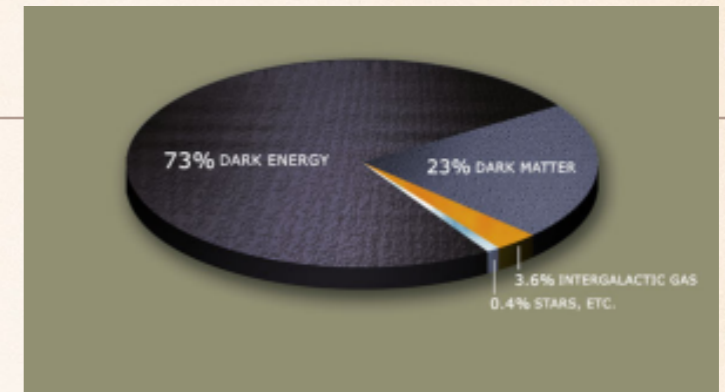
❖ Планкова – квантни ефекти гравитације -  $\sim 10^{19}$  GeV

❖ Корекције масе Хигсовог бозона пропорционалне су Планковој скали

❖ Маса би била енормна уколико не постоји фино подешавање

❖ Или нова физика!

Зашто је  
толика  
разлика?



❖ Тамна материја

❖ Уједињење са јаком интеракцијом

❖ Недовољно нарушење CP симетрије

❖ Гравитација

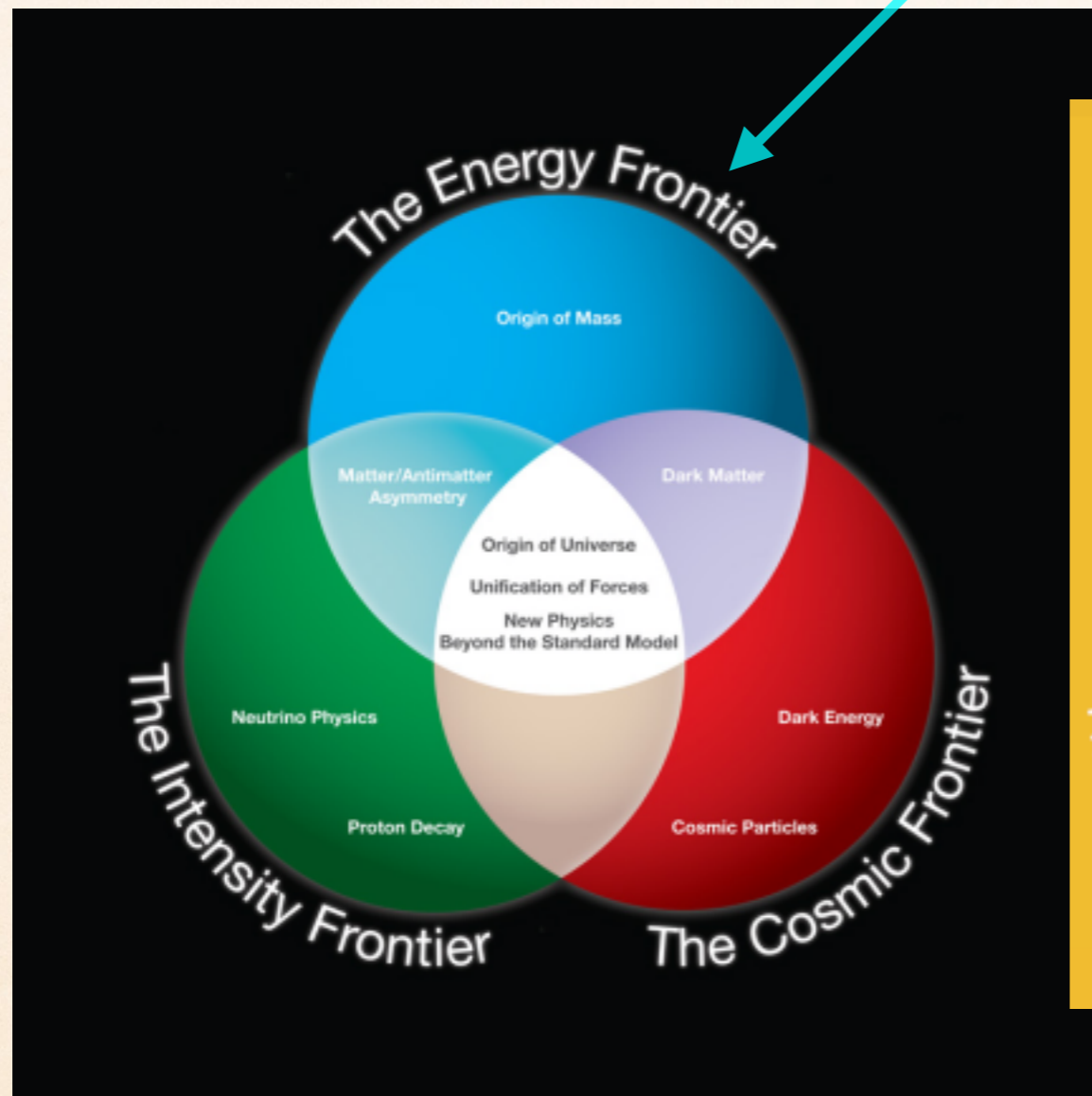
❖ Генерације фермиона

❖ ...



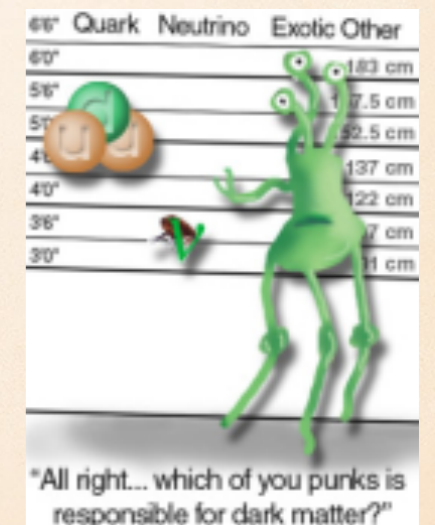
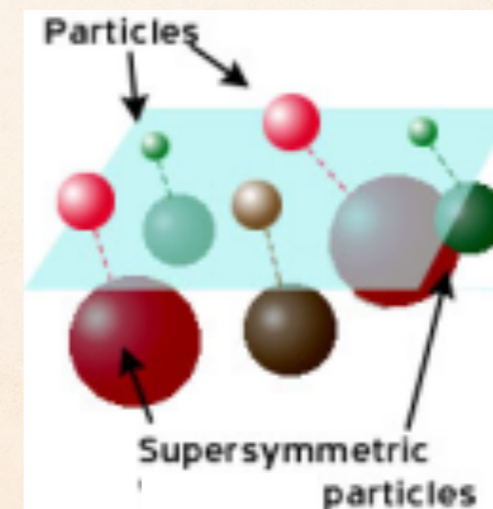
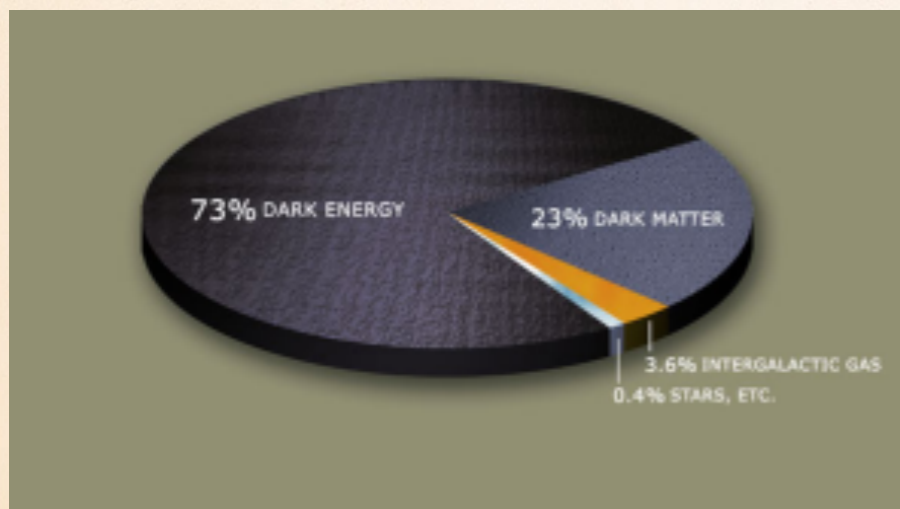
# ПРАВЦИ ИСТРАЖИВАЊА

Сударачи



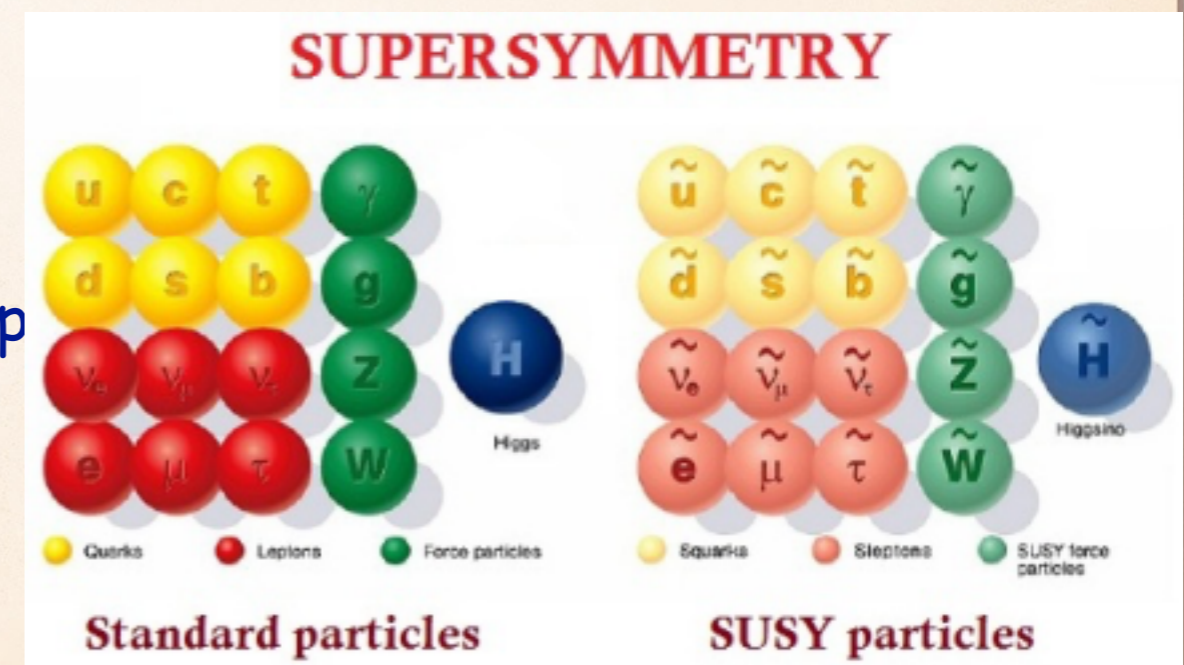
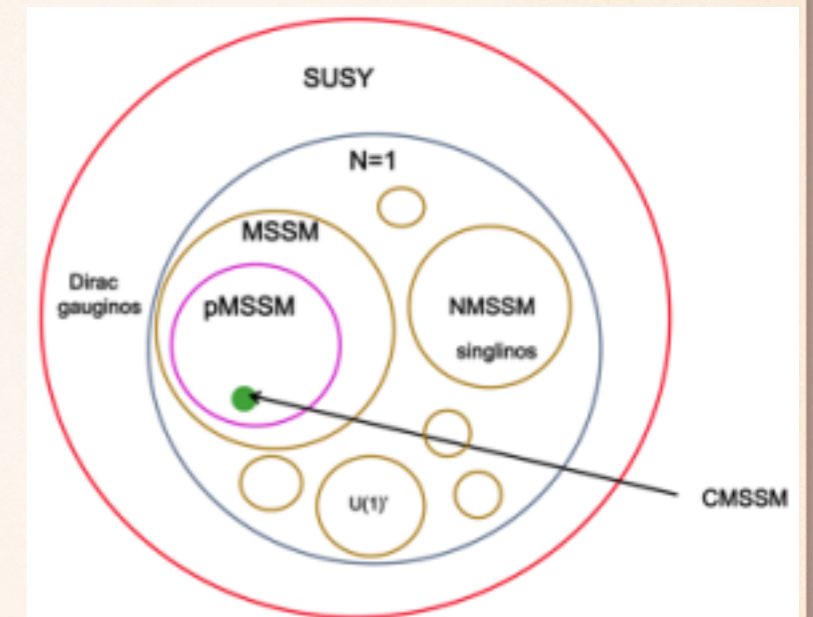
# ФИЗИКА ИЗВАН СТАНДАРДНОГ МОДЕЛА

- ❖ Стандардни модел комплетиран је открићем Хигсовог бозона, али не описује све
- ❖ Хигсов бозон може бити само налик на честицу описану Стандардним моделом (**SM-like**), али може да припада некој другој теорији
- ❖ Традиционална подела на суперсиметрију, СУСИ, и све остало



