



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

# 博士学位论文

基于 ATLAS 实验通过多轻子衰变末态寻找 $t\bar{t}h$ 和 $hh$ 产生

作者姓名: 周茂森

指导教师: 方亚泉 研究员 中国科学院高能物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 粒子物理与原子核物理

培养单位: 中国科学院高能物理研究所

2019 年 6 月



**Search for  $t\bar{t}h$  and  $hh$  productions in multilepton final states**  
**with the ATLAS detector**

A thesis submitted to the  
University of Chinese Academy of Sciences  
in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of  
Doctor of Natural Science  
in Particle Physics and Nuclear Physics  
By  
**Zhou Maosen**  
**Supervisor: Professor Fang Yaquan**

**Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences**

**June, 2019**



## 中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

## 中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：



## 摘要

本文论述通过多轻子衰变道寻找标准模型(SM)希格斯粒子关联顶夸克对产生模式, 使用 2015 年到 2017 年 ATLAS 探测器收集的积分亮度为  $\int \mathcal{L} dt = 80 \text{ fb}^{-1}$  的质子-质子对撞数据。本文主要涉及末态是由一个轻子和两个强子化衰变的  $\tau$  组成的分析道  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ , 该分析道最终给出信号强度为  $\mu_{t\bar{t}h} = \sigma/\sigma_{\text{SM}} = 1.00^{+1.22}_{-1.02}$ , 相当于  $0.96\sigma$  的信号显著性。

本文也论述通过多轻子道寻找一对衰变到四个  $W$  玻色子的中性标量玻色子, 使用 2015 年到 2016 年 ATLAS 探测器收集的积分亮度为  $\int \mathcal{L} dt = 36.1 \text{ fb}^{-1}$  的质子-质子对撞数据。该搜寻包括三种信号模型: SM 非共振态产生 ( $hh$ ), 共振态产生 ( $X \rightarrow hh$ ) 和有两个重质量类希格斯粒子的共振态产生 ( $X \rightarrow SS$ )。通过三个衰变道研究: 本文重点关注的相同电荷双轻子 (2LSS), 三轻子 (3L) 以及四轻子 (4L)。联合三个衰变道结果, 没有发现明显超出 SM 迹象。95% 置信度下 SM 非共振态产生截面观测(期望)上限值为 160 倍 (120) 倍预期。 $X \rightarrow hh$  在  $260 \text{ GeV} \leq m_X \leq 500 \text{ GeV}$  的质量区间内的产生截面观测(期望)上限值为  $9.3 (10) \text{ pb}$  到  $2.8 (2.6) \text{ pb}$ 。 $X \rightarrow SS$  在  $280 \text{ GeV} \leq m_X \leq 340 \text{ GeV}$ ,  $135 \text{ GeV} \leq m_S \leq 165 \text{ GeV}$  的质量区间内产生截面观测(期望)上限值为  $2.5 (2.5) \text{ pb}$  到  $0.16 (0.17) \text{ pb}$ 。

**关键词:** ATLAS, ITk,  $t\bar{t}h$ ,  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ ,  $hh$ ,  $4W$



## Abstract

This thesis presents a search for the Standard Model (SM) Higgs boson production in association with a top quark pair ( $t\bar{t}h$ ) in an inclusive multileptonic final state with the full 2015, 2016 and 2017 proton-proton collision dataset collected by the ATLAS detector at center of mass energy of 13 TeV, corresponding to an integrated luminosity of  $\int \mathcal{L} dt = 80 \text{ fb}^{-1}$ . The sub-channel being focused on is  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  with the signature of one light lepton and two hadronic taus. A best-fit value for the strength of the  $t\bar{t}h$  production cross section with respect to the SM prediction of  $\mu_{t\bar{t}h} = 1.00^{+1.22}_{-1.02}$  is expected, corresponding the significance of  $0.96\sigma$ .

A search for a pair of neutral, scalar bosons decaying to four  $W$ -bosons in multilepton final states is also performed using  $36.1 \text{ fb}^{-1}$  dataset collected in 2015 and 2016 with the ATLAS detector. This search uses three production models: non-resonant production, resonant production, and resonant production of a pair of heavy Higgs-like scalars. Three final states, classified by the number of leptons, are analysed: two same-sign leptons (2LSS) that is this thesis's focus, three leptons, and four leptons. No significant excess of events is observed above the background expectation using a combination of the three channels. An observed (expected) 95% confidence-level upper limit of 160 (120) times the SM prediction of non-resonant Higgs pair production cross-section is set from a combined analysis of the three final states. Upper limits are set on the production cross-section times branching ratio of a heavy scalar  $X$  decaying into a Higgs boson pair in the mass range of  $260 \text{ GeV} \leq m_X \leq 500 \text{ GeV}$  and the observed (expected) limits range from 9.3 (10) pb to 2.8 (2.6) pb. Upper limits are set on the production cross-section times branching ratio of a heavy scalar  $X$  decaying into a pair of heavy scalars  $S$  for mass ranges of  $280 \text{ GeV} \leq m_X \leq 340 \text{ GeV}$  and  $135 \text{ GeV} \leq m_S \leq 165 \text{ GeV}$  and the observed (expected) limits range from 2.5 (2.5) pb to 0.16 (0.17) pb.

**Keywords:** ATLAS, ITk,  $t\bar{t}h$ ,  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ ,  $hh$ ,  $4W$



## 目 录

第 1 章 引言 .....	1
第 2 章 希格斯唯象学 .....	5
2.1 部分子分布函数 .....	5
2.2 希格斯物理 .....	6
2.2.1 单希格斯粒子产生模式 .....	7
2.2.2 标准模型希格斯粒子对产生 .....	10
2.2.3 超出标准模型希格斯粒子对产生 .....	11
2.2.4 类希格斯粒子对产生 .....	12
第 3 章 LHC 和 ATLAS 实验 .....	15
3.1 大型强子对撞机 .....	15
3.1.1 质子加速过程 .....	16
3.1.2 亮度 .....	16
3.2 ATLAS 探测器 .....	19
3.2.1 坐标系统 .....	19
3.2.2 内部径迹探测器 .....	19
3.2.3 量能器 .....	21
3.2.4 $\mu$ 子谱仪 .....	22
3.2.5 触发和数据采集系统 .....	23
3.3 ATLAS Phase-II 升级 .....	27
3.3.1 Strips 模块组装及测试 .....	28
3.3.2 ITk 预期寻迹性能 .....	31
3.4 事例重建 .....	35
3.4.1 径迹和能量簇射 .....	35
3.4.2 电子 .....	36
3.4.3 $\mu$ 子 .....	37
3.4.4 喷注 .....	40
3.4.5 $\tau_{\text{had}}$ .....	41
3.4.6 丢失横动量 .....	41
3.5 事例仿真 .....	42

---

<b>第 4 章 通过多轻子道寻找 <math>t\bar{t}h</math> 产生模式</b>	<b>45</b>
4.1 $t\bar{t}h$ 发现	45
4.2 tthML 分类	48
4.3 数据与 MC	49
4.4 粒子定义	50
4.5 重叠移除	52
4.6 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 分析	52
4.6.1 事例筛选	53
4.6.2 Fakes 本底估计	53
4.6.3 MVA 研究	60
4.6.4 系统误差	64
4.7 统计模型	64
4.7.1 似然函数	65
4.7.2 假设检验量	66
4.8 $t\bar{t}h$ 分析结果	67
4.8.1 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 结果	67
4.8.2 tthML 联合统计结果	71
<b>第 5 章 希格斯粒子对寻找</b>	<b>75</b>
5.1 希格斯对衰变	75
5.2 数据和蒙特卡罗样本	77
5.2.1 数据	77
5.2.2 信号样本	77
5.2.3 背景样本	78
5.3 事例筛选	80
5.3.1 粒子定义与重叠移除	80
5.3.2 初步筛选	81
5.3.3 喷注数分类	82
5.4 本底估计	86
5.4.1 QmisID 估计	88
5.4.2 Fakes 估计	91
5.5 信号优化	99
5.5.1 优化策略	99
5.5.2 优化效率检查	105
5.5.3 优化结果	106
5.6 系统误差	113

5.6.1 对撞亮度 .....	113
5.6.2 信号模型 .....	113
5.6.3 data-driven 本底 .....	113
5.6.4 MC 本底预期截面 .....	114
5.6.5 实验相关 .....	114
5.7 2LSS 统计结果 .....	115
5.8 4W 联合统计结果 .....	117
5.8.1 系统误差关联性 .....	117
5.8.2 统计模型检查 .....	118
5.8.3 联合统计结果 .....	124
5.9 $hh$ 联合拟合结果 .....	126
第 6 章 总结与展望 .....	129
参考文献 .....	131
攻读学位期间发表的学术论文与会议报告 .....	143
致谢 .....	145



## 图形列表

1.1 标准模型基本粒子总结。 . . . . .	2
2.1 质子-质子对撞中的部分子硬散射过程。 . . . . .	5
2.2 NNPDF3.0[1] 在 $\mu^2 = 10 \text{ GeV}^2$ 和 $\mu^2 = 10^4 \text{ GeV}^2$ 时的质子部分子分布函数 $xf(x)$ , 其中曲线宽度代表 PDF 误差。 . . . . .	6
2.3 (a) 标准模型希格斯粒子各产生模式截面随 $m_h$ 变化 ( $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ), (b) 标准模型希格斯粒子各产生模式截面随 $\sqrt{s}$ 变化 ( $m_h = 125 \text{ GeV}$ )。 . . . . .	7
2.4 (a) LO $ggF$ 产生过程; (b) LO $VBF$ 产生过程。 . . . . .	8
2.5 (a) LO $Vh$ 产生过程; (b)(c) LO $ggZh$ 产生过程。 . . . . .	8
2.6 LO $t\bar{t}h$ 和 $b\bar{b}h$ 产生过程。 . . . . .	9
2.7 (a)(b) 典型 LO $thqb$ 产生过程; (c)(d) 典型 LO $thW$ 产生过程。 . . . . .	9
2.8 LO 标准模型 $hh$ 胶子融合产生过程。 . . . . .	10
2.9 领头阶标准模型 $hh$ 矢量玻色子融合产生过程。 . . . . .	11
2.10 QCD 次领头阶 $hh$ 各产生模式的截面随 $\sqrt{s}$ 变化情况 [2], 包括胶子融合, 矢量玻色子融合, 顶夸克对, $W/Z$ 玻色子关联以及单顶夸克模式。这里 $H$ 指代标准模型希格斯粒子, 曲线宽度代表不确定度大小, 包括 scale 和 PDF。 . . . . .	11
2.11 超出标准模型希格斯粒子产生模式, 其中 2.11a 和 2.11b 通过修改希格斯粒子耦合顶点常数实现, 2.11c 则通过中间态高质量粒子 $X$ 实现。 . . . . .	12
2.12 14 TeV 质心系能量下希格斯粒子对 QCD (次) 领头阶的产生截面随自耦合系数的变化情况, 其中浅色虚线 (深色实线) 对应领头阶 (次领头阶) 结果, 曲线宽度代表来自包括 scales 和 PDF 的系统误差大小。 $\kappa=1$ 对应标准模型希格斯粒子对。 . . . . .	13
2.13 实标量希格斯粒子衰变分支比随质量分布, 曲线宽度表示不确定度大小。 [3] . . . . .	13
3.1 LHC 概览 . . . . .	15
3.2 ATLAS 2015 年和 2016 年亮度-pileup 分布。 . . . . .	17
3.3 ATLAS 数据收集情况。 . . . . .	18
3.4 ATLAS 探测器简图。 . . . . .	19
3.5 ATLAS 内部径迹探测器。 . . . . .	20
3.6 ATLAS 量能器布局。 . . . . .	21

3.7 (a) 与束流垂直方向 ( $x - y$ 平面) 的 $\mu$ 子谱仪布局, 它有三层同心圆柱, 每层包含 8 个大室和 8 个小室, 最外层半径大约为 20 米。(b) $y - z$ 平面的 $\mu$ 子谱仪布局。 .....	23
3.8 ATLAS TDAQ 系统 [4], 图中着重标注触发相关部分。L1Topo 与 FTK 正在研究, 并未包括本文的结果中。 .....	25
3.9 2015 年 LHC 一次注入 (fill) 时的 L1 (a) 和 HLT (b) 的各种信号组的触发率, 此次注入最高亮度为 $4.5 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。因为各种信号类别之间有重叠, 所以他们的触发率之和高于总的触发率 (黑色实线), Multi-object 触发项包含在 b-jets 与 tau 信号组中。亮度区间 400 之后的触发率增长是因为移除了 B-physics prescaling。Combined 触发组包含不同的触发信号, 比如电子与 $\mu$ 子, $\tau$ , jets 或者 MET。[4] .....	26
3.10 LHC 运行和升级时间表 [5]。 .....	27
3.11 (short-strip) Strips 模块。 .....	28
3.12 ITk Strips 传感器种类 [6], Strips 探测器桶部区内两层由短条 (short-strip) 传感器组成, 外两层由长条 (long-strip) 组成, 由于端部的扇形几何结构, 其 strip 间距 (pitch) 随半径不同而不同。 .....	29
3.13 ITk (short-strip) 模块实际组装过程 (省略 wire-bonding 过程), 粘合芯片的胶水需要紫外线照射固化。 .....	30
3.14 Strips 模块测试系统设置。 .....	30
3.15 Strips 模块输入噪声, 上图对应左手 Hybrid (LH), 下图对应右手 Hybrid (RH), 点线为粘合 PB 之前, '+' 为粘合 PB 之后, 每图底部为粘合 PB 之后与之前的噪声之比。总体上比例在 1 附近, 但因为每次实际测试时, 环境参数并不完全一致, 所以不能够表明粘合 PB 之后噪声一定增加或者减少了。下图底部的“鼓包”由电源板上的屏蔽盒 (shieldb-box, 内部有 DC-DC converter) 引起, 本文写作期间正在研究解决方案。 .....	32
3.16 (a) 为测试模块 strip 整体不良率; (b) 为 LBL-EL-08 模块不良 strip 在传感器上的分布情况。 .....	33
3.17 ITk seeds 随 $ \eta $ 分布 [7]。 .....	33
3.18 (a) 径迹重建效率随 $\eta$ 分布 (matching criteria); (b) 重建径迹与真实粒子之比随 $\eta$ 分布 (no matching criteria)。[8] .....	33
3.19 (a) 不同工作点的电子鉴别效率随 $E_T$ 分布; (b) 电子电荷误判率随 $ \eta $ 分布。[9] .....	34
3.20 不同粒子在 ATLAS 探测器 ( $r - \phi$ 平面) 的径迹和能量沉积情况。 .....	36
3.21 2105 年数据与 $Z \rightarrow ee$ MC 中的电子重建效率随簇射 $E_T$ (a) 和簇射 $\eta$ (b) 分布情况 [10]。 .....	37
3.22 2015 年数据和 $Z \rightarrow ee$ MC 在不同工作点的鉴别效率随顶点数分布情况 [10], 背景中的灰色直方图为顶点数的分布情况。 .....	38

3.23 2015 年电子和 $Z \rightarrow ee$ MC 的单电子触发效率随 $E_T$ (a) 和 $\eta$ (b) 的分布情况 [10]。 .....	39
3.24 2015+2016 年数据与 $Z \rightarrow \mu\mu, J/\Psi \rightarrow \mu\mu$ MC 中的 $\mu$ 子重建效率随 $p_T$ (a) 和 $\eta$ (b) 分布情况, (b) 中 $ \eta  < 0.1$ 区间 Loose $\mu$ 子效率的回升是因为使用 calorimeter-tagged 的 $\mu$ 子定义。 .....	39
3.25 2015+2016 年数据中 L1 MU20 seed 的触发效率随 $p_T$ 分布 [11], HLT 的在线筛选对 $\mu$ 子有一定的 isolation 要求。 .....	40
3.26 产生子中 $t\bar{t}h$ 事例演化过程 [12]。首先携带大动量的硬散射过程发生 (大红色圆), 随后 $t$ 和 $h$ 衰变 (小红色圆), 衰变产物发生 QCD 硬辐射 (红色); 除硬散射之外, 次要散射 (由参与硬散射之外的部分子参与) 也可能发生 (紫色); 最后辐射到一定低能量时, 强子化过程发生 (浅绿), 强子化产物衰变到稳定粒子 (深绿)。光子辐射可在任一阶段发生 (黄色)。 .....	42
4.1 tthML 树图阶费曼图, 左图: $h \rightarrow WW^*/ZZ^*$ , 右图: $h \rightarrow \tau\tau$ 。 ..	46
4.2 Run 1 联合 ATLAS 与 CMS 数据给出的希格斯产生模式最佳拟合值 [13], 粗线表示 $1\sigma$ , 细线表示 $2\sigma$ 。 .....	46
4.3 Run 2 $t\bar{t}h$ 信号强度测量结果。 .....	47
4.4 tthML 分类图示。 .....	48
4.5 左图: tthML 信号类别中希格斯衰变来源分布; 右图: $S/B$ (黑色), $S/\sqrt{B}$ (红色)。其中'other' 主要贡献来自 $h \rightarrow \mu\mu$ 和 $h \rightarrow b\bar{b}$ 。[14]	49
4.6 喷注随 $ \eta $ 分布, 所选事例通过 $2\ell\text{SS}$ 初步筛选, 喷注按照 $p_T$ 排序, 所以领头喷注的总事例数最少。总体上, 分布没有明显的 $ \eta $ 依赖, 可以排除由于 JVT 造成的影响。 .....	52
4.7 左列展示根据 MC 真实信息双 $\tau_{\text{had}}$ 事例分为 fake-fake, fake-real, real-real 和其他的分布, 右列展示假 $\tau_{\text{had}}$ 的源头分布, 第一行对应 SS 双 $\tau_{\text{had}}$ , 第二行对应 OS 双 $\tau_{\text{had}}$ 。 .....	54
4.8 经过 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 事例初始筛选 (以及 $\text{BDT} < 0.5$ ) 之后的观测数据与全部使用 MC 的预期本底比较, 不确定度仅包括 MC 统计误差。各运动学变量含义将在下一小节说明。 .....	56
4.9 经过 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 事例初始筛选 (以及 $\text{BDT} < 0.5$ ) 之后的观测数据与预期本底比较, 其中 fakes 使用 data-driven 方法估计, 其他本底均是 truth MC。各运动学变量含义将在下一小节说明。 .....	58
4.10 MC OS 与 SS 形状比较。 .....	59
4.11 第一行: njet, nbjet, Htjets; 第二行: LeadPt, SubPt, Mttau; 第三行: Jjdr, Etamax。 .....	61
4.12 左图: BDTG 过度训练检查; 右图: BDTG 本底排除效率随信号效率分布。 .....	61
4.13 SS 数据与 $t\bar{t}$ MC 形状比较。 .....	62

