

ATLAS实验上希格斯玻色子 不可见衰变的寻找

王蔚

导师 梁志均

实验物理中心

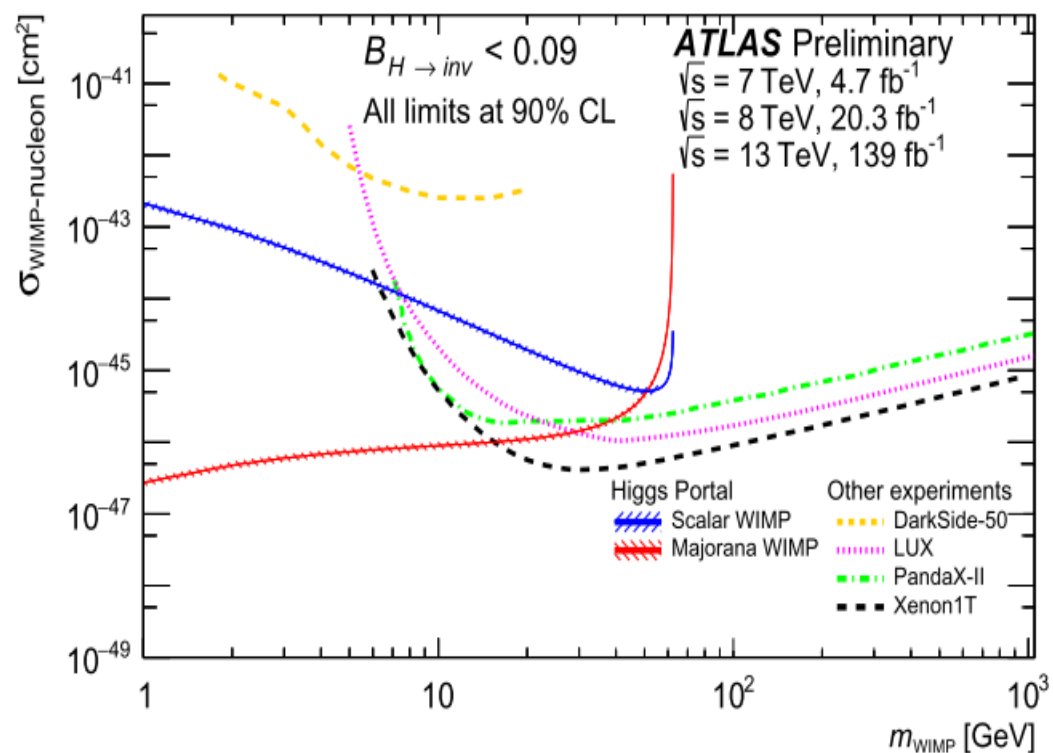
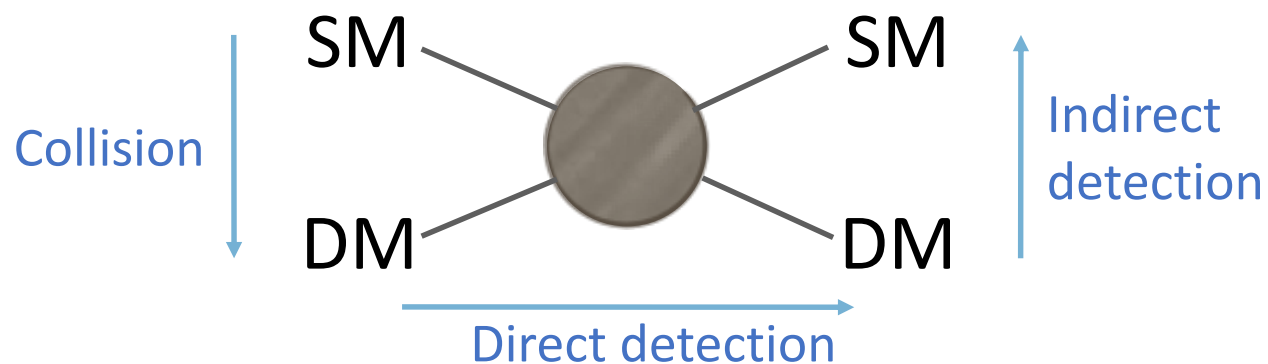
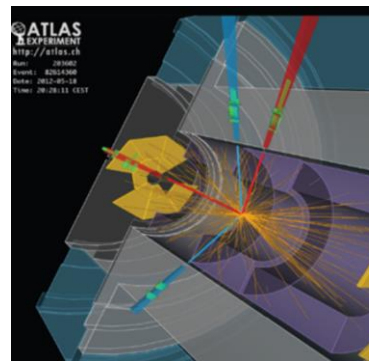
2022.06.30

高能所博士后学术交流会

wangw@ihep.ac.cn wei.wang@cern.ch

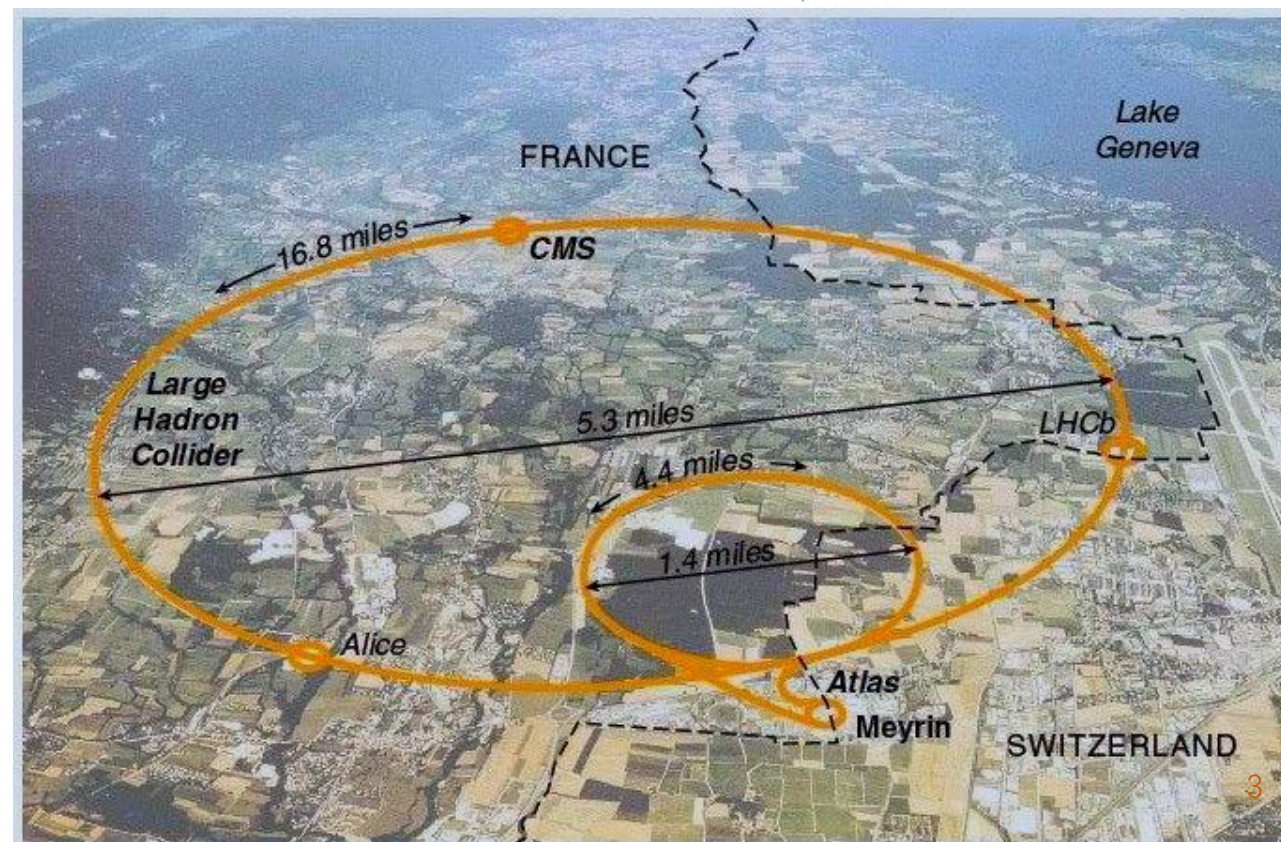
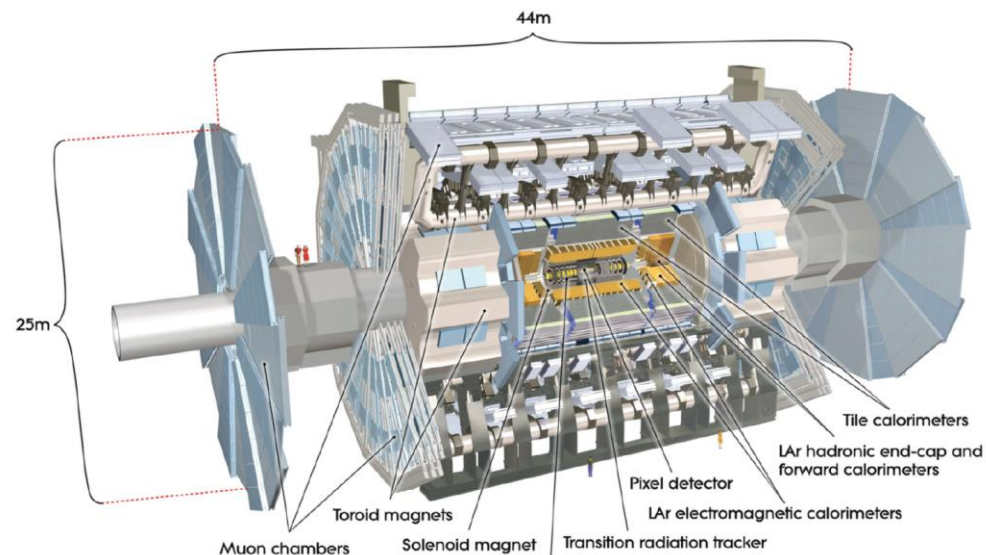
研究背景

