

中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

CMS上通过单轻子末态寻找与顶夸克对耦合的 Z' 粒子

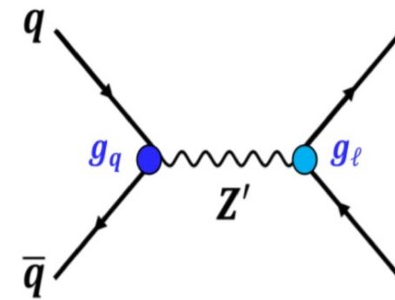
侯霄楠
IHEP

中国物理学会高能物理分会第十二届全国会员代表大会暨学术年会
广州, 广东 Jul 15th, 2026

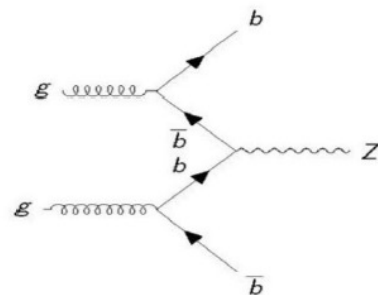


- 粒子物理学的标准模型在解释大量实验结果方面非常有效，但它在解决一些基本问题上仍存在不足。
- 重的中性共振态粒子 Z' 在许多超标准模型的理论中都很常见。
 - 目前主要的产生机制是通过轻夸克对的湮灭。
 - 在 LHC 上，这主要是与轻夸克的耦合。
- 在LHC和CMS上都有着对 Z' 粒子的广泛寻找，并对其存在给出了高达TeV量级的限制。
 - 当轻夸克的耦合被压低时， Z' 粒子将会倾向于通过与高代费米子耦合的方式产生 ([D. Barbosa et al.](#))
 - Z' 粒子可能会存在于至今未发现的产生方式和相空间中 ([P.J. Fox et al.](#))
 - 近些年有很多新关于 Z' 粒子的产生方式：
([EXO-22-006](#), [EXO-21-015](#))

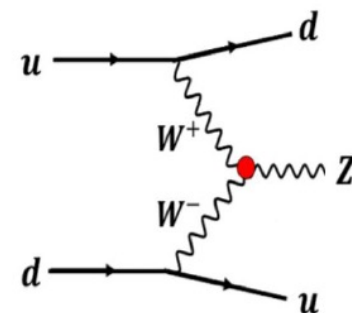
Drell-Yan



b-Quark Fusion



VBF





- 我们采用的模型是定义Z' 粒子为一种仅与顶夸克对耦合的色单态标量粒子 (V1)
- 描述这种模型的相互作用的拉氏量为:

$$L_{int} = \bar{t}\gamma_{\mu}(c_L P_L + c_R P_R)tV_1^{\mu} = c_t \bar{t}\gamma^{\mu}(\cos \theta P_L + \sin \theta P_R)tV_1^{\mu}$$

- 其中 $P_{R/L} = \frac{1 \pm \gamma_5}{2}$ 是投影算符, $c_t = \sqrt{(c_L)^2 + (c_R)^2}$ 是这个色单态标量粒子和顶夸克的耦合强度,
- $\tan \theta = \frac{c_R}{c_L}$ 是手征角。
- 这个模型中有三个自由参数:
 - V1粒子的质量M
 - V1粒子和顶夸克的耦合强度 c_t
 - 手征角 θ
- 不同参数的值决定了不同的产生方式

这个模型的参考文献:

[arXiv:1604.07421](https://arxiv.org/abs/1604.07421)

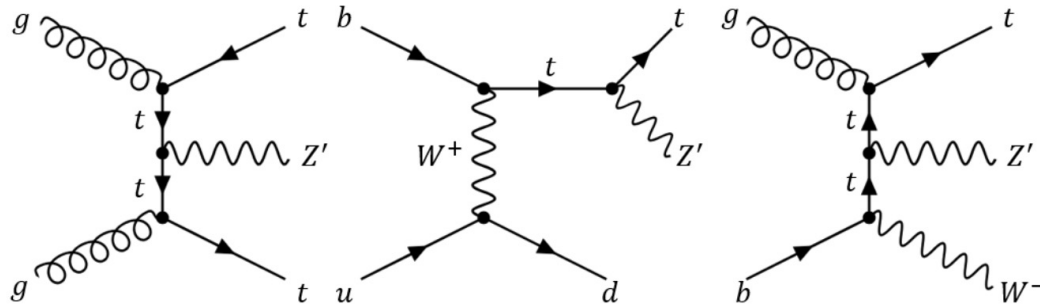


研究内容

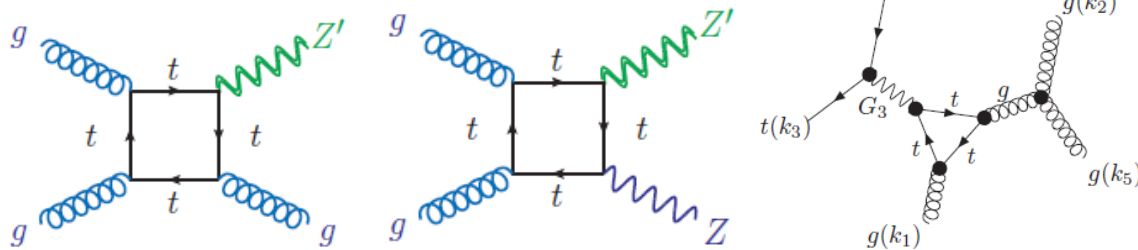
Z' 粒子的不同产生方式

- LHC上对于这种与顶夸克耦合的Z' 粒子主要有两种产生模式：树图水平和圈图水平

- 树图水平：（本课题的研究内容）



- 圈图水平：



手征角 θ	物理意义	实验影响
0	只有左手相互作用	高质量下tWZ' 过程的截面最大
$\frac{\pi}{4}$	无轴向分量	没有tjZ' 过程
$\frac{\pi}{2}$	只有右手相互作用	tWZ' 过程的截面最小
$\frac{3\pi}{4}$	轴向耦合	圈图方式的产生截面最大

- 本课题主要研究 $\theta = \frac{\pi}{4}$ 时树图水平的产生方式
- 主要关注于ttZ' 产生方式



- Top-philic Z' 模型的全部相空间:

	$0\ t_{had}$	$1\ t_{had}$	$2\ t_{had}$	$3\ t_{had}$	$4\ t_{had}$
0 lep				tjZ' or tWZ'	ttZ'
1 lep			tjZ' or tWZ'	ttZ' or tWZ'	
2 lep		tjZ' or tWZ'	ttZ' or tWZ'		
3 lep	tjZ' or tWZ'	ttZ' or tWZ'			
4 lep	ttZ' or tWZ'				

本课题所研究的内容

- 本课题主要关注于单轻子（电子/缪子）衰变末态

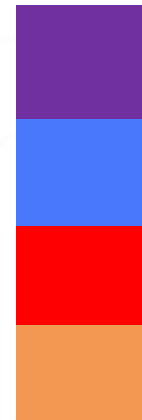
- 可以大幅度压低QCD本底
- 单轻子触发的效率较高

- 目前CMS上还有一个DESY团队在从事di-lepton末态的研究（今后可以进行比较和combine）



- 本课题所采用的本底MC样本:

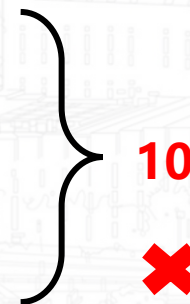
- 顶夸克对过程 ($t\bar{t}$ 包含全强衰变, 半轻衰变和全轻衰变)
- 标准模型的四顶夸克过程 (tttt)
- 其他别的顶夸克本底过程 (tttj/tttW, tt+V/VV, single-top, tZq)
- 其他不包含顶夸克的本底过程 (V/VV/VVV/Drell-Yan)



- 本课题所使用的信号样本:

- 质量点间隔如下:

- 从500GeV到2000GeV, 每间隔250GeV为一个质量点
- 从2000GeV到3000GeV, 每间隔500GeV为一个质量点
- 从3000GeV到4000GeV, 每间隔1000GeV为一个质量点



10

×

4

40

- 所使用的质量宽度 Γ/M_{Z_i} 分别为: 4%, 10%, 20%和50%



- 有且仅有一个轻子:

单轻子末态

- 一个tight缪子 && 0个额外的loose缪子和电子
- 一个tight电子 && 0个额外的loose电子和缪子

- 官方的单轻子触发

基本与标准模型的四顶夸克的分析保持一致，略有调整和提升。

- $HT > 700 \text{ GeV}$

- $MET_{pT} > 60 \text{ GeV}$

- ≥ 6 AK4 jets
- ≥ 2 boosted tops
- ≥ 1 loose b jets

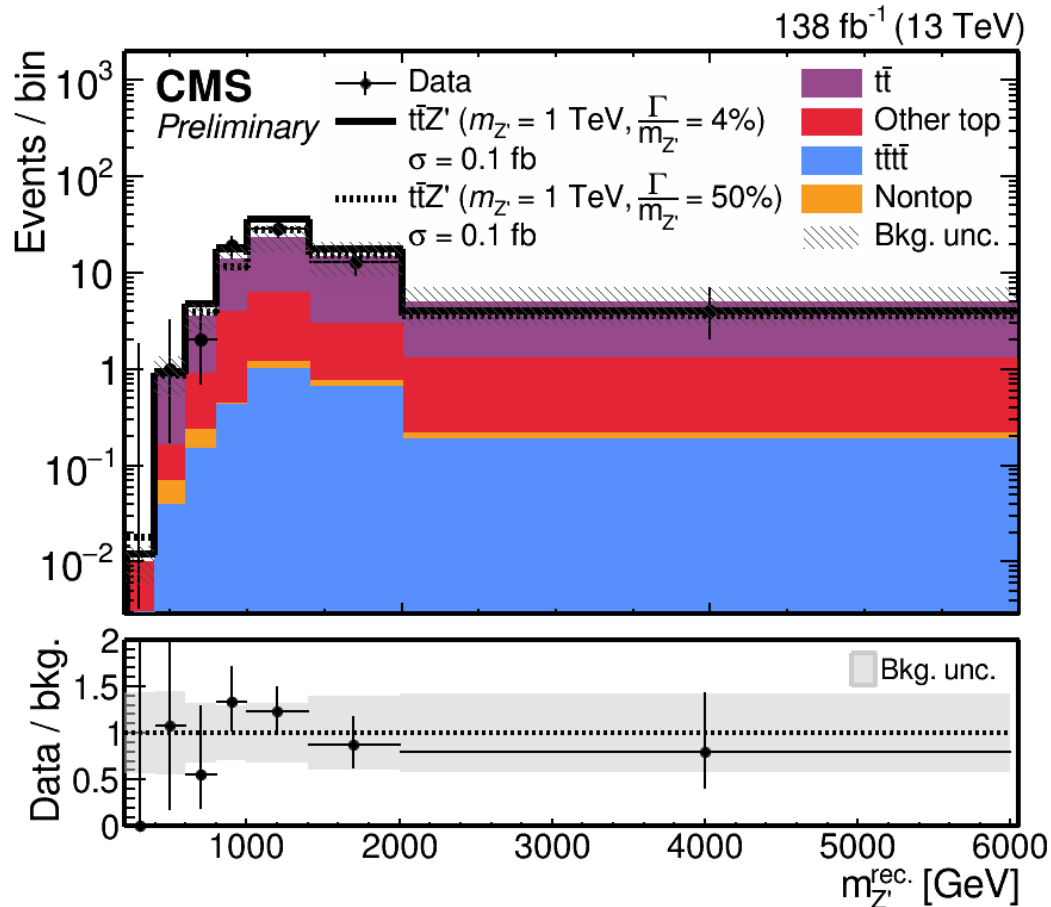
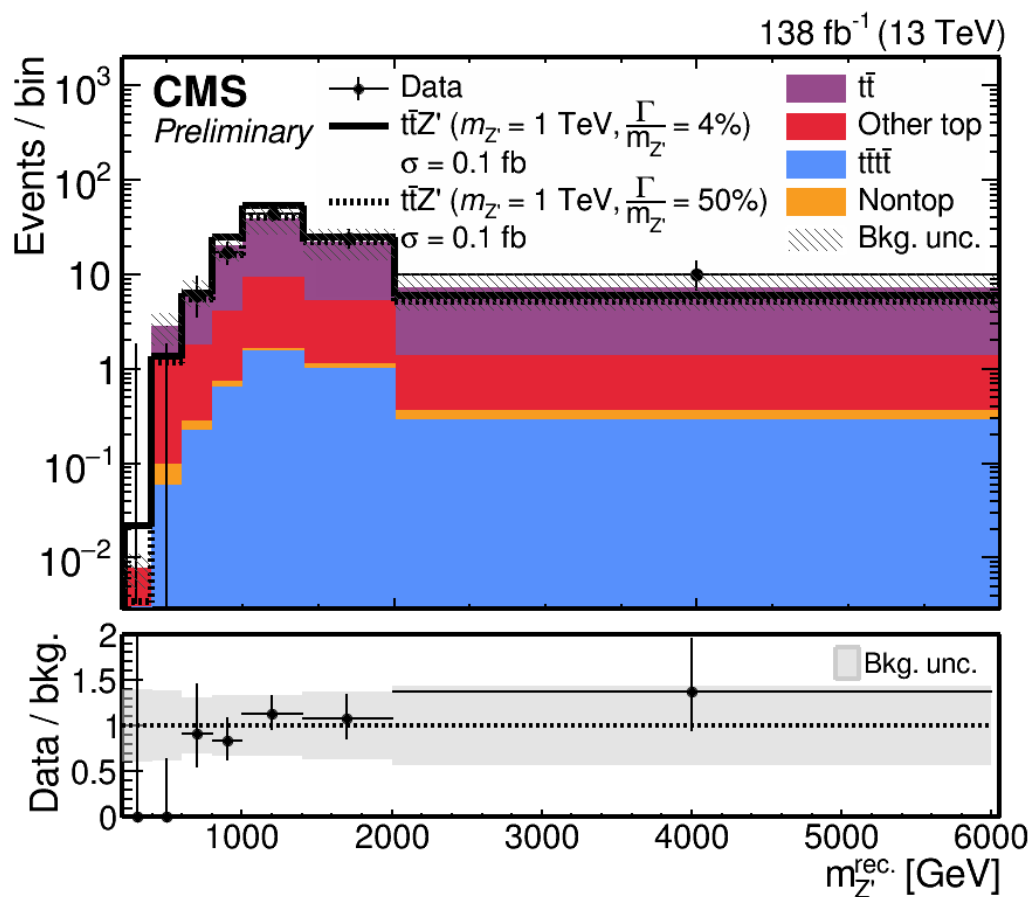
将HT, AK4 jets 的数量的要求提高
加入boosted tops个数的要求