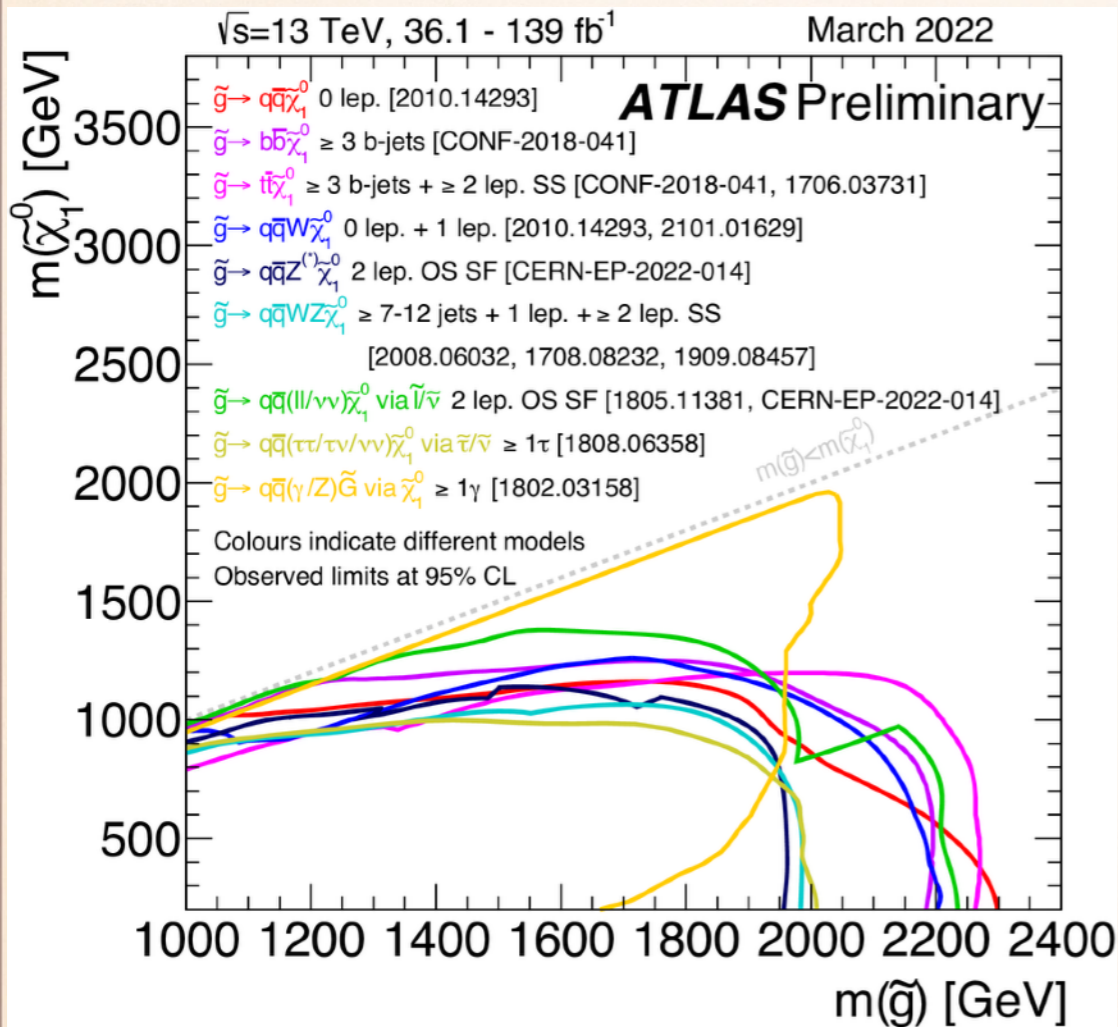
# СУПЕРСИМЕТРИЈА

- ❖ Симетрија између бозона и фермиона
- ❖ Нарушена, у супротном већ би пронашли суперсиметричне честице
  - ❖ Постоје разни модели нарушења
- ❖ Хигсов сектор има 5 бозона
- ❖ Партнери бозона су помешани ако имају исто наелектрисање
  - ❖ Чарџини и неутралини
- ❖ Велики број модела са великим бројем параметара
  - МССМ има 105 параметара
- ❖ Решава велики број проблема СМ



# СУПЕРСИМЕТРИЈА

Многе потраге су у поједностављеним моделима



**ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits**  
March 2022

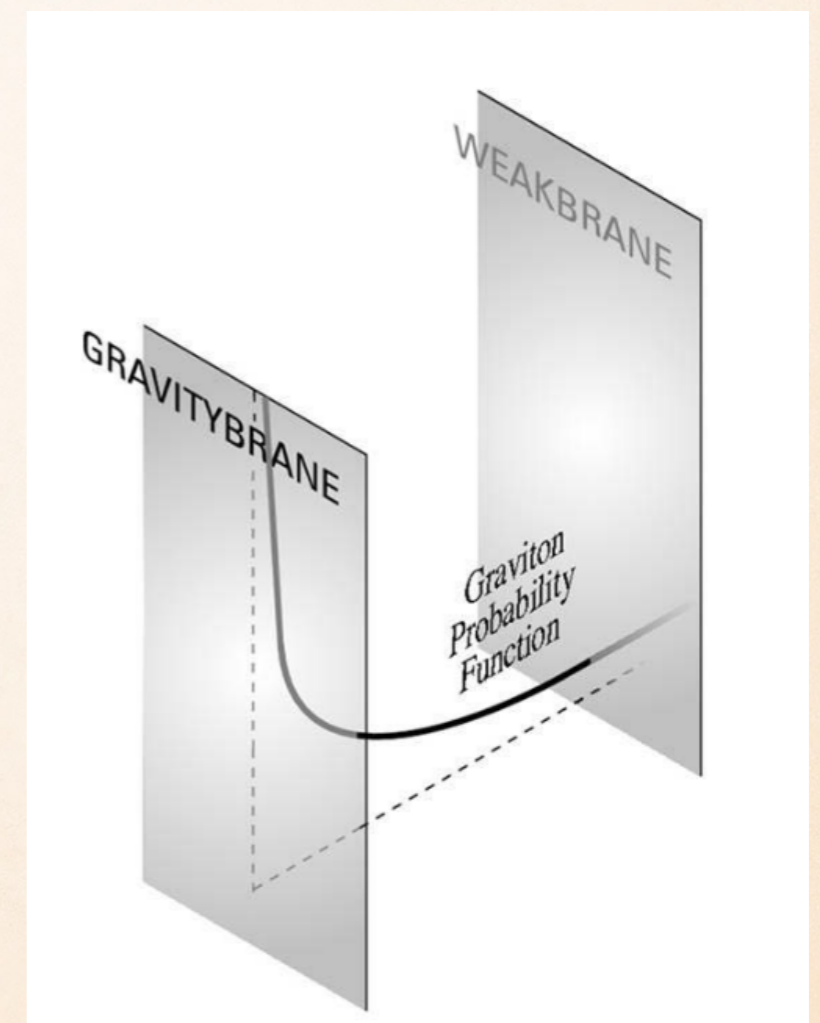
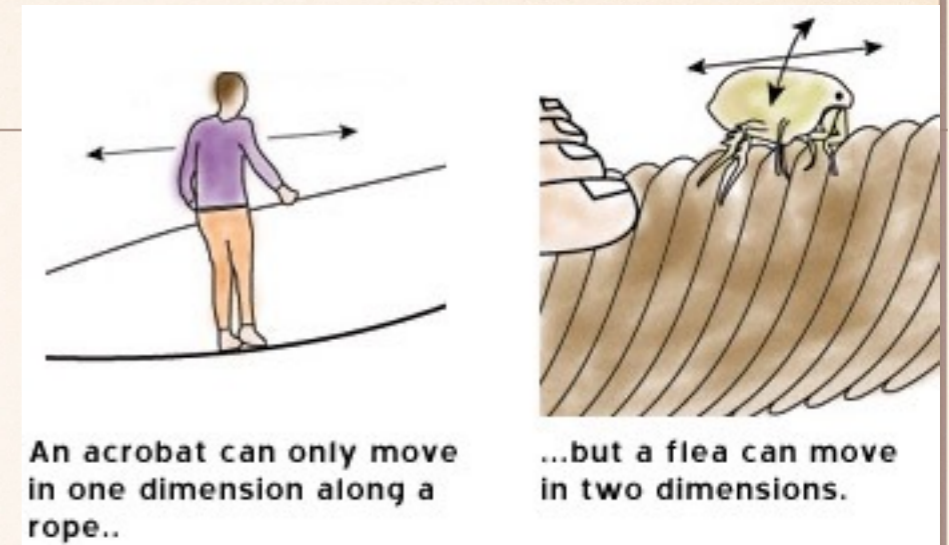
**ATLAS Preliminary**  
 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$

Model	Signature	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	Reference			
Inclusive Searches	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{\chi}_1^0$	0 $e, \mu$	2-6 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{g}$ [1x, 8x Degen] 1.0, 1.85	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400 \text{ GeV}$		
	mono-jet	1-3 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.9	$m(\tilde{g}) m(\tilde{\chi}_1^0) = 5 \text{ GeV}$	2102.10874		
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{\chi}_1^0$	0 $e, \mu$	2-6 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	Forbidden 1.15-1.95	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0 \text{ GeV}$	2010.14293	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}W\tilde{\chi}_1^0$	1 $e, \mu$	2-6 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	2.2	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 600 \text{ GeV}$	2101.01629	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}(ll)\tilde{\chi}_1^0$	$e, \mu, \mu$	2 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	2.2	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 700 \text{ GeV}$	CERN-EP-2022-014	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}WZ\tilde{\chi}_1^0$	0 $e, \mu$	7-11 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	1.97	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 600 \text{ GeV}$	2008.06032	
3 <sup>rd</sup> gen. squarks direct production	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}WZ\tilde{\chi}_1^0$	SS $e, \mu$	6 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	1.15	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 200 \text{ GeV}$	1909.08457	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow t\bar{t}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	3 b $E_T^{\text{miss}}$ 79.8	2.25	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2018-041	
	$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow t\bar{t}\tilde{\chi}_1^0$	SS $e, \mu$	6 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	1.25	$m(\tilde{g}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 300 \text{ GeV}$	1909.08457	
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1$	0 $e, \mu$	2 b $E_T^{\text{miss}}$ 139	1.255	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400 \text{ GeV}$	2101.12527	
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow b\tilde{h}\tilde{\chi}_1^0$	0 $e, \mu$	6 b $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.68	$10 \text{ GeV} < m(\tilde{b}_1) < m(\tilde{\chi}_1^0) < 20 \text{ GeV}$	2101.12527	
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow b\tilde{h}\tilde{\chi}_1^0$	2 $\tau$	2 b $E_T^{\text{miss}}$ 139	Forbidden 0.13-0.85	$\Delta m(\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0) = 130 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}_1^0) = 100 \text{ GeV}$	1908.03192	
EW direct	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1$	0-1 $e, \mu$	$\geq 1$ jet $E_T^{\text{miss}}$ 139	1.25	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 1 \text{ GeV}$	2004.14060, 2012.03799	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0$	1 $e, \mu$	3 jets/1 b $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.65	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 500 \text{ GeV}$	2012.03799	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow \tau\nu, \tilde{t}_1 \rightarrow \tau G$	1-2 $\tau$	2 jets/1 b $E_T^{\text{miss}}$ 139	Forbidden 1.4	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 800 \text{ GeV}$	2108.07665	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0 $e, \mu$	2 c $E_T^{\text{miss}}$ 36.1	0.85	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0 \text{ GeV}$	1805.01649	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0 $e, \mu$	mono-jet $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.55	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0 \text{ GeV}$	2102.10874	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	1-2 $e, \mu$	1-4 b $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.067-1.18	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 500 \text{ GeV}$	2006.05880	
Long-lived particles	$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow t + Z$	3 $e, \mu$	1 b $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.86	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 360 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}_2^0) = 40 \text{ GeV}$	2006.05880	
	Direct $\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^0$	Multiple $l$ /jets $e, \mu, \mu$	$\geq 1$ jet $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.205	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0, \text{ wino-bino}$	2106.01676, 2108.07596	
		$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $WZ$	2 $e, \mu$	$\geq 1$ jet $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.42	$m(\tilde{\chi}_1^0) - m(\tilde{\chi}_2^0) = 5 \text{ GeV}, \text{ wino-bino}$	1911.12606
	Stable $\tilde{g}$ R-hadron	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $WW$	Multiple $l$ /jets $e, \mu, \mu$	$\geq 1$ jet $E_T^{\text{miss}}$ 139	1.06	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0, \text{ wino-bino}$	1908.08215
		$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $Wh$	2 $e, \mu$	$\geq 1$ jet $E_T^{\text{miss}}$ 139	1.0	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 70 \text{ GeV}, \text{ wino-bino}$	2004.10894, 2108.07596
	RPV	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $l\nu/\nu\nu$	2 $e, \mu$	2 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.16-0.3	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0, \text{ wino-bino}$	1911.06660
$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $l\nu/\nu\nu$		2 $\tau$	2 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.12-0.39	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$	1908.08215	
$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $l\nu/\nu\nu$		2 $e, \mu$	0 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.7	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$	1911.12606	
$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $l\nu/\nu\nu$		0 $e, \mu$	$\geq 1$ jet $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.256	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$	1911.12606	
$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $l\nu/\nu\nu$		0 $e, \mu$	$\geq 3$ b $E_T^{\text{miss}}$ 36.1	0.13-0.23	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$	1806.04030	
$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$ via $l\nu/\nu\nu$		4 $e, \mu$	0 jets $E_T^{\text{miss}}$ 139	0.55	$BR(\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow hZ) = 1$	2103.11684	

\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models, c.f. refs. for the assumptions made.

# ДОДАТНЕ ДИМЕНЗИЈЕ И ГРАВИТАЦИЈА

- ❖ Гравитација је доста слабија од осталих интеракција
- ❖ Губи своју "снагу" кретањем кроз више димензија
- ❖ Постоји више теорија додатних димензија: Аркани-Хамед, Димопулос, Двали; Рандал, Сундрум; Универзалне ЕД...
- ❖ АДД: поља из СМ налазе на 3+1 димензионалној брани, док се гравитација несметано простире и по осталим димензијама
- ❖ РС: гравитација на Планковој брани, СМ на својој, али само гравитација може да пролази



# БСМ ХИГСОВ БОЗОН

- ❖ Подразумева се и СМ Хигсов бозон у егзотичном каналу, као и егзотичан Хигсов бозон
- ❖ Распад гравитона који се појављује у теоријама које описују гравитацију, или неке друге тешке честице, појава Хигсовог бозона у каскади у СУСИ ланцима, Хигсов бозон заједно са тамном материјом...
- ❖ Модели који укључују проширење Хигсовог поља из СМ - 2ХДМ, као и егзотичнији модели
- ❖ Продукција пара Хигсових бозона, значајна и због испитивања параметара Хигсовог потенцијала

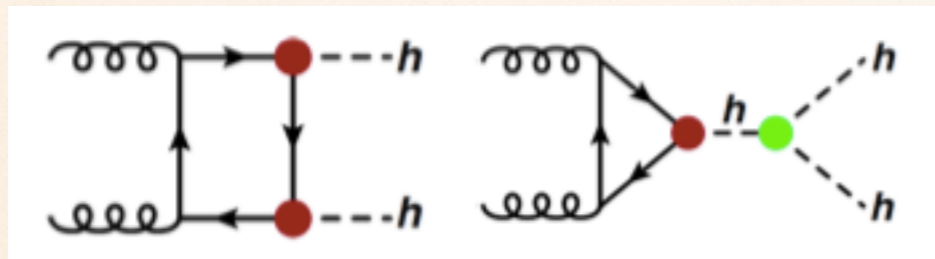


# ПРОДУКЦИЈА ПАРА ХИГСОВИХ БОЗОНА

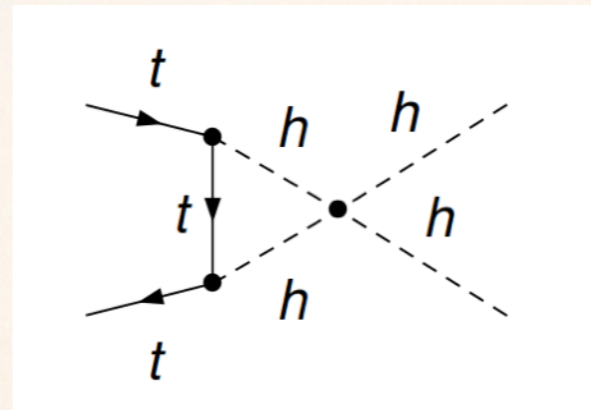
- ❖ Хигсов потенцијал после спонтаног нарушења симетрије

$$V(H) = \lambda v^2 H^2 + \lambda v H^3 + (1/4)\lambda H^4; M_H^2 = 2\lambda v^2$$