- 暗物质是当前天体物理观测中存在明显迹象的超出标准模型的新物理
- 主要探测手段
 - 直接探测, 间接探测, 对撞机探测
- 2012年大型强子对撞机上发现希格斯玻色子
- 希格斯探针模型: 暗物质与希格斯玻色子直接耦合
 - 希格斯不可见衰变 $H \rightarrow \text{invisible}$ (SM: $\text{Br}(H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\nu) \approx 0.1\%$)
 - 对低质量区间灵敏 ($< 60 \text{ GeV}$)
- 暗物质质量 $\longleftrightarrow ? \longleftrightarrow$ 希格斯机制



LHC和ATLAS

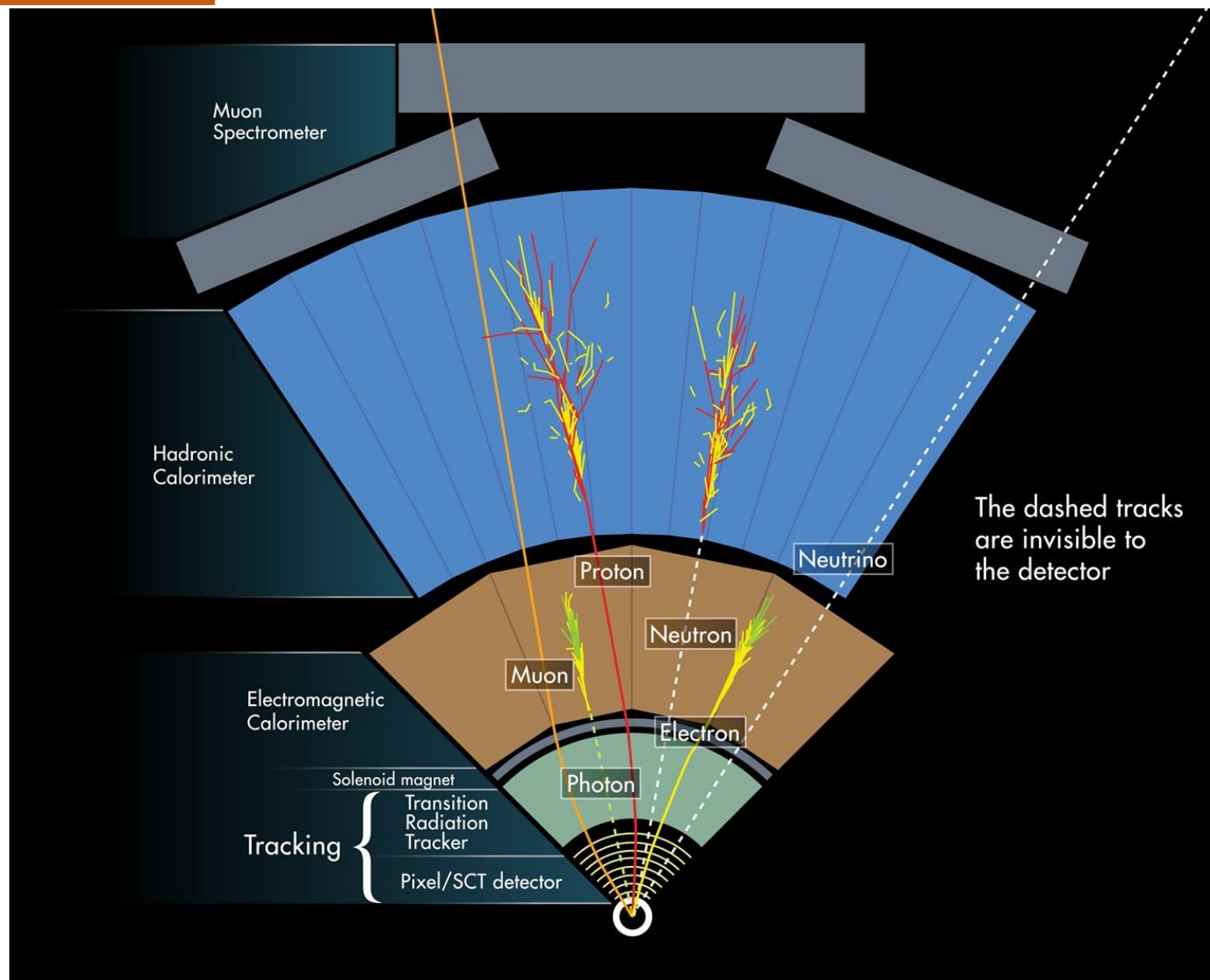
- 大型强子对撞机Large Hadron Collider(LHC) @ CERN
 - 周长27km, 世界最大, 能量最高的质子-质子对撞机
 - 希格斯物理研究及新物理寻找
- 对撞频率~40MHz (25ns bunch crossing)
- Run1 (2012-2013), 7-8 TeV, ~26 /fb
- Run2 (2015-2018) ,13 TeV, ~150 /fb
- Run3 (2022 started), 13.6TeV, ~150 /fb expected
- ATLAS(A Toroidal LHC ApparatuS)探测器
 - LHC上最大的探测器: l=46m, d=25m
 - 径迹系统, 量能器系统, muon探测器