突出对高质量的Z' 粒子的寻找的特点

2 boosted tops + 1 b (顶夸克轻子衰变) + 1b 2AK4 (顶夸克强衰变)



- 区分变量分布: ($M_{Z'}$ = 重建出的拥有最高横动量的前两个顶夸克的不变质量)



- 主要本底是 $t\bar{t}$, 其他不含顶夸克的本底过程占比非常少



- 定义一个与信号区间完全正交但又几乎没有信号样本的区间作为控制区间

信号区间	控制区间
有且仅有一个轻子	有且仅有一个轻子
单轻子触发	单轻子触发
$HT > 700 \text{ GeV}$	$HT > 700 \text{ GeV}$
$MET_{pT} > 60 \text{ GeV}$	$MET_{pT} > 60 \text{ GeV}$
$\geq 6 \text{ AK4 jets}$	$\geq 6 \text{ AK4 jets}$
$\geq 2 \text{ boosted tops}$	$\geq 2 \text{ boosted tops}$
$\geq 1 \text{ loose b jets}$	$< 1 \text{ loose b jets}$

- 信号样本在这两个区间的效率比较

效率	信号区间	控制区间
质量500GeV, 宽度4%	0.15070%	0.02310%
质量3TeV, 宽度4%	2.48830%	0.22740%

- 信号在控制区间只有信号区间的十分之一 → 信号区间和控制区间同时拟合



• 本底成分对比

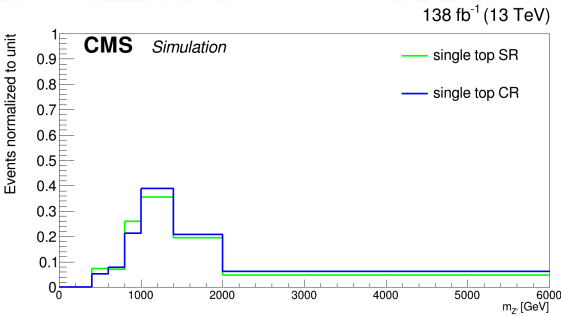
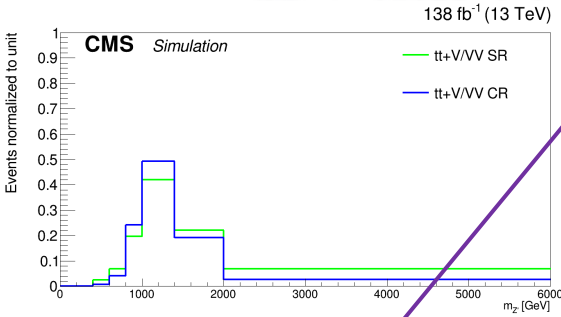
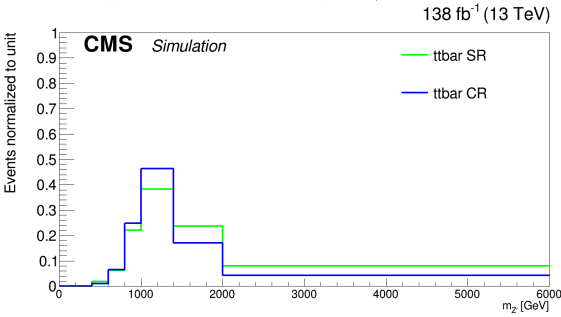
BKG samples	$t\bar{t}$	other top (ttt, tt+V/VV, single top)	tttt	Non top (V/VV/VVV/DY)
signal region	74.74%	20.72%	3.99%	0.55%
control region	67.86%	30.48%	0.51%	1.15%

组成成分非常相似

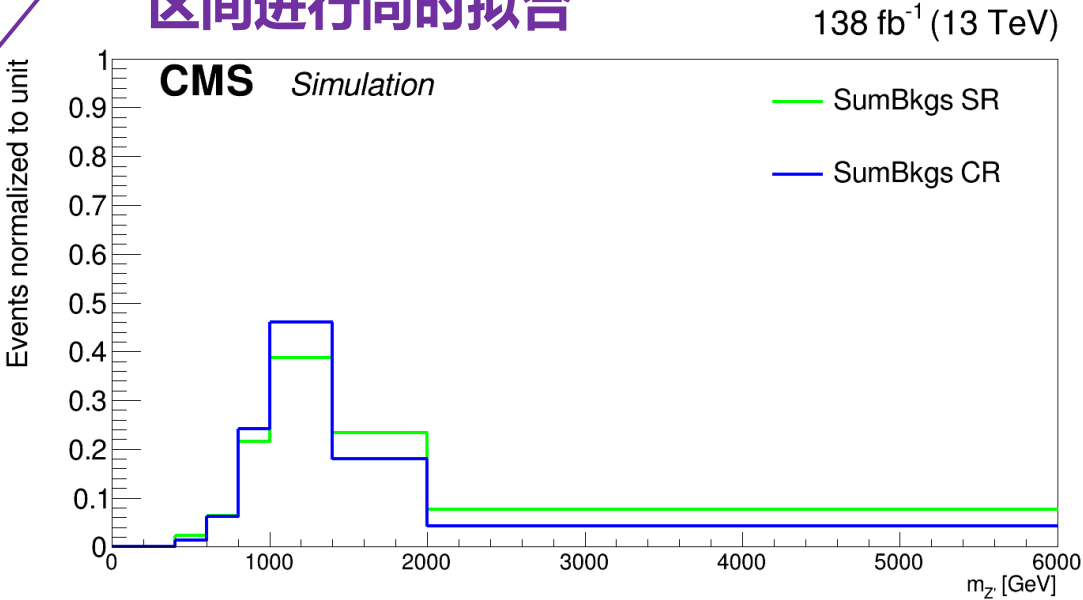
可以用来进行本底估计:

• 本底形状对比

使用 **rate parameter**, 并对信号区间和控制区间进行同时拟合

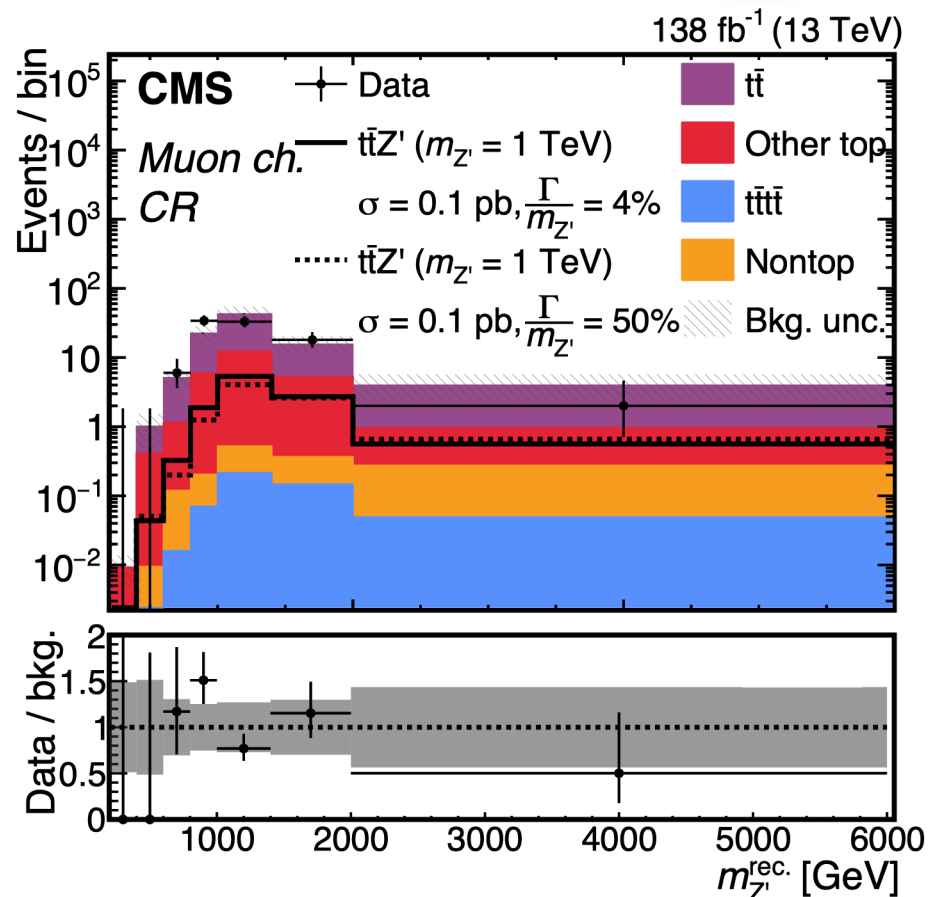
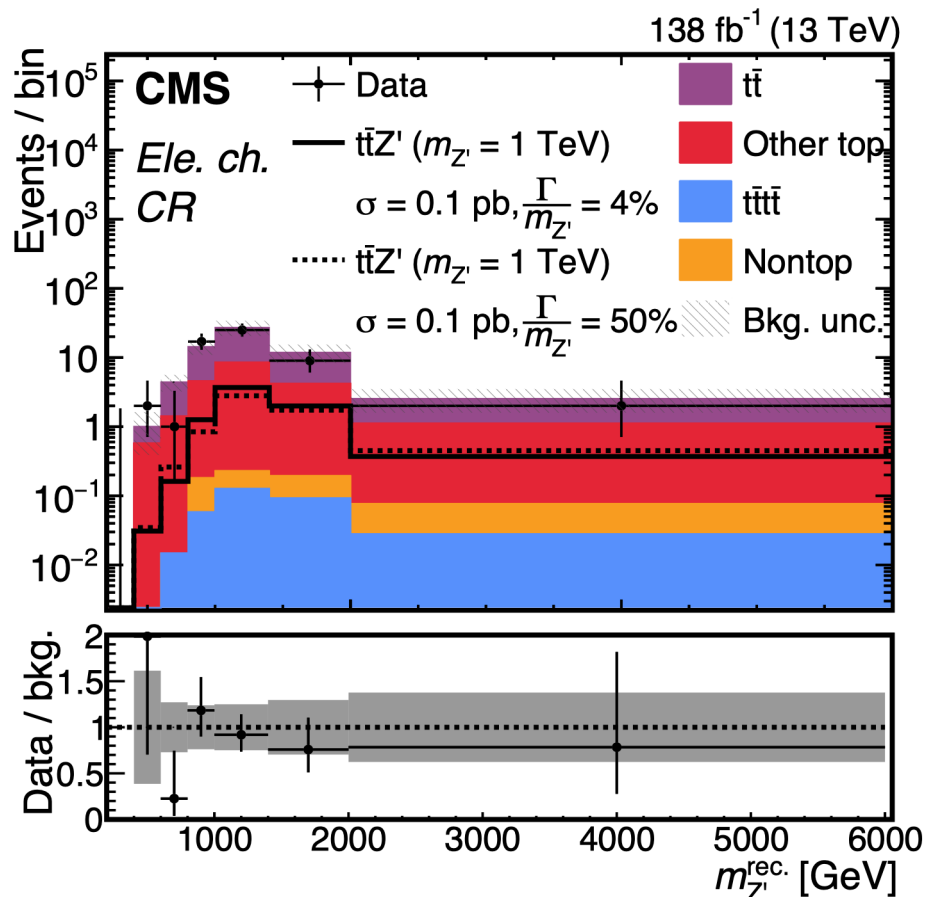