4.14 系统误差举例。 .....	64
4.15 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 拟合中考虑的系统误差总结, 绿色表示存在 (同时影响形状和大小), 黄色表示只影响大小。 .....	68
4.16 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 系统误差 pull。 .....	69
4.17 Asimov 数据 pre-fit 与 post-fit 结果。 .....	70
4.18 左图: 系统误差之间的关联性; 右图: 系统误差影响排名。 .....	70
4.19 Asimov 拟合之后的信号区分布, 数据只在 $S/B < 15\%$ bin 展示。 ..	72
4.20 左: 信号强度与各本底归一化 Asimov 拟合值; 右: NP 排序。 ..	73
5.1 $hh$ 主要衰变道分支比, 计算时假设 $m_h=125 \text{ GeV}$ 。 .....	75
5.2 在 8 TeV 质心系能量时 $\sigma(gg \rightarrow H) \times \text{BR}(H \rightarrow hh)$ 的 95% 置信度下的观测上限值与期望上限值, 结果联合拟合了 $b\bar{b}\tau\tau$ , $WW^*\gamma\gamma$ , $b\bar{b}\gamma\gamma$ 以及 $b\bar{b}bb$ 分析道。绿色和黄色区别分别表示期望上限值的 $\pm 1\sigma$ 和 $\pm 2\sigma$ , 500 GeV 以上的提升得益于 $b\bar{b}bb$ 的加入。 .....	76
5.3 $hh$ MC 的初步筛选效率。 .....	83
5.4 $SS$ MC 的初步筛选效率。 .....	84
5.5 $hh$ 信号的喷注 $p_T$ 分布和喷注数分布。图 5.5a 到 5.5e 是不同质量点的喷注未加 $p_T > 25 \text{ GeV}$ 条件之前的 $p_T$ 分布, 红色虚线分别对应 $p_T = 10 \text{ GeV}$ 和 $p_T = 25 \text{ GeV}$ 。图 5.5f 是喷注加上 $p_T > 25 \text{ GeV}$ 条件之后的喷注数分布。 .....	85
5.6 经过事例初始筛选之后数据与预期背景比较, 预期背景全部使用 MC 估计, 并且归一到 $\sigma \times \mathcal{L}$ , 图上部的粉色斜纹代表背景统计误差。 .....	87
5.7 似然函数方法给出的数据中电子电荷误判率随 $( \eta , p_T)$ 分布。 .....	89
5.8 似然函数方法 (实线) 和 truth-matching (虚线, 通过 MC 记录检查电子的真实电荷得到) 给出的 $Z + jets$ MC 中电子电荷误判率。 ..	90
5.9 电子电荷误判率的系统误差。此处 Likelihood 指代统计误差。 ..	90
5.10 经过事例初始筛选之后数据与预期背景比较, 对应 $N_{\text{jet}} \geq 2$ , promptSS 和 $V\gamma$ 使用 MC 估计, 并且归一到 $\sigma \times \mathcal{L}$ , QmisID 与 fakes 均用 data-driven 方法估计, 粉色斜纹代表误差相对大小, 包括 fakes 的所有误差项和其他本底的统计误差。 .....	98
5.11 经过事例初始筛选之后数据与预期背景比较, 对应 $N_{\text{jet}} \geq 3$ , promptSS 和 $V\gamma$ 使用 MC 估计, 并且归一到 $\sigma \times \mathcal{L}$ , QmisID 与 fakes 均用 data-driven 方法估计, 粉色斜纹代表误差相对大小, 包括 fakes 的所有误差项和其他本底的统计误差。 .....	98
5.12 训练变量之间的相关性。 .....	100
5.13 用于低质量信号优化的运动学变量分布, 对应 $N_{\text{jet}} \geq 2$ 。左: $ee$ , 中: $\mu\mu$ , 右: $e\mu$ 。 .....	101

---

5.14 用于低质量信号优化的运动学变量分布, 对应 $N_{\text{jet}} \geq 3$ 。左: $ee$ , 中: $\mu\mu$ , 右: $e\mu$ 。	102
5.15 左上: 信号效率和本底效率变化, 右下: SM $hh \mu\mu$ 信号显著性随 给定效率分布情况, 其他: 运动学变化最佳筛选上下限随信号效率 变化情况。显著性计算的信号与本底均考虑了统计误差, 0.72 选作 SM $hh \mu\mu$ 的最佳工作点, 其相应的运动学变量筛选值则用作最终 信号优化条件 (会进行一定的平滑性选择)。	103
5.16 $hh$ 信号优化效率 (相比于初步筛选)。	105
5.17 $SS$ 信号优化效率 (相比于初步筛选)。	105
5.18 SM $hh$ 质量点经过优化筛选之后 $M(\ell_1 jj)$ 分布。	107
5.19 $m_X=260 \text{ GeV}$ 质量点经过优化筛选之后 $M(all)$ 分布。	107
5.20 $m_X=300 \text{ GeV}$ 质量点经过优化筛选之后 $M(all)$ 分布。	108
5.21 $m_X=400 \text{ GeV}$ 质量点经过优化筛选之后 $M(\ell_1 jj)$ 分布。	109
5.22 $m_X=500 \text{ GeV}$ 质量点经过优化筛选之后 $M(\ell_1 jj)$ 分布。	109
5.23 经过 $SS$ 低质量点优化筛选条件的 $M(\ell_1 jj)$ 分布, 图中展示的信号 是 $m_X=300 \text{ GeV}, m_S=135 \text{ GeV}$ 。	111
5.24 经过 $SS$ 高质量点优化筛选条件的 $M(\ell_1 jj)$ 分布, 图中展示的信号 是 $m_X=340 \text{ GeV}, m_S=145 \text{ GeV}$ 。	112
5.25 $pp \rightarrow X \rightarrow hh$ 产生截面上限随 $m_X$ 分布。	116
5.26 $pp \rightarrow X \rightarrow hh$ 产生截面上限, 左图对应 fixing $m_S=135 \text{ GeV}$ , 右图 对应 fixing $m_X=340 \text{ GeV}$ 。	117
5.27 无信号 Asimov 数据给出的 $m_X=260 \text{ GeV}$ pull 图。	119
5.28 观测数据给出的 $m_X=260 \text{ GeV}$ pull 图。	119
5.29 S+B Asimov 数据给出的 $m_X=260 \text{ GeV}$ pull 图。	119
5.30 无信号 Asimov 数据给出的 $m_X=500 \text{ GeV}$ pull 图。	120
5.31 观测数据给出的 $m_X=500 \text{ GeV}$ pull 图。	120
5.32 S+B Asimov 数据给出的 $m_X=500 \text{ GeV}$ pull 图。	120
5.33 $m_X=260 \text{ GeV}$ 分析 NP 相关性检查, 分别对应无信号 Asimov 数据, 观测数据和 S+B Asimov 数据。	121
5.34 $m_X=500 \text{ GeV}$ 分析 NP 相关性检查, 分别对应无信号 Asimov 数据, 观测数据和 S+B Asimov 数据。	121
5.35 $m_X=260 \text{ GeV}$ 分析 NP 影响排名, 分别对应无信号 Asimov 数据, 观 测数据和 S+B Asimov 数据。	122
5.36 $m_X=500 \text{ GeV}$ 分析 NP 影响排名, 分别对应无信号 Asimov 数据, 观 测数据和 S+B Asimov 数据。	122
5.37 通过 4W 分析给出的 $X \rightarrow hh$ 截面上限值 (pb) 随 $m_X$ 分布, 包括各 个衰变道的期望值和联合结果。	124

5.38 通过 4W 分析给出的 $X \rightarrow SS$ 截面上限值 (pb) 随 (a) $m_S$ 与 (b) $m_X$ 分布, 包括各个衰变道的期望值和联合结果。 . . . . .	125
5.39 联合 $hh$ 各衰变道给出的标准模型希格斯粒子对的产生截面上限 (归一化到 $\sigma_{\text{SM}}$ )。 . . . . .	127
5.40 联合 $hh$ 各衰变道给出的共振态的产生截面上限 (pb)。 . . . . .	128
5.41 联合 $hh$ 各衰变道给出的标准模型希格斯粒子对产生截面上限随 $\kappa_\lambda$ 变化结果, 其中紫色曲线表示理论预期。 . . . . .	128

## 表格列表

1.1 四种相互作用特征表。 .....	3
2.1 13 TeV 质心系能量下标准模型希格斯玻色子(假设 $m_h=125.09\text{ GeV}$ )产生截面理论预测值 (pb), 其中误差包括来自 QCD scales, PDF 以及 $\alpha_s$ 的不确定度。 .....	10
2.2 13 TeV 质心系能量下标准模型 $hh$ (假设 $m_h=125.09\text{ GeV}$ , 但对于 $gg \rightarrow hhh, m_h=125\text{ GeV}$ ) 产生截面理论预测值 (fb)。 .....	12
3.1 LHC 设计指标, 以及在 2015 年和 2016 年的运行参数 [15] .....	17
4.1 信号与背景 MC 产生子总结。对每一项过程, 如果表中只有一个 PDF, 则表示硬散射和部分子簇射过程使用相同的 PDF; 如果有两个 PDF, 则前者用于硬散射, 后者用于部分子簇射。 $V$ 指代 $W$ 或者 $Z/\gamma^*$ 。Tune 指代部分子簇射产生子使用的次级碰撞微调器 (underlying-event tune)。MG5_aMC 是 MadGraph5_aMC@NLO 2.2.1 [16], Pythia 6 指代版本 6.427 [17], Pythia 8 指代版本 8.2 [18], Herwig++ 指代版本 2.7 [19]。通过 Pythia 6 或者 Pythia 8 产生的 MC 使用 EvtGen 1.2.0 [20] 模拟, 所有 MC 均考虑领头阶对数光子辐射 (leading-logarithm photon emission), 这通过部分子簇射产生子或者 PHOTOS [21] 仿真。 .....	50
4.2 tthML 重叠移除总结, 移除顺序从上到下。 .....	52
4.3 假 $\tau_{\text{had}}$ 估计方法在低喷注数区和低信号区的 closure test。 .....	55
4.4 训练变量重要性排名。 .....	62
4.5 预期信号与本底数。 .....	63
4.6 tthML 各个分析道拟合所涉及到的信号区域控制区。L 指代通过基本筛选条件, 加 '*' 表示额外的孤立化条件, SFOC 指代相同味道, 相反电荷轻子对。 .....	71
4.7 tthML 各个分析道的期望信号显著性与联合统计结果。 .....	73
5.1 $hh$ MC 产生情况, 每个质量点的 MC 包含 $++(\ell^+\ell^+)$ 和 $--(\ell^-\ell^-)$ , 在 ATLAS 产生环境中每个 MC 样本对应唯一的 DSID, AFII 表示探测器反应使用快速仿真 [22]。 .....	78
5.2 $X \rightarrow SS$ MC 产生总结, 每个质量包含 $++(\ell^+\ell^+)$ 与 $--(\ell^-\ell^-)$ , 分支比 $BR$ 对应 $pp \rightarrow X \rightarrow SS \rightarrow \ell^\pm\ell^\pm qqqq$ 。 .....	79
5.3 4W 物理分析粒子筛选条件总结 .....	80
5.4 4W 分析重叠移除总结, 移除顺序从上到下。 .....	80

5.5	4W 事例初步筛选条件。 . . . . .	82
5.6	SM $hh$ 信号 MC 的初步筛选效率。结果归一到 $\sigma_{\ell^\pm\ell^\pm} \times \mathcal{L}$ , 最后一行误差项为统计误差。 . . . . .	83
5.7	$Z$ 玻色子不变质量区间定义。 . . . . .	89
5.8	tight 与 anti-tight 电子定义, 两者都应通过轻子 baseline 筛选。 . . . . .	91
5.9	tight 与 anti-tight $\mu$ 子定义, 两者都应通过轻子 baseline 筛选。 . . . . .	91
5.10	Fake factor 方法中对应不同质量点的区域定义, 需要区分的是, 进入最终拟合的信号区 (SR) 两个轻子须满足 tight 筛选。 . . . . .	92
5.11	电子 Fake factor CR ( $N_{\text{jet}} == 1$ ) 中的数据与预期本底数, 不确定度仅是统计误差。 . . . . .	92
5.12	$\mu$ 子 Fake factor CR ( $N_{\text{jet}} == 1$ ) 中的数据与预期本底数, 不确定度仅是统计误差。 . . . . .	92
5.13	电子 Fake factor CR ( $1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$ ) 中的数据与预期本底数, 不确定度仅是统计误差。 . . . . .	93
5.14	$\mu$ 子 Fake factor CR ( $1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$ ) 中的数据与预期本底数, 不确定度仅是统计误差。 . . . . .	93
5.15	电子与 $\mu$ 子的 fake factor 计算值, 不确定度仅是统计误差。 . . . . .	93
5.16	Fake factor SR ( $N_{\text{jet}} \geq 2$ ) 中的数据与预期本底数, 不确定度仅是统计误差。 . . . . .	94
5.17	Fake factor SR ( $N_{\text{jet}} \geq 3$ ) 中的数据与预期本底数, 不确定度仅是统计误差。 . . . . .	94
5.18	Fake factor 方法给出的 fakes 计算值, 不确定度仅是统计误差。 . . . . .	94
5.19	利用 $t\bar{t}$ MC 得出的 $\theta_e$ 与 $\theta_\mu$ 的 non-closure 系统误差, 其中为了减小 MC 统计误差, 初步筛选并未要求双轻子相同电荷, 轻子 $p_T$ 条件以及 $M(ll) > 15 \text{ GeV}$ 。 . . . . .	95
5.20	$t\bar{t}$ (semi-leptonic) 与 $W + jets$ 在不同喷注数要求时的预期数比较, 两者均利用 Sherpa 产生。 . . . . .	96
5.21	Fake factor 在要求与不要求 $b$ 喷注时计算值, 其相对差别作为一项系统误差。 . . . . .	96
5.22	电子 fake factor 的系统误差 (%) 总结。 . . . . .	96
5.23	$\mu$ 子 fake factor 的系统误差 (%) 总结。 . . . . .	97
5.24	经过初步筛选之后的预期事例数, 对应 $N_{\text{jet}} \geq 2$ 。Fakes 的不确定度包括统计误差和系统误差, 其他本底和信号仅包含统计误差。 PromptSS 和 $V + \gamma$ 归一到 $\sigma \times \mathcal{L}$ 。 . . . . .	97
5.25	经过初步筛选之后的预期事例数, 对应 $N_{\text{jet}} \geq 3$ 。Fakes 的不确定度包括统计误差和系统误差, 其他本底和信号仅包含统计误差。 PromptSS 和 $V + \gamma$ 归一到 $\sigma \times \mathcal{L}$ 。 . . . . .	98