探测器中的对象重建

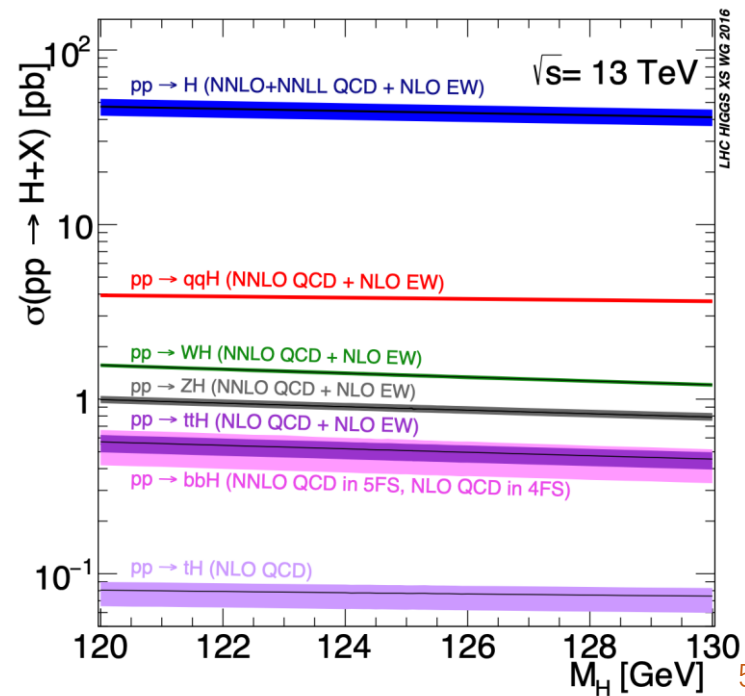
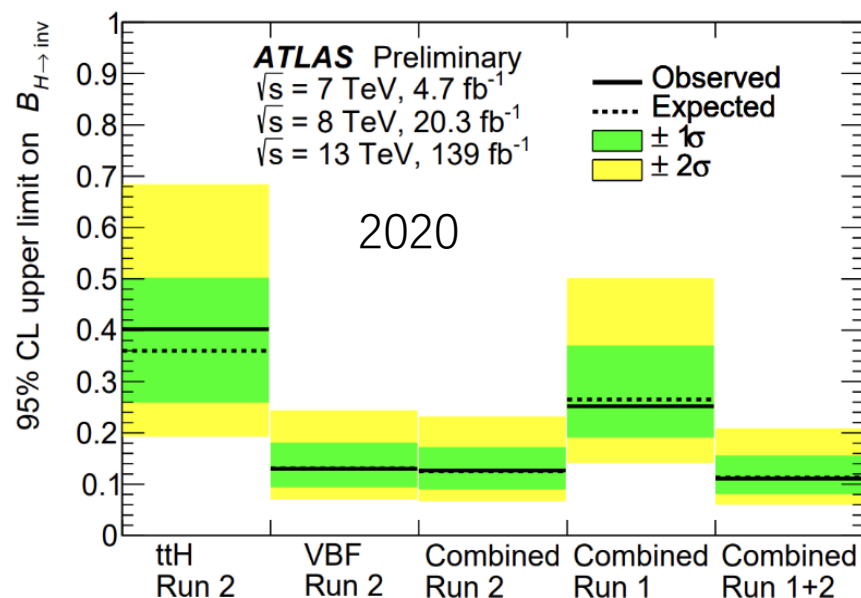
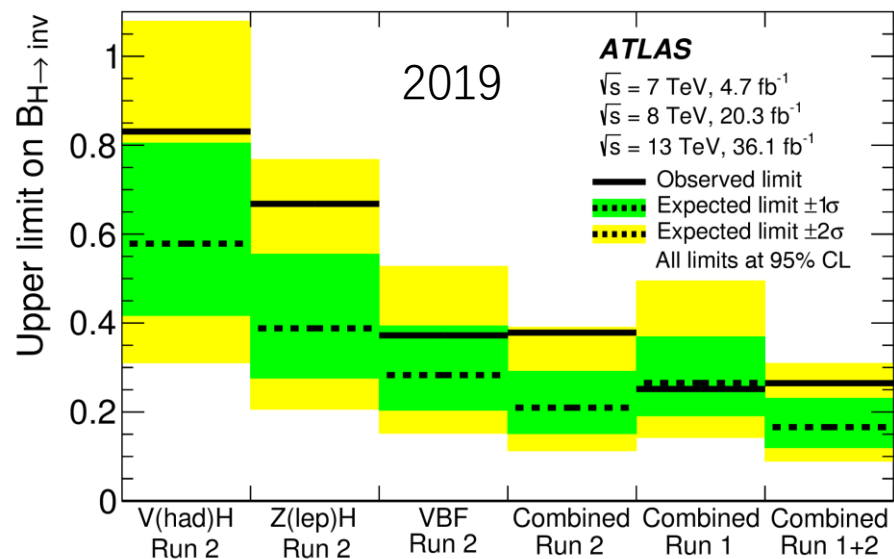
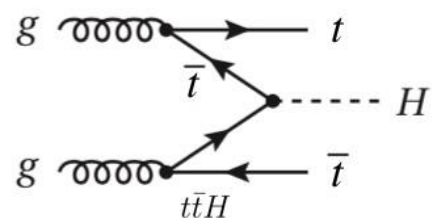
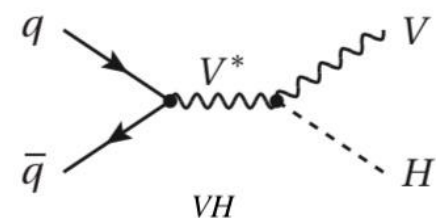
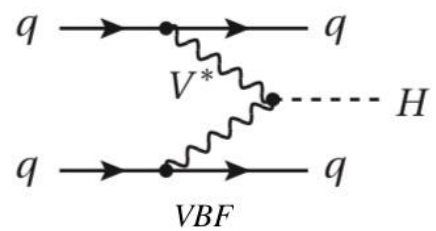
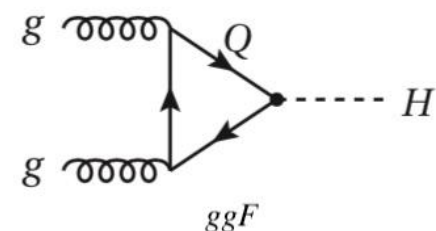
- 可见粒子的重建
 - 轻子Leptons
 - 喷注Jets
 - 光子Photon
- 不可见粒子的重建
 - 丢失横动量 E_T^{miss}
 - (missing transverse energy)

暗物质, 中微子



LHC上希格斯产生道

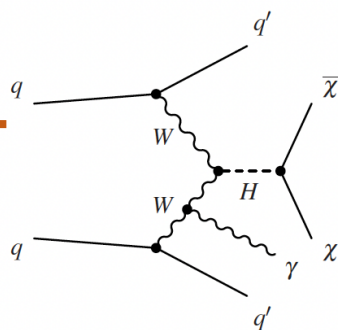
- 四个主要产生模式: ggH , VBF , VH , ttH
 - 伴随海量QCD本底
- VBF道对于希格斯不可见衰变的灵敏度最高
 - 较高的产生截面
 - 前向喷注的辅助鉴别



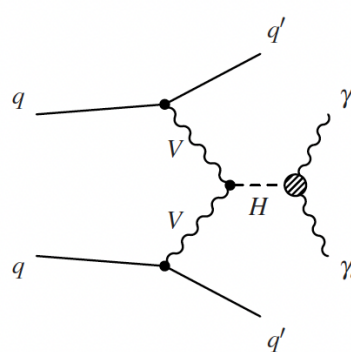
信号区间signal region

- 创新性地引入一个高能光子区间
 - QED初态辐射光子
 - 有效压低QCD本底
 - 降低其他变量选择阈值，拓展参数空间
 - 引入更多的分析参数
- 探测器特征
 - 较高的 E_T^{miss} (>150GeV)
 - 两个VBF过程的前向喷注
 - 一个高能光子
- 同时可研究希格斯到光子暗光子衰变 $H \rightarrow \gamma\gamma_d$
 - 首次在ATLAS实验上研究 $H \rightarrow \gamma\gamma_d$ 衰变
 - 暗光子模型
- 标准模型 $Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma + jets$ 测量
 - $H \rightarrow inv.$ 和 $H \rightarrow \gamma\gamma_d$ 过程的主要本底