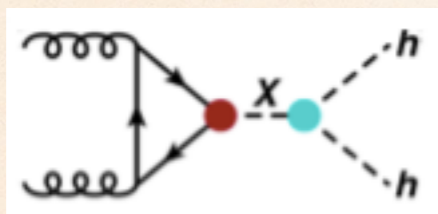
Троструко самоспрезање  
(trilinear self coupling)



Четвороструко самоспрезање  
(quartic self coupling)

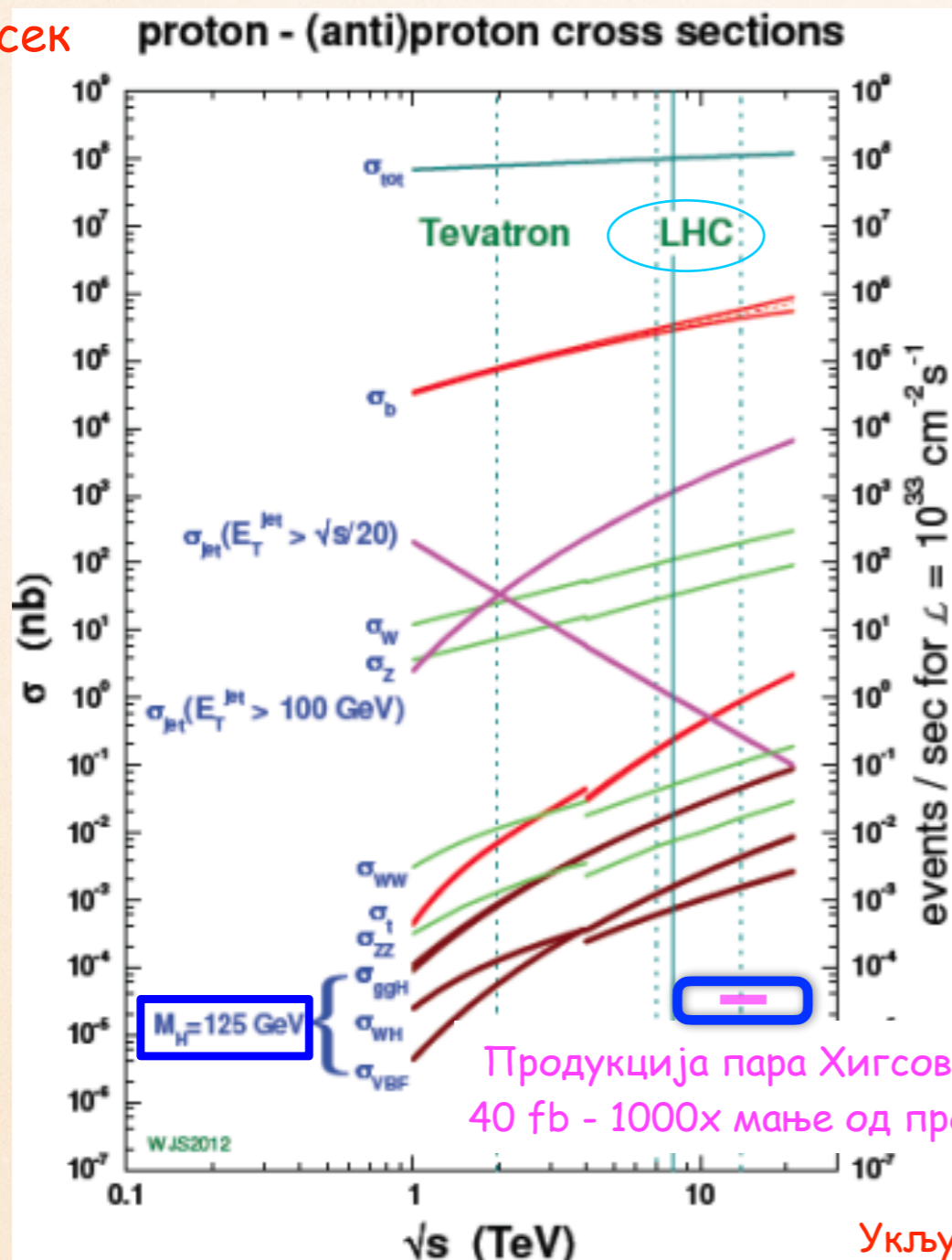


- ❖ Продукција нове резонантне честице и њен распад на два Хигсова бозона



# Како тражимо интресантне догађаје

Пресек



Тродукција пара Хигсових бозона у СМ:  
40 fb - 1000x мање од тродукције једног!

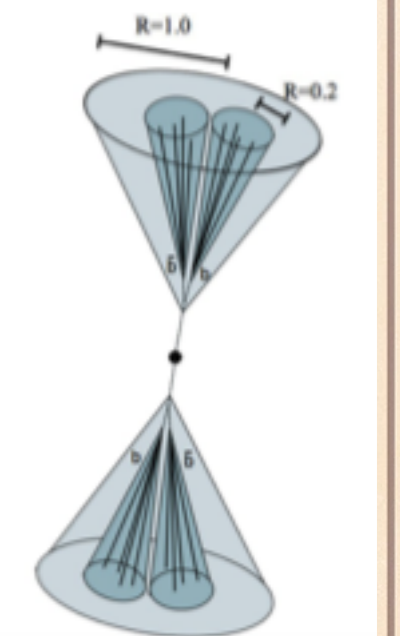
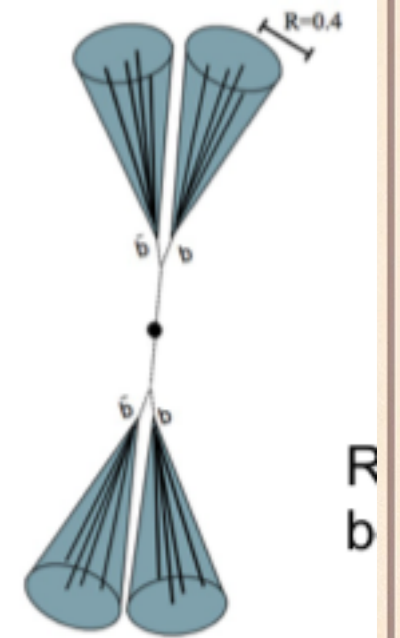


Укључивање процеса нове физике може да повећа пресек за тродукцију



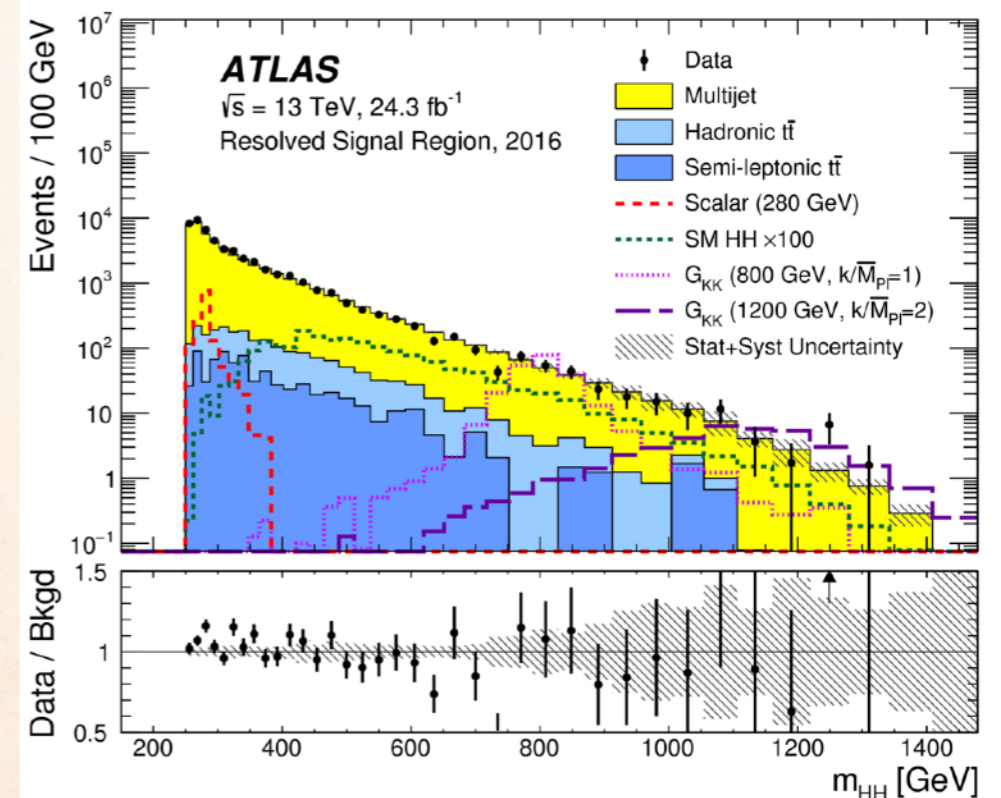
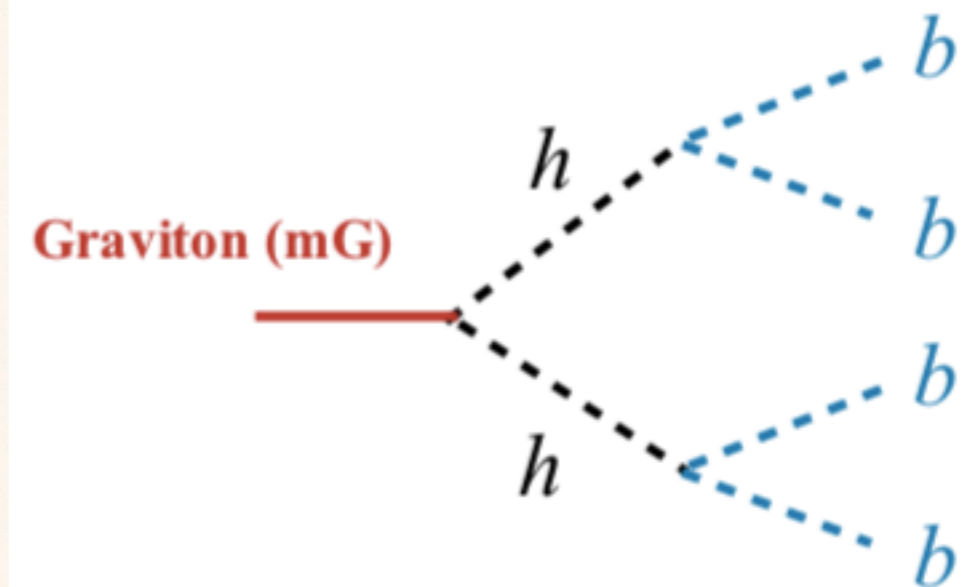
# HH $\rightarrow$ 4b

- ❖ Највероватнији распад Хигсовог бозона је на пар  $b$ -кваркова
- ❖ Две различите анализе
  - ❖ разрешена, јасно се разликују четири  $b$ -џета
  - ❖ тзв. бустована, када је нова резонантна честица тешка, Хигсови бозони су бустовани и производи њиховог распада су близу, па се реконструишу два џета великог радијуса (сваки садржи два  $b$ -кварка)

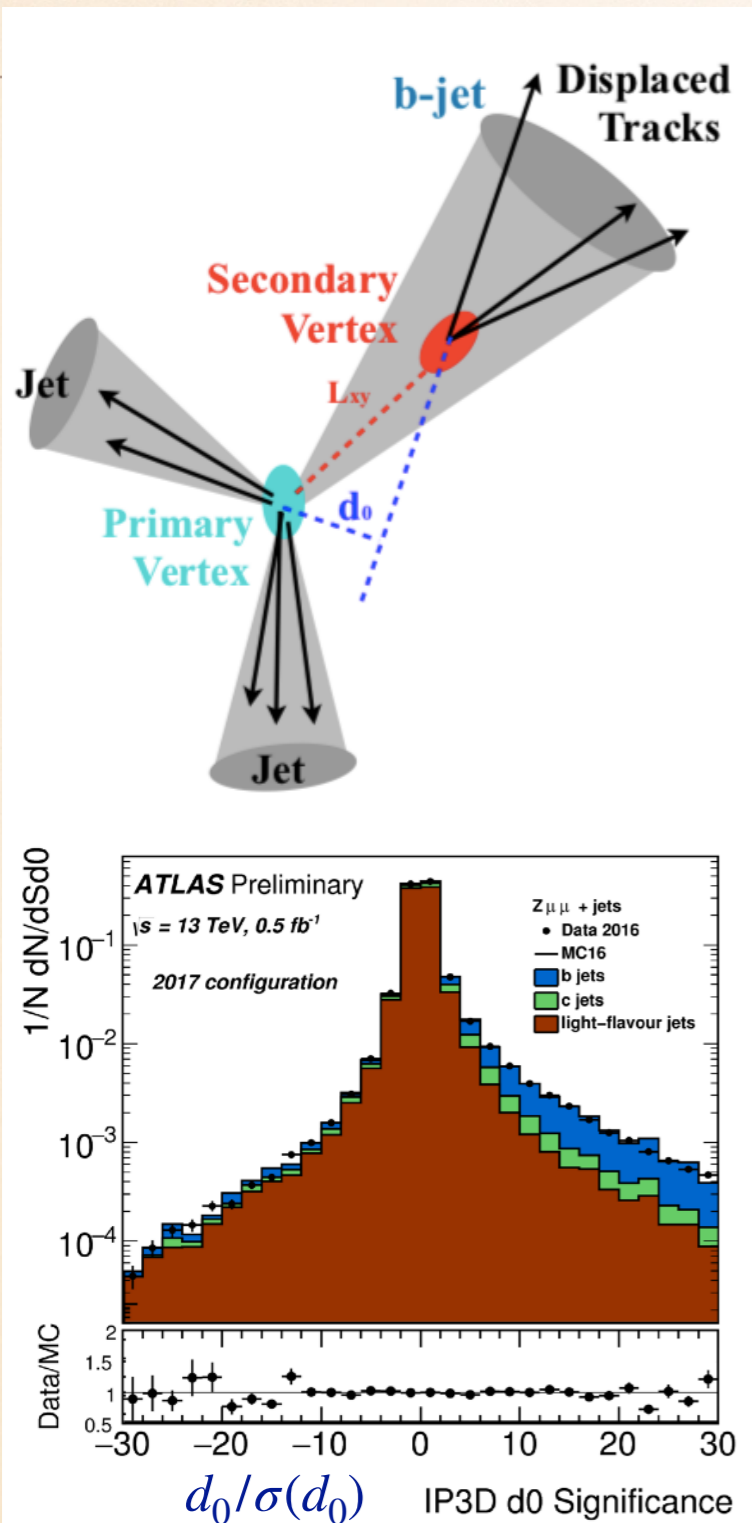


# СЕЛЕКЦИЈА ДОГАЂАЈА

- ❖ Физички не можемо да снимимо све догађаје
  - ❖ Користимо тригере за селекцију интресантних
- ❖ Четири  $b$ -цета са великим трансверзалним импулсом
  - ❖ Упаримо их на начин да одговарају производу распада Хигсовог бозона из СМ ( $m_H = 125 \text{ GeV}$ )
- ❖ Поставимо вето за позадинске процесе који потичу од производње парова топ кварка -  $t\bar{t}$
- ❖ Посматрамо расподелу инваријантне масе два Хигсова бозона