5.26 基于运动学变量 $X \rightarrow hh$ 信号优化总结, 对应 $m_X=260, 300$ GeV, 所有不变质量单位为 GeV。 .....	100
5.27 基于运动学变量 $X \rightarrow hh$ 信号优化总结, 对应 $m_X=400, 500$ GeV 以 及 SM $hh$ , 所有不变质量单位为 GeV。 .....	104
5.28 基于运动学变量 $X \rightarrow SS$ 信号优化总结, 所有不变质量单位为 GeV。 .....	104
5.29 SM $hh ee$ 类别的优化结果。 .....	106
5.30 SM $hh \mu\mu$ 类别的优化结果。 .....	106
5.31 SM $hh e\mu$ 类别的优化结果。 .....	106
5.32 $m_X=260$ GeV $ee$ 类别的优化结果。 .....	107
5.33 $m_X=260$ GeV $\mu\mu$ 类别的优化结果。 .....	107
5.34 $m_X=260$ GeV $e\mu$ 类别的优化结果。 .....	107
5.35 $m_X=300$ GeV $ee$ 类别的优化结果。 .....	107
5.36 $m_X=300$ GeV $\mu\mu$ 类别的优化结果。 .....	108
5.37 $m_X=300$ GeV $e\mu$ 类别的优化结果。 .....	108
5.38 $m_X=400$ GeV $ee$ 类别的优化结果。 .....	108
5.39 $m_X=400$ GeV $\mu\mu$ 类别的优化结果。 .....	108
5.40 $m_X=400$ GeV $e\mu$ 类别的优化结果。 .....	108
5.41 $m_X=500$ GeV $ee$ 类别的优化结果。 .....	109
5.42 $m_X=500$ GeV $\mu\mu$ 类别的优化结果。 .....	109
5.43 $m_X=500$ GeV $e\mu$ 类别的优化结果。 .....	109
5.44 $m_X=280$ GeV, $m_X=300$ GeV and $m_X=320$ GeV(fixing $m_S=135$ GeV) $ee$ 类别的优化结果。 .....	110
5.45 $m_X=280$ GeV, $m_X=300$ GeV and $m_X=320$ GeV(fixing $m_S=135$ GeV) $\mu\mu$ 类别的优化结果。 .....	110
5.46 $m_X=280$ GeV, $m_X=300$ GeV and $m_X=320$ GeV(fixing $m_S=135$ GeV) $e\mu$ 类别的优化结果。 .....	110
5.47 $m_S=135$ GeV, $m_S=145$ GeV, $m_S=155$ GeV and $m_S=165$ GeV(fixing $m_X=340$ GeV) $ee$ 类别的优化结果。 .....	111
5.48 $m_S=135$ GeV, $m_S=145$ GeV, $m_S=155$ GeV and $m_S=165$ GeV(fixing $m_X=340$ GeV) $\mu\mu$ 类别的优化结果。 .....	111
5.49 $m_S=135$ GeV, $m_S=145$ GeV, $m_S=155$ GeV and $m_S=165$ GeV(fixing $m_X=340$ GeV) $e\mu$ 类别的优化结果。 .....	111
5.50 $X \rightarrow hh$ 理论误差。 .....	114
5.51 $X \rightarrow SS$ 理论误差。 .....	114
5.52 对应 non-resonant $hh e\mu$ 搜索的系统误差(%) 总结。 .....	115

5.53 95% 置信度下 $X \rightarrow hh$ 产生截面上限, SM $hh$ 列对应 $\sigma/\sigma_{SM}$ , 其余列对应 $\sigma(\text{pb})$ 。 .....	116
5.54 95% 置信度下 $X \rightarrow SS$ 产生截面上限, 所有列单位为 pb。 .....	117
5.55 4W 分析中各种系统误差关联策略。 .....	118
5.56 系统误差 JET_Pileup_OffsetMu 对信号本底的相对影响, 其正反变化不对称。 .....	118
5.57 $hh$ $\Delta\text{limit}/\text{limit}$ 总结, 每行对应去掉该项 NP 之后上限的变化。 ..	122
5.58 $SS$ $\Delta\text{limit}/\text{limit}$ 总结, 每行对应去掉该项 NP 之后上限的变化。 ..	123
5.59 $SS(m_X = 340 \text{ GeV})$ $\Delta\text{limit}/\text{limit}$ 总结, 每行对应去掉该项 NP 之后上限的变化。 .....	123
5.60 通过 4W 分析给出的 $X \rightarrow hh$ 截面上限值, 包括各个衰变道的期望值和联合结果。 .....	124
5.61 通过 4W 分析给出的 $X \rightarrow SS$ 截面上限值, 对应 $m_S = 135 \text{ GeV}$ , 包括各个衰变道的期望值和联合结果。 .....	125
5.62 通过 4W 分析给出的 $X \rightarrow SS$ 截面上限值, 对应 $m_X = 340 \text{ GeV}$ , 包括各个衰变道的期望值和联合结果。 .....	126

## 符号列表

### 缩写

LHC	大型强子对撞机
ATLAS	超环面仪器
CMS	紧凑 $\mu$ 子线圈
LHCb	LHC-beauty
ALICE	大型离子对撞机实验

### 名词解释

$\sqrt{s}$	质心系能量
IP	质子-质子对撞点
PV	Primary Vertex, 转移能量最大的质子-质子相互作用点
pileup	初始顶点外的质子-质子相互作用
MC	利用蒙特卡罗方法产生的仿真事例
CR	Control Region, 信号少, 用于本底研究的区域
ID	粒子鉴别条件
isolation	粒子孤立化条件



## 第1章 引言

粒子物理是关于基本粒子的学科，基本粒子的定义是不再可分的粒子。粒子可不可分取决于“探针”的空间分辨率 ( $\Delta r$ )，假设“探针”由点粒子组成，其分辨率由德布罗意波长 ( $\lambda = h/p$ ) 决定。一台光学显微镜的分辨率为：

$$\Delta r \approx \lambda / \sin\theta \quad (1.1)$$

代入德布罗意公式，得到：

$$\Delta r \approx \frac{h}{p \sin\theta} \approx \frac{h}{q} \quad (1.2)$$

可以发现， $\Delta r$  与转移给光子或者其他入射粒子的动量 ( $q$ ) 成反比，那么对于  $qc = 10 \text{ GeV}$  的动量转移，相应的空间分辨率大约为  $10^{-16} \text{ m}$ ，大约只有质子半径的十分之一。所以想要看的越小，就需要更高的能量<sup>1</sup>。粒子物理就是伴随着加速器发展起来的，在 20 世纪早期，质子、中子曾作为基本粒子，因为当时的加速器能量只能达到几 MeV，随着加速器能量的提高，更多的粒子被发现，盖尔曼等人提出夸克模型以解释新发现的粒子 [23–25]，并从 70 年代开始，所谓的标准模型 (SM) 在格拉肖等人的努力下建立起来 [26–30]。

标准模型是描述基本粒子和相互作用的理论（未包括引力作用），它成功预言或解释了大多数目前观测到的实验现象。根据标准模型，物质世界由自旋为  $1/2$  的费米子组成，包括夸克 ( $u, d, c, s, t, b$ ) 和轻子 ( $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )。标准模型基本粒子总结在图1.1。

标准模型是基于  $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  群的规范场论，总共包含 12 个生成元。每个生成元对应传递相互作用的一个规范玻色子，其中八个是胶子，为对称群为  $SU(3)_C$  的强相互作用传播子；另外四个是  $\gamma, W^\pm, Z$ ，为对称群为  $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  的电弱相互作用传播子。为了保持规范对称性，这些中间传播子应当是无质量的。夸克间的强相互作用由量子色动力学 (QCD) 描述，它具有渐近自由和夸克禁闭的性质。电磁和弱作用由电弱统一理论 (EW) 描述，其中电磁相互作用通过光子传递，弱作用通过  $W^\pm, Z$  传递。每种相互作用有不同的力程和强度，总结如表1.1所示<sup>2</sup>。弱作用的短力程和长作用时间表明中间玻色子 ( $W^\pm, Z$ ) 是有质量的，而这与规范对称性矛盾。

<sup>1</sup>在本文将采用的自然单位制中，可以更直接的看到这一联系： $1 \text{ GeV}^{-1} \approx 0.2 \text{ fm}$ 。

<sup>2</sup>弱相互作用常数具有  $\text{GeV}^{-2}$  量纲，为方便比较，乘上质子质量平方，引力作用常数也使用质子质量。

## Standard Model of Elementary Particles

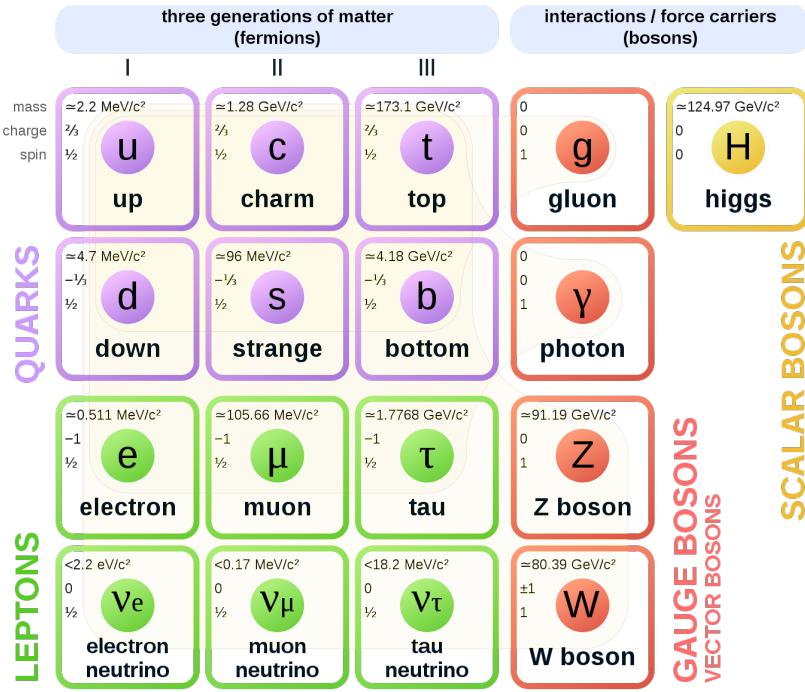


图 1.1 标准模型基本粒子总结。

希格斯机制 [31–36] 保持了理论的规范对称性，同时通过自发对称性破缺使得中间玻色子获得了质量，并且预言了一个新的标量粒子，即希格斯粒子。经过几十年的寻找，希格斯粒子于 2012 年在 LHC 发现 [37, 38]。虽然截止目前对希格斯粒子的测量并未发现明显超出标准模型迹象，但是误差较大。精确测量希格斯粒子性质是非常重要的，因为任何的偏差会给新物理寻找提供线索。顶夸克的汤川耦合是希格斯粒子测量的重要目标，顶夸克在标准模型中具有最大的质量，理论表明它与希格斯粒子的汤川耦合是最强的，所以实验与理论的偏差有可能是新物理的迹象。希格斯粒子关联顶夸克对产生模式 ( $t\bar{t}h$ ) 是这一测量的黄金过程，虽然  $t\bar{t}h$  产生截面只占希格斯粒子总产生截面的 1%，但是 Run 2 是 Run 1 的几乎四倍，为  $t\bar{t}h$  寻找提供了可能。

与夸克和轻子不同，希格斯粒子具有一独特的性质，即自耦合，自耦合常数的测量可以帮助验证和更深一步理解希格斯机制。通过测量希格斯粒子对 ( $hh$ ) 的产生可以帮助限制自耦合常数范围。而且在许多新物理模型中，通过修改自耦合常数或者增加一个希格斯二重态可以增大希格斯粒子对的产生截面，所以希格斯粒子对寻找也是通向新物理的渠道之一。

标准模型希格斯粒子有多种衰变渠道，主要到  $b\bar{b}$ ,  $ZZ$ ,  $\tau\tau$  等。 $h \rightarrow b\bar{b}$  虽然

	强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用	引力相互作用
源	色荷	电荷	弱超荷	质量
相互作用常数	$1 \sim 10$	$\approx 1/137$	$\approx 1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-40}$
力的传递者	胶子	光子	$W^\pm, Z$	-
典型作用时间 (s)	$10^{-23}$	$10^{-16}$	$10^{-10}$	-
力程	1 fm	$\infty$	1/400 fm	$\infty$

表 1.1 四种相互作用特征表。

有最高的分支比 (58%)，但是在强子对撞机容易淹没在海量的喷注本底中。而  $h \rightarrow WW/\tau\tau$  可为希格斯粒子提供标记，得益于它们的轻子末态或者强子化衰变的  $\tau_{had}$ 。本文将论述通过多轻子道寻找  $t\bar{t}h$  和希格斯粒子对，结构如下：第2章简要介绍希格斯唯象学，包括 LHC 单希格斯粒子产生，双希格斯粒子产生以及类希格斯对产生；第3章首先描述 LHC 和 ATLAS 探测器，随后介绍 ATLAS 实验事例重建，事例仿真等过程，最后介绍 ATLAS Phase-II 升级以及硅微条探测器模块组装和测试；第4章论述通过多轻子道寻找  $t\bar{t}h$  产生，主要关注由单轻子和两  $\tau_{had}$  组成的信号道的数据分析过程，并给出统计结果；第5章展示通过多轻子道寻找希格斯粒子对和类希格斯对产生，重点论述相同电荷双轻子分析道，最后给出统计结果；第6章作出文章总结，并对未来的分析工作作出一定展望。



## 第2章 希格斯唯象学

### 2.1 部分子分布函数

质子对撞可以产生丰富的物理过程，这得益于质子是一个复合粒子。对于一定能量(GeV以上)的质子，在每次对撞中，往往是质子的某一部分(Parton，部分子)参与相互作用(图2.1)，而这一部分的能量是不确定的，多种多样具有不同能量阈值的物理过程才可以发生。但是为了准确预测各种物理过程的产生截面，我们需要了解质子中各部分子的能量分布情况。通过深度非弹实验[39]，我们可以得知具有特定比例动量 $x$ 的部分子的存在概率 $f(x)$ ，即PDF(Parton Distribution Function)。但是这些测量均在特定 $\mu$ (代表散射过程中的典型能量转移大小)进行，得到的PDF须根据微扰QCD演化公式[40]外推到大型强子对撞机(LHC)能量尺度。图2.2展示LHC常用的一种PDF，值得指出的是， $\mu^2 = 10^4 \text{ GeV}^2$ 表示希格斯粒子产生过程的典型能量转移，在13 TeV质心系能量下， $x$ 大约为 $10^{-2}$ ，所以LHC希格斯粒子产生的主要贡献来自胶子融合。之后，根据因子化定理

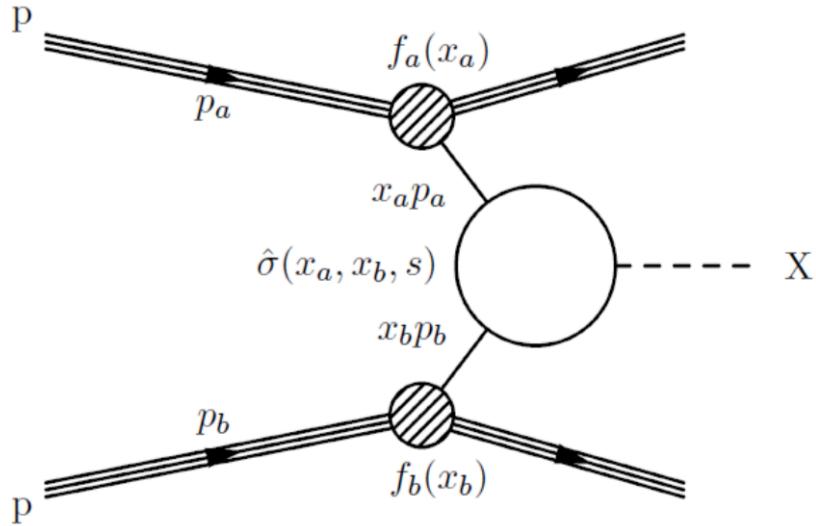


图2.1 质子-质子对撞中的部分子硬散射过程。

[41]，图2.1所示的质子-质子对撞的单举产生截面则为：

$$\sigma_{pp \rightarrow X} = \sum_{a,b} \int dx_a dx_b f_a(x_a, \mu_F^2) f_b(x_b, \mu_F^2) \hat{\sigma}_{ab \rightarrow X}(x_a p_a, x_b p_b, \mu_R^2, \mu_F^2) \quad (2.1)$$

公式中对所有可以发生某过程的各种味道部分子求和，部分子的PDF $f_i(x_i, \mu_F^2)$ 依赖 $\mu_F^2$ ，即因子化尺度，代表探查质子时的能量尺度，而硬散射过程 $ab \rightarrow X$

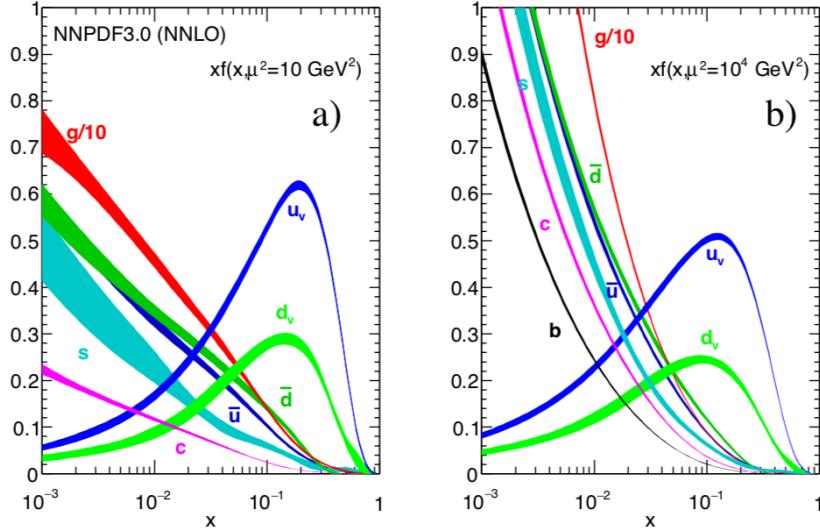


图 2.2 NNPDF3.0[1] 在  $\mu^2 = 10 \text{ GeV}^2$  和  $\mu^2 = 10^4 \text{ GeV}^2$  时的质子部分子分布函数  $xf(x)$ , 其中曲线宽度代表 PDF 误差。

截面还依赖于 QCD 重整化大小  $\mu_R^2$ 。需要指出的是,  $\mu_F$  和  $\mu_R$  都是为了计算结果有物理意义而人为选择的参数, 在微扰 QCD 中, 如果能够计算散射过程的所有展开阶数, 物理过程的产生截面不依赖于  $\mu_F$  和  $\mu_R$ , 但是在有限阶数的计算下,  $\mu_F$  和  $\mu_R$  的大小选择会影响截面的计算结果, 这也是理论误差的来源之一。