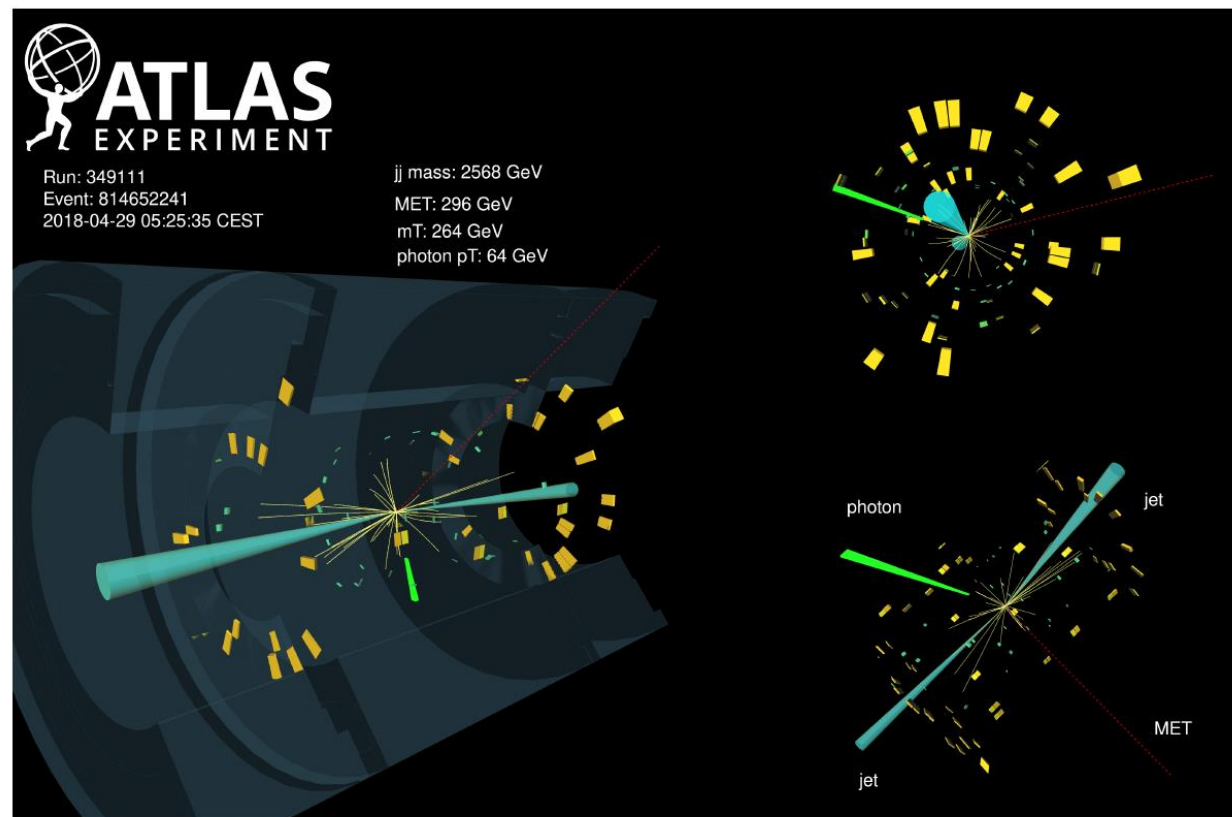
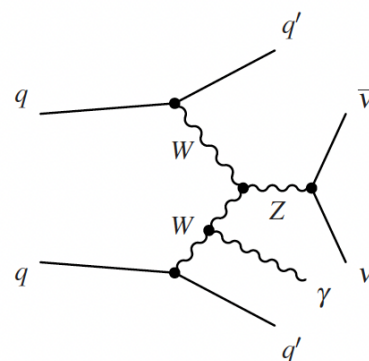
VBF $H(\rightarrow inv.)\gamma$



VBF $H \rightarrow \gamma\gamma_d$

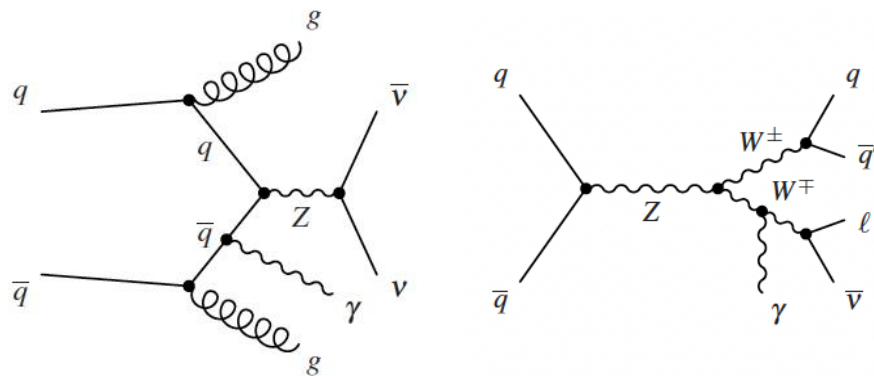


EW $Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma$



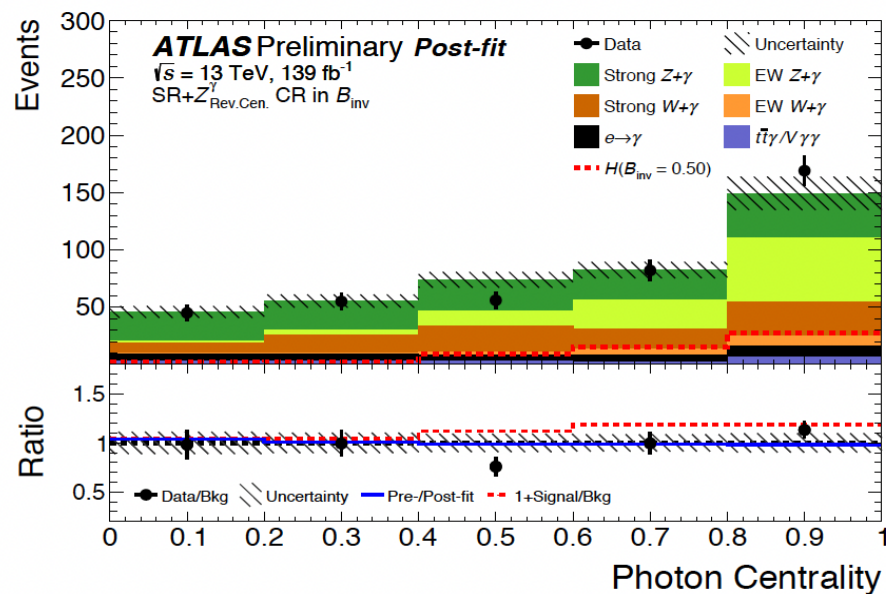
本底估计

- 主要本底 $W(\rightarrow \ell\nu)\gamma + \text{jets}$, $Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma + \text{jets}$
- 定义四个控制区间(control region)研究相应本底并控制其归一化参数
 - $W_{\mu\nu}^\gamma$ 和 W_{ev}^γ CR
 - $W(\rightarrow \ell\nu)\gamma$ 事例因轻子重建丢失而进入SR
 - CR要求事例中含有一个 μ 或 e
 - $Z_{Rev.Cen.}^\gamma$ CR
 - 强相互作用 $Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma$ 中光子位于中间区域的事例进入SR
 - CR要求SR中的光子中心度条件反转
 - Fake-e CR
 - 喷注赝电子本底进入 W_{ev}^γ CR
 - Fake-e CR中要求反转 W_{ev}^γ CR中 $E_T^{miss}(< 80 \text{ GeV})$ 条件