形状分布非常相似





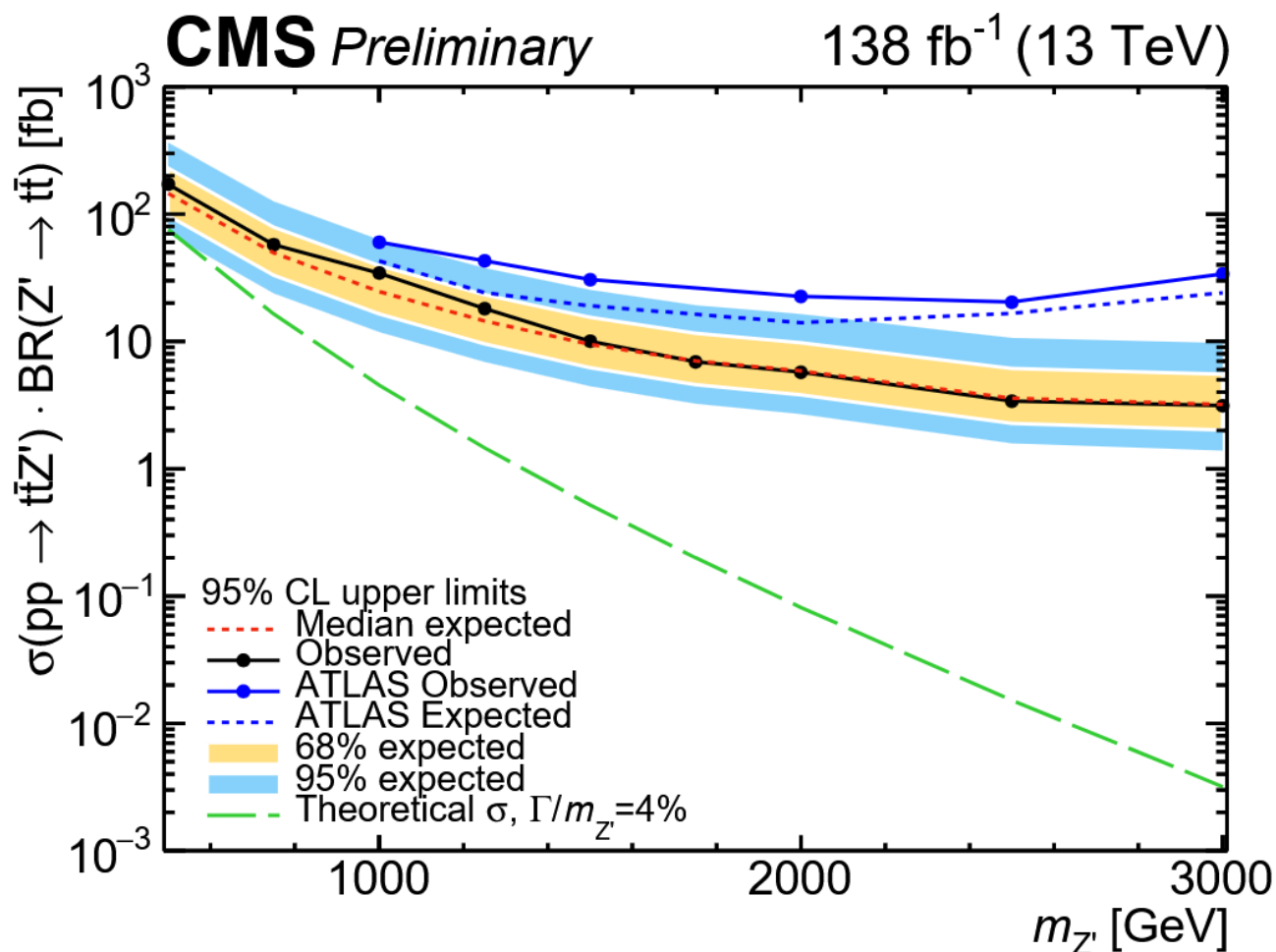
- 控制区间的Post-fit 分布:



- 数据和MC在误差范围内是一致的



- 宽度 ($\Gamma/M_{Z'}$) 为4%的信号的整体Run2结果, 并于ATLAS组的结果进行比较:



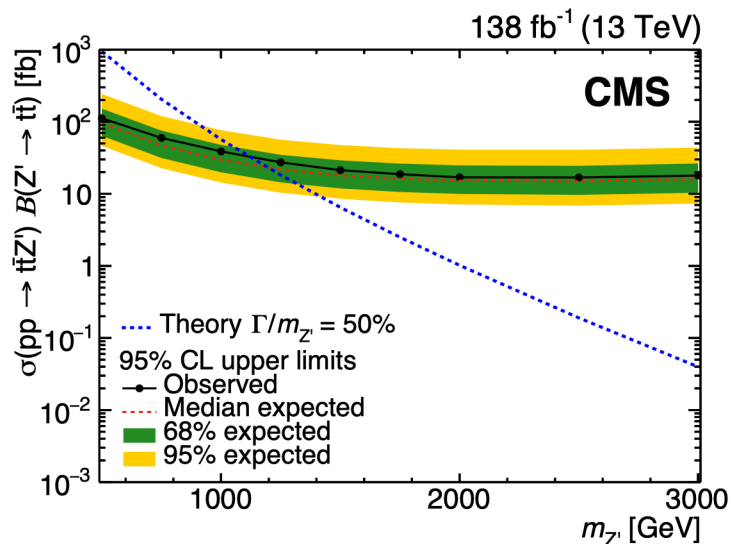
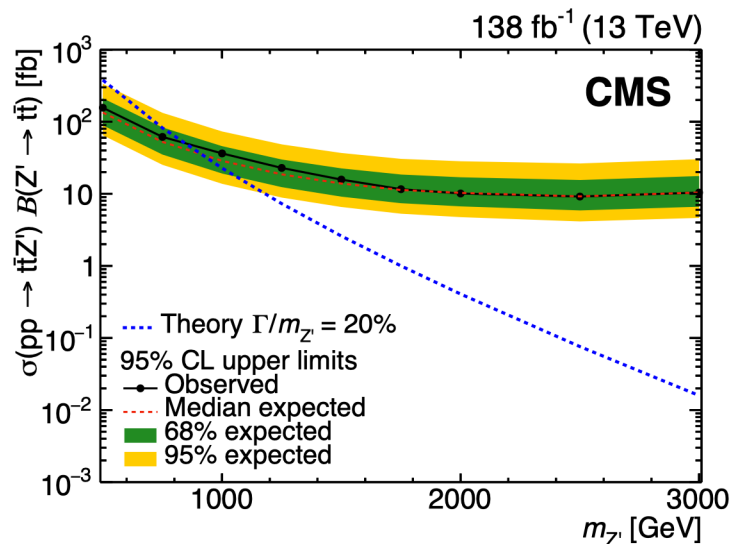
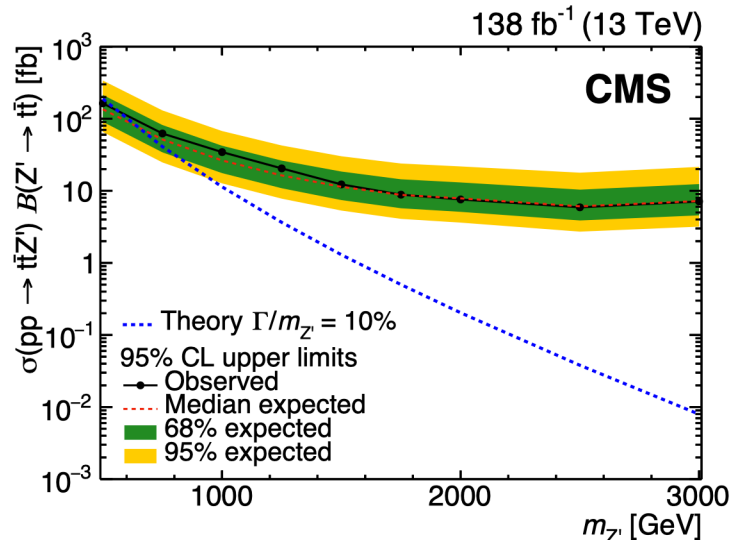
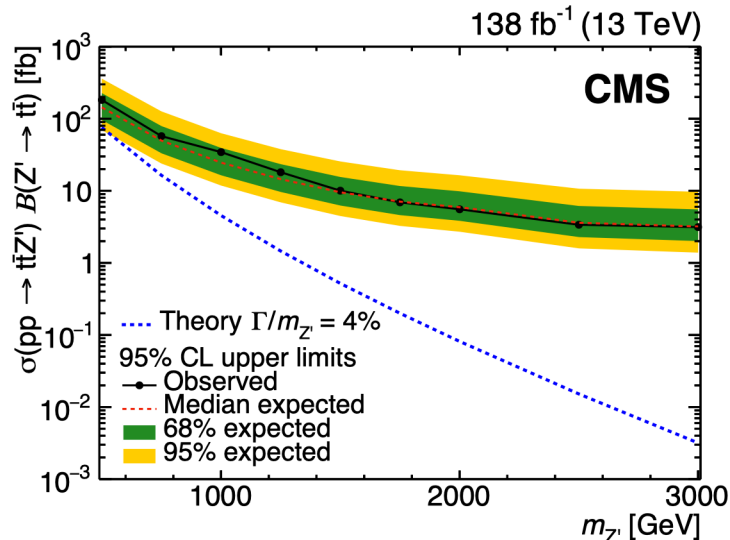
Branch ratio ($Z' \rightarrow t\bar{t}$) = 1

- 我们比ATLAS合作组研究的范围更广
 - 我们从500GeV开始, ATLAS从1TeV开始
- 我们在每一个质量点的结果都优于ATLAS合作组的结果
- 高质量点的灵敏度有显著优势
 - particleNet顶夸克重建算法的使用

3-170 fb⁻¹



- 四个宽度 ($\Gamma/M_{Z'}$) = 4%, 10%, 20%和50%下的整个Run2的结果:



Branch ratio ($Z' \rightarrow t\bar{t}$) = 1

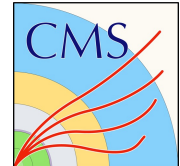
Limit结果分别为:

3-170 fb⁻¹ 4%

6-160 fb⁻¹ 10%

9-160 fb⁻¹ 20%

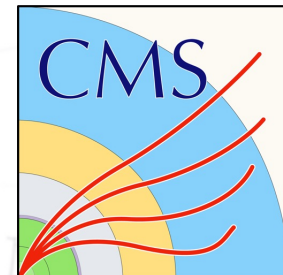
17-110 fb⁻¹ 50%



- 本课题展示了CMS上通过单轻子末态寻找与一对顶夸克联合产生并且衰变为一对顶夸克的 Z' 粒子的分析
- 这是CMS实验上**第一次**利用与顶夸克耦合的模型来寻找此类 Z' 粒子，并给出了目前**最严格**的限制
- 使用particleNet算法来鉴别boosted顶夸克，极大的提升了灵敏度
- 将寻找范围扩展到500GeV
- 本底分析过程中使用了一个与信号区间正交，并且本底组成和形状分布完全一致的控制区间
- 状态: **Ready-For-Submission**
- 预期投稿: **JHEP**



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences



Thanks!