## 2.2 希格斯物理

标准模型引入了一个具有非零真空期望值的复标量希格斯场,  $\varphi$ , 其场势能项为:

$$V(\varphi) = -v^2 \lambda \varphi^\dagger \varphi + \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2 \quad (2.2)$$

其中,  $v = (\sqrt{2}G_F)^{-1/2} \approx 246 \text{ GeV}$  为希格斯场真空期望值,  $\lambda$  是希格斯自耦合参数。通过自发对称性破缺,  $W^\pm$  和  $Z$  玻色子得到质量, 而且预言了一个额外的标量粒子, 即希格斯玻色子。在标准模型中包含希格斯耦合项的拉氏量密度如公式2.3所示:

$$\mathcal{L} = -\lambda \bar{f} f h + \delta_V V_\mu V^\mu (\lambda_{hVV} h + \lambda_{hhVV} h^2) + \lambda_{hh} h^2 + \lambda_{hhh} h^3 + \lambda_{hhhh} h^4 \quad (2.3)$$

其中,  $f$  代表费米子,  $V$  为  $W^\pm$  ( $\delta_W=1$ ) 和  $Z$  ( $\delta_Z=1/2$ ) 玻色子, 并且方程中的耦合参数可以表达为:

$$\begin{aligned} \lambda_{h\bar{f}f} &= \frac{m_f}{v}, \quad \lambda_{hVV} = \frac{2m_V^2}{v}, \quad \lambda_{hhVV} = \frac{m_V^2}{v^2} \\ \lambda_{hh} &= \frac{m_h^2}{2}, \quad \lambda_{hhh} = \frac{m_h^2}{2v} = \lambda v, \quad \lambda_{hhhh} = \frac{m_h^2}{8v^2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

可以看到希格斯粒子与其他粒子的耦合强度正比于其他粒子质量，所以希格斯粒子与顶夸克耦合最强。另外当希格斯粒子质量确定之后，希格斯自耦合参数  $\lambda_{hhh}$  也随之确定， $\lambda_{hhh}$  测量是可以直接检验希格斯机制的。

### 2.2.1 单希格斯粒子产生模式

在 LHC 单希格斯粒子有以下产生模式：

- 胶子融合 ( $ggF$ ):  $gg \rightarrow h$ ;
- 矢量玻色子融合 (VBF):  $q'q \rightarrow q'qh$ ;
- $W$  或  $Z$  玻色子关联产生 ( $Vh$ ):  $q\bar{q} \rightarrow Vh$ , 其中还包括部分 (~8%):  $gg \rightarrow Zh$  ( $ggZh$ );
- 底夸克对关联产生 ( $b\bar{b}h$ ):  $q\bar{q}/gg \rightarrow b\bar{b}h$ , 和顶夸克对关联产生 ( $t\bar{t}h$ ):  $q\bar{q}/gg \rightarrow t\bar{t}h$ ;
- $t$  过程单顶夸克关联产生 ( $thqb$ ):  $qg \rightarrow thq'b$  (四味方案), 和关联  $W$  玻色子产生 ( $thW$ ):  $gb \rightarrow thW$  (五味方案) ,  $s$  过程可以忽略。

图2.3分别总结了上述几种产生模式在  $\sqrt{s} = 13$  TeV 时产生截面随  $m_h$  变化情况，和在  $m_h=125$  GeV 时随  $\sqrt{s}$  变化情况。

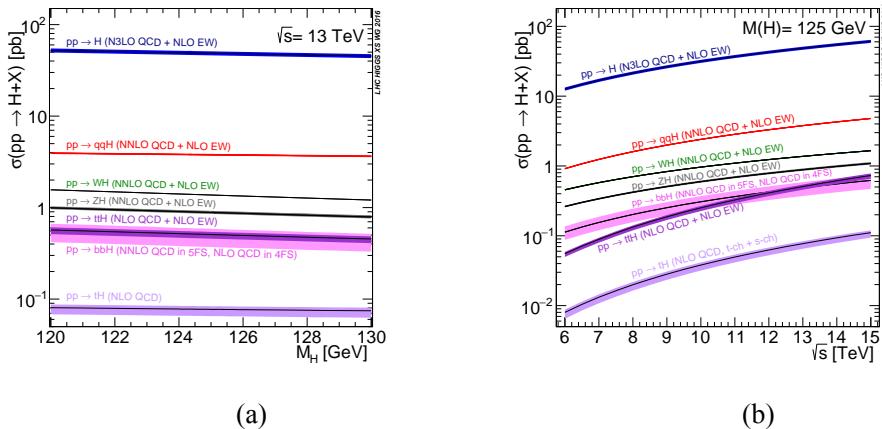


图 2.3 (a) 标准模型希格斯粒子各产生模式截面随  $m_h$  变化 ( $\sqrt{s} = 13$  TeV), (b) 标准模型希格斯粒子各产生模式截面随  $\sqrt{s}$  变化 ( $m_h = 125$  GeV)。

$ggF$  是 LHC 上希格斯粒子产生的主要过程，大约占比 90% ( $m_h=125$  GeV)，是希格斯粒子发现的首要贡献过程。在一般的超出标准模型设置中， $ggF$  也假设为主要贡献过程，如本文将要研究的  $hh$  产生。不过需要指出的是， $ggF$  过程有很高的 QCD 本底，不能很好地纯化。图2.4a是  $ggF$  的领头阶 (LO) 的费曼图，因为胶子是无质量的，所以必须通过重味夸克传递。

$VBF$  具有第二大的产生截面，其 LO 费曼图如图2.4b所示，除了产生希格斯粒子外，还有两个较前向的喷注，这是它的显著信号特征，可以与  $ggF$  很好区分； $VBF$  于 2018 年被正式发现 [42]。

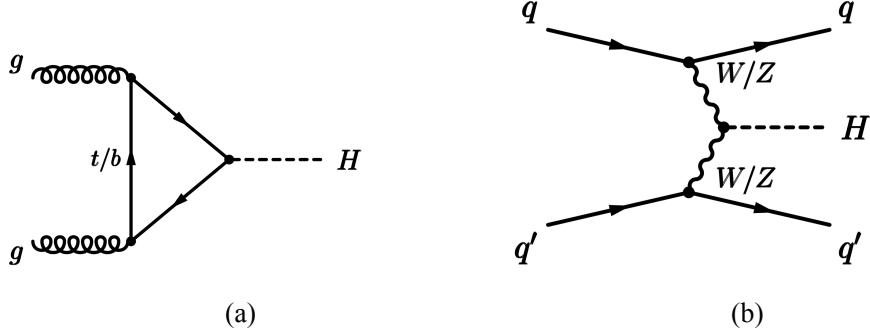


图 2.4 (a) LO  $ggF$  产生过程；(b) LO  $VBF$  产生过程。

$Vh$  过程的显著特征是末态中只有一个  $W$  或  $Z$  玻色子和希格斯粒子，其 LO 费曼图如图2.7a所示。它可以通过玻色子的轻子化衰变产物去寻找，从而极大地压低 QCD 本底。 $Vh$  是发现  $h \rightarrow b\bar{b}$  的黄金过程，并已于 2018 年正式发现 [43, 44]。通过  $Vh$  过程，我们还可以测量  $\lambda_{hVV}$  参数。另外， $ggZh$  的产生截面很小，一般在希格斯粒子性质测量中，没有考虑。

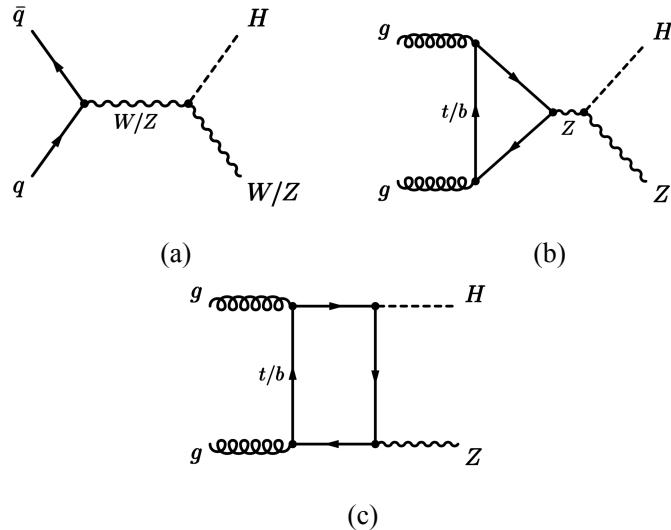


图 2.5 (a) LO  $Vh$  产生过程；(b)(c) LO  $ggZh$  产生过程。

相比于  $ggF$  和  $VBF$ ， $b\bar{b}h$  和  $t\bar{t}h$  产生截面很小。对于  $b\bar{b}h$ ，其挑战在于一般  $b$  夸克动量很低，不能有效地标记。而对于  $t\bar{t}h$ ，得益于顶夸克的质量，其衰变产物，如  $b$  喷注，具有较高的动量，可以有效标记，最终可以标记到此过程的相空间。通过  $t\bar{t}h$  的研究可以测量希格斯粒子与最重粒子的汤川耦合参数。在 LHC，

$t\bar{t}h$  是近几年的研究热点，已开展  $t\bar{t}h(\rightarrow \gamma\gamma)$ ,  $t\bar{t}h(\rightarrow b\bar{b})$  以及  $t\bar{t}h(\rightarrow \ell/\tau)$  (一般称为 tthML)，其中 tthML 研究将在本文讲述。 $t\bar{t}h$  的 LO 费曼图见图2.6。

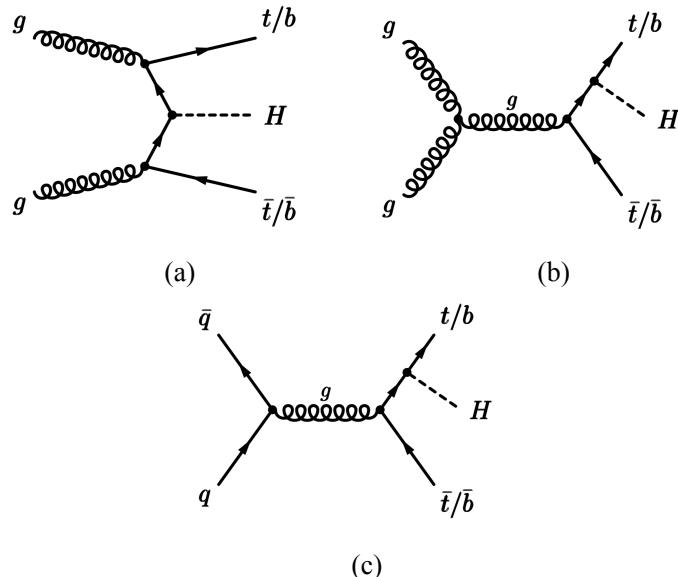


图 2.6 LO  $t\bar{t}h$  和  $b\bar{b}h$  产生过程。

$th$  过程，具有最小的产生截面，其 LO 费曼图如图2.7所示。它的末态产物跟  $t\bar{t}h$  很相似，可以跟  $t\bar{t}h$  一起研究，联合测量希格斯粒子与顶夸克的汤川耦合常数。

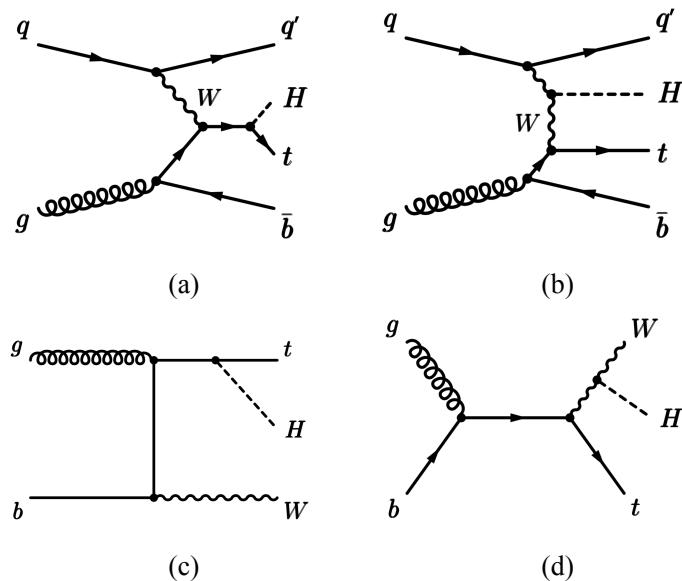


图 2.7 (a)(b) 典型 LO  $thqb$  产生过程; (c)(d) 典型 LO  $thW$  产生过程。

表2.1总结这些产生过程在  $\sqrt{s} = 13$  TeV 时的截面，其计算 QCD 阶数和 QED 阶数也列出。

Production process	Cross section [pb]	Order of calculation
$ggF$	$48.61 + (\text{theory})^{+4.27\%}_{-6.49\%} (\text{PDF})^{+1.85\%}_{-1.85\%} (\alpha_s)^{+2.59\%}_{-2.62\%}$	$N^3\text{LO QCD} + \text{NLO EW}$ [45, 46]
$VBF$	$3.766 + (\text{scale})^{+0.43\%}_{-0.33\%} (\text{PDF} + \alpha_s)^{+2.1\%}_{-2.1\%}$	$\text{NNLO QCD} + \text{NLO EW}$ [45, 46]
$Wh$	$1.358 + (\text{scale})^{+0.51\%}_{-0.51\%} (\text{PDF} + \alpha_s)^{+1.35\%}_{-1.35\%}$	$\text{NNLO QCD} + \text{NLO EW}$ [45, 46]
$Zh$	$0.880 + (\text{scale})^{+3.50\%}_{-2.68\%} (\text{PDF} + \alpha_s)^{+1.65\%}_{-1.65\%}$	$\text{NNLO QCD} + \text{NLO EW}$ [45, 46]
$t\bar{t}h$	$0.507 + (\text{scale})^{+5.8\%}_{-9.2\%} (\text{PDF} + \alpha_s)^{+3.6\%}_{-3.6\%}$	$\text{NLO QCD} + \text{NLO EW}$ [47]
$b\bar{b}h$	$0.486 + (\text{scale} + \text{PDF} + \alpha_s)^{+20.1\%}_{-23.9\%}$	$5\text{FS NNLO} + 4\text{FS NLO}$ [47]
$th$	$0.848 + (\text{scale} + \text{FS})^{+6.6\%}_{-13.3\%} (\text{PDF} + \alpha_s)^{+3.3\%}_{-3.3\%}$	$\text{NLO QCD}$ [48]

表 2.1 13 TeV 质心系能量下标准模型希格斯玻色子（假设  $m_h = 125.09$  GeV）产生截面理论预测值 (pb)，其中误差包括来自 QCD scales, PDF 以及  $\alpha_s$  的不确定度。

## 2.2.2 标准模型希格斯粒子对产生

标准模型预言希格斯粒子对产生，与单希格斯粒子产生类似，其主要来源是胶子融合过程。在 LHC LO 的产生过程如图2.8所示，分为箱图 (2.8a) 和能够测量  $\lambda_{hhh}$  的三角图 (2.8b)。在三角图中，中间态的希格斯粒子作为一个传播子，质量不在壳，而末态的双希格斯粒子均在壳；而中间态希格斯粒子在壳，末态希格斯粒子不在壳的情况下被极大地压低 [1]。而且需要指出的是，箱图和三角图具有抵消干涉项，导致标准模型希格斯对总产生截面很小。

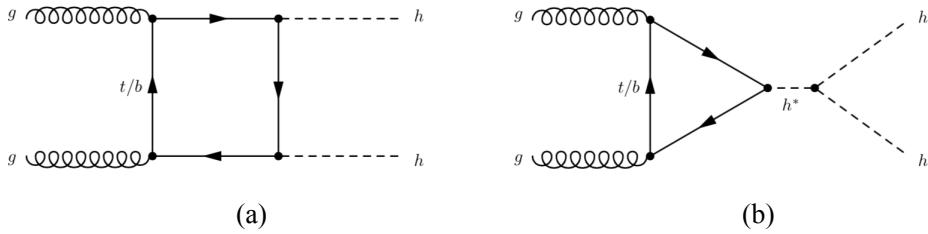
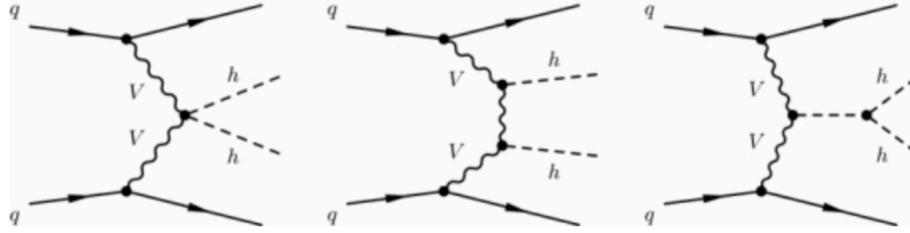
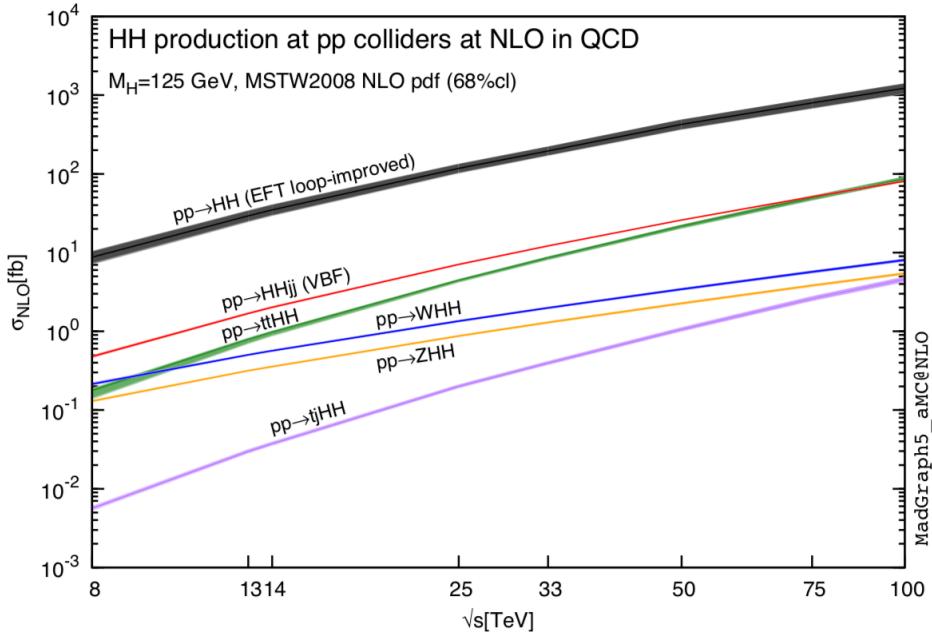