Strong $Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma + \text{jets}$

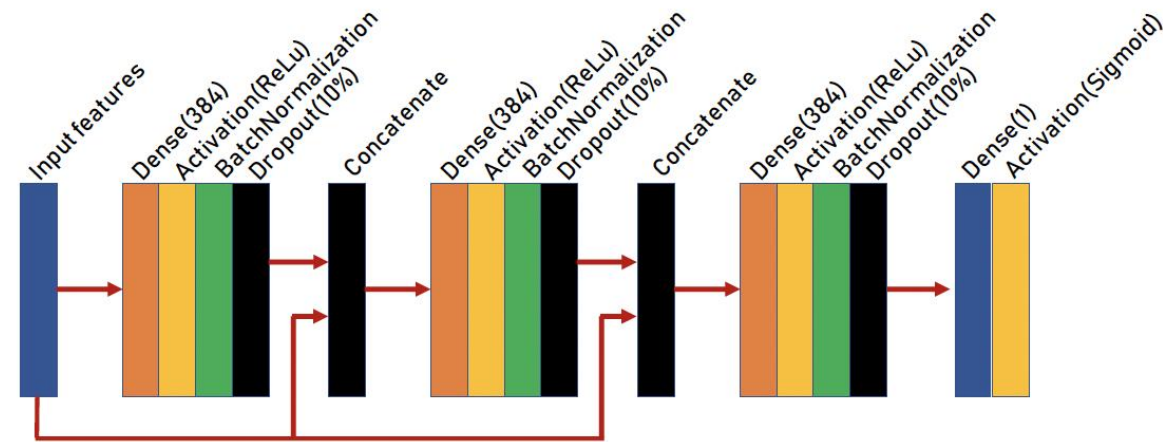
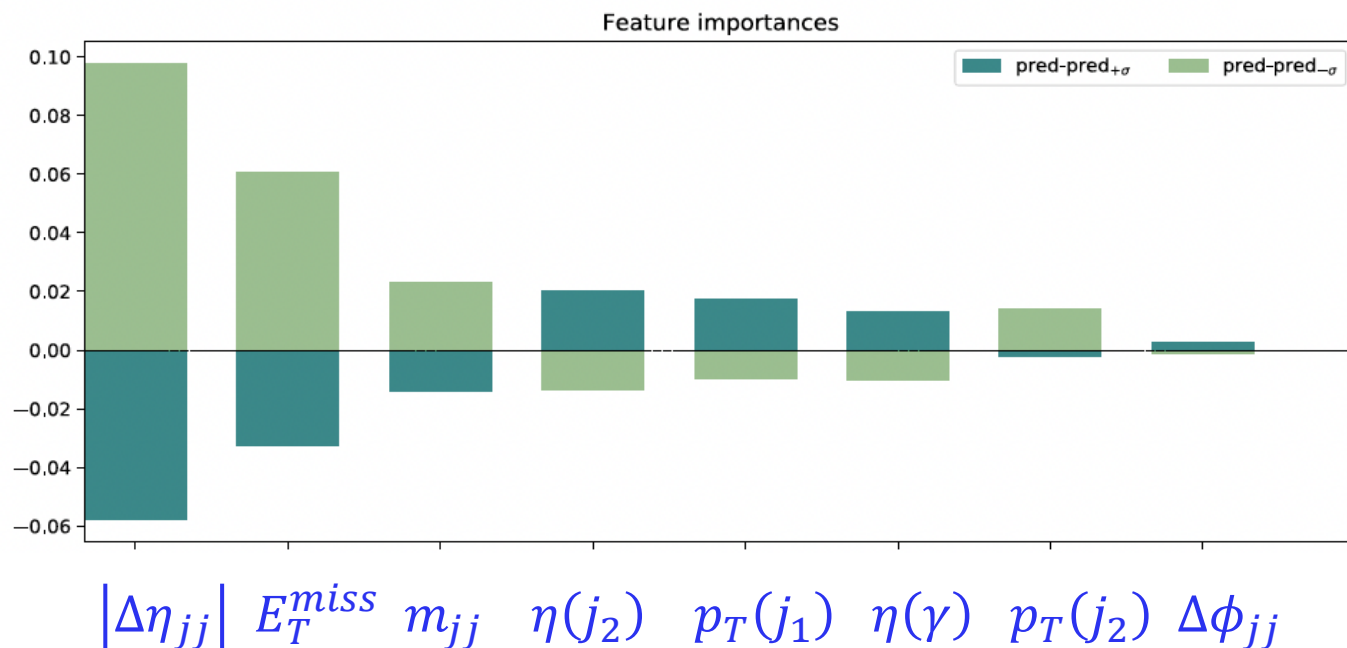
Triboson (EW)



$Z_{Rev.Cen.}^\gamma$ CR in $H \rightarrow \text{inv.}$

多变量分析

- 深度神经网络 (DNN) 算法
- 特征变量选择
 - 通过将特征变量向上/下变化10%对DNN输出的影响来判断该变量的重要性
 - 最终8个变量被选为DNN的特征输入变量



DNN architecture

- DNN输出值范围 0 ~ 1
 - 1 -> 信号, 0 -> 本底
- 相对于cut-based单一变量方法信号灵敏度提升 ~ 20%

统计分析

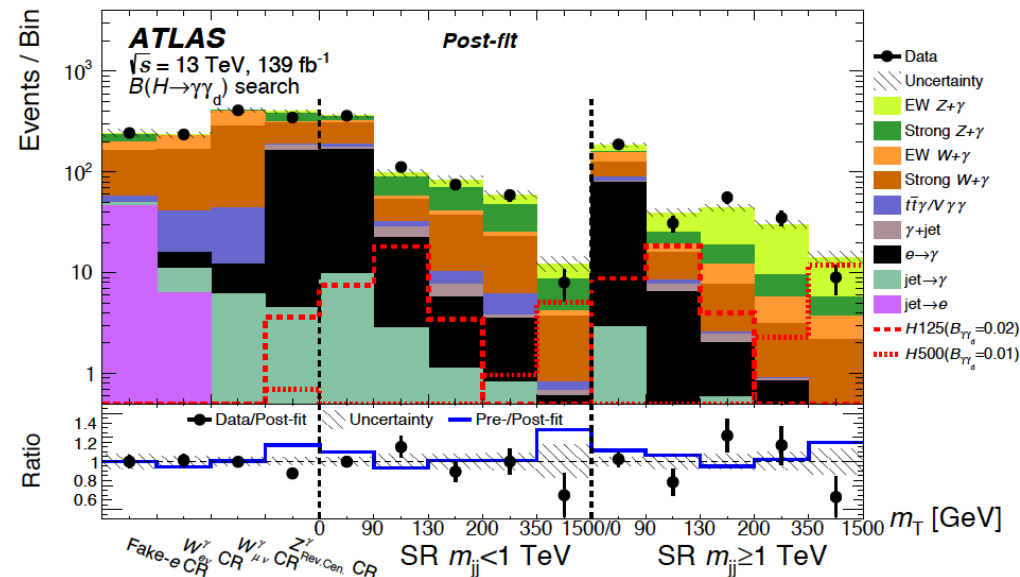
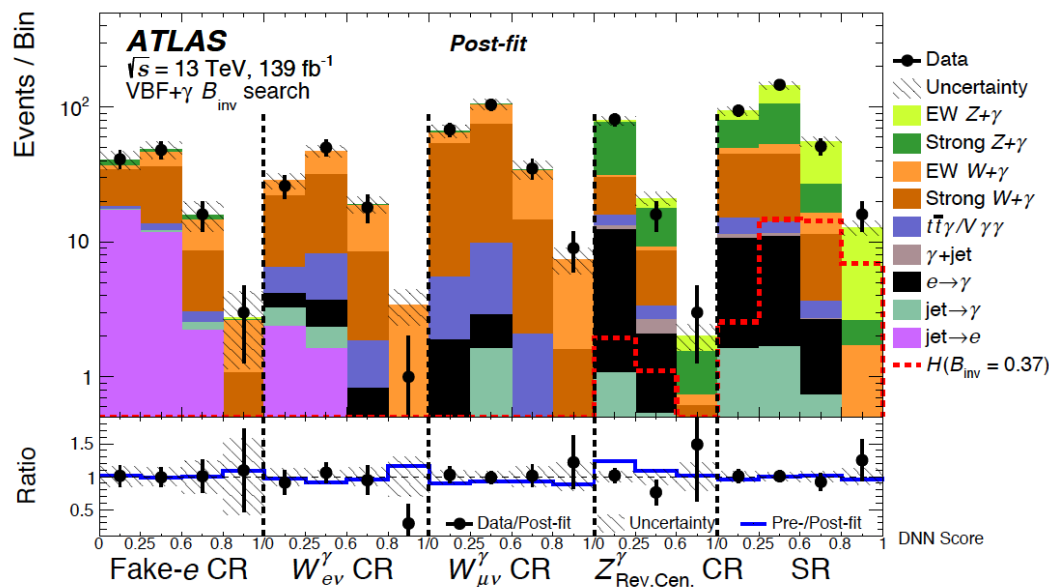
■ 最大似然拟合

- 特征变量: DNN score
- POI: 信号强度
- NP: 本底归一参数, 系统误差等

$$\mathcal{L}(\mu, \theta) = \prod_j^{N_{\text{categories}}} \prod_i^{N_{\text{bins}}} P(N_{ij} | \mu S_{ij}(\theta) + B_{ij}(\theta)) \prod_k^{N_{\text{nuisance}}} \mathcal{G}(\theta_k)$$

SR plus CR observed event expected signal and background Gaussian function for constraint on nuisance parameter