# ИДЕНТИФИКАЦИЈА Ь-ЦЕТОВА

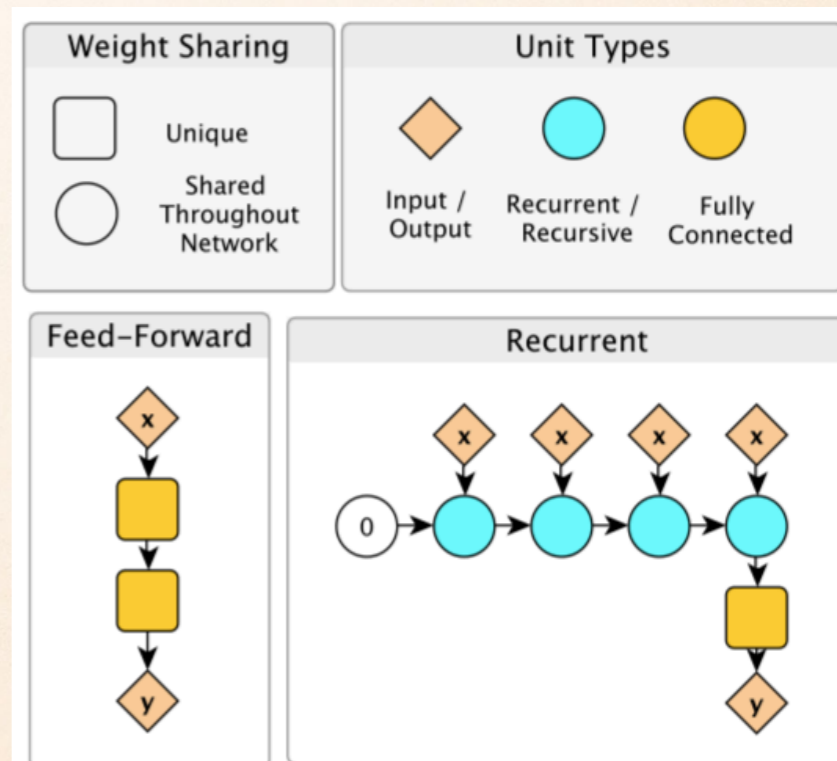
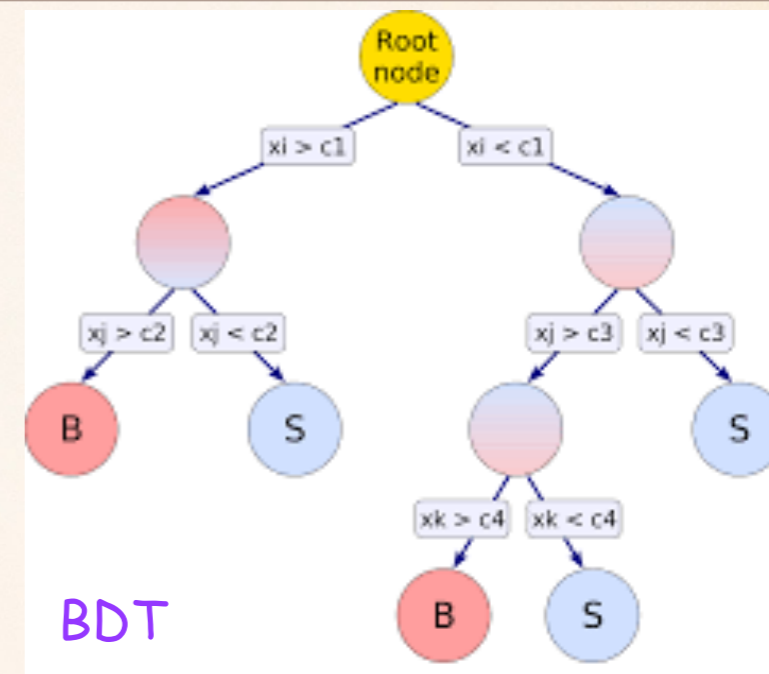


- ❖ Има кључну важност у анализама, нарочито са Хигсовим бозоном
- ❖ Карактеристике В-хадрона:
  - ❖ Велика маса  $\sim 5.2 \text{ GeV}$
  - ❖ Релативно дуг "живот"  $\sim 1.6 \text{ ps}$ 
    - => дужина прелета пре распада  $\sim$  неколико  $\text{mm}$
    - => појава **секундарних вертекса**
    - => трагови су измештени због тога што потичу из секундарног вертекса
    - => велики импакт параметар  $d_0$
- ❖ Могућност семи-лептонског распада

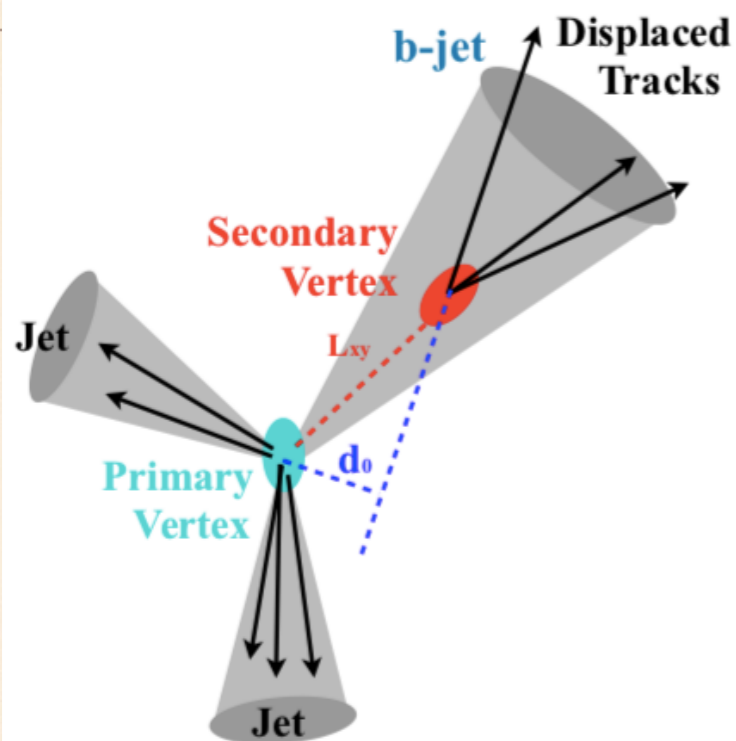
# МАШИНСКО УЧЕЊЕ



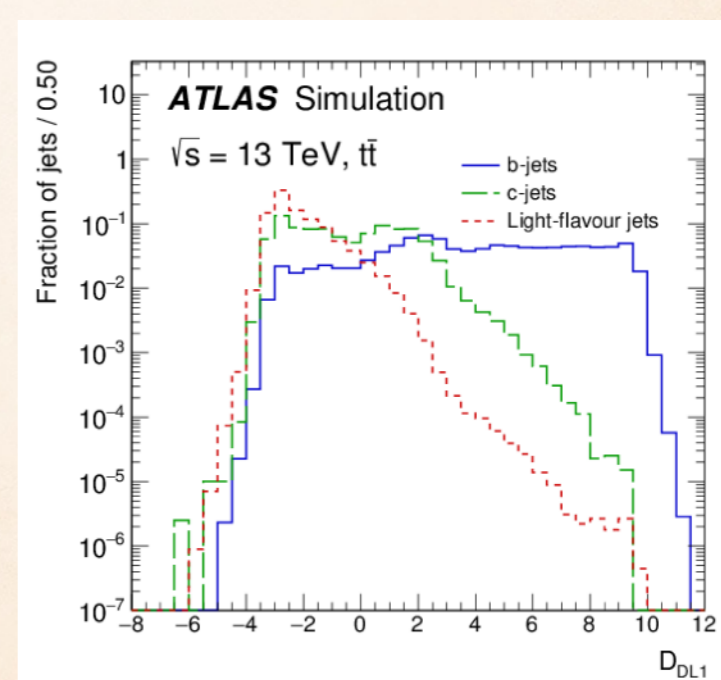
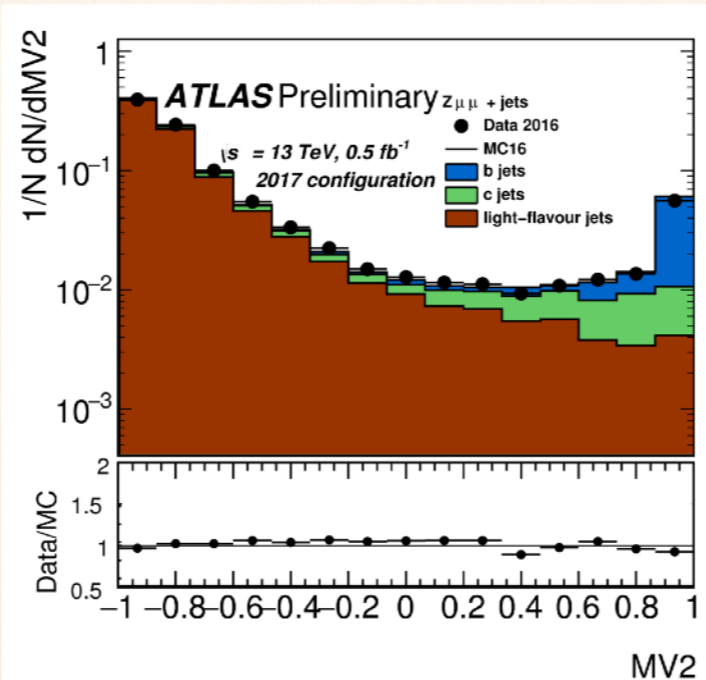
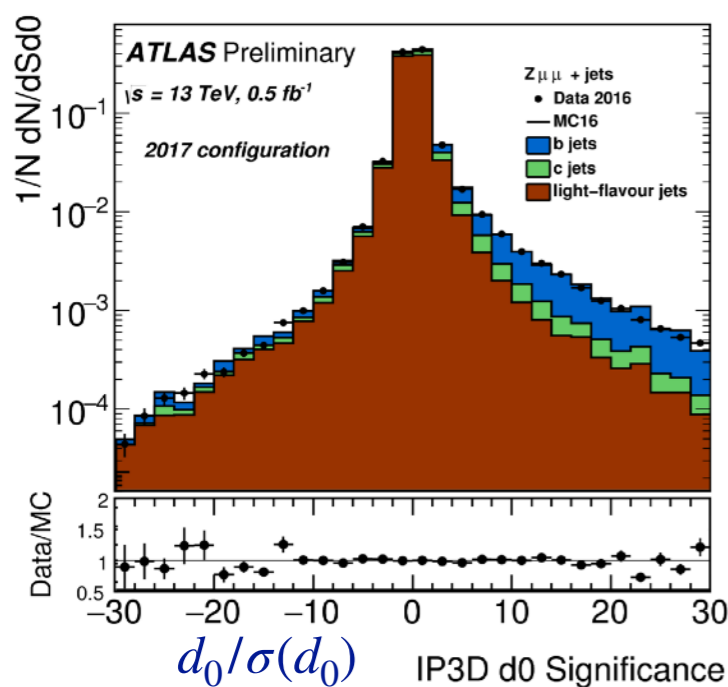
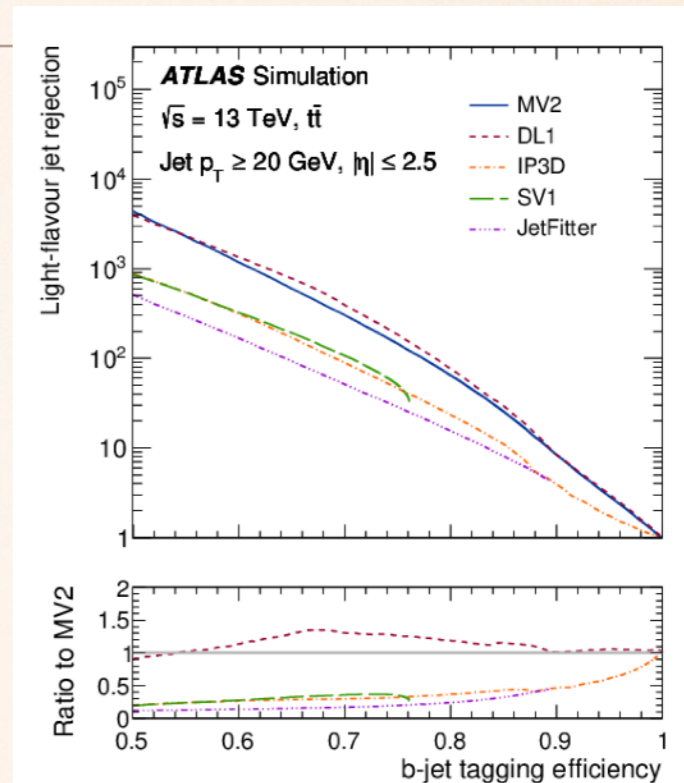
- ❖ Посебне карактеристике могу да се комбинују у неку мултиваријабилну технику => основа машинског учења
- ❖ *Boosted Decision Tree (BDT)* техника веома популарна у последњих > 10 година
  - ❖ Поједностављено, догађај пролази или не пролази селекцију док није класификован као сигнал или позадина
- ❖ Неуронске мреже
  - ❖ *Deep Learning* - укључује више сакривених нивоа
  - ❖ *Recurrent Neural networks* - може да процесуира секвенце улазних параметара
  - ❖ *Graph Neural networks* - ОК, овде и мени треба лекција :)