格博
物学
明德
格
物
明
德
格
物
明
德

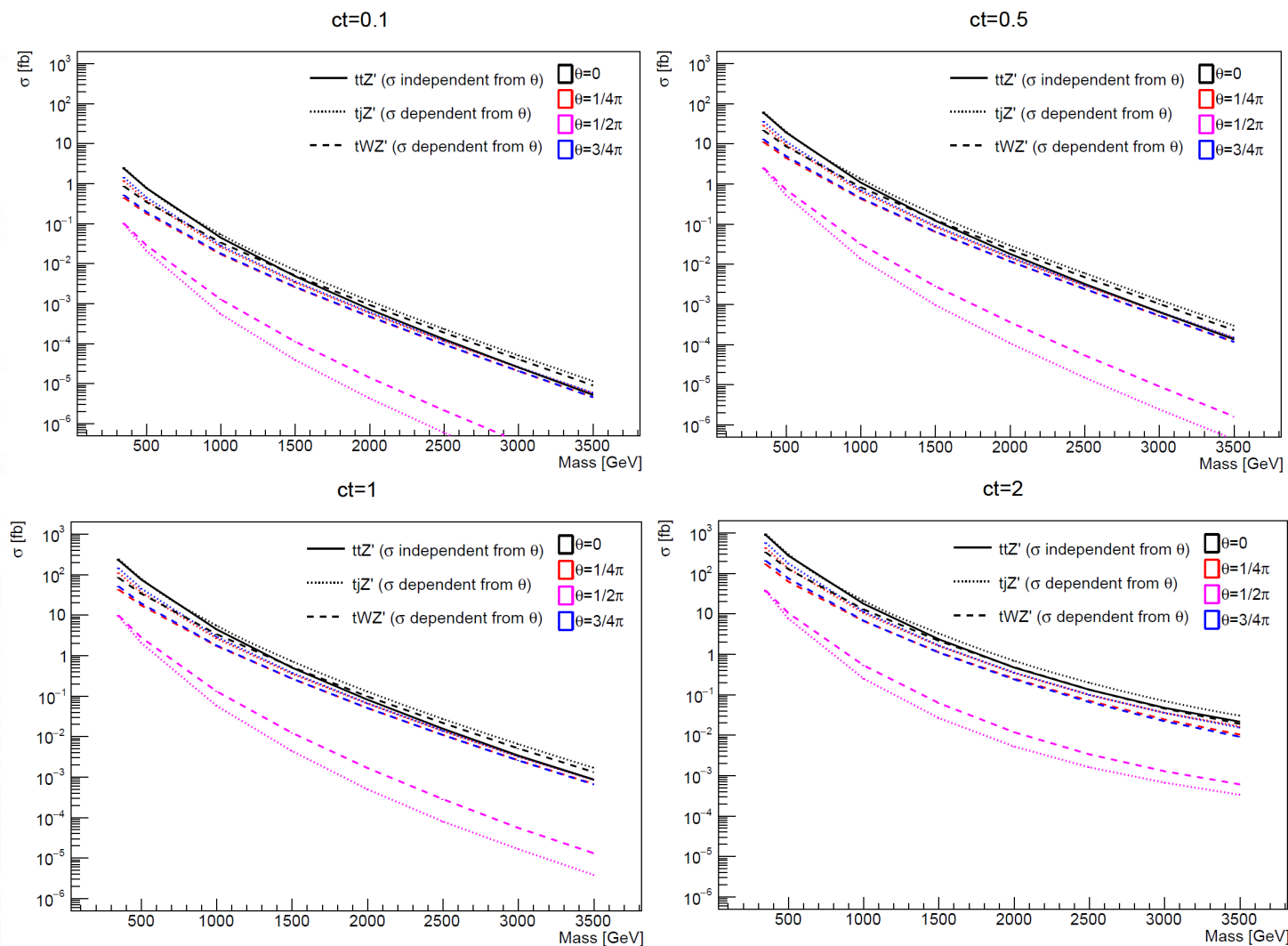


BackUp

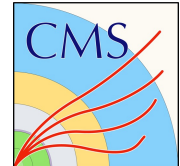




- 不同产生模式与耦合强度 c_t 的关系:



- 不同的耦合强度值 c_t 只是将产生截面同比例的放大或缩小了一个相同的值。
- ttZ' 产生方式与 θ 无关。
- 本课题使用 $c_t = 1$ 时的产生模式, 与ATLAS实验的相关研究保持一致 ([arXiv:2304.01678](https://arxiv.org/abs/2304.01678))。



- 本课题所采用的数据样本是CMS探测器在质心能量为13TeV下的整个Run2（2016-2018）的单轻子对撞数据：

年份及亮度	数据样本
2018 (59.83 fb^{-1})	/SingleMuon/Run2018A-UL2018_MiniAODv2_NanoAODv9-v2 /SingleMuon/Run2018B-UL2018_MiniAODv2_NanoAODv9-v2 /SingleMuon/Run2018C-UL2018_MiniAODv2_NanoAODv9-v2 /SingleMuon/Run2018D-UL2018_MiniAODv2_NanoAODv9-v2 /EGamma/Run2018A-UL2018_MiniAODv2_NanoAODv9-v1 /EGamma/Run2018B-UL2018_MiniAODv2_NanoAODv9-v1 /EGamma/Run2018C-UL2018_MiniAODv2_NanoAODv9-v1 /EGamma/Run2018D-UL2018_MiniAODv2_NanoAODv9-v3
2017 (41.48 fb^{-1})	/SingleMuon - SingleElectron/Run2017B-UL2017_MiniAODv2_NanoAODv9-v1 /SingleMuon - SingleElectron/Run2017C-UL2017_MiniAODv2_NanoAODv9-v1 /SingleMuon - SingleElectron/Run2017D-UL2017_MiniAODv2_NanoAODv9-v1 /SingleMuon - SingleElectron/Run2017E-UL2017_MiniAODv2_NanoAODv9-v1 /SingleMuon - SingleElectron/Run2017F-UL2017_MiniAODv2_NanoAODv9-v1
2016 pre-VFP (19.50 fb^{-1})	/SingleMuon - SingleElectron/Run2016B-ver1_HIPM_UL2016_MiniAODv2_NanoAODv9-v2 /SingleMuon - SingleElectron/Run2016B-ver2_HIPM_UL2016_MiniAODv2_NanoAODv9-v2 /SingleMuon - SingleElectron/Run2016C-HIPM_UL2016_MiniAODv2_NanoAODv9-v2 /SingleMuon - SingleElectron/Run2016D-HIPM_UL2016_MiniAODv2_NanoAODv9-v2 /SingleMuon - SingleElectron/Run2016E-HIPM_UL2016_MiniAODv2_NanoAODv9-v2 /SingleMuon - SingleElectron/Run2016F-HIPM_UL2016_MiniAODv2_NanoAODv9-v2
2016 post-VFP (16.81 fb^{-1})	/SingleMuon - SingleElectron/Run2016F-UL2016_MiniAODv2_NanoAODv9-v1 /SingleMuon - SingleElectron/Run2016G-UL2016_MiniAODv2_NanoAODv9-v1 /SingleMuon - SingleElectron/Run2016H-UL2016_MiniAODv2_NanoAODv9-v1

- 其中2016年的数据被分为两个不同的时期：**2016 pre-VFP** 和 **2016 post-VFP**。由于这两个时期之间的探测器条件发生了很大变化，因此对这两个时期进行了单独处理。



- 本课题所采用的本底MC样本:

类别	样本名称	截面 (pb)
标准模型的四顶夸克过程	TTTT_TuneCP5_13TeV-amcatnlo-pythia8	0.012
顶夸克对过程	TTToHadronic_TuneCP5_13TeV-powheg-pythia8	383.59
	TTToSemiLeptonic_TuneCP5_13TeV-powheg-pythia8	366.92
	TTTo2L2Nu_TuneCP5_13TeV-powheg-pythia8	83.39
其他别的顶夸克本底过程	TTTJ_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	0.000474
	TTTW_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	0.000788
	ttWJets_TuneCP5_13TeV_madgraphMLM_pythia8	0.6962
	ttZJets_TuneCP5_13TeV_madgraphMLM_pythia8	1.015
	ttHJetTobb_M125_TuneCP5_13TeV_amcatnloFXFX_madspin_pythia8	0.2897
	ttHJetToNonbb_M125_TuneCP5_13TeV_amcatnloFXFX_madspin_pythia8	0.209
	TTGJets_TuneCP5_13TeV-amcatnloFXFX-madspin-pythia8	3.697
	TTWW_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	0.00838
	TTWZ_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	0.004884
	TTWH_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	0.001582
	TTZZ_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	0.002705
	TTZH_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	0.001535
	TTHH_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	0.000756
	ST_s-channel_4f_leptonDecays_TuneCP5_13TeV-amcatnlo-pythia8	3.36
	ST_s-channel_4f_hadronicDecays_TuneCP5_13TeV-amcatnlo-pythia8	6.96
	ST_tW_antitop_5f_inclusiveDecays_TuneCP5_13TeV-powheg-pythia8	39.65
	ST_tW_top_5f_inclusiveDecays_TuneCP5_13TeV-powheg-pythia8	39.65
	ST_t-channel_top_4f_InclusiveDecays_TuneCP5_13TeV-powheg-madspin-pythia8	134.2
	ST_t-channel_antitop_4f_InclusiveDecays_TuneCP5_13TeV-powheg-madspin-pythia8	80.0
	tZq_ll_4f_ckm_NLO_TuneCP5_13TeV-amcatnlo-pythia8	0.0758



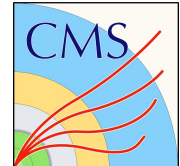
- 本课题所采用的本底MC样本:

类别	样本名称	截面 (pb)
其他不包含顶夸克的本底过程	WJetsToLNu_HT-70To100_TuneCP5_13TeV-madgraphMLM-pythia8	1595.99
	WJetsToLNu_HT-100To200_TuneCP5_13TeV-madgraphMLM-pythia8	1627.45
	WJetsToLNu_HT-200To400_TuneCP5_13TeV-madgraphMLM-pythia8	435.237
	WJetsToLNu_HT-400To600_TuneCP5_13TeV-madgraphMLM-pythia8	58
	WJetsToLNu_HT-600To800_TuneCP5_13TeV-madgraphMLM-pythia8	13
	WJetsToLNu_HT-800To1200_TuneCP5_13TeV-madgraphMLM-pythia8	5.4
	WJetsToLNu_HT-1200To2500_TuneCP5_13TeV-madgraphMLM-pythia8	1.07
	WJetsToLNu_HT-2500ToInf_TuneCP5_13TeV-madgraphMLM-pythia8	0.008
	WW_TuneCP5_13TeV-pythia8	110.8
	WZ_TuneCP5_13TeV-pythia8	47.13
	ZZ_TuneCP5_13TeV-pythia8	16.523
	WWW_4F_TuneCP5_13TeV-amcatnlo-pythia8	0.209
	WWZ_4F_TuneCP5_13TeV-amcatnlo-pythia8	0.168
	WZZ_TuneCP5_13TeV-amcatnlo-pythia8	0.057
	ZZZ_TuneCP5_13TeV-amcatnlo-pythia8	0.0147
	WGToLNuG_01J_5f_TuneCP5_13TeV-amcatnloFXFX-pythia8	192
	ZGToLLG_01J_5f_TuneCP5_13TeV-amcatnloFXFX-pythia8	55.6
	VHToNonbb_M125_TuneCP5_13TeV-amcatnloFXFX_madspin_pythia8	0.946
	DYJetsToLL_M-10to50_TuneCP5_13TeV-madgraphMLM-pythia8	18610
	DYJetsToLL_M-50_TuneCP5_13TeV-amcatnloFXFX-pythia8	6077