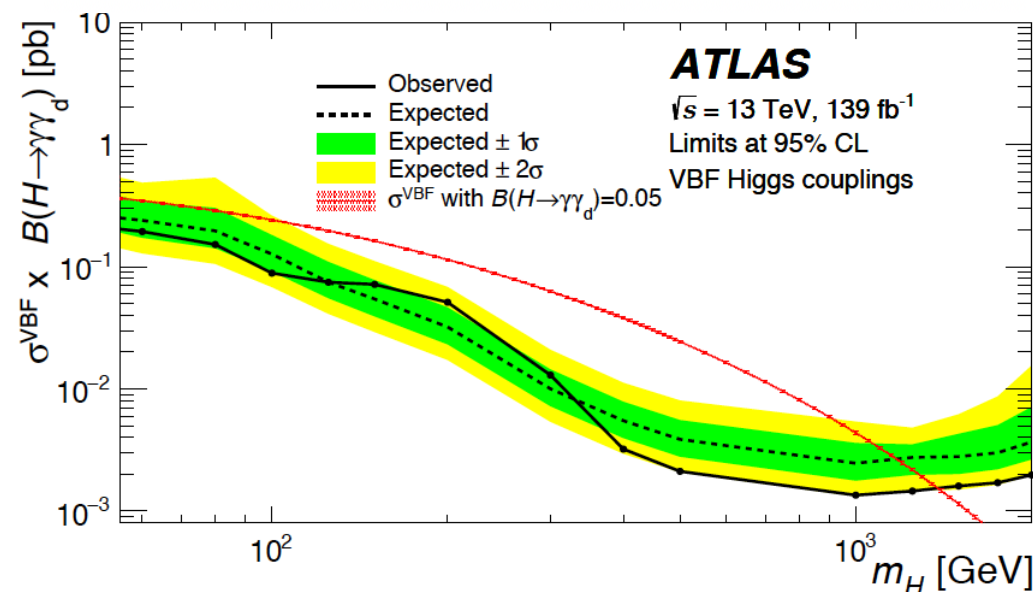
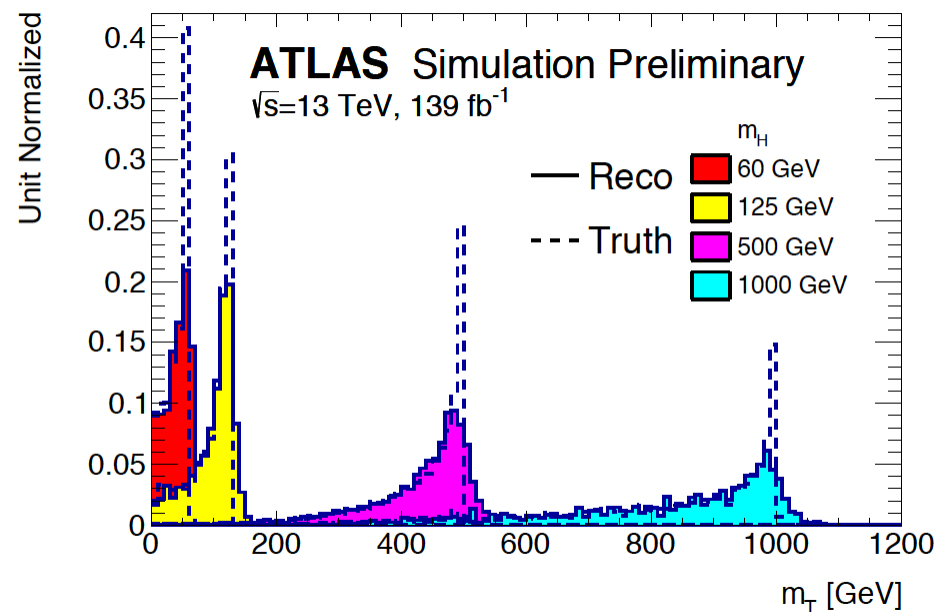
Poisson distribution signal strength nuisance parameters for background normalization and systematic uncertainties



Run2分析结果

- 希格斯不可见衰变 $H \rightarrow inv.$ 寻找
 - 本底假设：未发现超出标准模型的新物理
 - 本底+信号假设：分支比 B_{inv} 上限 0.37 (0.35 exp.)
- 希格斯到暗光子衰变 $H \rightarrow \gamma\gamma_d$ 寻找
 - 本底假设：未发现新物理信号
 - 本底+信号假设：125 GeV Higgs分支比 $B(H \rightarrow \gamma\gamma_d)$ 上限提取 0.018 (0.017 exp.) (CMS:0.029(0.021 exp.))
 - 类希格斯玻色子[60 GeV, 2 TeV]截面×分支比上限提取 [0.15 pb, 3 fb].
- $Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma + jets$ 测量
 - 本底假设：5.2 σ obs. (5.1 σ exp.)
 - 信号强度 $\mu_{Z\gamma}$ 提取

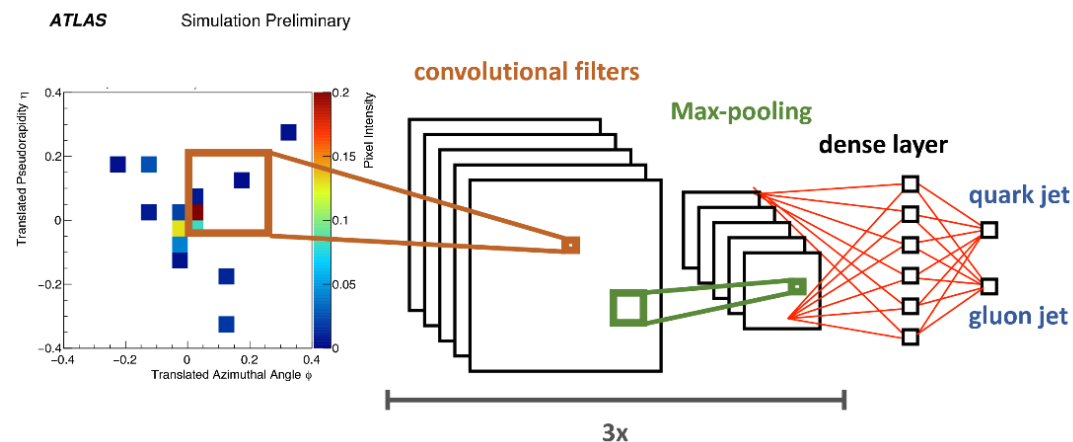
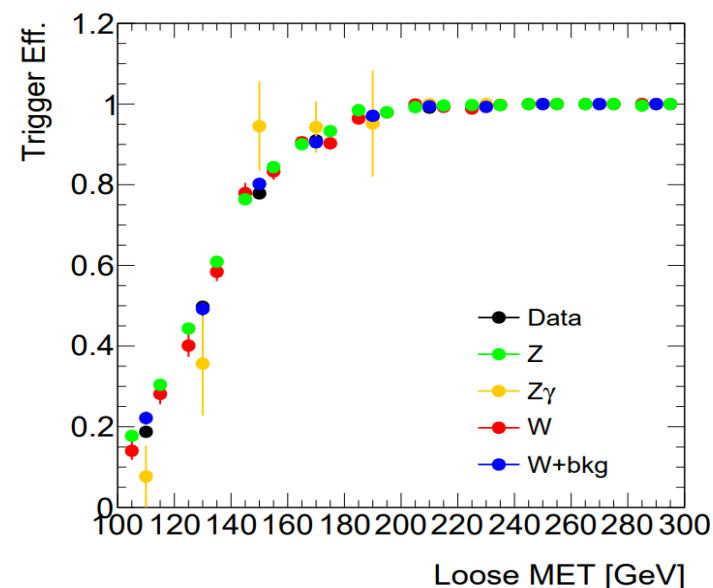
$\mu_{Z\gamma_{EW}}$	$\beta_{Z\gamma_{strong}}$	$\beta_{W\gamma}$
1.03 ± 0.25	1.02 ± 0.41	1.01 ± 0.20



Run3期望

- Run3今年已经开始取数
 - 对撞能量(13.6TeV)与统计量(+~150/fb)的提升
- 设计运行全新多体触发Trigger
 - $VBF\ jets + \gamma + E_T^{miss}$
 - 降低 E_T^{miss} 阈值, 拓展相空间
 - 研发设计中, 计划于明年加入trigger列表
- 基于粒子流(particle flow)的喷注及 E_T^{miss} 重建算法
- 基于机器学习的q/g喷注识别