# ИДЕНТИФИКАЦИЈА Ь-ЏЕТОВА

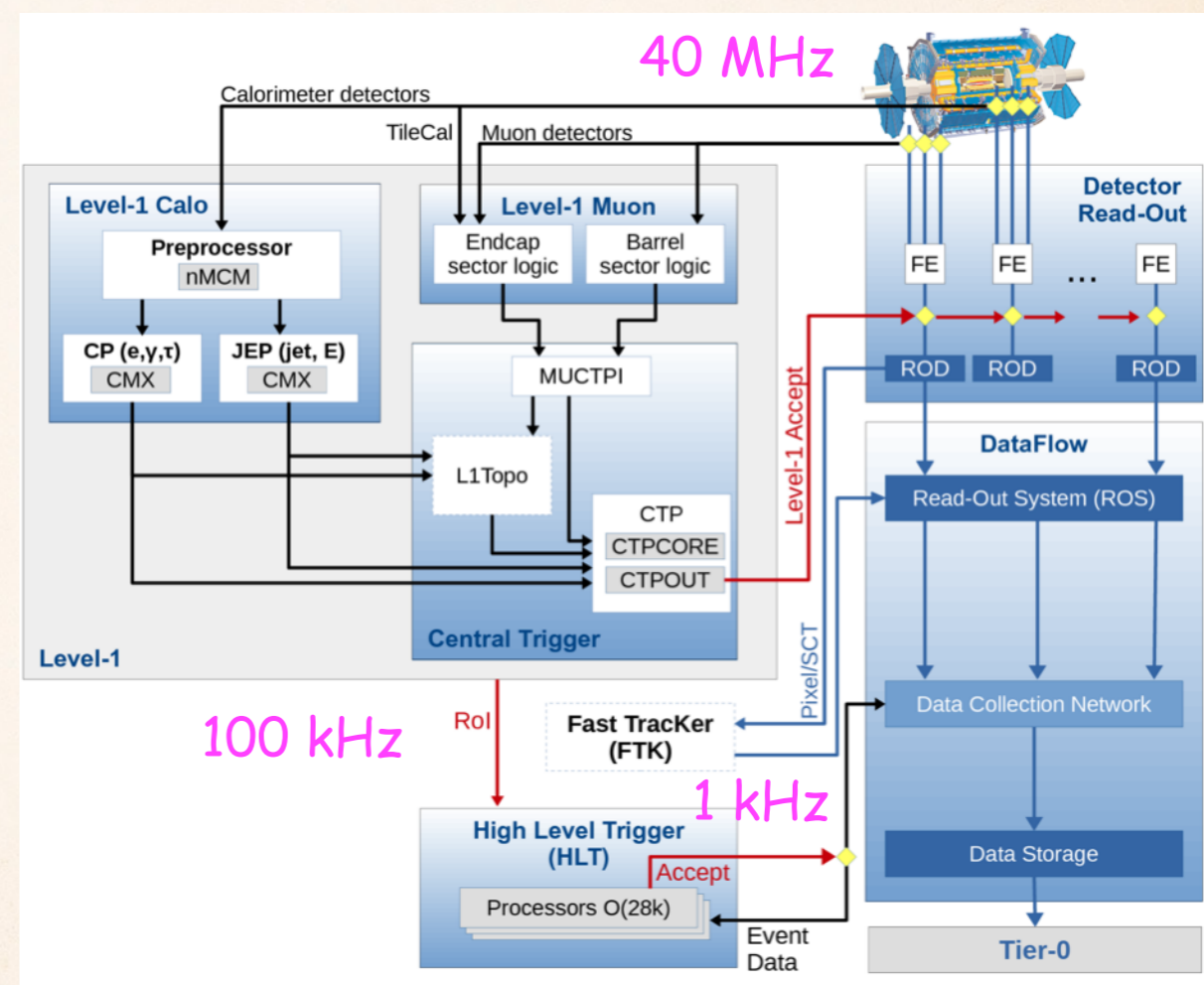


- ◆ Посебне карактеристике могу да се комбинују у неку мултиваријабилну технику
- ◆ За идентификацију користе се комбинације различитих техника



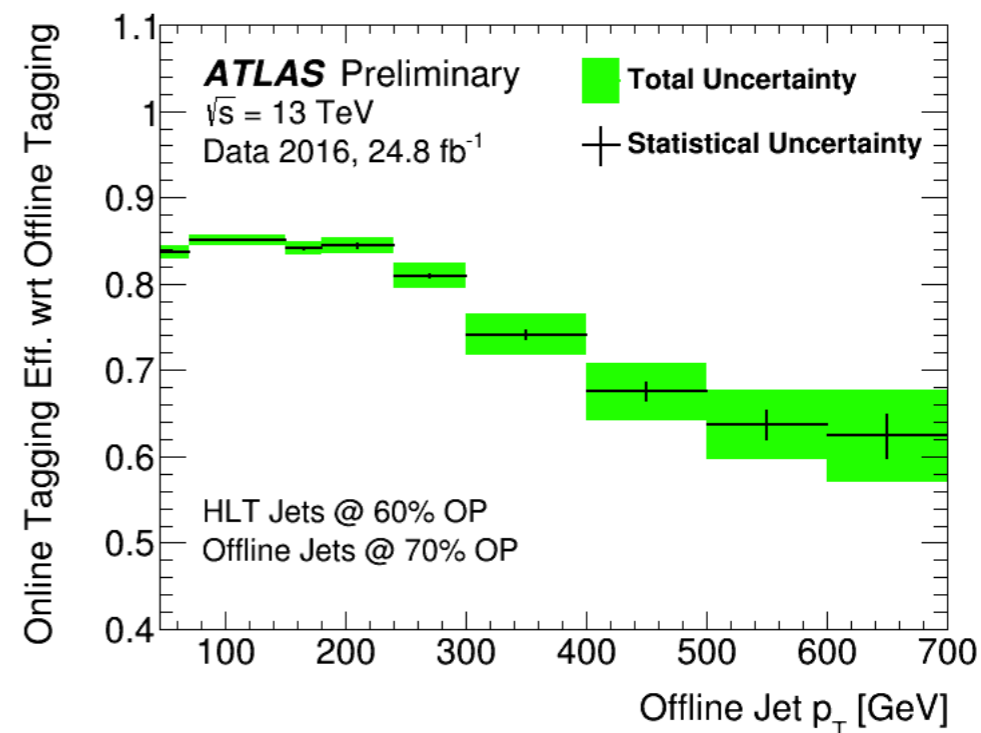
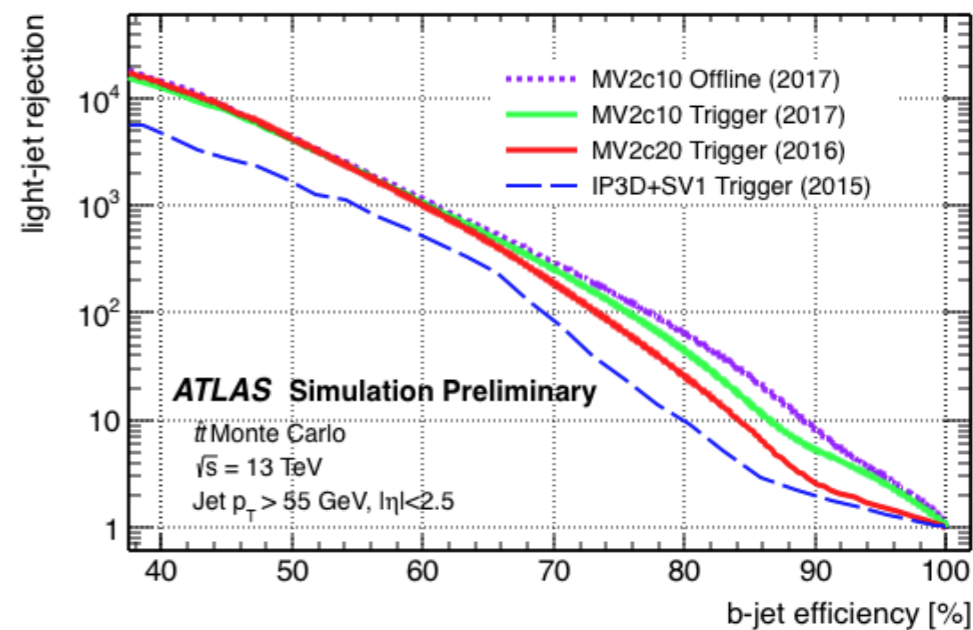
# ТРИГЕРИ

- ❖ Два нивоа тригера
- ❖ Први ниво (Level 1 - L1):
  - Хардверски, електроника да се одреде Региони Интреса (Regions of Interest - RoIs) базирани на грубој информацији из калориметра и мионског система
  - Редукција: 40 MHz → 100 kHz
  - Латенција 2.5 μs
- ❖ Високи ниво (High Level Trigger - HLT):
  - Софтверски алгоритми који користе или RoIs или потпуни информацију - веома слични онима за реконструкцију догађаја
  - Редукција: 100 kHz → 1 kHz (1.5 kHz максимум)
  - Латенција 0.2 s

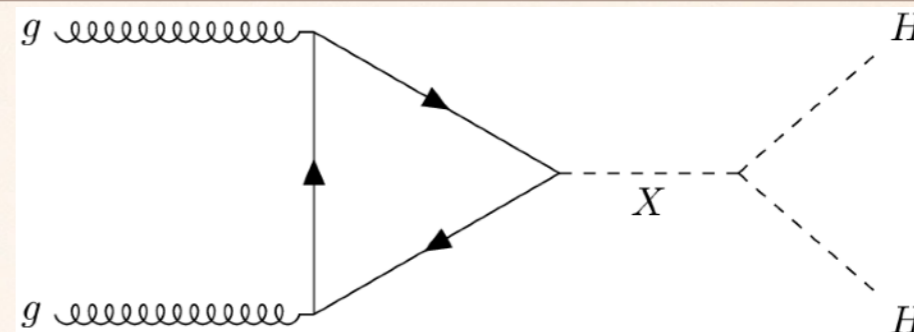
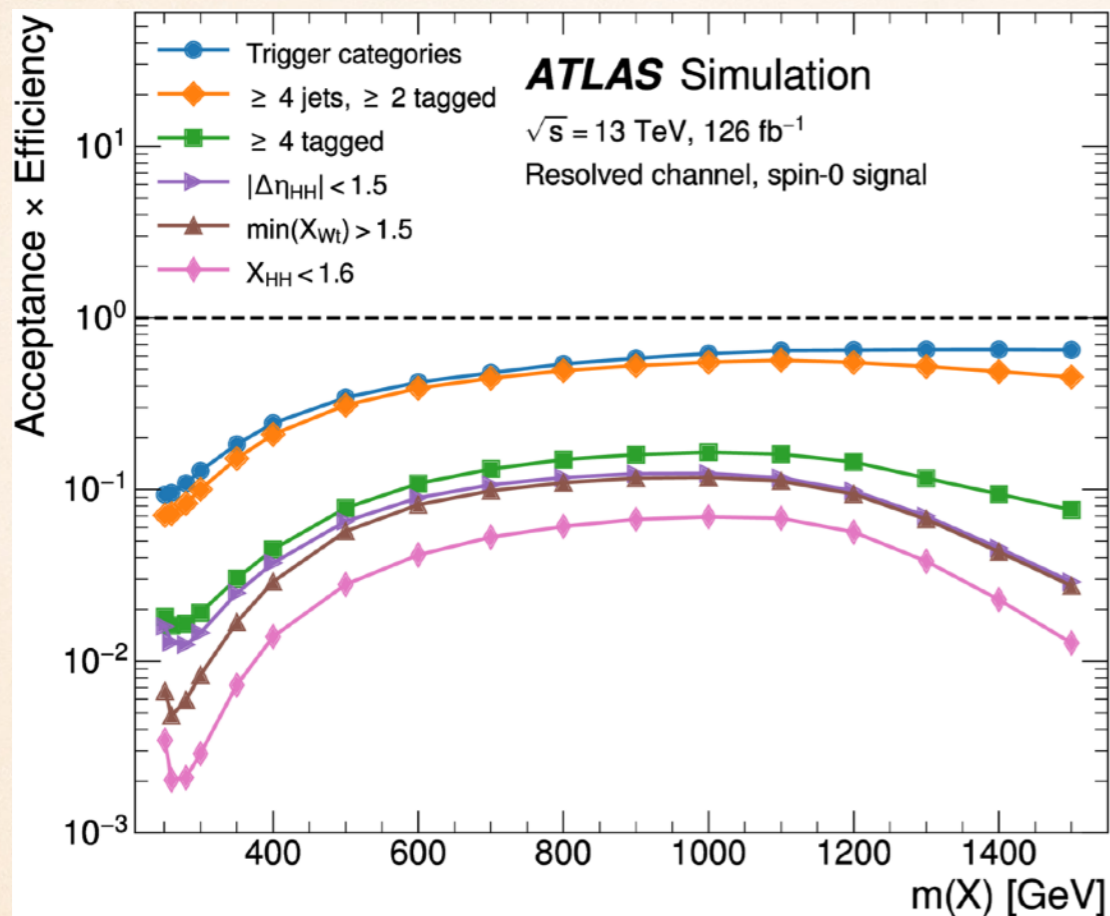


# ТРИГЕРИ

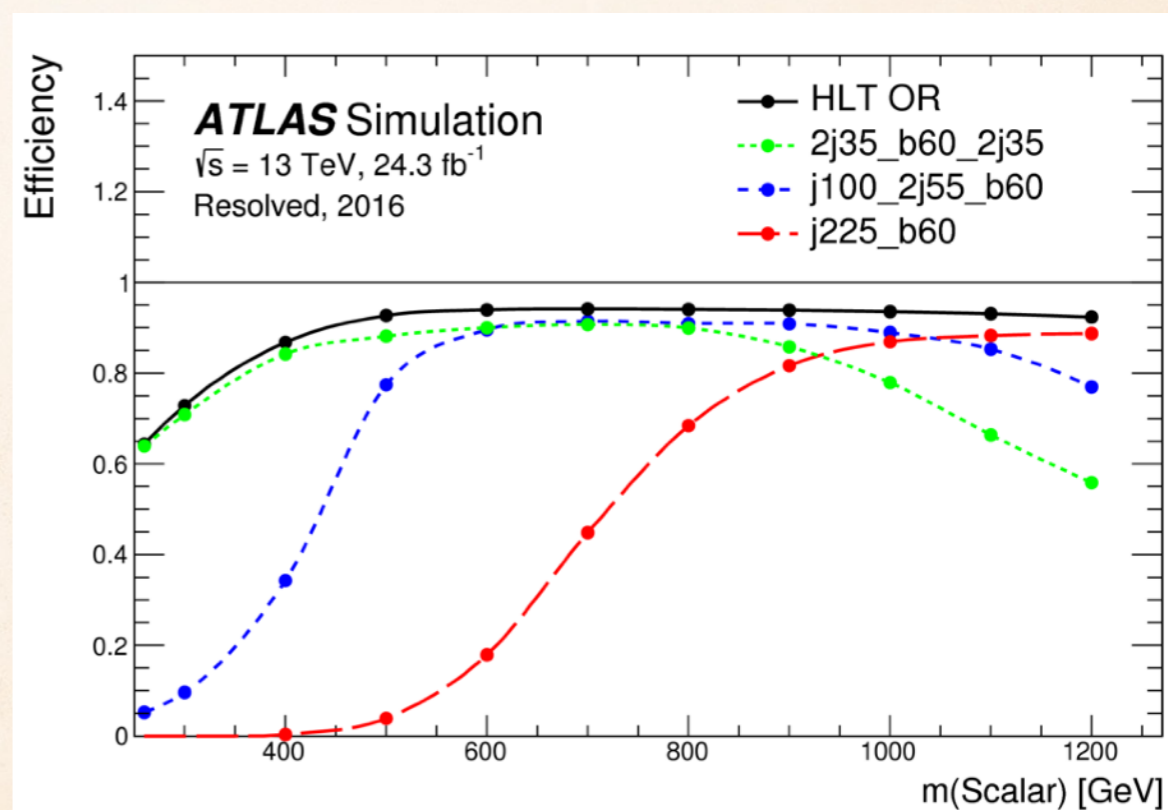
- ❖ Тригери за  $b$ -цетове користе исте алгоритме као и идентификација у реконструкцији
- ❖ од 2016 користе се мултиваријабилни алгоритми