- 本课题所采用的信号样本：

质量点	样本名称	截面 (pb)
M500	TTZprimeToTT_M-500_Width4_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	7.56e-02
	TTZprimeToTT_M-500_Width10_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	7.56e-02 (×2.5)
	TTZprimeToTT_M-500_Width20_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	7.56e-02 (×5)
	TTZprimeToTT_M-500_Width50_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	7.56e-02 (×12.5)
M750	TTZprimeToTT_M-750_Width4_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.64e-02
	TTZprimeToTT_M-750_Width10_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.64e-02 (×2.5)
	TTZprimeToTT_M-750_Width20_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.64e-02 (×5)
	TTZprimeToTT_M-750_Width50_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.64e-02 (×12.5)
M1000	TTZprimeToTT_M-1000_Width4_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	4.54e-03
	TTZprimeToTT_M-1000_Width10_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	4.54e-03 (×2.5)
	TTZprimeToTT_M-1000_Width20_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	4.54e-03 (×5)
	TTZprimeToTT_M-1000_Width50_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	4.54e-03 (×12.5)
M1250	TTZprimeToTT_M-1250_Width4_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.46e-03
	TTZprimeToTT_M-1250_Width10_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.46e-03 (×2.5)
	TTZprimeToTT_M-1250_Width20_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.46e-03 (×5)
	TTZprimeToTT_M-1250_Width50_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.46e-03 (×12.5)
M1500	TTZprimeToTT_M-1500_Width4_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	5.19e-04
	TTZprimeToTT_M-1500_Width10_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	5.19e-04 (×2.5)
	TTZprimeToTT_M-1500_Width20_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	5.19e-04 (×5)
	TTZprimeToTT_M-1500_Width50_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	5.19e-04 (×12.5)



- 本课题所采用的信号样本：

质量点	样本名称	截面 (pb)
M1750	TTZprimeToTT_M-1750_Width4_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	2.00e-04
	TTZprimeToTT_M-1750_Width10_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	2.00e-04 (×2.5)
	TTZprimeToTT_M-1750_Width20_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	2.00e-04 (×5)
	TTZprimeToTT_M-1750_Width50_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	2.00e-04 (×12.5)
M2000	TTZprimeToTT_M-2000_Width4_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	8.14e-05
	TTZprimeToTT_M-2000_Width10_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	8.14e-05 (×2.5)
	TTZprimeToTT_M-2000_Width20_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	8.14e-05 (×5)
	TTZprimeToTT_M-2000_Width50_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	8.14e-05 (×12.5)
M2500	TTZprimeToTT_M-2500_Width4_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.52e-05
	TTZprimeToTT_M-2500_Width10_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.52e-05 (×2.5)
	TTZprimeToTT_M-2500_Width20_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.52e-05 (×5)
	TTZprimeToTT_M-2500_Width50_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.52e-05 (×12.5)
M3000	TTZprimeToTT_M-3000_Width4_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	3.18e-06
	TTZprimeToTT_M-3000_Width10_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	3.18e-06 (×2.5)
	TTZprimeToTT_M-3000_Width20_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	3.18e-06 (×5)
	TTZprimeToTT_M-3000_Width50_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	3.18e-06 (×12.5)
M4000	TTZprimeToTT_M-4000_Width4_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.60e-07
	TTZprimeToTT_M-4000_Width10_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.60e-07 (×2.5)
	TTZprimeToTT_M-4000_Width20_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.60e-07 (×5)
	TTZprimeToTT_M-4000_Width50_TuneCP5_13TeV-madgraph-pythia8	1.60e-07 (×12.5)



- 本课题中所有的物理对象都使用的是CMS官方推荐的定义和要求

- 缪子:

$|\eta| < 2.4, p_T > 26 \text{ GeV}$ (15GeV loose)

$D_{xy} < 0.2, D_z < 0.5$

使用cutbased ID的tight工作点, loose工作点作为veto使用

- 电子:

$|\eta| < 2.5$, 除去 $1.4442 < |\eta| < 1.566$ 的区域

$p_T > 33 \text{ GeV}$ (15 GeV loose)

使用MVA ID的tight工作点, loose工作点作为veto使用

电磁量能器桶部和端盖中间的连接处

- AK8 jets:

$p_T > 300 \text{ GeV}, |\eta| < 2.4$, 和前面定义的轻子不重叠

- AK4 jets:

$p_T \geq 30 \text{ GeV}, |\eta| < 2.5$ (2.4 for 2016)

与前面定义的轻子和AK8 jets不重叠

- b jets:

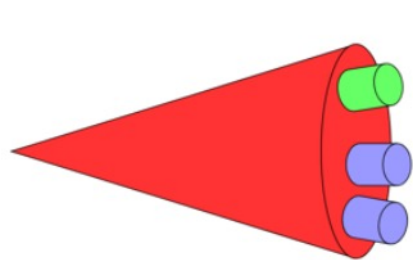
通过DeepJet 底夸克鉴别算法的AK4 jets

- 单轻子触发 (HLT) :

Year	Channel	Trigger
2018	muon	HLT_IsoMu24 HLT_IsoTkMu24
2017	muon	HLT_IsoMu27
2016	muon	HLT_IsoMu24 HLT_IsoTkMu24
2018	electron	HLT_Ele32_WPTight_Gsf
2017	electron	HLT_Ele32_WPTight_Gsf_L1DoubleEG with hltEGL1SingleEGOrFilter
2016	electron	HLT_Ele25_eta2p1_WPTight_Gsf

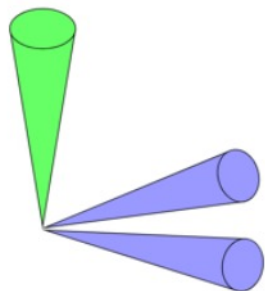


- 本课题中涉及的顶夸克主要有以下三类:



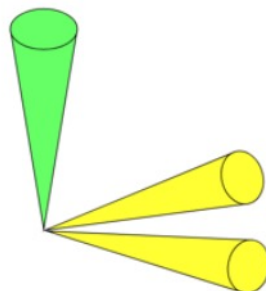
Fully boosted top

$t_{\{Wh+b\}}$



Resolved hadronic top

t_{Wh+b}



Resolved leptonic top

$t_{W\ell+b}$

- Fully boosted top:
通过了particleNet top tagger的AK8 jets
- Resolved hadronic top:
1 loose b jet + 2 AK4 jets (不是b jets)
- Resolved leptonic top:
1 loose b jet + 1 lep + MET

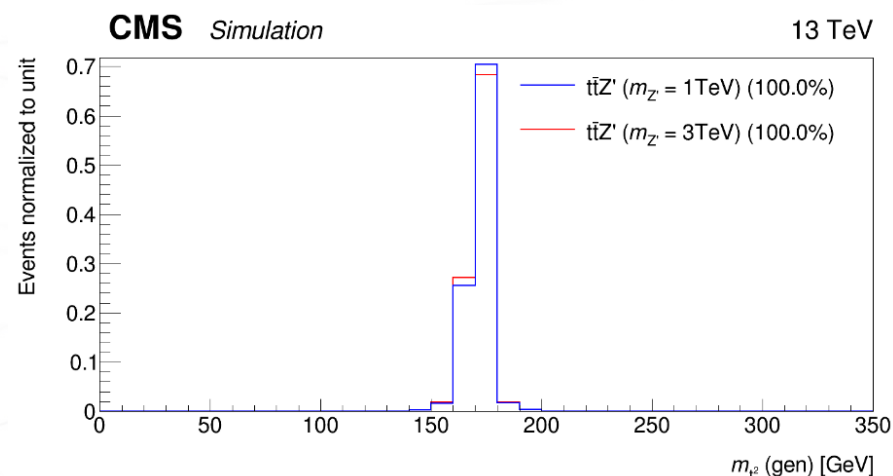
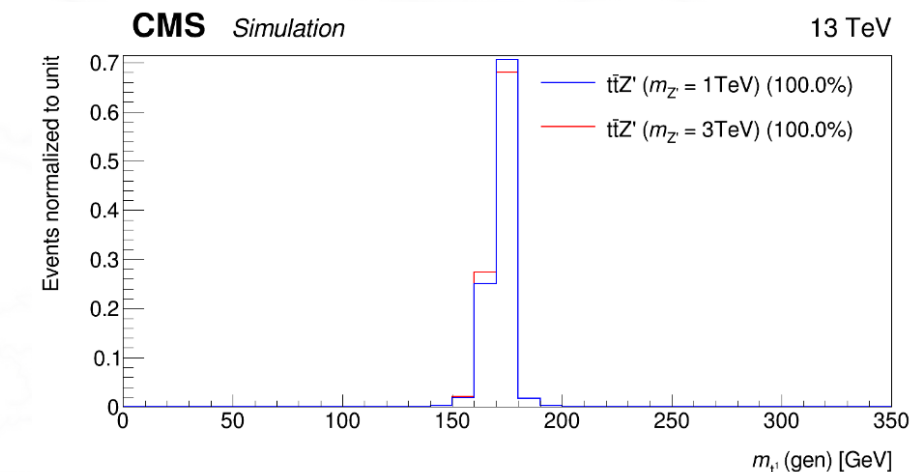
- 重建步骤

- 全部重建以上三种顶夸克候选事例 (无论他们在重建中是否使用了相同的成分)
- 我们定义 $\chi^2 = \left(\frac{recoTopmass - genTopmass}{\sigma_t}\right)^2 + \left(\frac{recoWmass - genWmass}{\sigma_W}\right)^2$, 并将所有重建出来的顶夸克候选者按照 χ^2 上升的顺序排列 (定义第一种fully boosted top的 $\chi^2 = 0$, σ_t 和 σ_W 从与产生子的匹配 (gen-matching) 得来)
- 挑选出 χ^2 靠前且小于5的顶夸克候选者, 并且挑选出的后一个顶夸克不能包含与前一个顶夸克相同的成分

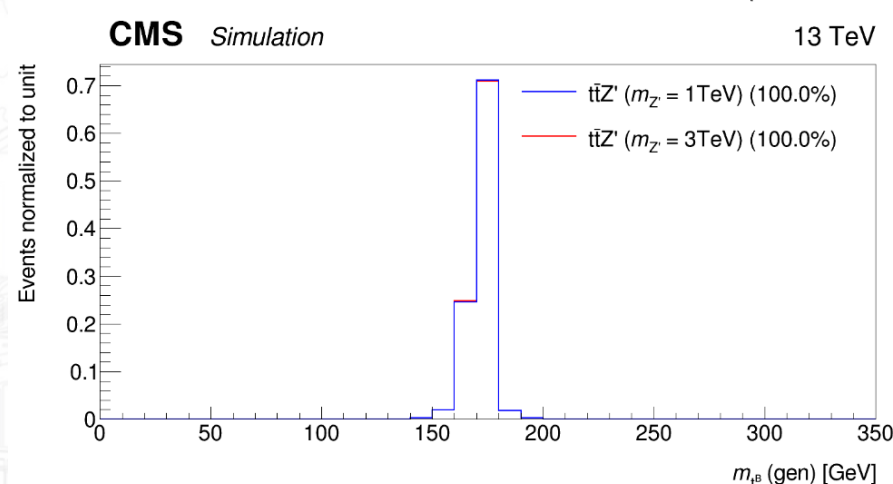
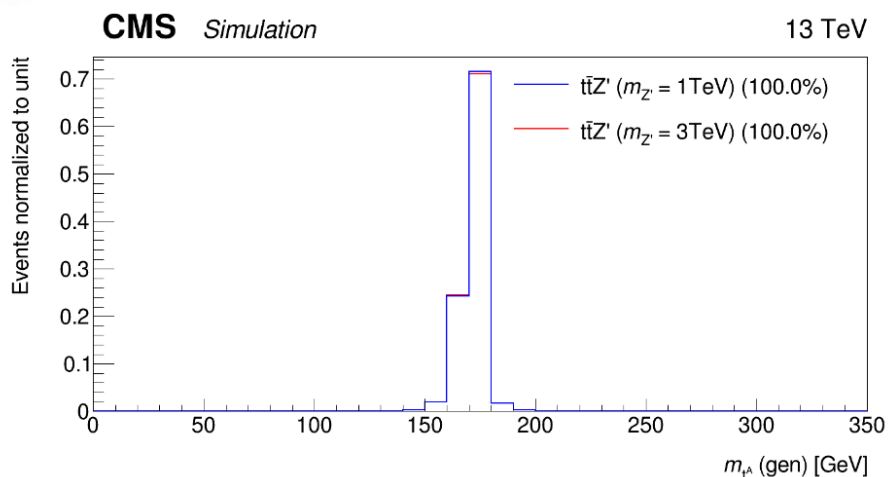