获第69批博士后基金面上项目资助



Summary

- ATLAS实验上通过希格斯不可见衰变寻找暗物质 (“希格斯探针”)
 - 60GeV以下低质量区间对暗物质直接探测实验的有力补充
- 创新性引入高能光子区间, 有效压低QCD本底
 - 该区间内 $H \rightarrow inv.$ 分支比上限为0.37 (0.35 exp.)
- 首次在ATLAS实验上寻找希格斯到暗光子衰变
 - 125 GeV Higgs分支比 $B(H \rightarrow \gamma\gamma_d)$ 上限提取 0.018 (0.017 exp.)
 - 类希格斯玻色子[60 GeV, 2 TeV]截面 $\times$ 分支比上限提取[0.15 pb, 3 fb].
- 首次以 5.2σ obs. (5.1σ exp.)观察到 $Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma + jets$ 过程
- Run3数据分析稳步开展, 并获得博士后基金面上项目资助
 - 全新 $VBF jets + \gamma + E_T^{miss}$ 多体触发设计
 - 基于粒子流的喷注及 E_T^{miss} 重建算法
 - 基于机器学习的q/g喷注鉴别

相关论文

- VBF γ channel result
[Eur. Phys. J. C 82, 105 \(2022\)](#)
- Invisible Higgs combination result
[Phys. Rev. Lett. 122 \(2019\) 231801](#)
- VH channel result
[JHEP 10 \(2018\) 180](#)

相关报告

- Conference talk: EDSU2018
- ATLAS paper approval meeting

简历

■ 个人经历

- 2021至今，实验物理中心，博士后，导师梁志均
- 2014~2020，南京大学，博士，导师陈申见
- 2015~2018，CERN，联合培养博士，导师Song-Ming Wang

■ 研究方向

- ATLAS实验希格斯物理分析
- CEPC顶点探测器TaichuPix芯片研究与测试
- ATLAS实验HGTD项目LGAD传感器抗辐照性能研究与设计

■ 主要科研成果（共发表11篇重要贡献期刊文章）

- 首次发现希格斯玻色子最主要衰变道 $H \rightarrow b\bar{b}$ (2018年美国物理学会十大亮点成果, [Phys. Lett. B 786 \(2018\) 59](#))
- 寻找希格斯玻色子的不可见衰变 $H \rightarrow \text{invisible}$ ([Phys. Rev. Lett. 122 \(2019\) 231801](#))
- LGAD掺碳工艺设计抗辐照性能达到世界领先水平

■ 主持基金及荣誉

- 中国博士后基金面上项目，8万，主持
- 中国科学院“特别研究助理”资助项目，60+20万
- 粒子物理卓越中心“赵忠尧”优秀博士后

谢谢大家！

Back-up

$H \rightarrow \text{inv.}$ 和 $Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma$ 信号区域

- E_T^{miss} 触发
- $H \rightarrow \text{inv.}$:
 - DNN 输出值
- $Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma$
 - m_{jj} 变量可以有效区分EW/Strong $Z\gamma$
- 部分变量定义
 - 丢失横动量 E_T^{miss} : 所有物理对象横向动量的负矢量和
 - 光子中心度 C_γ : 光子位于两个领头喷注中间区域 $C_\gamma = \exp[-\frac{4}{(\eta_1 - \eta_2)^2} (\eta_\gamma - \frac{\eta_1 + \eta_2}{2})^2]$
 - 第三喷注 j_3 中心度 C_3 : 第三领头喷注不能位于两个领头喷注中间区域, $C_3: C_\gamma (\eta_\gamma \rightarrow \eta_3)$
 - $E_T^{\text{jets, no-jvt}}$: 所有不满足JVT要求的喷注

Variable	SR
$p_T(j_1)$ [GeV]	> 60
$p_T(j_2)$ [GeV]	> 50
N_{jet}	2, 3
$N_{\text{b-jet}}$	< 2
$\Delta\phi_{ii}$ 前向喷注	< 2.5
$ \Delta\eta_{jj} $	> 3.0
$\eta(j_1) \times \eta(j_2)$	< 0
C_3	< 0.7
m_{jj} [TeV] 丢失横动量	> 0.25
E_T^{miss} [GeV]	> 150
$E_T^{\text{jets, no-jvt}}$ [GeV]	> 130
$\Delta\phi(j_i, E_T^{\text{miss, lep-rm}})$	> 1.0
N_γ 单光子	1
$p_T(\gamma)$ [GeV]	$> 15, < 110$
C_γ	> 0.4
$\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss, lep-rm}})$	> 1.8
N_ℓ	0
$p_T(\ell)$ [GeV]	> 30

$H \rightarrow \gamma\gamma_d$ 信号区域

• 区别 $H \rightarrow \text{inv. SR}$

• 更严格的 $\Delta\phi_{jj}$ 截断

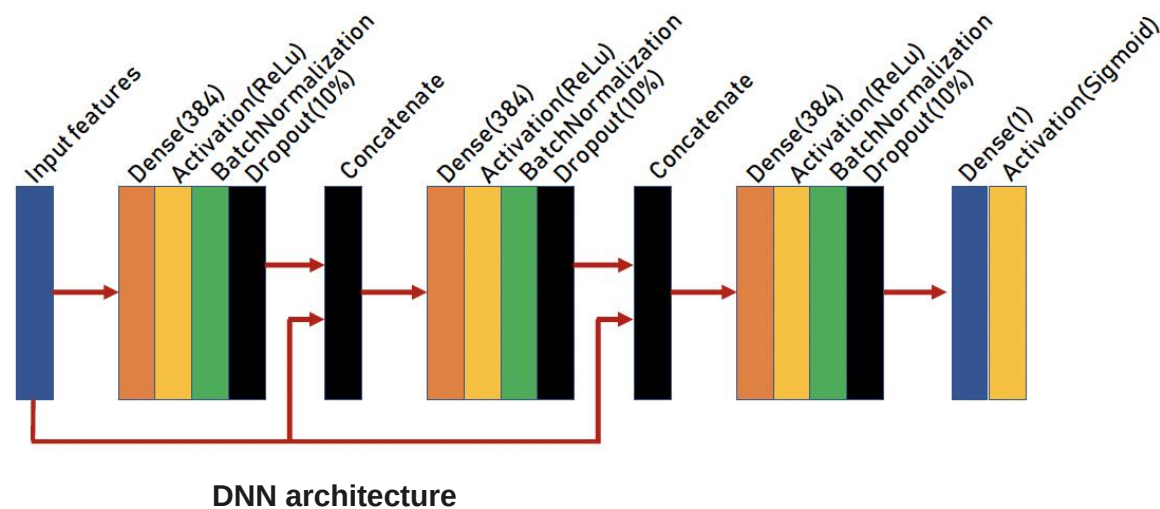
• 宽松的 $p_T(\gamma)$ 截断：提高高 m_T 区域的信号效率

• 无 $\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss,lep-rm}})$ 截断：提高低 m_T 区域的信号效率

Variable	SR
$p_T(j_1)$ [GeV]	> 60
$p_T(j_2)$ [GeV]	> 50
N_{jet}	2, 3
$N_{\text{b-jet}}$	< 2
$\Delta\phi_{jj}$	< 2.0
$ \Delta\eta_{jj} $	> 3.0
$\eta(j_1) \times \eta(j_2)$	< 0
C_3	< 0.7
m_{jj} [TeV]	> 0.25
E_T^{miss} [GeV]	> 150
$E_T^{\text{jets,no-jvt}}$ [GeV]	> 130
$\Delta\phi(j_i, E_T^{\text{miss,lep-rm}})$	> 1.0
N_γ	1
$p_T(\gamma)$ [GeV]	$> 15, < \max(110, 0.733 m_T)$
C_γ	> 0.4
$\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss,lep-rm}})$	—
N_ℓ	0
$p_T(\ell)$ [GeV]	> 30

DNN 结构

- 深度神经网络(DNN)方法: $H \rightarrow inv.$
- 3个模块, 每个模块包含
 1. 全连接层 (dense layer) — 384 神经元
 2. 激活函数 — 修正线性单元 (ReLU)
 3. 批归一化层 (Batch Normalization)
 4. 丢弃率 (Dropout)