# ЕФИКАСНОСТ СЕЛЕКЦИЈЕ



❖ Ефикасност тригера у односу на финалну селекцију

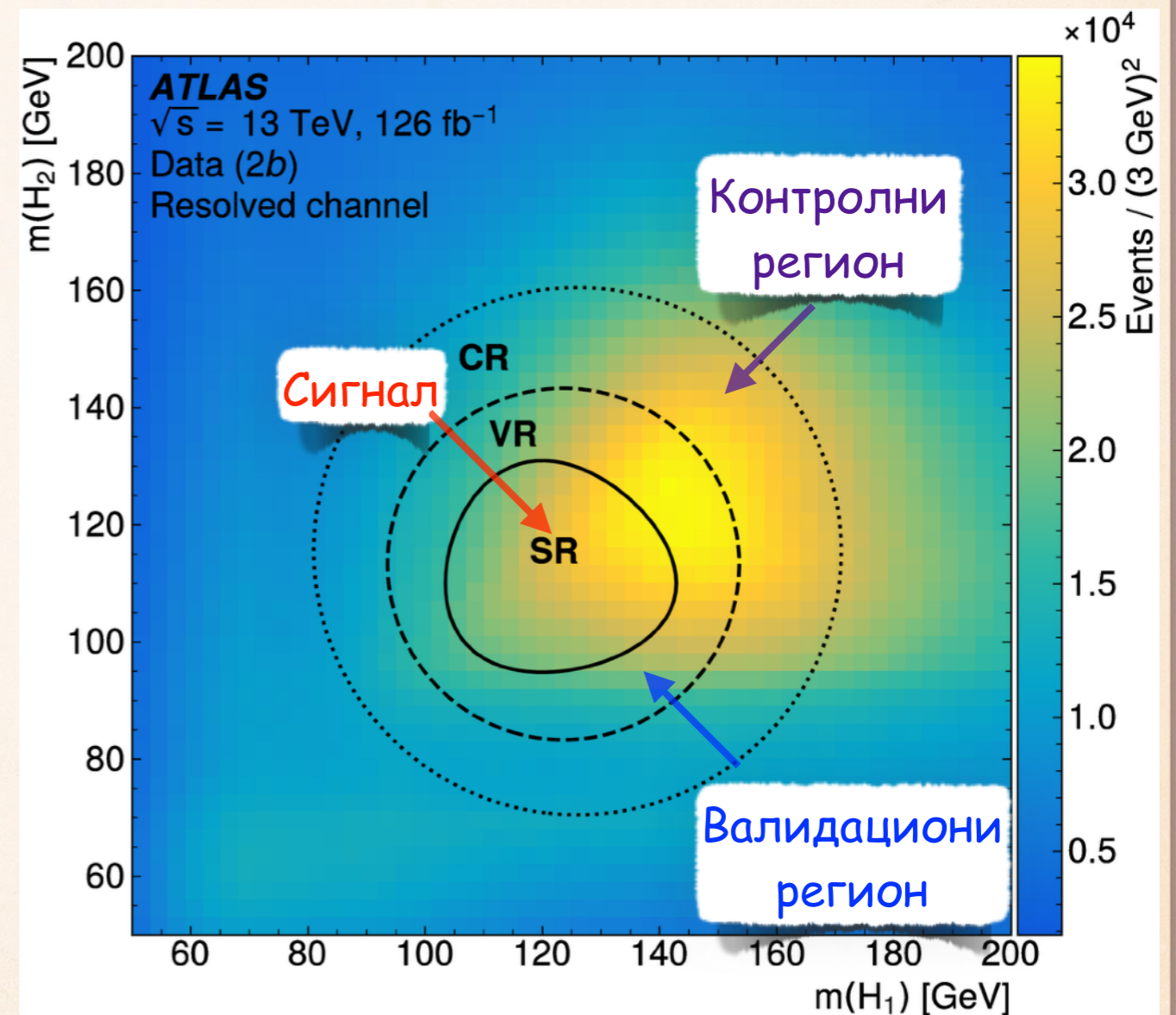


- ❖ Четири b-цета,
- ❖ Упарени да одговарају Хигсовим бозонима коришћењем БДТ
- ❖ Вето на продукцију топ парова



# АНАЛИЗА

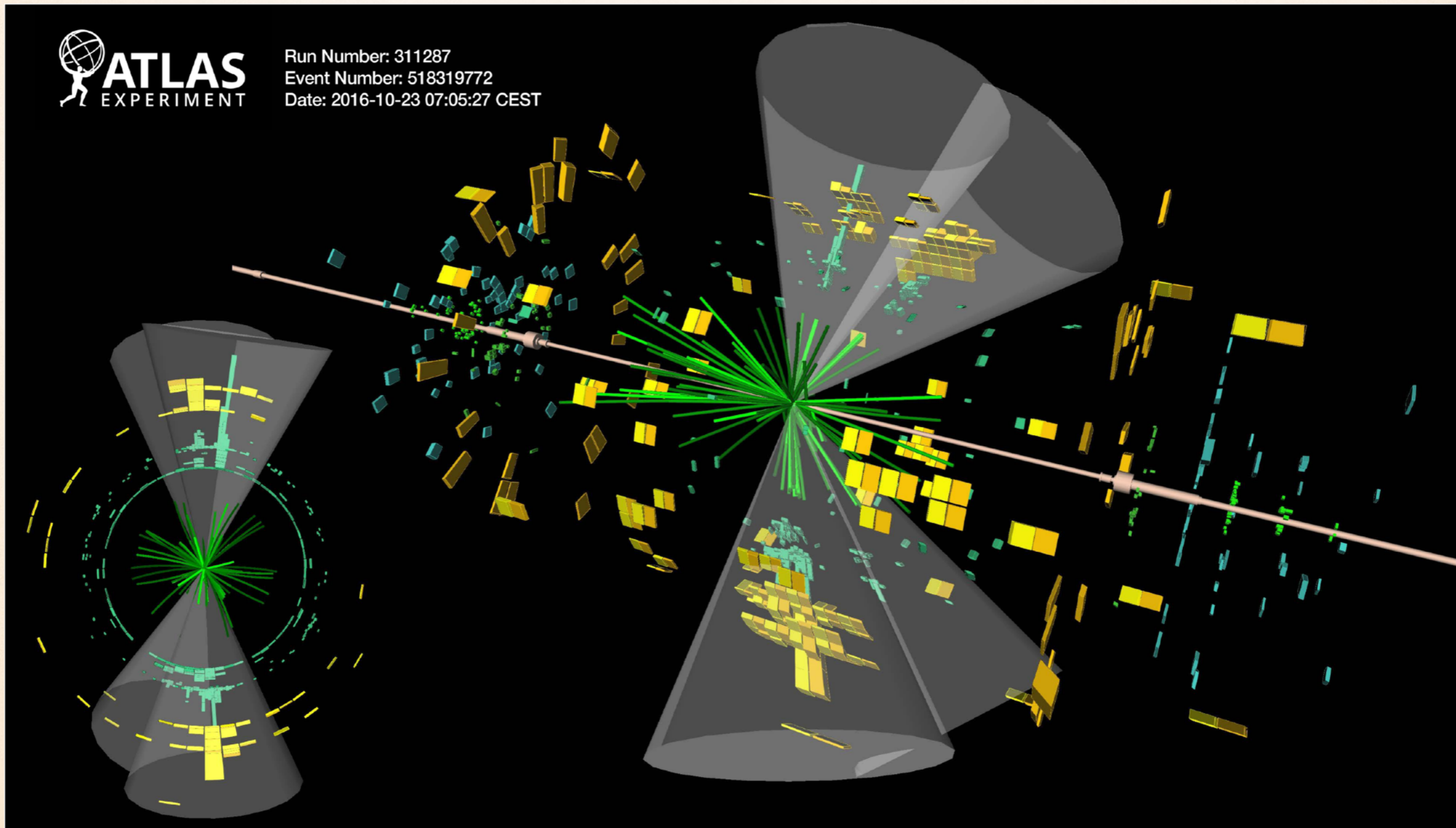
- ❖ Позадински процеси су моделирани из правих података
  - ❖ Подаци са само два  $b$ -цета се користе за моделирање QCD процеса са 4  $b$ -цета
  - ❖ Контролни регион (за моделирање) - Изведе се корекција за  $2b \rightarrow 4b$  за нормирање и изглед
  - ❖ Валидациони регион - провера моделирања и одређивање систематских грешака
  - ❖ **Сигнални регион - потрага за ВИШКОМ**



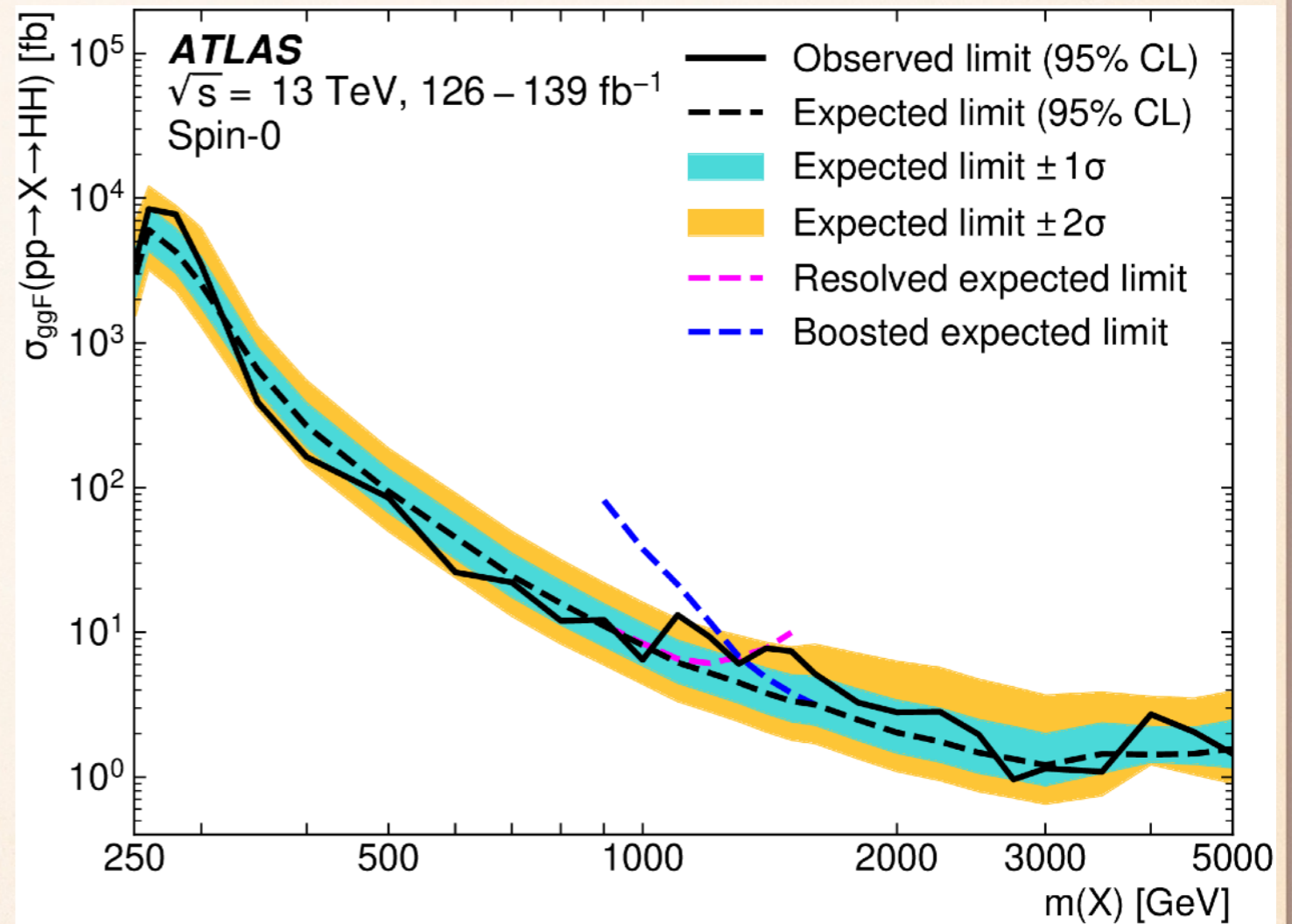
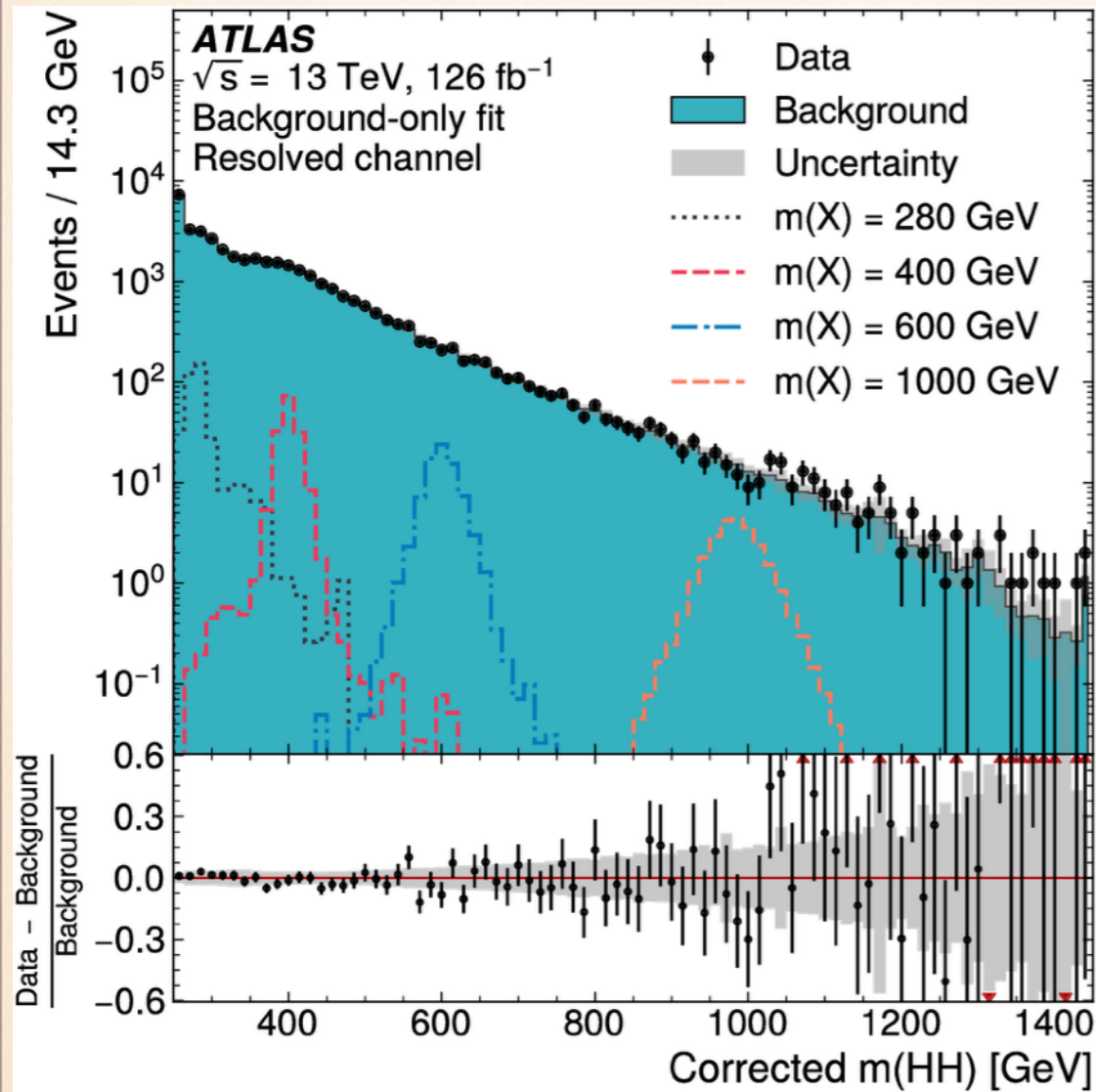
# СТВАРНИ ДОГАЂАЈ