- σ_t 和 σ_W 的研究:

- 产生子级别的研究: 利用衰变链直接拿到四个顶夸克的质量分布



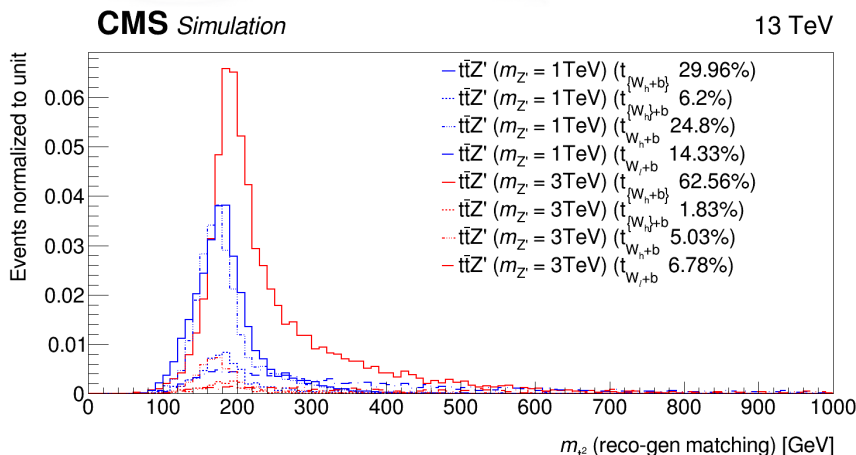
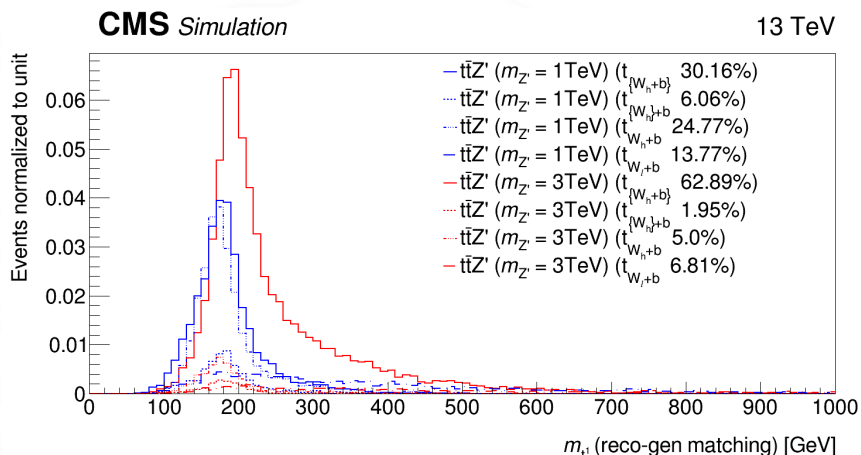
符合理论预期



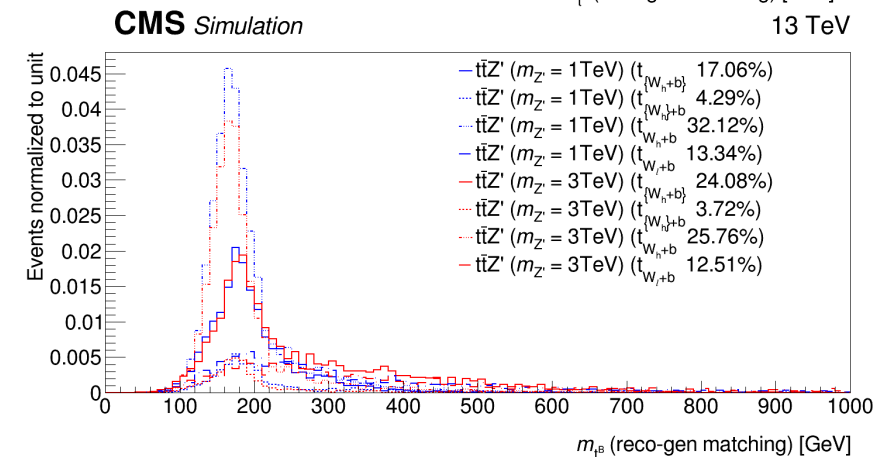
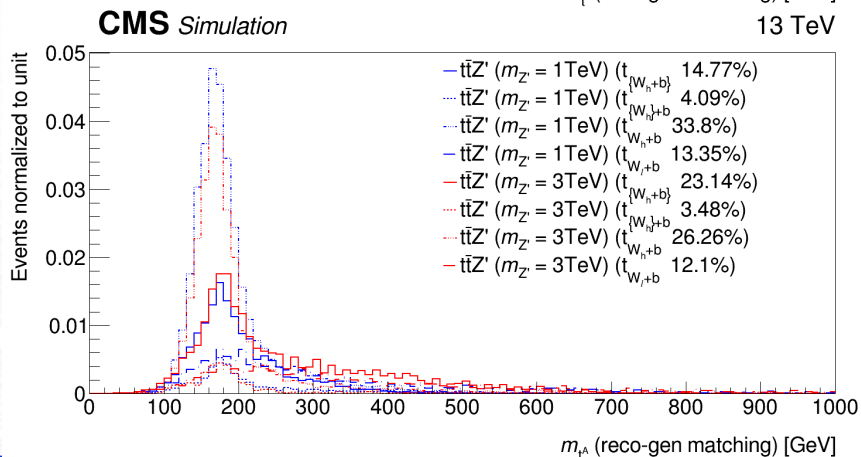


- σ_t 和 σ_W 的研究:

- 产生子级别和重建级别的匹配: 将重建出的顶夸克与产生子级别的4个顶夸克进行匹配, 计算 $dR = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\varphi^2} < 0.4$, 即为匹配上。由此得到与产生子匹配上的重建出的顶夸克如下:



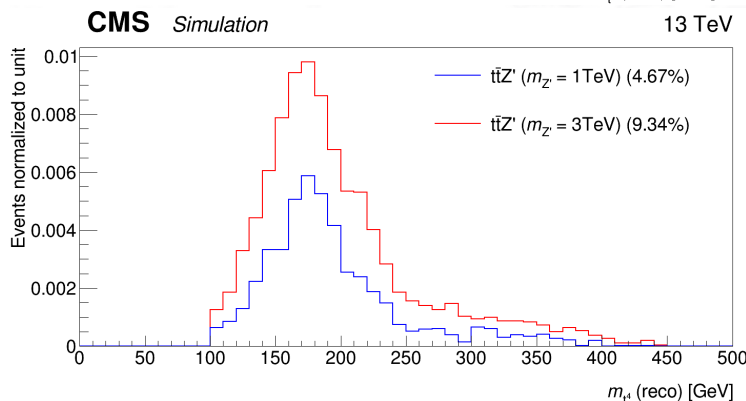
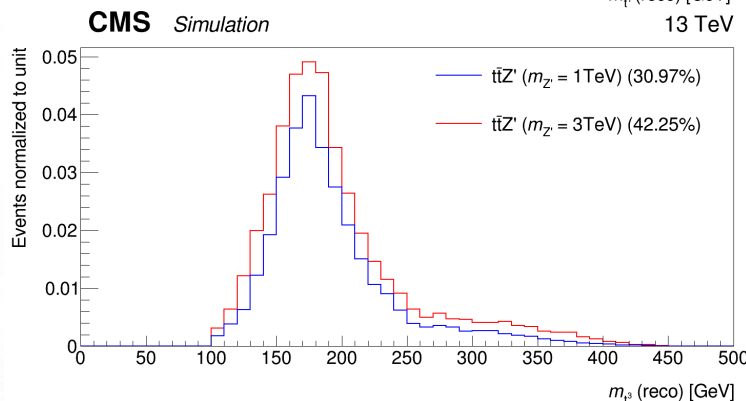
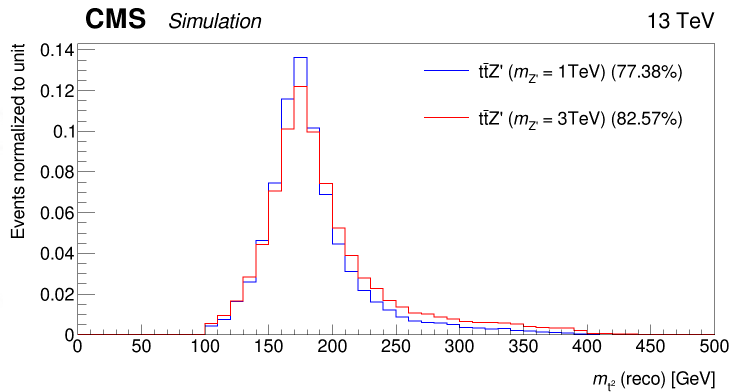
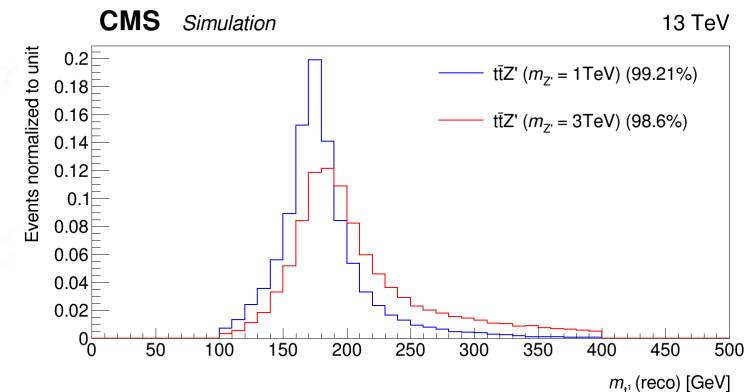
此过程中得到的RMS作为 σ_t



同理与W相匹配能得到 σ_W



- 重建出来的四个顶夸克及相应重建效率:



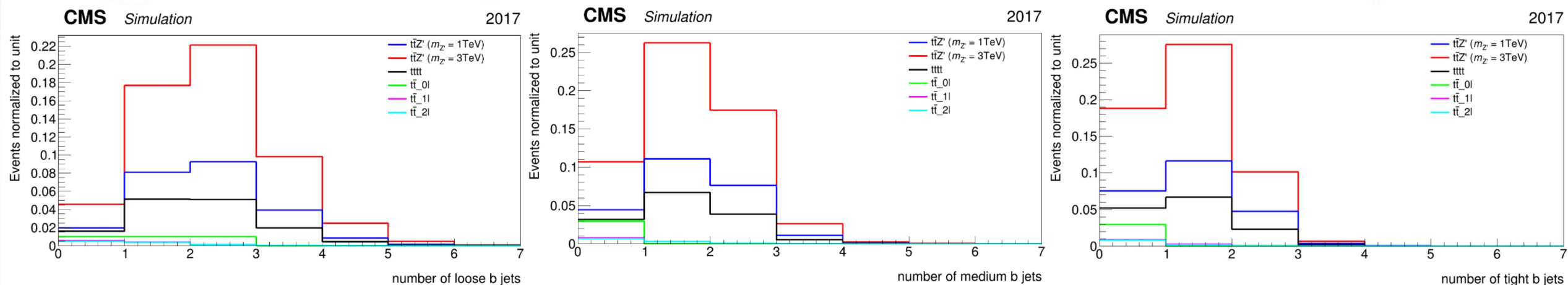
- 纯度测试: 纯度 = $\frac{\text{重建出来的第}n\text{个顶夸克与真实顶夸克相匹配的事例数}}{\text{单轻子条件下重建出第}n\text{个顶夸克的事例数}}$

recoTop	top1	top2	top3	top4
purity (1 TeV)	82.85%	65.95%	54.11%	45.14%
purity (3 TeV)	92.82%	75.83%	54.62%	41.17%