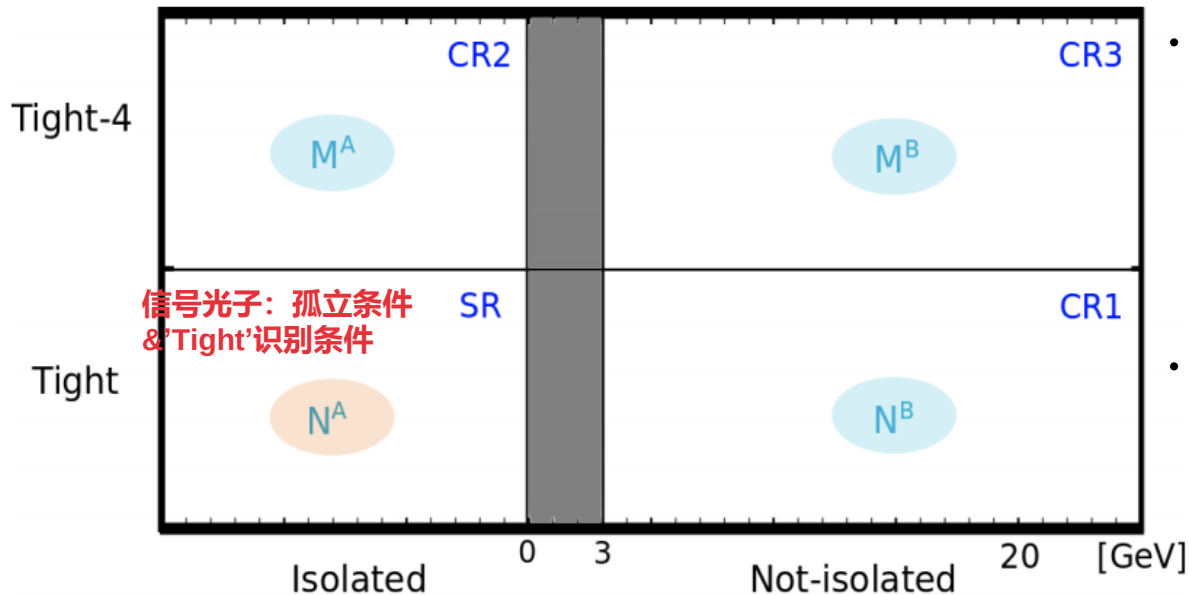
- 每个模块接收上个模块的输出作为其输入
- Dropout和BN层用来防止过拟合
- 通过最小化二分类熵损失(binary cross-entropy loss)函数对权重进行更新

喷注赝光子本底

• $\text{jet} \rightarrow \gamma$ 本底: 事例中喷注被错误重建为光子 (如: $W/Z + \text{jets}$)

• **ABCD method**

• ~1% SRs



• 两个假设:

- 1). 光子的孤立和'Tight'识别条件不相关
- 2). CRs中的信号光子数可忽略

$$\bullet N_A/N_B = M_A/M_B$$

• MC估计参数

- 相关因子 R_{MC}
- 信号泄漏因子 $c_{1,2,3}$

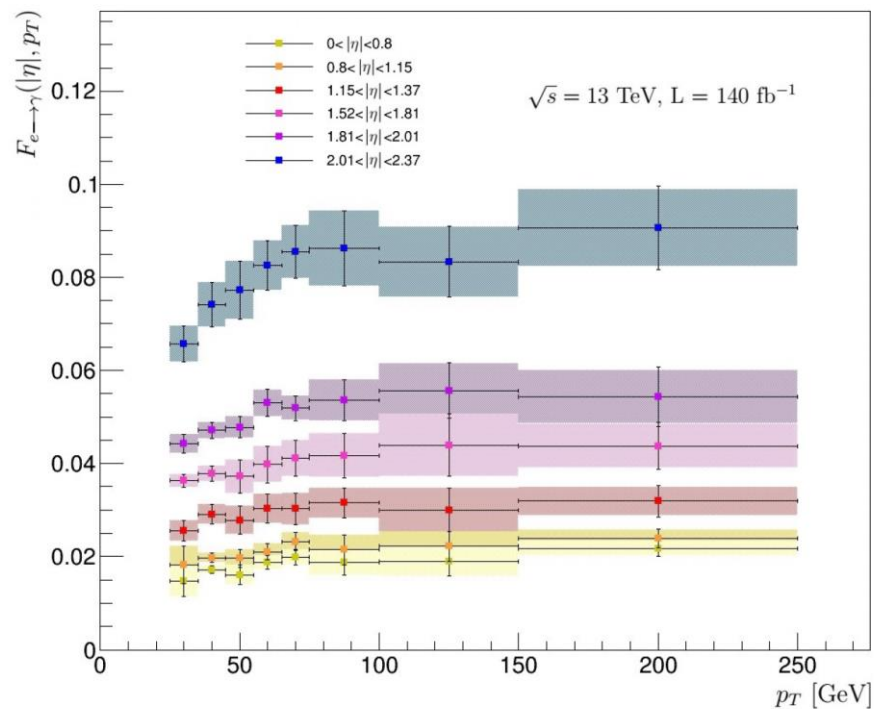
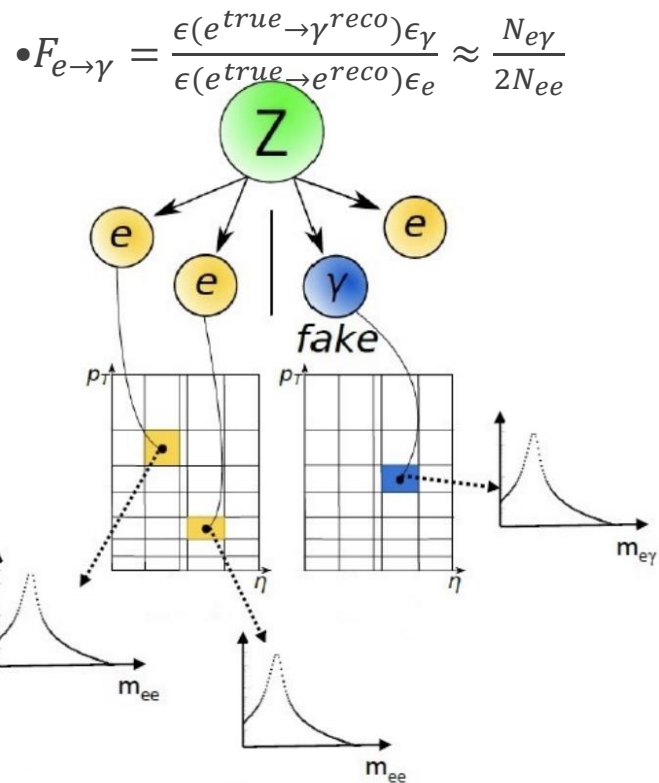
1 SR: 信号光子; 3 CRs: 非孤立/非'Tight'光子

数据驱动 (Data driven) 技术
以得到SR纯度

$$P = \frac{(M^B + N^A c_3 - N^B c_2 R_{MC} - M^A c_1 R_{MC})}{2N^A(c_1 c_2 R_{MC} - c_3)} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4(c_1 c_2 R_{MC} - c_3)(N^A M^B - N^B M^A R_{MC})}{(M^B + N^A c_3 - N^B c_2 R_{MC} - M^A c_1 R_{MC})^2}} \right)$$

电子赝光子本底

- $e \rightarrow \gamma$ 本底: 电子被错误重建为光子 (如: $W(\rightarrow e\nu)+\text{jets}$)
- $H \rightarrow \text{inv}$ 和 $Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma$ SRs: $\sim 5\%$
- $H \rightarrow \gamma\gamma_d$ SR: $\sim 35\%$
- 通过Z质量峰中 $e^\pm\gamma$ 和 e^+e^- 事例比进行估计: η & p_T bin.



统计学拟合

最大似然拟合

$$\mathcal{L} = \prod_{i \in \text{bins}} \mathcal{P}(N_i | B_i(\vec{\theta}) + \mu S_i(\vec{\theta})) \cdot \prod_{j \in \text{syst.}} \mathcal{G}(0 | \theta_j) B_i(\vec{\theta}) = \sum_{k \in \text{bkg.comp.}} \beta_{i,k} \cdot B_{i,k}(\vec{\theta})$$

三个拟合模型， 归一化参数：' '表示 ✓

EWK $Z(\nu\nu)\gamma$

	SR	Z γ QCD rev. γ Centrality CR 2	W γ CR
$\mu_{Z\gamma\text{EWK}}$	✓	✓	
$\mu_{Z\gamma\text{QCD}}$	✓	✓	
$\mu_{W\gamma}$	✓	✓	✓

HInv and $H_{\gamma\gamma\text{dark}}$

	SR	Z γ QCD rev. γ Centrality CR 2	W γ CR
$\mu_{Z\gamma\text{EWK}}$			
$\mu_{Z\gamma\text{QCD}}$			
$\mu_{W\gamma}$	✓	✓	✓