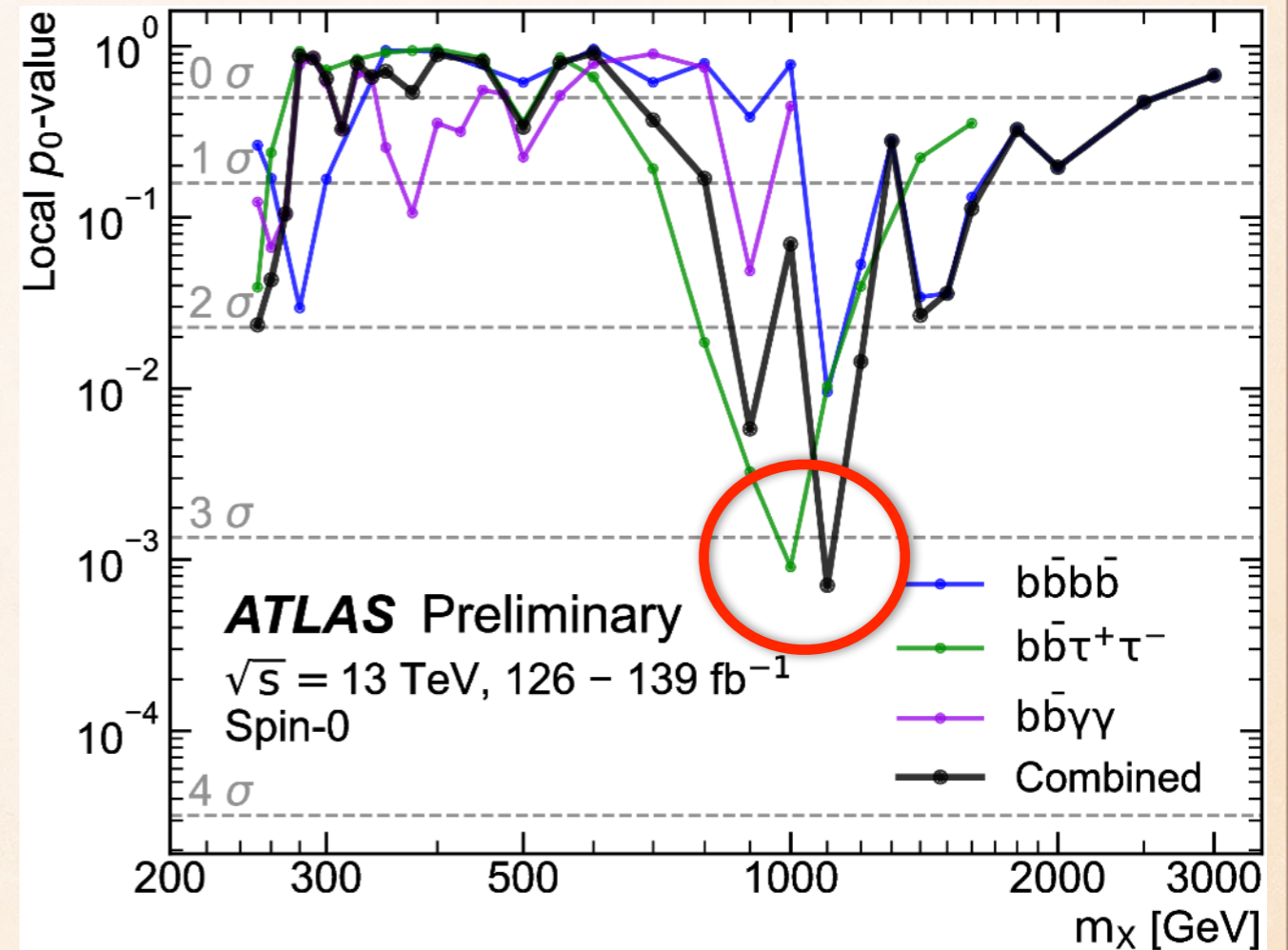
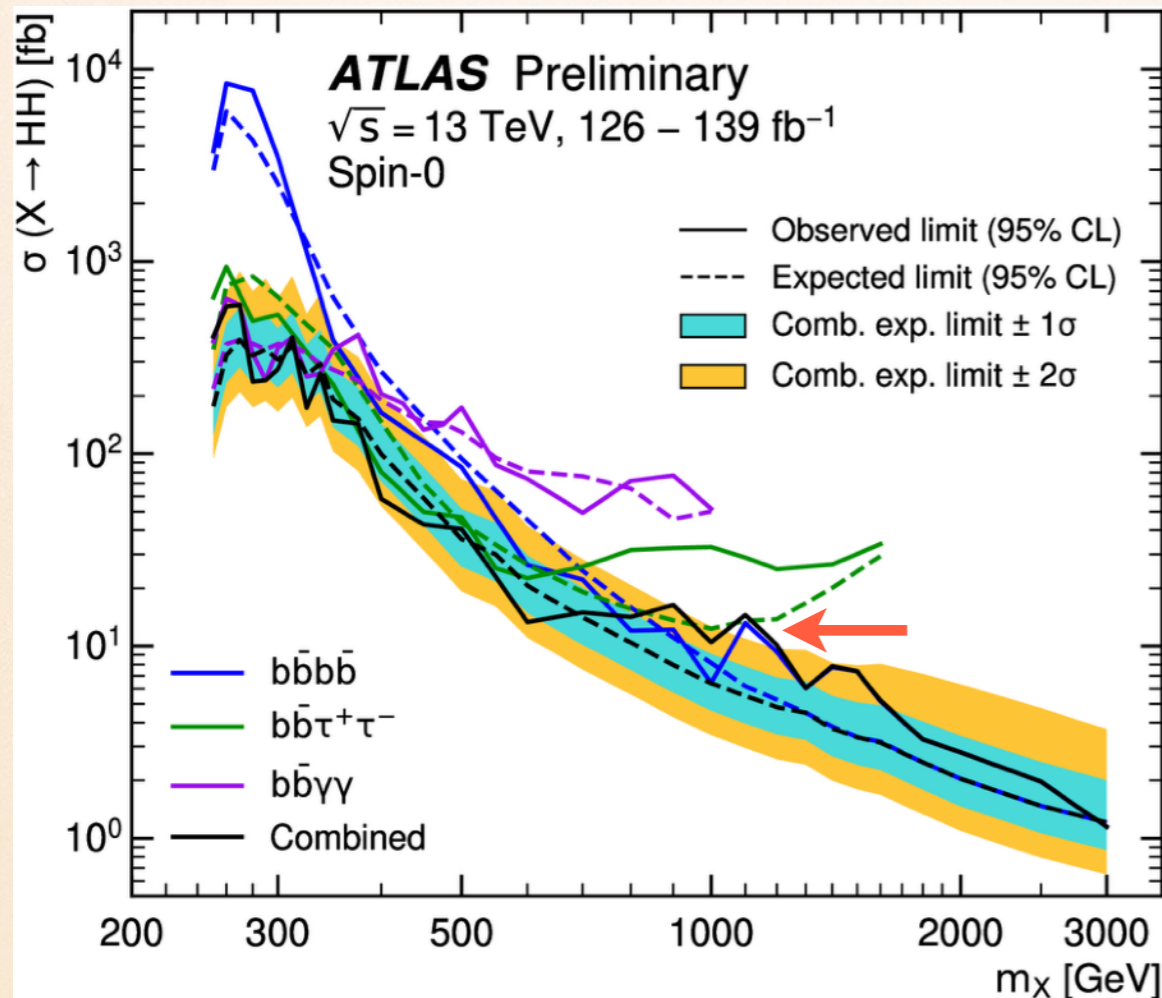
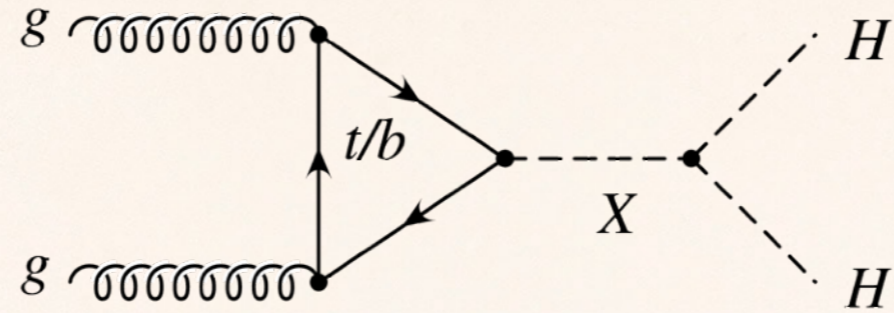
Run Number: 311287  
Event Number: 518319772  
Date: 2016-10-23 07:05:27 CEST