图 2.8 LO 标准模型  $hh$  胶子融合产生过程。

另外，除了胶子融合过程，还有其他希格斯粒子对产生模式，比如矢量玻色子融合，其领头阶费曼图如图2.10所示。需要指出的是，在 ATLAS 利用 2015 年和 2016 年数据进行的分析中，仅考虑了胶子融合过程，这也是本文  $hh$  研究的考虑范围。

图2.10总结了不同  $hh$  产生过程截面随  $\sqrt{s}$  的变化情况。对于 13 TeV 质子质子对撞，考虑 QCD 次次领头阶 (NNLO) 和次次领头阶对数求和 (NNLL) 以及次领头阶有限顶夸克质量影响，几种  $hh$  产生过程的截面 [48] 总结在表2.2。<sup>1</sup>：

<sup>1</sup>目前已有的计算结果 [49, 50]，但本文  $hh$  分析使用列出的计算值。

图 2.9 领头阶标准模型  $hh$  矢量玻色子融合产生过程。图 2.10 QCD 次领头阶  $hh$  各产生模式的截面随  $\sqrt{s}$  变化情况 [2]，包括胶子融合，矢量玻色子融合，顶夸克对， $W/Z$  玻色子关联以及单顶夸克模式。这里  $H$  指代标准模型希格斯粒子，曲线宽度代表不确定度大小，包括 scale 和 PDF。

### 2.2.3 超出标准模型希格斯粒子对产生

虽然目前希格斯粒子的测量结果越来越符合标准模型预期，但 125 GeV 质量很难避开精细调节，如果有 TeV 量级的新粒子，此种不自然性就可以避免。在许多超出标准模型中， $hh$  产生截面既可以通过非共振态也可以通过共振态模式增强。对于非共振态模式，可以修改  $\lambda_{h\bar{t}}$  顶点 [51, 52] 或者一个新的带色荷标量粒子 [53]；或者增强  $\lambda_{hhh}$  自耦合顶点，如图 2.11b 中的绿圈所示。非共振态增强可以表述为超出标准模型产生截面与标准模型产生截面比值，对于希格斯自耦合顶点增强而言，等价于耦合常数增强，即  $\kappa_\lambda = \lambda/\lambda_{SM}$ ，从标准模型电弱测量得知，其被限制在  $(-14, 17.4)$  [54] 范围内。而且值得指出的是，不同的  $\kappa$  对希格斯对产生有不同的影响 [2]，图 2.12 展示希格斯粒子对产生截面随  $\kappa$  的变化情况。在高  $\lambda$  区 ( $|\kappa_\lambda| > 10$ )，非共振态干涉贡献主要来自于自耦合顶点。 $\kappa$  的确认可

Production process	Cross section [fb]	Order of calculation
$gg \rightarrow hh$	$33.49 + (\text{scale})^{+4.3\%}_{-6.0\%} \text{theory}^{+5\%}_{-5\%} (\alpha_s)^{+2.3\%}_{-2.3\%} \text{PDF}^{+2.1\%}_{-2.1\%}$	NNLO+NNLL QCD
$\text{VBF} \rightarrow hh$	$1.62 + (\text{scale})^{+2.3\%}_{-2.7\%} (\text{PDF})^{+2.3\%}_{-2.3\%}$	NLO QCD
$gg \rightarrow hhh$	$0.0632 + (\text{scale})^{+16.1\%}_{-14.1\%} (\text{PDF})^{+3.4\%}_{-3.4\%}$	NLO QCD

表 2.2 13 TeV 质心系能量下标准模型  $hh$  (假设  $m_h = 125.09$  GeV, 但对于  $gg \rightarrow hhh$ ,  $m_h = 125$  GeV) 产生截面理论预测值 (fb)。

以通过测量希格斯对产生截面得到, 这是  $hh$  研究的重要目标。

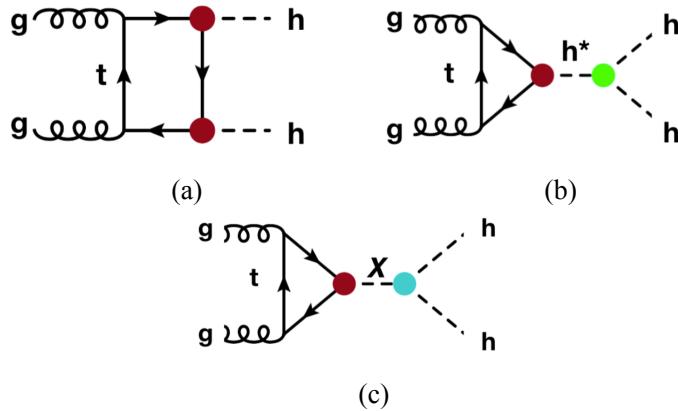


图 2.11 超出标准模型希格斯粒子产生模式, 其中 2.11a 和 2.11b 通过修改希格斯粒子耦合顶点常数实现, 2.11c 则通过中间态高质量粒子  $X$  实现。

理论上比较容易引入一个新的与希格斯粒子耦合的标量粒子, 从而使得希格斯粒子对产生截面增大。一个简单的扩展是 2HDM [55], 它有两个希格斯二重态, 从而有 5 个希格斯玻色子, 分别是  $h$  (轻标量 Higgs, 一般看作发现的标准模型 Higgs),  $X$  (重标量 Higgs),  $A$  (重赝标量 Higgs),  $H^\pm$  (两个带电 Higgs)。为了避免树图阶味道改变中性流, 2HDM 应用分立对称性使得带电费米子只与一个希格斯二重态耦合。

## 2.2.4 类希格斯粒子对产生

以上模型局限在  $hh$  中的  $h$  为标准模型希格斯粒子, 它的质量为 125 GeV,  $h \rightarrow b\bar{b}$  具有最大的衰变分支比。但是也可以研究  $h$  不是标准模型粒子的情况, 如在模型 [56] 中, 除了常规 2HDM 中的粒子, 额外引入一个实标量粒子  $S$ , 它被假设与希格斯粒子具有一样的耦合性质, 唯一不同之处是质量, 那么在  $m_S > 135$  GeV 时 (图 2.13),  $S \rightarrow WW$  具有最大的分支比, 这是本文选择 4W 末态分析的动机之一。

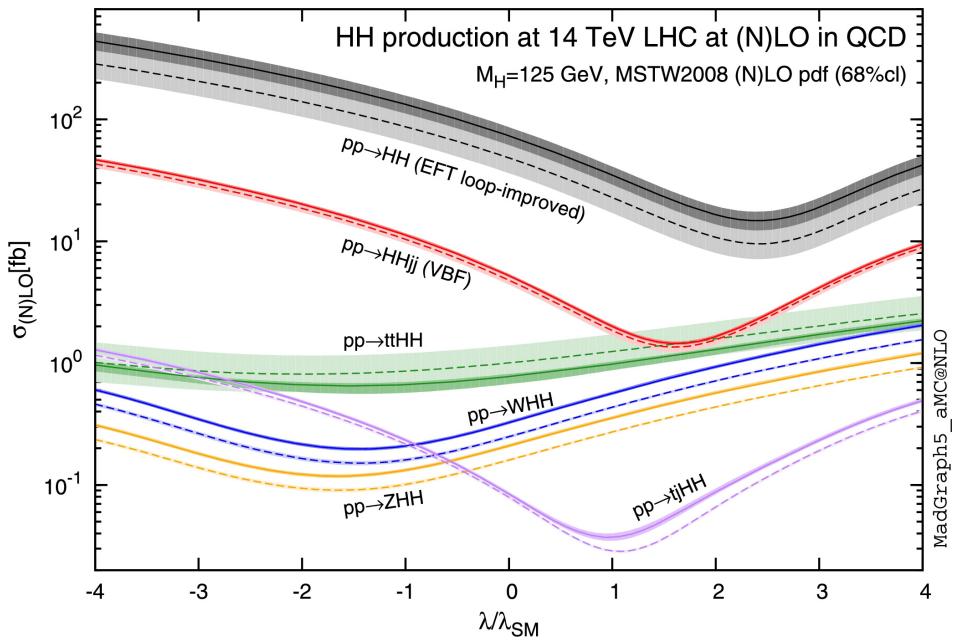


图 2.12 14 TeV 质心系能量下希格斯粒子对 QCD (次) 领头阶的产生截面随自耦合系数的变化情况, 其中浅色虚线 (深色实线) 对应领头阶 (次领头阶) 结果, 曲线宽度代表来自包括 scales 和 PDF 的系统误差大小。 $\kappa=1$  对应标准模型希格斯粒子对。

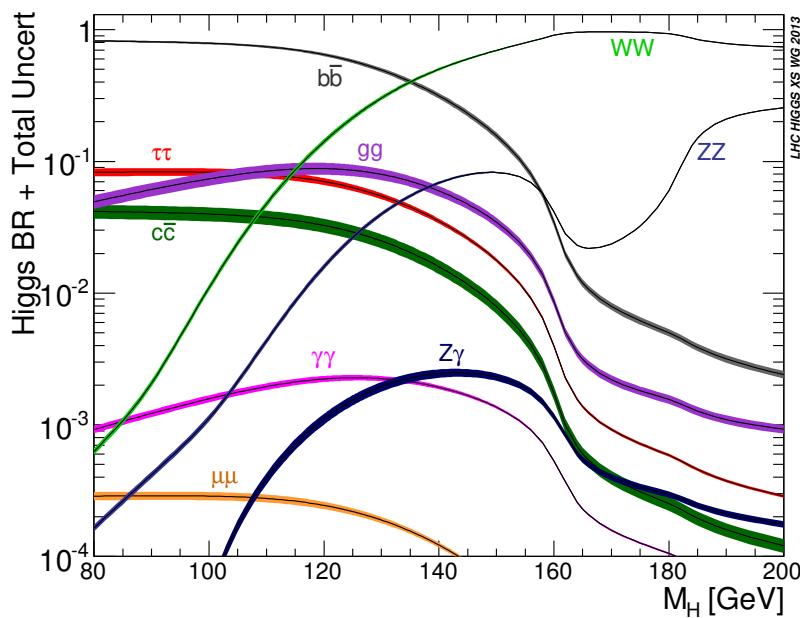


图 2.13 实标量希格斯粒子衰变分支比随质量分布, 曲线宽度表示不确定度大小。[3]



## 第3章 LHC 和 ATLAS 实验

### 3.1 大型强子对撞机

座落在瑞士法国边境的大型强子对撞机是目前世界上最大，能量最高的对撞机，其对撞环（储存环）在地下 100 米，周长为 27 公里。在 LHC 储存环上，有四个相互作用点（实验），分别是超环面仪器 (ATLAS) [57]，紧凑  $\mu$  子线圈 (CMS) [58]，LHC-beauty (LHCb) [59] 以及大型离子对撞机实验 (ALICE) [60]，其相对位置如简图 3.1 所示。ALTAS 和 CMS 是多用途探测器，主要为了检验标准模型和发现 TeV 量级新物理，随后会进一步介绍 ATLAS 探测器。LHCb 实验主要用于 CP 破坏以及  $b$  强子稀有衰变的精确测量。ALICE 实验主要研究重离子对撞。本文将讨论质子-质子对撞和 ATLAS 实验。

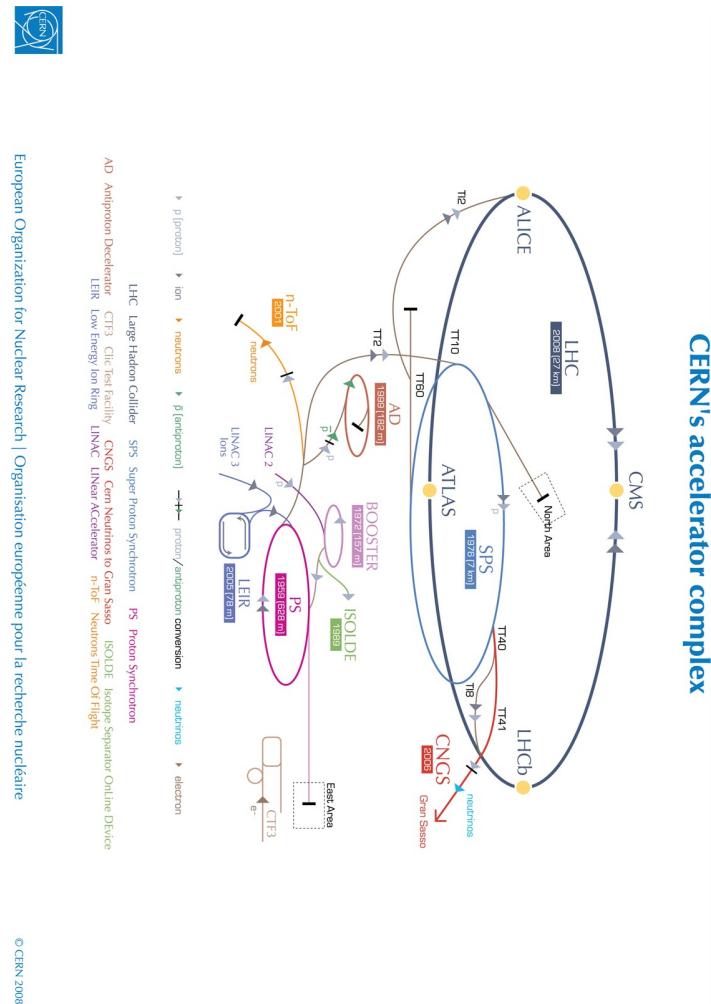


图 3.1 LHC 概览

### 3.1.1 质子加速过程

LHC 的设计目标是提供质心系能量为 14 TeV, 平均瞬时亮度可达  $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  的质子-质子对撞。质子来源于电离氢气, 而后会经历以下加速过程:

- 通过直线加速器 (Linac2) 加速到 50 MeV ( $\beta \approx 5\%$ );
- 注入到质子同步增强器 (Proton Synchrotron Booster), 加速至 1.4 GeV ( $\beta \approx 70\%$ );
- 质子同步加速器 (Proton Synchrotron) 加速至 25 GeV ( $\beta \approx 99.9\%$ );
- 超级质子同步器 (Super Proton Synchrotron) 提升至 450 GeV ( $\beta \approx 99.9998\%$ );
- 注入储存环上的两条束流管, 一条顺时针, 另一条逆时针转圈, 每次注入 (fill) 大约花费 4 分钟。
- 最终通过储存上的超导高频腔加速到 6.5 TeV。

在每次注入后 LHC 可持续对撞几小时, 直到束流密度下降到一定阈值, 而后束流被导出, 一个新的循环开始。

### 3.1.2 亮度

LHC 的瞬时亮度公式如下:

$$\mathcal{L} = \frac{N_b^2 f_r n_b F}{4\pi \varepsilon_n \beta^*} \quad (3.1)$$

其中  $N_b$  (束流团所含质子数),  $n_b$  (储存环中运行束流团数),  $f_r$  (束流团旋转频率) 以及  $\varepsilon_n$  (束团归一横向发射度, 描述粒子横向扩散) 由质子加速过程决定; 而  $\beta^*$  是在对撞点的所谓振幅函数, 它的性质由聚焦磁铁决定;  $F$  是为修正束团对撞角度偏差的束流形状因子, 一般小于 1。 $\varepsilon_n \beta^*$  正比于束流横向面积, 那么越小的横向发射度或者越小的振幅函数意味着更窄的束流, 对撞频率就越高。关于 LHC 亮度的重要参数如表 3.1 所示, 需要注意的是, 自 LHC 开机以来, 一直在进行优化, 一些所列参数已经超过设计指标, 比如最大瞬时亮度, 其已在 2016 年运行时超过  $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 主要是因为更小的  $\beta^*$  和优化的形状因子。相应地, pileup 数也随之增加, 见图 3.2。2015 年到 2017 年 LHC 亮度及 ATLAS 数据收集情况总结在图 3.3。

Beam/collision parameters	2015	2016	Nominal design (if available)
Center-of-mass energy ( $\sqrt{s}$ ) [TeV]	13	13	14
Bunch spacing [ns]	50-25	25	25
Bunch revolution frequency ( $f_r$ ) [kHz]	11.245	11.245	11.245
Max. number of bunches/beam ( $n_b$ )	2232	2208	2808
Max. charge per bunch colliding ( $10^{11}$ p/bunch)	1.21	1.31	1.15
Peak instantaneous luminosity [ $10^{34}$ cm $^{-2}$ s $^{-1}$ ]	0.5	1.38	1
Max. pileup	28.2	52.2	
Longest stable beams fill duration [h]	24.3	37.03	