- 算法的重建效率和纯度都很理想
- 可以应用于所有包含多顶夸克末态的新物理分析



- 构建一个 Z' 粒子需要两个顶夸克
- 本课题所寻找的高质量 Z' 粒子更倾向于衰变成boosted tops $\rightarrow \geq 2$ boosted tops
- ≥ 2 boosted tops 的条件下, b jets的个数分布:



- 最大限度的提高这一条件的效率: ≥ 1 loose b jets



- 信号区间效率

相对效率 = $\frac{\text{通过第}n\text{个筛选条件的事例数}}{\text{通过第}n-1\text{个筛选条件的事例数}}$, 绝对效率 = $\frac{\text{通过第}n\text{个筛选条件的事例数}}{\text{初始事例数}}$

Selection	$ttZ' (m_{Z'} = 500 \text{ GeV}, \Gamma/m = 4\%) (\mu)$	$ttZ' (m_{Z'} = 3 \text{ TeV}, \Gamma/m = 4\%) (\mu)$	$ttZ' (m_{Z'} = 500 \text{ GeV}, \Gamma/m = 4\%) (e)$	$ttZ' (m_{Z'} = 3 \text{ TeV}, \Gamma/m = 4\%) (e)$
Ini evt	100.000±0.000	1100.000±0.000	100.000±0.000	100.000±0.000
exactly 1 lepton	15.115±0.036	13.113±0.034	11.271±0.032	10.304±0.030
HLT	91.360±0.072	90.673±0.080	86.512±0.102	84.657±0.112
Noise Filters	99.844±0.011	98.830±0.031	99.818±0.014	98.926±0.035
$HT > 700 \text{ GeV}$	66.221±0.127	99.128±0.027	67.497±0.150	99.075±0.033
$MET > 60 \text{ GeV}$	73.337±0.146	90.339±0.087	72.944±0.173	89.981±0.103
number of jets ≥ 6	95.358±0.081	89.978±0.093	95.117±0.098	89.808±0.109
≥ 2 boosted tops, ≥ 1 b – tagged jets	2.412±0.061	27.891±0.146	2.288±0.070	27.383±0.170

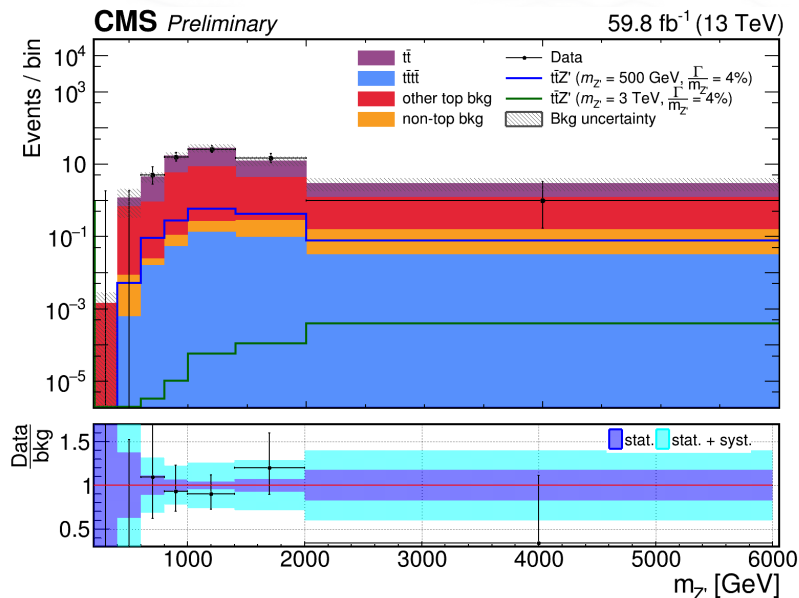
Selection	$ttZ' (m_{Z'} = 500 \text{ GeV}, \Gamma/m = 4\%) (\mu)$	$ttZ' (m_{Z'} = 3 \text{ TeV}, \Gamma/m = 4\%) (\mu)$	$ttZ' (m_{Z'} = 500 \text{ GeV}, \Gamma/m = 4\%) (e)$	$ttZ' (m_{Z'} = 3 \text{ TeV}, \Gamma/m = 4\%) (e)$
Ini evt	100.000±0.000	100.000±0.000	100.000±0.000	100.000±0.000
exactly 1 lepton	15.115±0.036	13.113±0.034	11.271±0.032	10.304±0.030
HLT	13.809±0.035	11.890±0.032	9.751±0.030	8.723±0.028
Noise Filter	13.788±0.034	11.751±0.032	9.733±0.030	8.629±0.028
$HT > 700 \text{ GeV}$	9.130±0.029	11.648±0.032	6.570±0.025	8.549±0.028
$MET > 60 \text{ GeV}$	6.696±0.025	10.523±0.031	4.792±0.021	7.693±0.027
number of jets ≥ 6	6.385±0.024	9.468±0.029	4.558±0.021	6.909±0.025
≥ 2 boosted tops, ≥ 1 b – tagged jets	0.151±0.004	2.488±0.016	0.102±0.003	1.781±0.013

- 上述效率结果包含了四顶夸克末态到单轻子衰变道的分支比
- 高质量点的信号样本效率更高 $\longrightarrow$ boosted top tagger在高质量点的性能更好

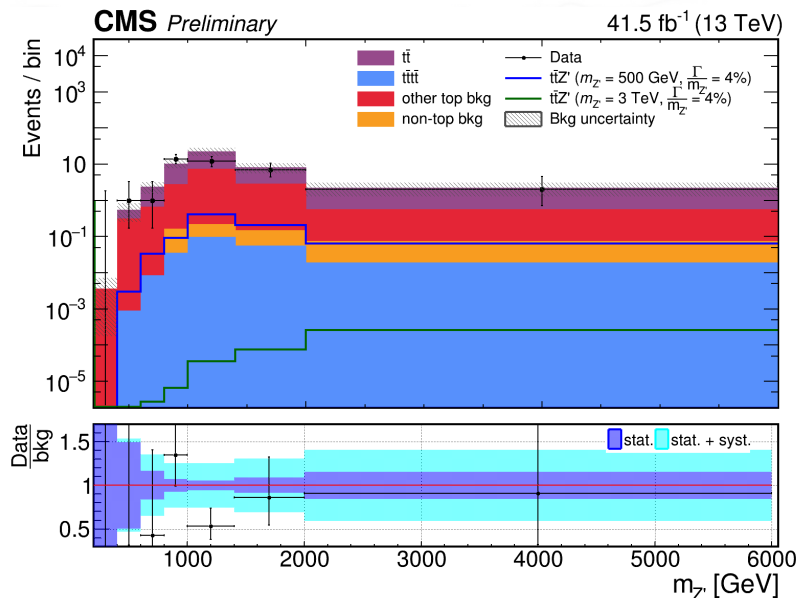


- 控制区间的数据和MC分布:

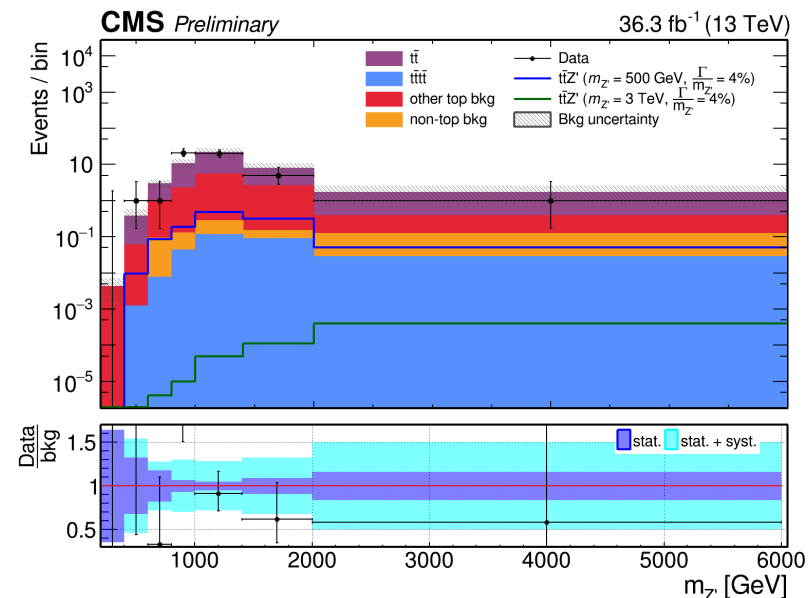
2018



2017



2016



- 针对每一年份分别定义一个 rate parameter 进行拟合: rate_2018, rate_2017, rate_2016

- 作用于所有本底过程

对特定物理过程的事例产额进行操作和计算的自由参数

- 同时拟合信号区间和控制区间



- 系统误差（由于实验装置、测量方法、数据处理等方面的系统性偏差，导致的不可随机消除的误差）

所有系统误差都严格按照官方指南得到

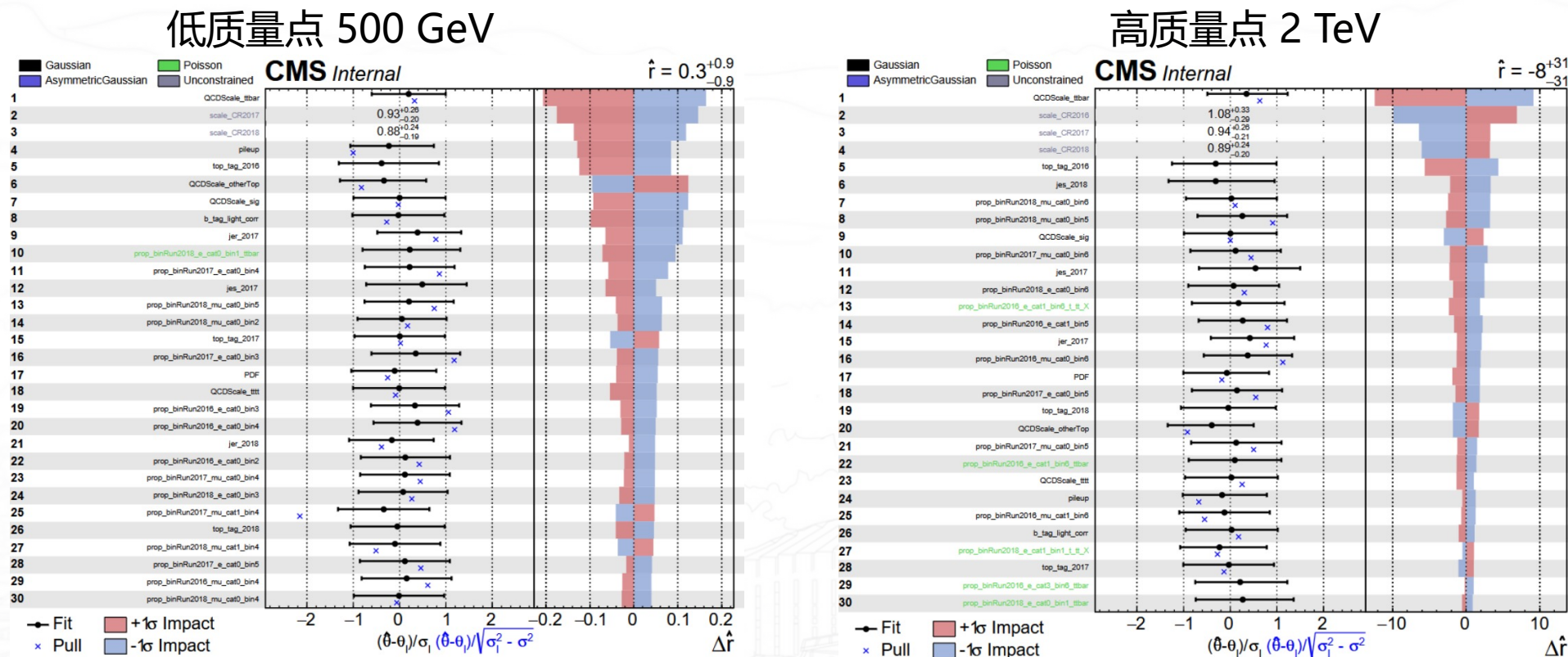
systematics	type	2016	2017	2018	process	year correlation
PDF	shape	✓	✓	✓	sig+bkg	correlated
QCDScale_sig	shape	✓	✓	✓	sig	correlated
QCDScale_tttt	shape	✓	✓	✓	tttt	correlated
QCDScale_ttbar	shape	✓	✓	✓	tt	correlated
QCDScale_otherTop	shape	✓	✓	✓	otherTopBkg	correlated
QCDScale_VX	shape	✓	✓	✓	nonTopBkg	correlated
Trigger	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	partial correlated
lepton	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	correlated
pile-up	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	correlated
Prefiring	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	uncorrelated
Jet resolution	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	uncorrelated
Jet scale	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	uncorrelated
b-tag_light_corr	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	correlated
b-tag_bc_corr	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	correlated
b-tag_bc	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	uncorrelated
b-tag_light	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	uncorrelated
boosted top	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	uncorrelated
MET uncluster	norm+shape	✓	✓	✓	sig+bkg	uncorrelated
Lumi_Corr	norm	0.6%	0.9%	2.0%	sig+bkg	correlated
Lumi_UnCorr	norm	1.0%	2.0%	1.5%	sig+bkg	uncorrelated
Lumi_Corre_1718	norm	-	0.6%	0.2%	sig+bkg	correlated