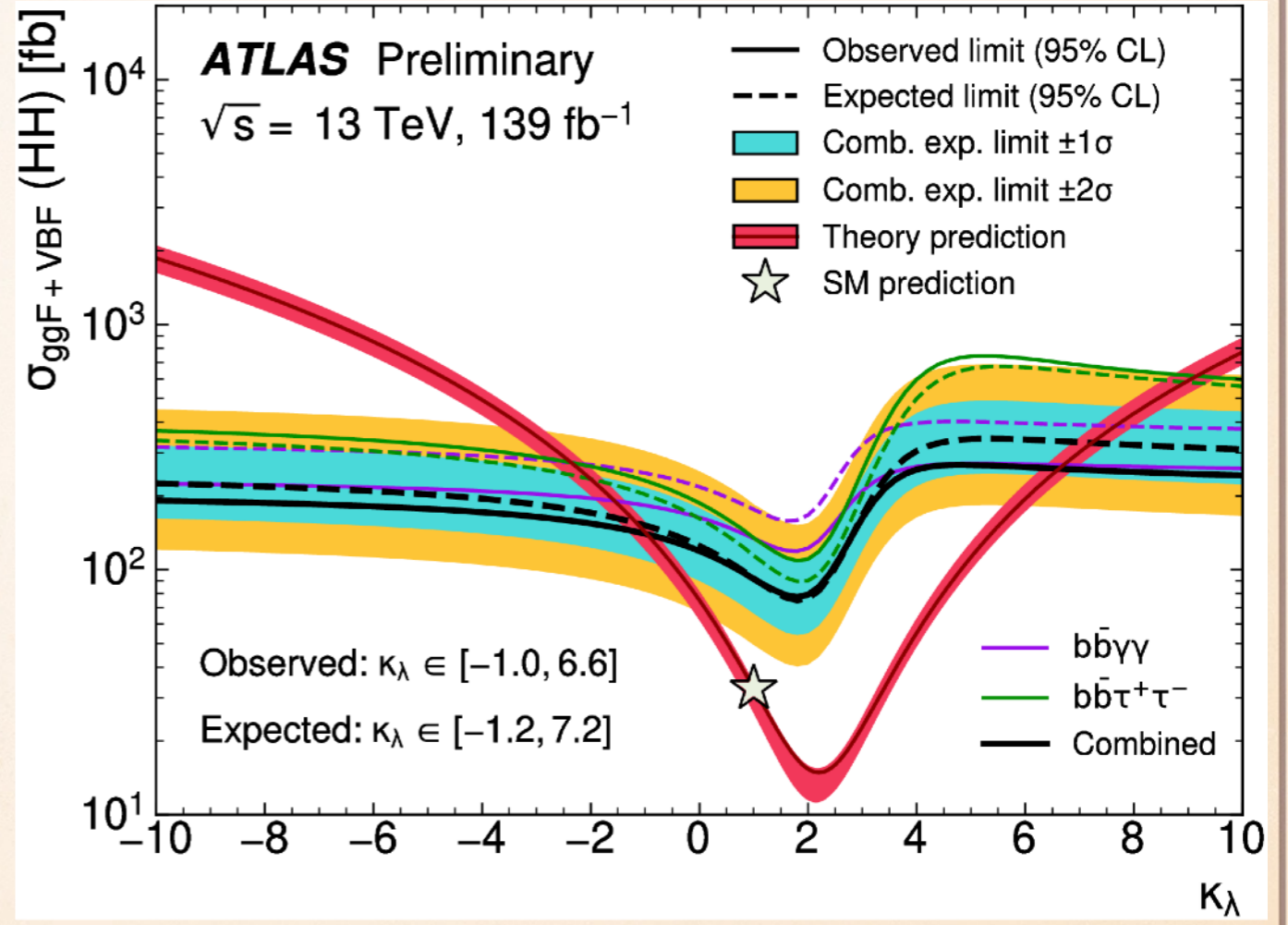
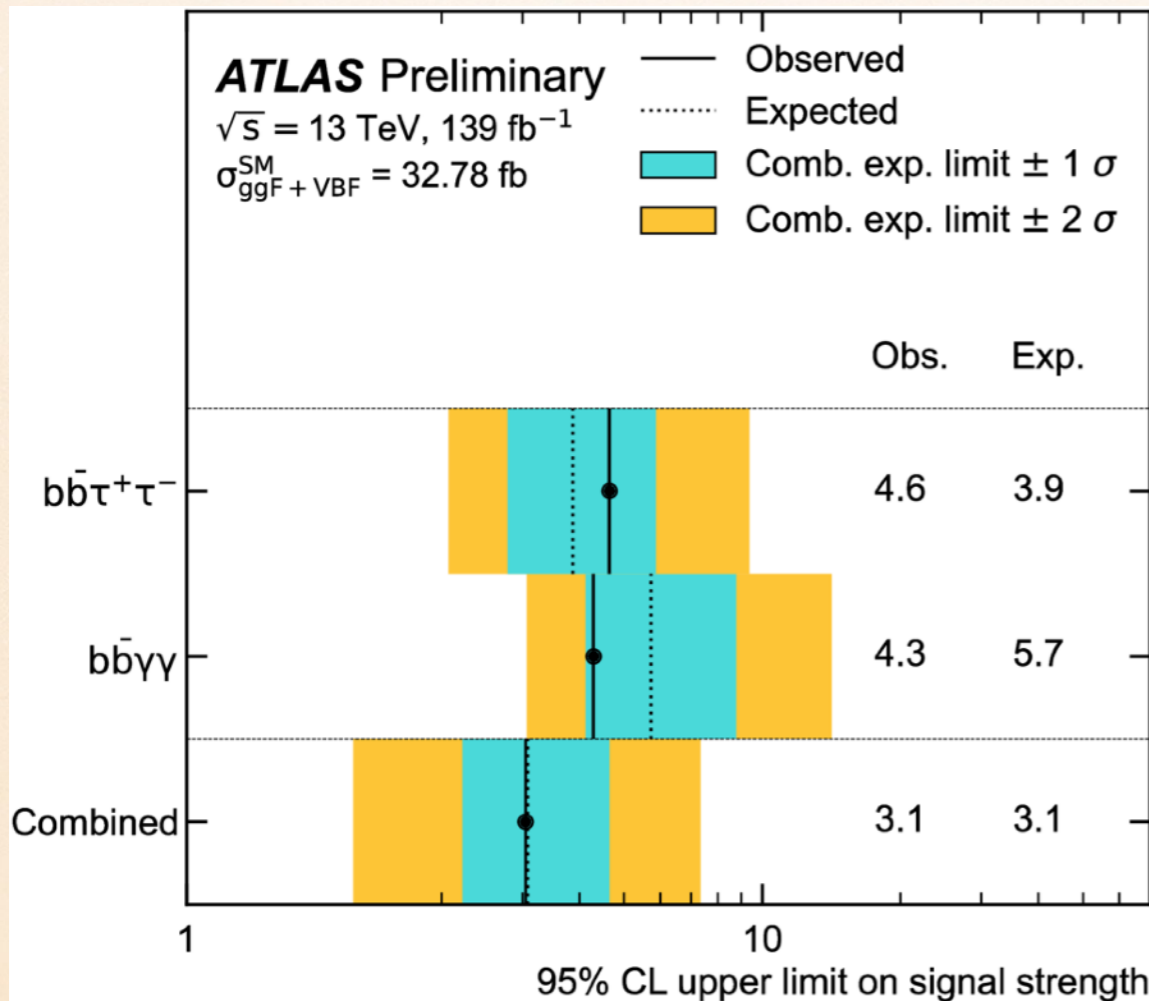
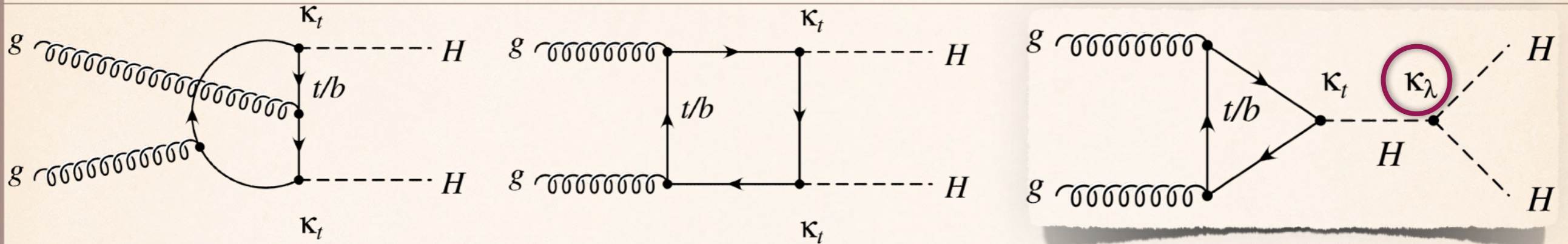
# РЕЗУЛТАТ



# КОМБИНАЦИЈА



# ИНТЕРПРЕТАЦИЈА У СМ



# БСМ РЕЗУЛТАТИ

## ATLAS Exotics Searches\* - 95% CL Upper Exclusion Limits

Status: May 2020

ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L} dt = (3.2 - 139) \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8, 13 \text{ TeV}$

Model	$\ell, \gamma$	Jets <sup>†</sup>	$E_T^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Limit	Reference	
Extra dimensions	ADD $G_{KK} + g/q$	$0 e, \mu$	$1-4 j$	Yes	36.1	$M_D$ 7.7 TeV	$n=2$
	ADD non-resonant $\gamma\gamma$	$2 \gamma$	-	-	36.7	$M_S$ 8.6 TeV	$n=3$ HLZ NLO
	ADD QBH	-	$2 j$	-	37.0	$M_{BH}$ 8.9 TeV	$n=6$
	ADD BH high $\sum p_T$	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 2 j$	-	3.2	$M_{BH}$ 8.2 TeV	$n=6, M_D=3 \text{ TeV}$ , rot BH
	ADD BH multijet	-	$\geq 3 j$	-	3.6	$M_{BH}$ 9.55 TeV	$n=6, M_D=3 \text{ TeV}$ , rot BH
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	$2 \gamma$	-	-	36.7	$G_{KK}$ mass 4.1 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 0.1$
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW/ZZ$	multi-channel	-	-	36.1	$G_{KK}$ mass 2.3 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 1.0$
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WV \rightarrow \ell\nu qq$	$1 e, \mu$	$2 j / 1 J$	Yes	139	$G_{KK}$ mass 2.0 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 1.0$
	Bulk RS $g_{KK} \rightarrow tt$	$1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 1 J/2 j$	Yes	36.1	$g_{KK}$ mass 3.8 TeV	$\Gamma/m = 15\%$
	2UED / RPP	$1 e, \mu$	$\geq 2 b, \geq 3 j$	Yes	36.1	$KK$ mass 1.8 TeV	Tier (1,1), $\mathcal{B}(A^{(1,1)} \rightarrow tt) = 1$
Gauge bosons	SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$	$2 e, \mu$	-	-	139	$Z'$ mass 5.1 TeV	
	SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$	$2 \tau$	-	-	36.1	$Z'$ mass 2.42 TeV	
	Leptophobic $Z' \rightarrow bb$	-	$2 b$	-	36.1	$Z'$ mass 2.1 TeV	
	Leptophobic $Z' \rightarrow tt$	$0 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 2 J$	Yes	139	$Z'$ mass 4.1 TeV	$\Gamma/m = 1.2\%$
	SSM $W' \rightarrow \ell\nu$	$1 e, \mu$	-	Yes	139	$W'$ mass 6.0 TeV	
	SSM $W' \rightarrow \tau\nu$	$1 \tau$	-	Yes	36.1	$W'$ mass 3.7 TeV	
	HVT $W' \rightarrow WZ \rightarrow \ell\nu qq$ model B	$1 e, \mu$	$2 j / 1 J$	Yes	139	$W'$ mass 4.3 TeV	$g_V = 3$
	HVT $V' \rightarrow WV \rightarrow qq qq$ model B	$0 e, \mu$	$2 J$	-	139	$V'$ mass 3.8 TeV	$g_V = 3$
	HVT $V' \rightarrow WH/ZH$ model B	multi-channel	-	-	36.1	$V'$ mass 2.93 TeV	$g_V = 3$
	HVT $W' \rightarrow WH$ model B	$0 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 2 J$	Yes	139	$W'$ mass 3.2 TeV	$g_V = 3$
LRSM $W_R \rightarrow tb$	multi-channel	-	-	36.1	$W_R$ mass 3.25 TeV		
LRSM $W_R \rightarrow \mu N_R$	$2 \mu$	$1 J$	-	80	$W_R$ mass 5.0 TeV	$m(N_R) = 0.5 \text{ TeV}$ , $g_L = g_R$	
CI	CI $qqqq$	-	$2 j$	-	37.0	$\Lambda$ 21.8 TeV $\eta_{LL}$	1703.09127
	CI $\ell\ell qq$	$2 e, \mu$	-	-	139	$\Lambda$ 35.8 TeV $\eta_{LL}$	CERN-EP-2020-066
	CI $tttt$	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	36.1	$\Lambda$ 2.57 TeV	$ C_{4i}  = 4\pi$ 1811.02305
DM	Axial-vector mediator (Dirac DM)	$0 e, \mu$	$1-4 j$	Yes	36.1	$m_{\text{med}}$ 1.55 TeV	$g_q=0.25, g_t=1.0, m(\chi) = 1 \text{ GeV}$
	Colored scalar mediator (Dirac DM)	$0 e, \mu$	$1-4 j$	Yes	36.1	$m_{\text{med}}$ 1.67 TeV	$g=1.0, m(\chi) = 1 \text{ GeV}$
	$VV\chi\chi$ EFT (Dirac DM)	$0 e, \mu$	$1 J, \leq 1 j$	Yes	3.2	$M_s$ 700 GeV	$m(\chi) < 150 \text{ GeV}$
	Scalar reson. $\phi \rightarrow t\chi$ (Dirac DM)	$0-1 e, \mu$	$1 b, 0-1 J$	Yes	36.1	$m_\phi$ 3.4 TeV	$y = 0.4, \lambda = 0.2, m(\chi) = 10 \text{ GeV}$
LQ	Scalar LQ 1 <sup>st</sup> gen	$1, 2 e$	$\geq 2 j$	Yes	36.1	LQ mass 1.4 TeV	$\beta = 1$
	Scalar LQ 2 <sup>nd</sup> gen	$1, 2 \mu$	$\geq 2 j$	Yes	36.1	LQ mass 1.56 TeV	$\beta = 1$
	Scalar LQ 3 <sup>rd</sup> gen	$2 \tau$	$2 b$	-	36.1	LQ <sub>3</sub> mass 1.03 TeV	$\mathcal{B}(LQ_3^+ \rightarrow b\tau) = 1$
	Scalar LQ 3 <sup>rd</sup> gen	$0-1 e, \mu$	$2 b$	Yes	36.1	LQ <sub>3</sub> mass 970 GeV	$\mathcal{B}(LQ_3^+ \rightarrow t\tau) = 0$
Heavy quarks	VLQ $TT \rightarrow Ht/Zt/Wb + X$	multi-channel	-	-	36.1	T mass 1.37 TeV	SU(2) doublet
	VLQ $BB \rightarrow Wt/Zb + X$	multi-channel	-	-	36.1	B mass 1.34 TeV	SU(2) doublet
	VLQ $T_{5/3} T_{5/3} T_{5/3} \rightarrow Wt + X$	$2(SS)/\geq 3 e, \mu \geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	36.1	$T_{5/3}$ mass 1.64 TeV	$\mathcal{B}(T_{5/3} \rightarrow Wt) = 1, c(T_{5/3} Wt) = 1$	
	VLQ $Y \rightarrow Wb + X$	$1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	36.1	Y mass 1.85 TeV	$\mathcal{B}(Y \rightarrow Wb) = 1, c_R(Wb) = 1$
	VLQ $B \rightarrow Hb + X$	$0 e, \mu, 2 \gamma$	$\geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	79.8	B mass 1.21 TeV	$\kappa_B = 0.5$
VLQ $QQ \rightarrow WqWq$	$1 e, \mu$	$\geq 4 j$	Yes	20.3	Q mass 690 GeV	ATLAS-CONF-2018-024 1509.04261	
Excited fermions	Excited quark $q^* \rightarrow qg$	-	$2 j$	-	139	$q^*$ mass 6.7 TeV	only $u^*$ and $d^*$ , $\Lambda = m(q^*)$
	Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$	$1 \gamma$	$1 j$	-	36.7	$q^*$ mass 5.3 TeV	only $u^*$ and $d^*$ , $\Lambda = m(q^*)$
	Excited quark $b^* \rightarrow bg$	-	$1 b, 1 j$	-	36.1	$b^*$ mass 2.6 TeV	
	Excited lepton $\ell^*$	$3 e, \mu$	-	-	20.3	$\ell^*$ mass 3.0 TeV	$\Lambda = 3.0 \text{ TeV}$
	Excited lepton $\nu^*$	$3 e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$\nu^*$ mass 1.6 TeV	$\Lambda = 1.6 \text{ TeV}$
Other	Type III Seesaw	$1 e, \mu$	$\geq 2 j$	Yes	79.8	$N^0$ mass 560 GeV	ATLAS-CONF-2018-020
	LRSM Majorana $\nu$	$2 \mu$	$2 j$	-	36.1	$N_R$ mass 3.2 TeV	$m(W_R) = 4.1 \text{ TeV}$ , $g_L = g_R$
	Higgs triplet $H^{++} \rightarrow \ell\ell$	$2, 3, 4 e, \mu$ (SS)	-	-	36.1	$H^{++}$ mass 870 GeV	DY production
	Higgs triplet $H^{++} \rightarrow \ell\tau$	$3 e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$H^{++}$ mass 400 GeV	DY production, $\mathcal{B}(H^{++} \rightarrow \ell\tau) = 1$
	Multi-charged particles	-	-	-	36.1	multi-charged particle mass 1.22 TeV	DY production, $ q  = 5e$
	Magnetic monopoles	-	-	-	34.4	monopole mass 2.37 TeV	DY production, $ g  = 1g_D$ , spin 1/2

\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

† Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter j (J).