表 3.1 LHC 设计指标，以及在 2015 年和 2016 年的运行参数 [15]

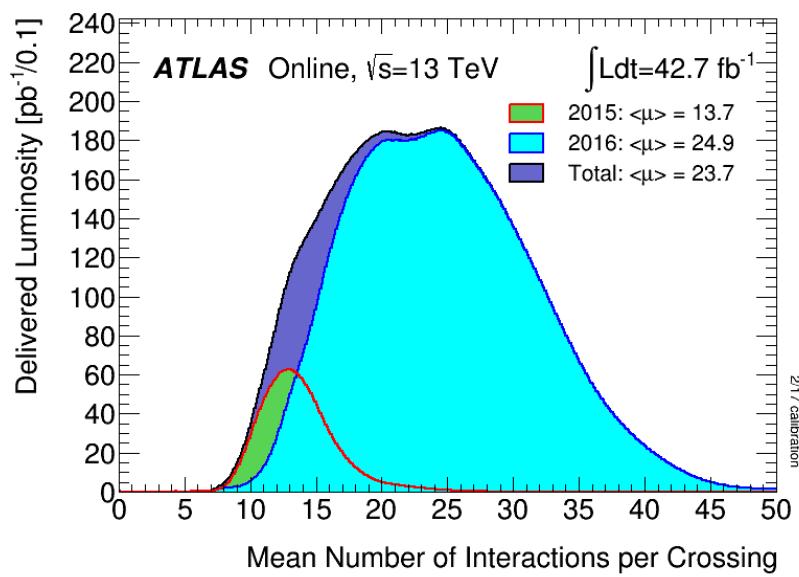


图 3.2 ATLAS 2015 年和 2016 年亮度-pileup 分布。

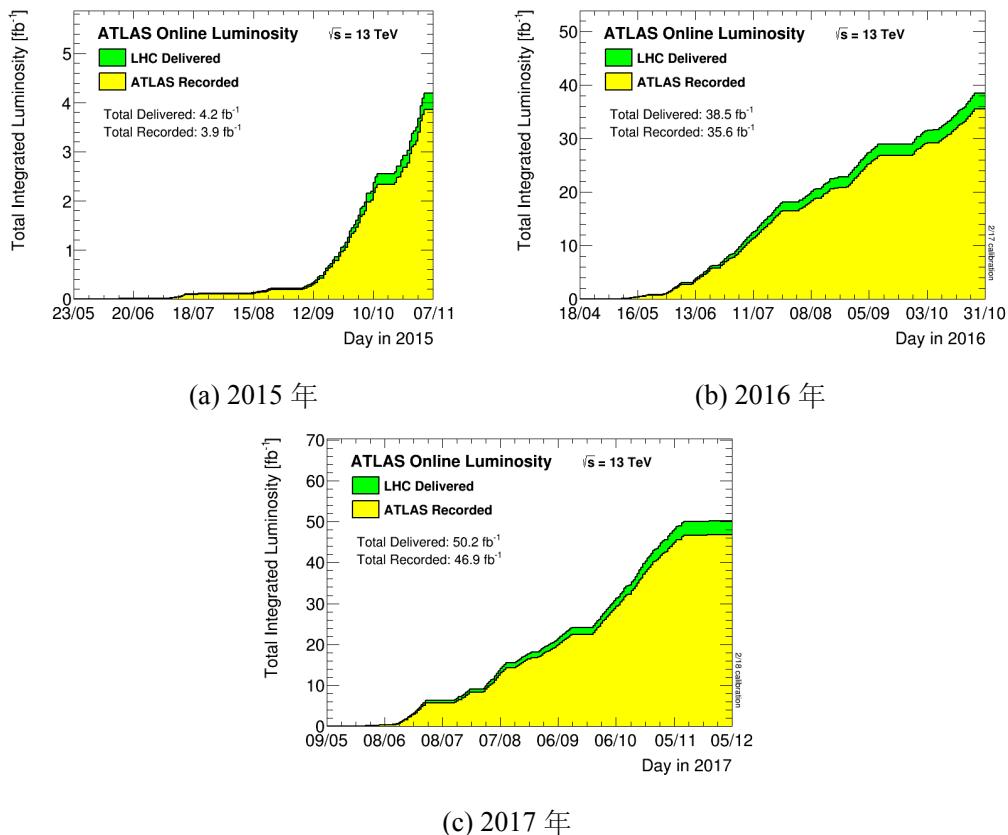


图 3.3 ATLAS 数据收集情况。

### 3.2 ATLAS 探测器

ATLAS 探测器有 25 米高，44 米长，总重大约 7000 吨。ATLAS 探测器内层是内部径迹探测器 (ID)，其被直径为 2.3 米的超导螺线管包围，该超导线圈提供平行于束流方向，大小为 2 T 的磁场；紧挨着 ID 是量能器系统，包括电磁量能器 (EM) 和强子量能器 (HCal)；最外层是  $\mu$  子探测器 (MS)。本章将论述图 3.4 所示的各个部分。

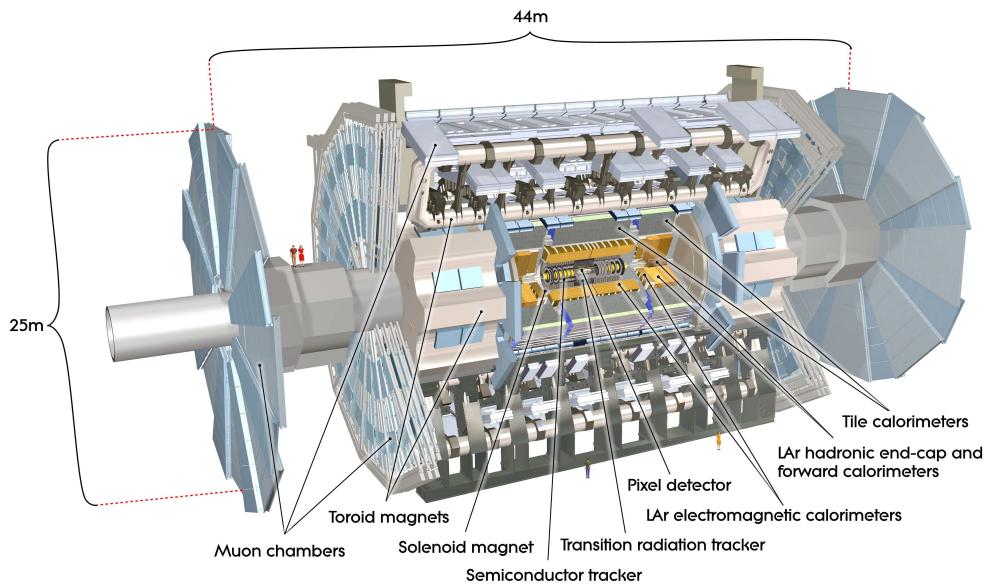


图 3.4 ATLAS 探测器简图。

#### 3.2.1 坐标系统

ATLAS 使用右手坐标系，其定义对撞点 (IP) 为原点， $z$  轴为束流方向，正  $x$  轴指向环中心，正  $y$  轴则向上。在极角坐标系中，定义方位角  $\phi$  在  $(x, y)$  平面，大小从  $-\pi$  到  $\pi$ ，极角  $\theta$  从 0 到  $\pi$ ， $\theta = 0$  与正  $z$  轴同向。赝快度定义为  $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$ ，更大的  $|\eta|$  意味着粒子更靠近束流方向，在 ATLAS 一般称为更前向。定义两个粒子的角距离  $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$ 。

#### 3.2.2 内部径迹探测器

ATLAS 内部径迹探测器主要用来精确寻迹 ( $p_T > 0.1 \text{ GeV}$ )，可覆盖  $|\eta| < 2.5$ 。它包括三个子探测器，离束流中心距离从 3.3 cm 到 101.6 cm，图 3.5 展示 ID 的各个部分的分布。ID 浸没在通过铌钛超导螺线管产生的 2 T 轴向磁场中，线圈通过液氦冷却，温度为 4.5 K。ID 的强磁场可偏转带电粒子，通过测量径迹曲率可推出粒子动量。

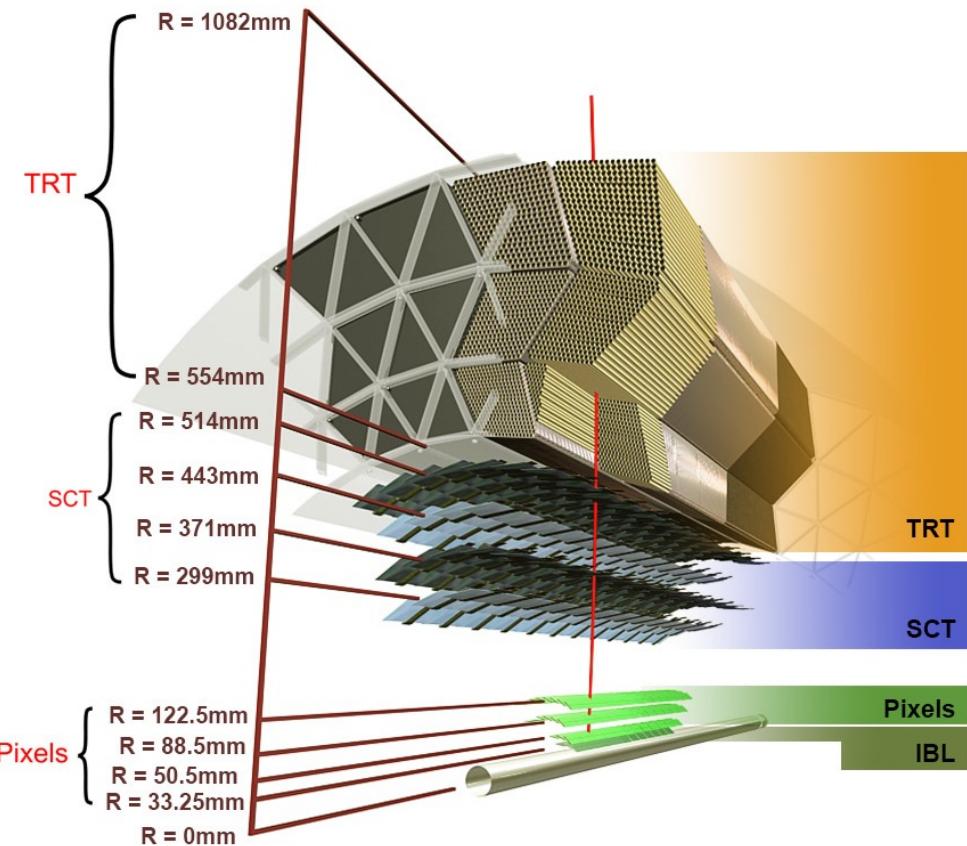


图 3.5 ATLAS 内部径迹探测器。

像素探测器 (Pixel detector) 围绕着束流中心，是离束流最近的系统，会经受最高密度的粒子束流，因此在 ATLAS 所有子探测器中具有最高的分辨率。Pixel 在桶部区有四层，由 1744 个模块 (module) 组成，端盖区有三层，含有 288 个模块。桶部区的最内层 (IBL) 在 Run 1 和 Run 2 之间安装，主要用于提高  $b$ -jet 鉴别。每个 Pixel 模块含有 46080 个电子学读出道，Pixel 探测器总共有 8 千万读出道。每个模块大小为  $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ (IBL 模块为  $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ )，其位置分辨率可达  $10 \mu\text{m}$  ( $r-\phi$ ) 和  $115 \mu\text{m}$  (z 方向)。

硅微条探测器 (SCT) 桶部区有四层，端盖区有 9 层。每个 SCT 模块只能提供一维位置信息，所以每层 SCT 两个模块背靠背以一定角度粘贴在一起，加上模块本身所在位置即可提供三维位置信息。一般 SCT 的分辨率为  $17 \mu\text{m}$  ( $r-\phi$ )， $580 \mu\text{m}$  (z 方向)。SCT 的总读出电子学道为 630 万。

穿越辐射探测器 (TRT) 由大约 30 万，直径为 4 mm 充满 70% 氩气，20%  $\text{CF}_4$ ，10% 二氧化碳的漂移管组成，桶部区的漂移管与轴线平行，端部区的漂移管则成辐射状，其总的电子学读出道达 35 万。带电粒子穿过漂移管电离气体，电离

电子在电压作用下达到管中心丝。桶部区（端部）只提供  $r\phi$  ( $rz$ ) 方向的位置测量，每条管的位置分辨率为  $130 \mu\text{m}$ 。TRT 管层含有聚丙烯纤维和箔层，带电粒子穿过它们的边界时发射 X 射线，其强度与入射粒子能量成正比，X 射线通过光电效应能够产生比电离电子幅度更大的信号。入射电子动量接近  $1 \text{ GeV}$  时即产生明显的穿越辐射，而  $\pi$  介子在  $O(100) \text{ GeV}$  动量时才产生辐射，此信息可用于粒子鉴别。

ID 可为粒子径迹重建提供 36 个着火点 ( $|\eta| < 2.0$ )。联合这三个子探测器的信息，ID 可测量  $p_T$  低至  $400 \text{ MeV}$  的带电粒子，其相应的动量分辨率可由如下公式 [57] 描述：

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = 0.05\% p_T \oplus 1\% \quad (3.2)$$

### 3.2.3 量能器

ATLAS 量能系统 [57] 包括几个具有不同技术和粒度的组件，涵盖非常大的范围 ( $|\eta| < 4.9$ )。所有组件都是采样式取数，带有吸收材料，入射粒子经过时产生电磁或强子簇射，这些簇射能量仅有一部分被灵敏层检测。量能器会利用测试束流以及探测器模拟 [61, 62] 进行刻度，并在碰撞数据中刻度。ATLAS 量能器的布局如图 3.6 所示。

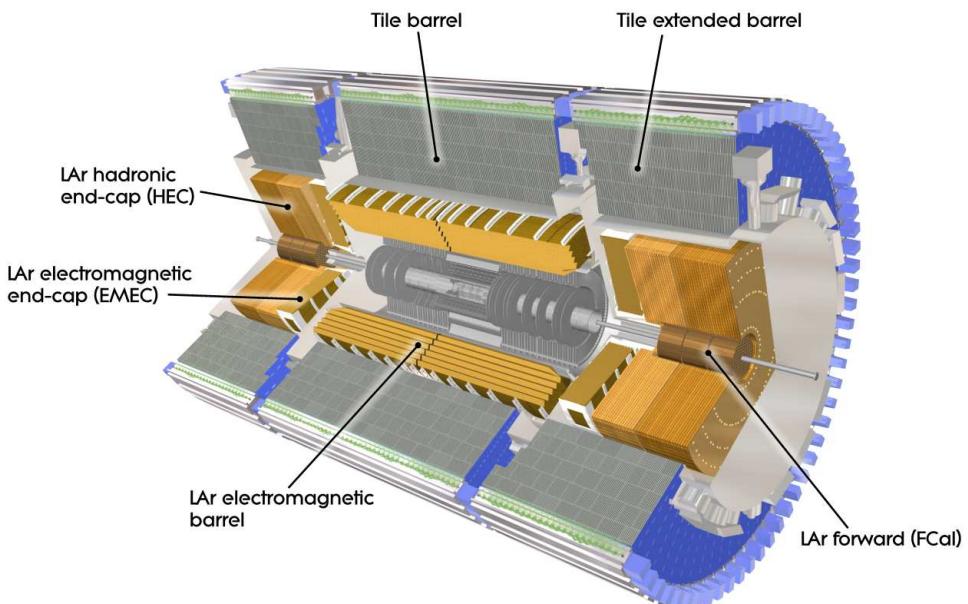


图 3.6 ATLAS 量能器布局。

螺线管外部最里面的部分是电磁量能器，专门用于电子和光子的能量测量。

它使用液氩 (LAr) 作为活性介质，具有优异的抗辐射性和能量分辨率，并容易产生电磁簇射。读出单元是分成条状的电镀铜板电极。EM 桶部可覆盖到  $|\eta| = 1.4$ ，端盖系统延伸到  $|\eta| = 3.2$ 。它分为 3-4 层，具有类似手风琴的几何形状，可提供完整的  $\phi$  覆盖，没有死区，并且在 ID 探测范围内 ( $|\eta| < 2.5$ ) 具有精细的  $\Delta\eta \times \Delta\phi$  分辨，最小值为  $0.025 \times 0.025$ ，可以分辨  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 。为了确保能够接收绝大部分的电磁簇射，EM 桶部厚度大于 22 个辐射长度 (X0)，端盖则大于 24 倍 X0。大多数服务设施都位于过渡区域，即  $1.37 < |\eta| < 1.52$ 。EM 能量分辨率可描述为 [57]：

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\% \quad (3.3)$$

强子量能器包围着电磁量能器，专门用于测量  $\pi$  介子和中子等强子的能量。桶区  $|\eta| < 1.7$  由三层钢-塑料闪烁体采样量能仪 (TileCal) 组成，其在  $\eta = 0$  时总厚度为 9.7 倍相互作用长度 ( $\lambda$ )，以最大限度地减少强子簇射穿透 HCal 并到达外部  $\mu$  子光谱仪 (punch-through)。强子端盖量能器 (HEC) 覆盖  $1.5 < |\eta| < 3.2$ ，虽然使用铜作为被动材料并为平面状，但是与 HCal 采用相同的液态氩技术。强子量能器的粒度比 EM 更粗， $\Delta\eta \times \Delta\phi$  为  $0.1 \times 0.1$ ，并且由于强子与材料核相互作用的性质，能量分辨率更差 [57]：