理论计算所带来的误差

实验方法所带来的误差



- 冗余参数 (NP) 的影响分布：衡量不同冗余参数对信号强度的影响

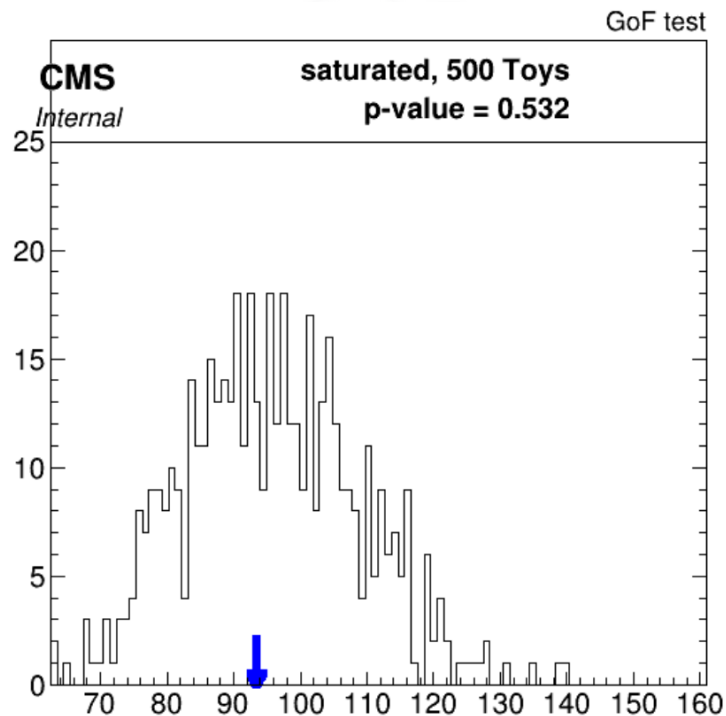


- QCD Scale对信号强度的影响很大，这一现象也在别的分析例如ttbar resonance的寻找中见到 ([link](#))
- 本底估计引入的修正在本课题中影响很大，与预期一致

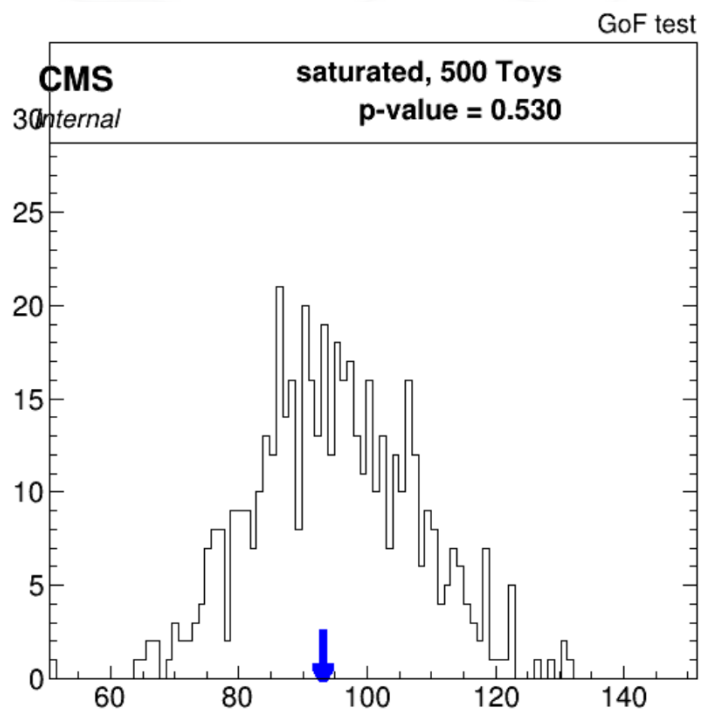


- 拟合优度检验：评估观察到的数据与模型的概率密度分布的兼容性，衡量本底估计模型的状况。

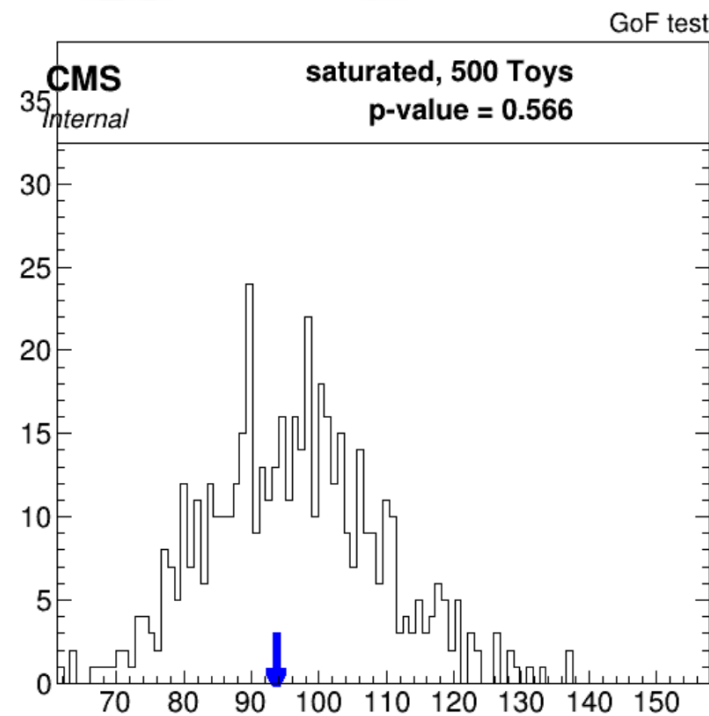
Z' 质量 500 GeV



Z' 质量 1 TeV



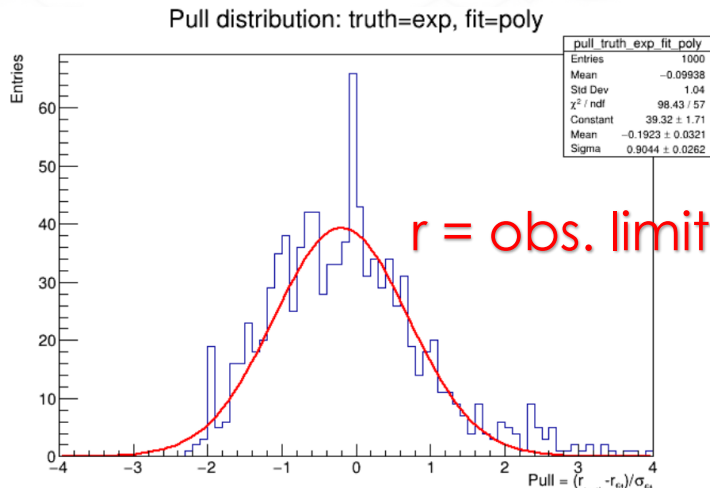
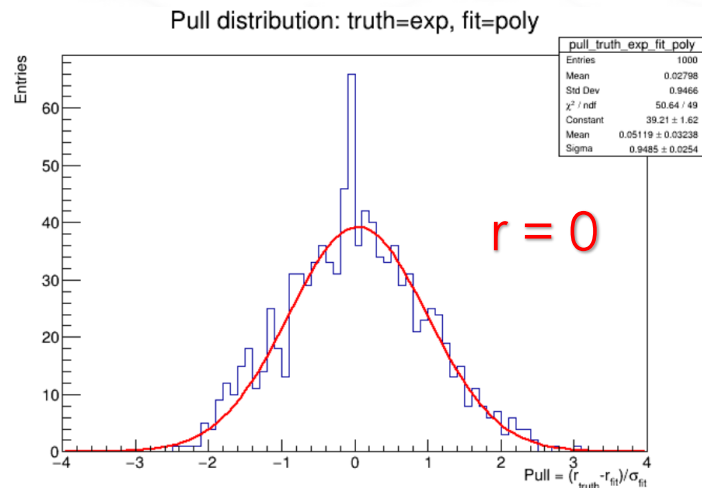
Z' 质量 3 TeV



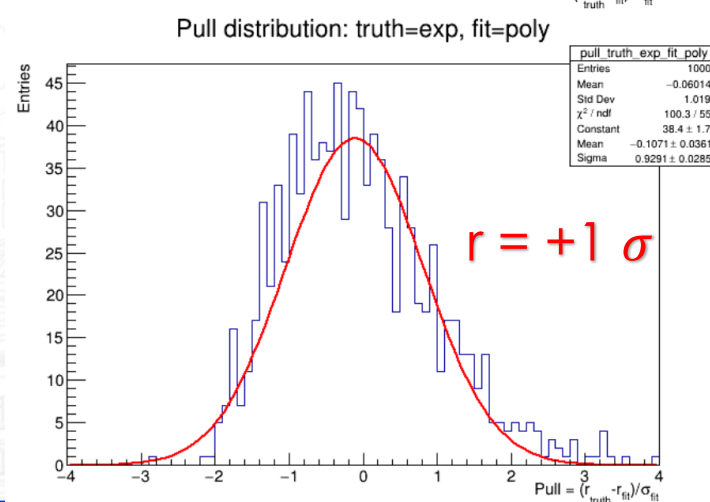
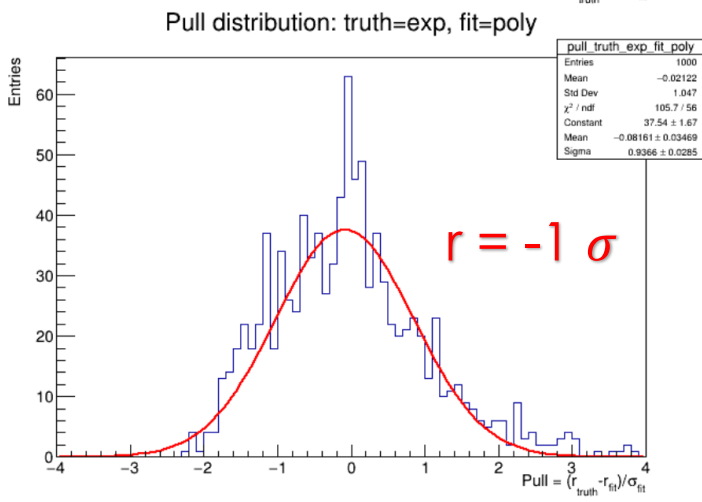
- 本底模型合理



- 信号注入测试（无偏性检验）：分析模型是否存在偏差，是否存在过度或低估数据中的真实信号的贡献。
- 注入的信号强度分别取0，观测到的limit值和 $\pm 1\sigma$ 值后的pull分布如下：



(以1 TeV为例)



- 所有分布符合正态分布趋势
- 模型健康无偏



Tips: 图标分为线形图标和面型图标，使用过程中应尽量保持线面一致，颜色一致，尺寸一致。

iSlide图标库提供了丰富的图标供用户下载使用。