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\% \quad (3.4)$$

最后，3 层前向量能计 (FCal) 覆盖  $3.1 < |\eta| < 4.9$  以测量丢失横向能量和前向喷注。它也采用 LAr 技术，利用铜和钨分别作为第一层和最后两层的吸收材料。

### 3.2.4 $\mu$ 子谱仪

$\mu$  子谱仪 (MS) 环绕着量能器，是 ATLAS 最外层的子探测系统，用于测量穿过 ID 和量能器的  $\mu$  子动量和位置。MS 系统有大约 100 万个电子学读出道，从半径 5 米延伸到 10 米，在  $|\eta|=0$  处因为服务电缆有一个小间隙。MS 桶区由 3 个同心圆柱体组成，设计用于测量动量高于 5 GeV 的  $\mu$  子，其分辨率在 100 GeV 时为 3%。端盖区有四个轮状部分，覆盖到  $|\eta| < 2.7$ 。与 ID 类似，MS 也可测量  $\mu$  子动量，其磁场由大型空心环形磁体系统提供，大小在 0.5 T 和 1 T 之间。

$\mu$  子室有两组系统：一组用于  $\mu$  子轨道的精确测量，第二组用于  $\mu$  子触发。精密腔室包括监测漂移管 (MDT)[63] 和阴极条带室 (CSC)[64]。MDT 涵盖  $|\eta| < 2.7$  的大部分区域，除了端盖最内层安装 CSC 区域  $2.0 < |\eta| < 2.7$ 。MDT 由 3cm 直径的漂移管组成，其含有 93% 氩和 7%CO<sub>2</sub> 的混合物。每根管具有单根钨-铼线，

其在 3kV 的电压下操作，基于入射粒子产生的电离电荷的漂移时间可测量其相对位置。单管的典型空间分辨率低于  $100 \mu\text{m}$ ，联合多层管可提升至约  $50 \mu\text{m}$ 。

CSC 由具有正交平面阴极的多丝比例室组成。它们可以处理更高的粒子流并且具有比 MDT 更高的辐射耐受性，因此被放置在粒子通量较大的前向区域  $2 < |\eta| < 2.7$ 。径向导线保持在 1.9 kV 的电势，并与每个条状阴极保持 2.5 mm 的距离。在弯曲平面的 CSC 探测器寻迹分辨率约为  $60 \mu\text{m}$  并且具有高抗辐照性，因此用在 MS 的第一层。

不同的设计导致不同的电荷收集时间，MDT 约为 700 ns，CSC 约为 40 ns。MDT 为管状，在中心丝上施加电压，电场以  $1/r^2$  下降 ( $r$  是与中心丝的距离)。而 CSC 是具有恒定电压差和恒定场的平坦腔室。两个专用触发室提供快速测量，用于触发决策。 $\mu$  子事件的触发系统基于电阻板腔 (RPC)[65] 仪器在桶区域  $|\eta| < 1.05$ ，而薄间隙腔 (TGC)[66] 用于端盖区域。RPC 由平行电极板组成，它们相距 2 mm 并填充有  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$  的气体混合物，工作电压为 9.8 kV，有非常好的时间分辨率，约为 2 ns。TGC 由多丝正比室组成，含有  $\text{CO}_2$  和  $n\text{-C}_5\text{H}_{12}$  的气体混合物。TGC 的阳极线距离带状阴极 1.4 mm，之间的电位差为 2.9kV，时间分辨率为 4 ns。

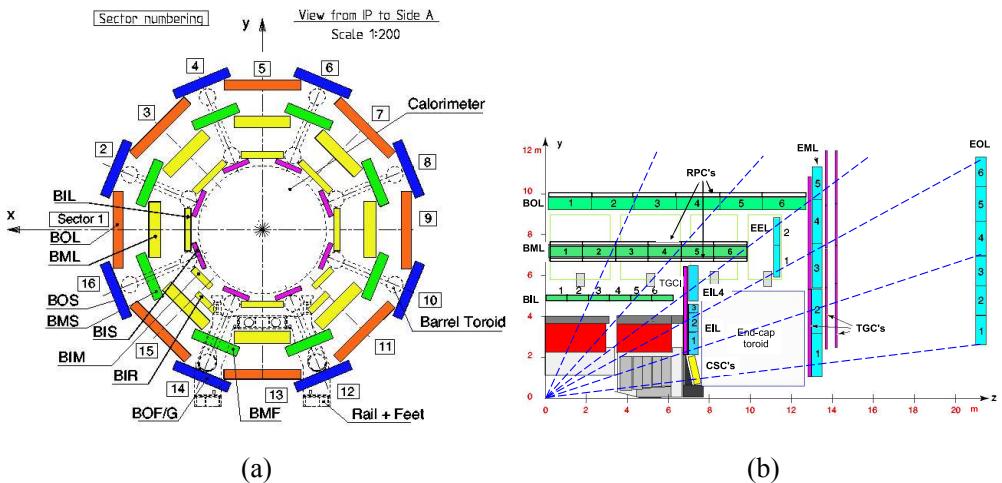


图 3.7 (a) 与束流垂直方向 ( $x - y$  平面) 的  $\mu$  子谱仪布局，它有三层同心圆柱，每层包含 8 个大室和 8 个小室，最外层半径大约为 20 米。(b)  $y - z$  平面的  $\mu$  子谱仪布局。

### 3.2.5 触发和数据采集系统

LHC 束团间距为 25 ns，那么束团碰撞率为 40 MHz，质子非弹性散射率接近 1 GHz，平均 pileup 数为 23.7，考虑到电子读出系统和数据存储能力的限制，

ATLAS 仅能处理并存储极少数的事例。ATLAS 触发和数据采集系统 (TDAQ)[4] 是探测器的基本组成部分，它负责决定是否为以后的离线研究保存事件。

TDAQ 有两级：基于硬件的使事例率降低至 100 kHz 的 Level-1 触发器 (L1)，以及基于软件的高级触发器 (HLT) 系统。HLT 使用 4 万个 CPU，并在一次 LHC 注入期间以 1 kHz 的平均速率选择事件，这是离线计算模型和存储可以处理的最大值。

L1 触发器包括中央触发处理器 (CTP)，它处理来自 L1 量能器 (L1Calo) 和 L1  $\mu$  子 (L1Muon) 触发子系统的输入。L1Calo 直接从量能器获取信息。L1Muon 利用桶部 ( $|\eta| < 1.0$ )RPC 和  $1.0 < |\eta| < 2.4$  区的 TGC 进行测量。为了应对更高的事件发生率并有效地选择感兴趣的物理事件，在 2016 年一个称为 L1 拓扑处理器 (L1Topo)[67] 的新元素添加到 L1 中。L1Topo 系统从 L1Calo 和 L1Muon 获取信息，可以计算不变质量等物理变量以用于 L1 决策。由于 L1 电子设备的延迟为  $2.5 \mu\text{s}$ ，CTP 也应用预防性死时间，设置 L1 连续两次接受决策之间的最短时间以避免重叠读出窗口，并限制在给定束团对撞数目内 L1 接受决策数以避免前端缓冲区溢出。

在 L1 触发接受之后，HLT 使用更细粒度的量能器信息，来自 MS 的精确测量以及来自 ID 的径迹信息来处理事件。为了最大限度地提高效率，HLT 软件经过调整，使算法和选择尽可能接近离线重建。HLT 接受的事件最终存储在磁盘上，并导出到 CERN 计算中心进行离线重建。根据需要，HLT 可以处理来自 L1 处识别的感兴趣区域 (RoI) 或来自完整探测器的信息。ATLAS 触发系统的完整方案如图 3.8 所示。

L1 和 HLT 的触发决策根本上是由物理分析决定的，不同物理分析处理不同的物理对象，而所有这些物理对象归纳起来则给出所谓的触发菜单。菜单中的主要触发器涵盖了各种 ATLAS 物理搜索所需的所有信号，包括电子、 $\mu$  子、光子、 $\tau$  轻子、喷注和丢失能量 (MET)。触发菜单组成和触发阈值针对若干亮度范围进行了优化，以便最大化实验的物理输出并且满足 ATLAS 探测器读出速率和带宽限制。许多 ATLAS 分析的主要特征信号，包括  $hh \rightarrow 4W$  搜索，是电子或者  $\mu$  子。因此，在事件中需要存在至少一个  $p_T > 25 \text{ GeV}$  轻子的触发占据可用带宽的很大一部分，如图 3.9 所示。

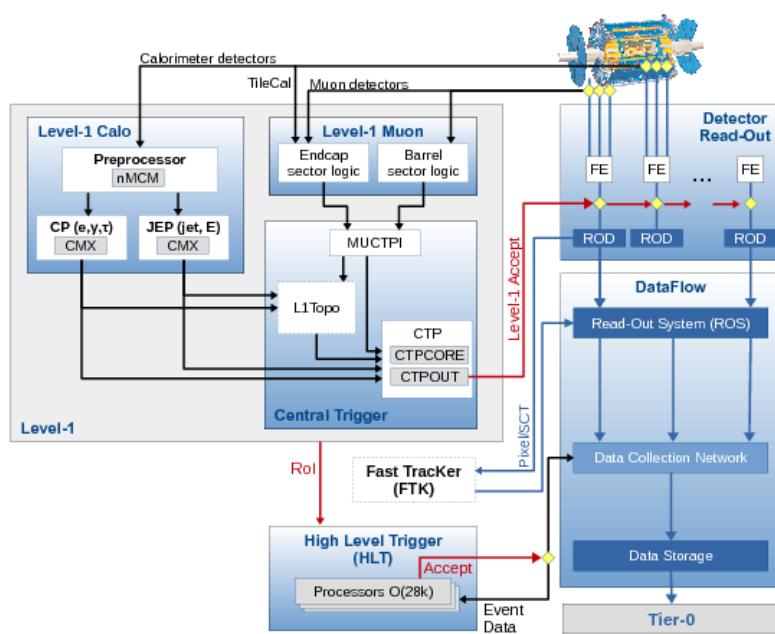


图 3.8 ATLAS TDAQ 系统 [4]，图中着重标注触发相关部分。L1Topo 与 FTK 正在研究，并未包括本文的结果中。

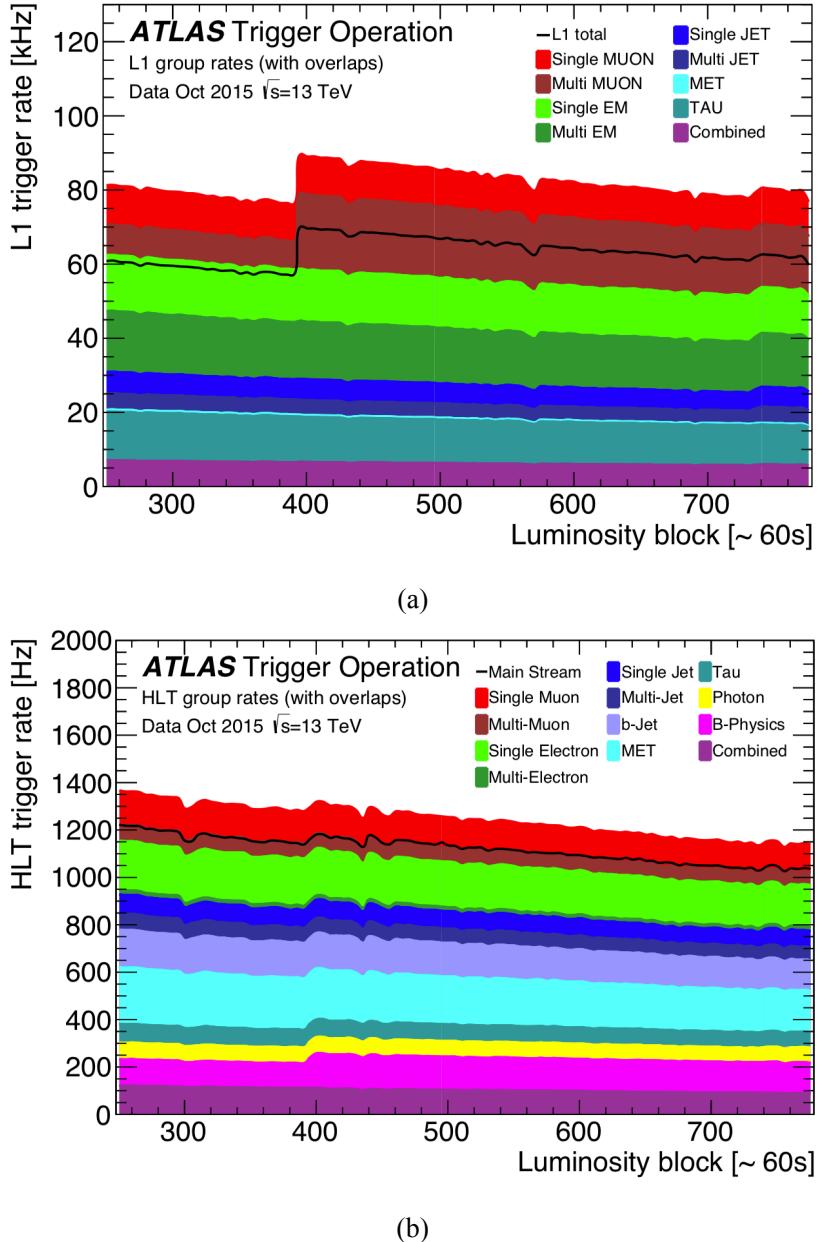


图 3.9 2015 年 LHC 一次注入 (fill) 时的 L1 (a) 和 HLT (b) 的各种信号组的触发率, 此次注入最高亮度为  $4.5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。因为各种信号类别之间有重叠, 所以他们的触发率之和高于总的触发率 (黑色实线), Multi-object 触发项包含在 b-jets 与 tau 信号组中。亮度区间 400 之后的触发率增长是因为移除了 B-physics prescaling。Combined 触发组包含不同的触发信号, 比如电子与  $\mu$  子,  $\tau$ , jets 或者 MET。[4]

### 3.3 ATLAS Phase-II 升级

LHC 会在 2020 年之后进行一个主要升级，称为 High Luminosity LHC (HL-LHC)，届时 LHC 将在 14 TeV 能量下运行，瞬时亮度将达到原始设计目标的 5 倍，即  $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，LHC 的计划运行和升级时间表可见图3.10。HL-LHC 的成功运行依赖于超导磁铁等新技术的运用，具体可见 HL-LHC 技术设计报告 [5]。为了承受 HL-LHC 的高 pileup 和高辐照压力，ATLAS 探测器将进行全面升

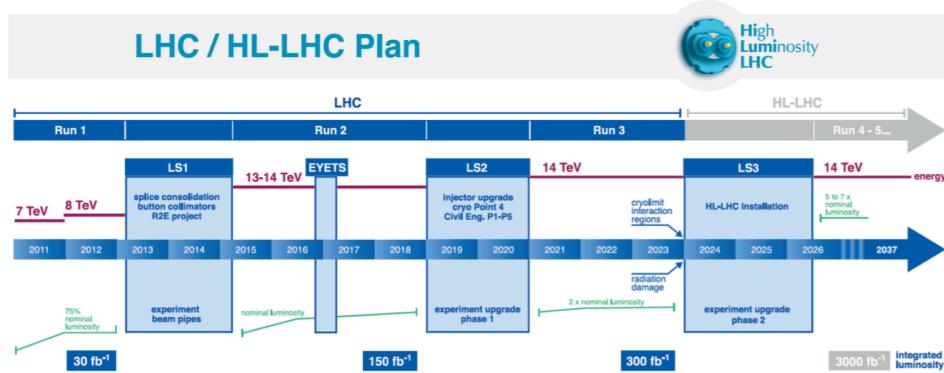


图 3.10 LHC 运行和升级时间表 [5]。

级。内部径迹探测器将全部替换成由硅组成的 Inner Tracker (ITk)，ITk 分为靠近束流的像素探测器 (Pixel)[68] 和扩展到高半径的硅微条探测器 (Strips)[6]，Pixel 桶部区有五层，Strips 则有四层，一系列环形探测器也会添加到前向区使得寻迹区域扩展到  $|\eta| < 4.0$ 。Liquid Argon (LAr) 量能器 [69] 将会有全新的前端和读出电子学器件，其电子学架构设计在 40 MHz 输出全粒度数字信号 (full-granularity digitized signals)。Tile 量能器 [70] 会使用新的前端和读出电子学器件，电源和光链路接口板 (optical link interface boards)。 $\mu$  子探测器 [71] 的一大部分前端，在和不在探测器 (on- and off-detector) 的读出和触发电子学设备将会被替换，额外的  $\mu$  子室也会安装以保持  $\mu$  子的鉴别和重建性能，另外目前正在研究扩展到  $|\eta| < 4.0$  的可能性。全新的触发和数据接收系统 [72] 也会应用在升级 ATLAS 上。考虑到 HL-LHC 的高 pileup，一个新的探测器 High-Granularity Timing Detector (HGTD)[73] 会安装在 LAr 量能器之前，覆盖  $2.4 < |\eta| < 4.0$  区域，它可以精确测量带电粒子的时间分辨。本章将关注硅微条探测器模块和 ITk 的预期径迹重建性能研究。

### 3.3.1 Strips 模块组装及测试

ATLAS Phase-II 升级之后的硅微条探测器传感器覆盖  $165 \text{ m}^2$ , 桶部区有四层, 而端部磁盘区有六层, 总共需要建造 18,000 个基本探测模块。一个完整模块由一个硅传感器, 两块或一块包含读出芯片 (ABC130Star chip) 以及控制芯片 (HCCStar) 的支撑电路板 (hybrid) 和电源板 (Power Board) 组成, 具体可见图3.11. 虽然 Strips 硅传感器的大小和形状由模块所在位置决定 (见图3.12), 但是其整体设计和架构是一致的。读出芯片是二元设计 (binary design), 与每条微条 (strip) 通过金属线相连, 信号通过芯片初步处理之后传输到控制芯片, 然后统一输出到读出系统, 控制芯片同时负责传输控制命令, 而电源板则是用于模块电源控制以及环境参数监控, 各部分的具体信息可见设计报告 [6]。本文将呈现整个模块的组装过程以及测试结果, 所使用的读出芯片和控制芯片版本分别为 ABC130 和 HCC, 具体区别同样可见 [6]。

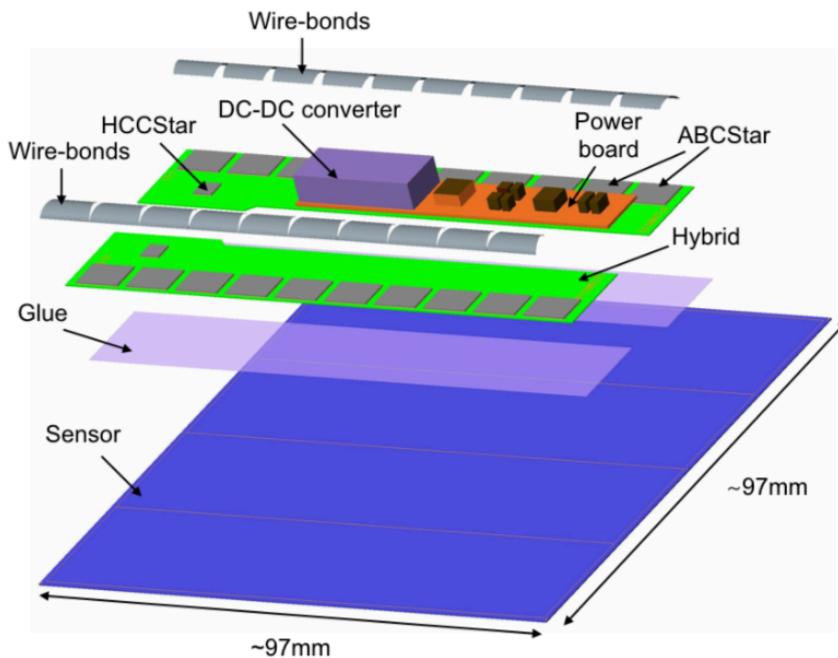


图 3.11 (short-strip) Strips 模块。

模块的组装是探测器建造的重要一环, 模块的质量决定了最终探测器的性能。组装过程大致可以分为以下几步:

1. 将读出芯片通过胶水粘合在支撑电路板的对应位置, 而后连接读出芯片与支撑电路板 (wire-bonding);
2. 将芯片通过胶水粘合在传感器上, 而后将每条硅微条与读出芯片相连;
3. 最后粘合电源板到传感器上, 最后进行 wire-bonding。

Sensor type	Number of sensors	Shape	Number of rows	Channels per sensor	Min/max pitch ( $\mu\text{m}$ )
Short-strips	3808	Square	4	5128	75.5
Long-strips	7168	Square	2	2564	75.5
EC Ring 0	768		4	4360	73.5/84
EC Ring 1	768		4	5640	69/81
EC Ring 2	768		2	3076	73.5/84
EC Ring 3	1536		4	3592	70.6/83.5
EC Ring 4	1536		2	2052	73.4/83.9
EC Ring 5	1536		2	2308	74.8/83.6

图 3.12 ITk Strips 传感器种类 [6]，Strips 探测器桶部区内两层由短条 (short-strip) 传感器组成，外两层由长条 (long-strip) 组成，由于端部的扇形几何结构，其 strip 间距 (pitch) 随半径不同而不同。

其实际对应过程可见图片3.13<sup>1</sup>。组装的挑战在于各个部分的接触面大小，胶水厚度以及位置的精确控制，一般要求控制到  $O(10)$   $\mu\text{m}$  水平，比如芯片与 hybrid 的胶水粘合面应当保证至少 50% 的接触面，以便传导芯片工作时产生的大量热量，而固化的胶水应当保持在  $120 \pm 40$   $\mu\text{m}$  厚度。组装完成的模块需要进行电子学测试，以保证模块工作性能达到预期。测试时，模块应当处于干燥且低温的环境中，其测试系统如图3.14所示。一个重要指标是测试 ABC130 芯片的输入噪声 (input noise)，它由芯片本身和与之相连的硅微条噪声决定。其测试基本原理是阈值扫描，给定注入电荷，逐步提高阈值，效率慢慢变为 0 (效率 50% 时对应的点为 Vt50)，拟合所得到的效率随阈值变化曲线，得到标准差 ( $\sigma$ )；在不同输入

<sup>1</sup>过程中的具体粘合方法，所使用的器械以及工艺等，一直在进行优化，不同组装地点也可能使用不同的方法。

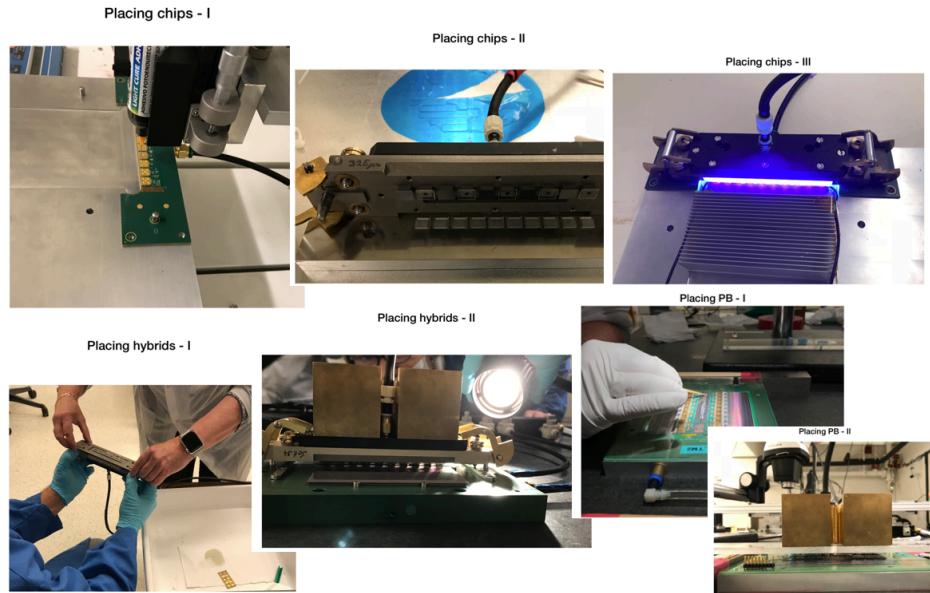


图 3.13 ITk (short-strip) 模块实际组装过程（省略 wire-bonding 过程），粘合芯片的胶水需要紫外线照射固化。

电荷情况下，拟合  $V_{t50}$  随电荷的变化曲线，得到斜率，即增益 (gain)。 $\sigma/gain$  为输入噪声。图3.15展示几个模块粘合电源板之前和之后的输入噪声水平，基本在 600 电子与 900 电子之间（模块经受辐照之后，整体噪声会上升）。图3.16则为测试模块的工作不良硅微条的空间分布。总体而言，所示的组装模块均工作良好，达到预期。

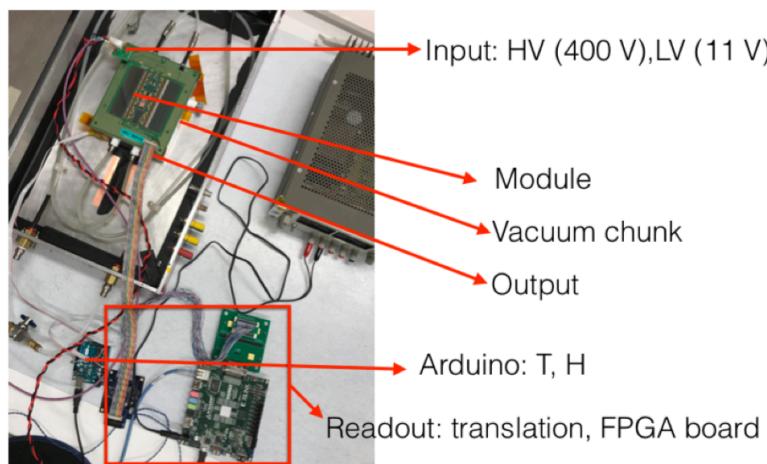


图 3.14 Strips 模块测试系统设置。

### 3.3.2 ITk 预期寻迹性能

相比目前的内部径迹探测器，ITk 具有更低的物质量<sup>2</sup>，其具有更高的寻迹效率和分辨。径迹重建从种子 (seed) 开始，所谓的 seed 是三个空间点。在 ITk 的前期研究中，只考虑了两种 seed，全部由 Pixel 着火点组成的 PPP，全部由 Strips 着火点组成的 SSS。图3.17展示 seeds 随  $|\eta|$  分布，整体而言，PPP 比 SSS 数目高一个量级。联合拟合 PPP 与 SSS，并消除掉重复着火点，同时满足一系列条件，即得到最终的径迹。图3.18展示径迹重建效率随  $\eta$  分布，可达 90%。值得一提的是，由于径迹重建性能的提高，相比于 Run 2，电子电荷误判率下降，见图3.19。

---

<sup>2</sup>目前研究显示材料预算在 TDR 被低估，这些预期结果也许过于乐观，全新的估计正在进行。

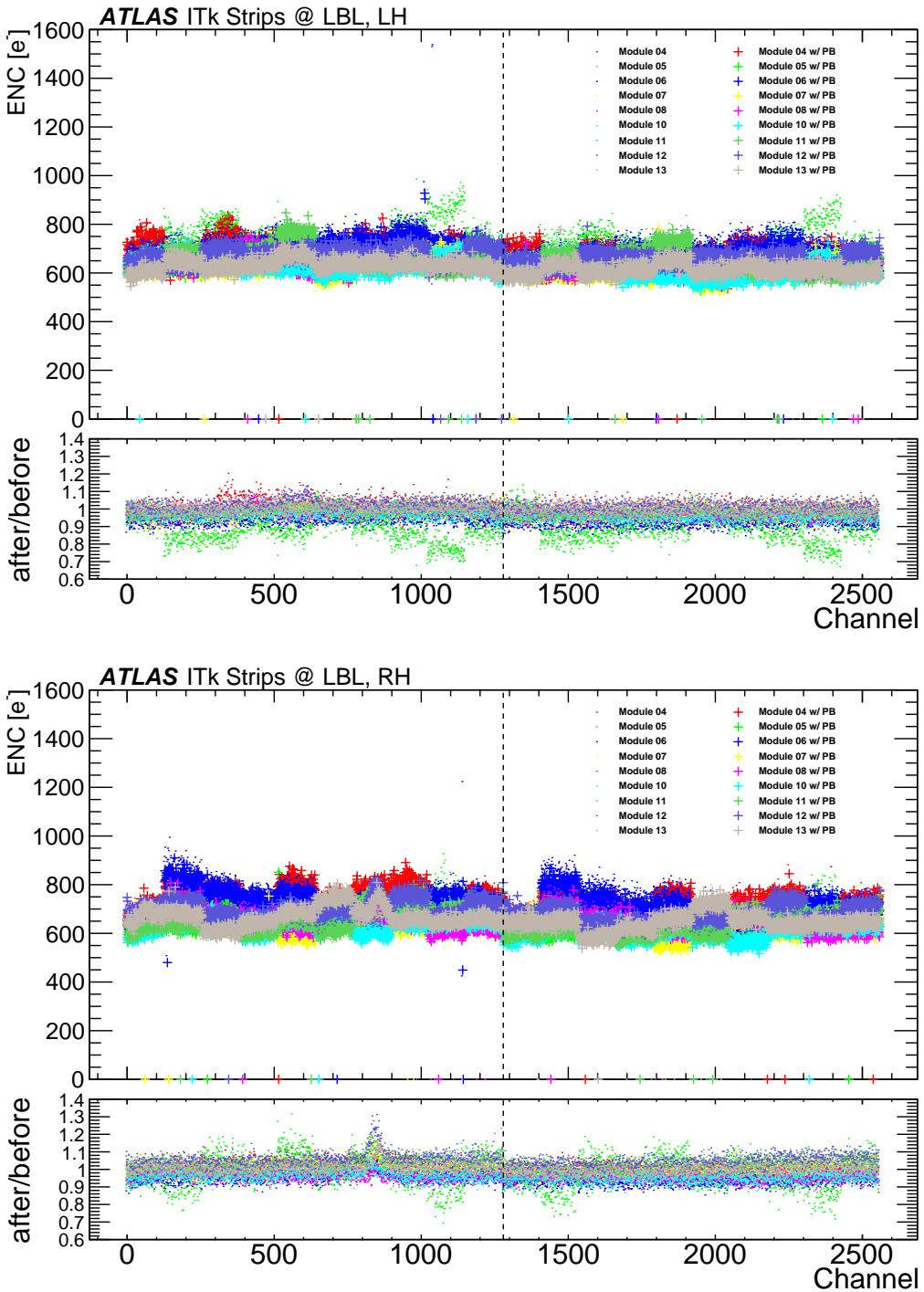
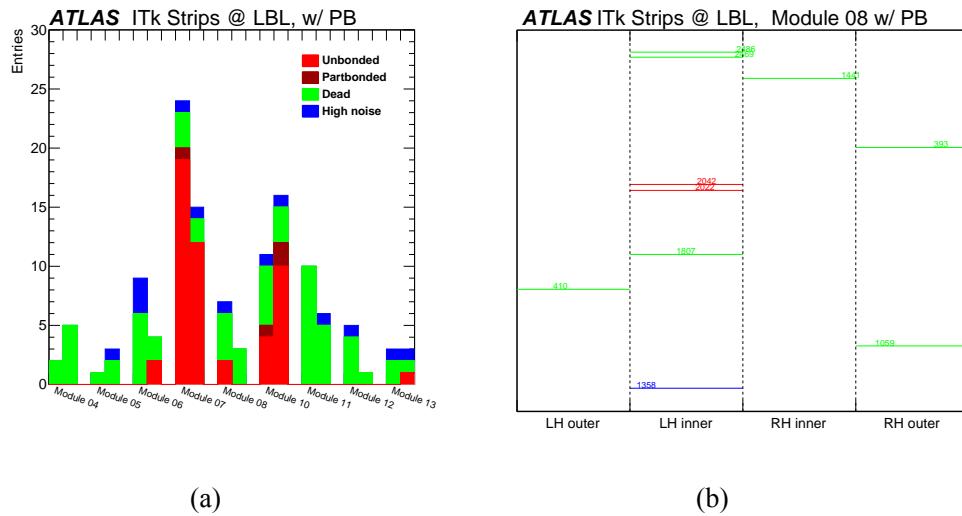


图 3.15 Strips 模块输入噪声，上图对应左手 Hybrid (LH)，下图对应右手 Hybrid (RH)，点线为粘合 PB 之前，’+’ 为粘合 PB 之后，每图底部为粘合 PB 之后与之前的噪声之比。总体上比例在 1 附近，但因为每次实际测试时，环境参数并不完全一致，所以不能够表明粘合 PB 之后噪声一定增加或者减少了。下图底部的“鼓包”由电源板上的屏蔽盒 (shielded-box, 内部有 DC-DC converter) 引起，本文写作期间正在研究解决方案。



(a)

(b)

图 3.16 (a) 为测试模块 strip 整体不良率; (b) 为 LBL-EL-08 模块不良 strip 在传感器上的分布情况。

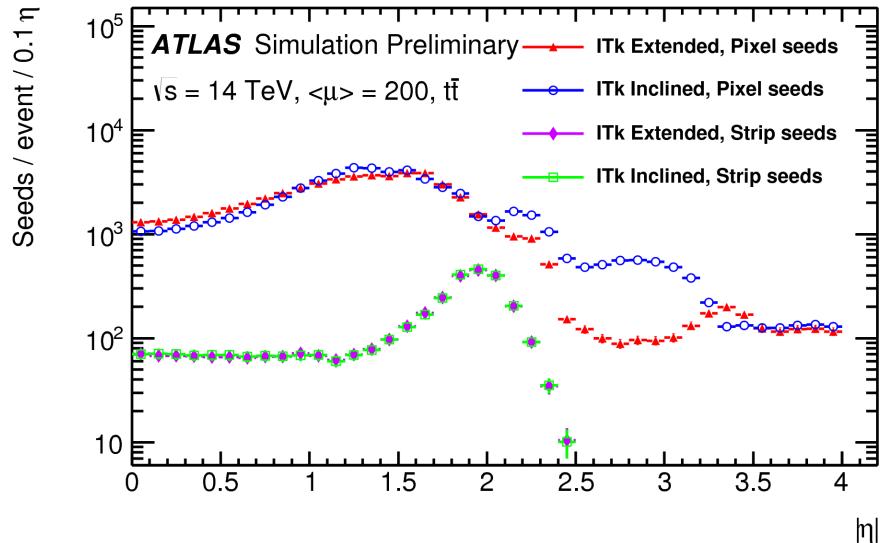


图 3.17 ITk seeds 随  $|\eta|$  分布 [7]。

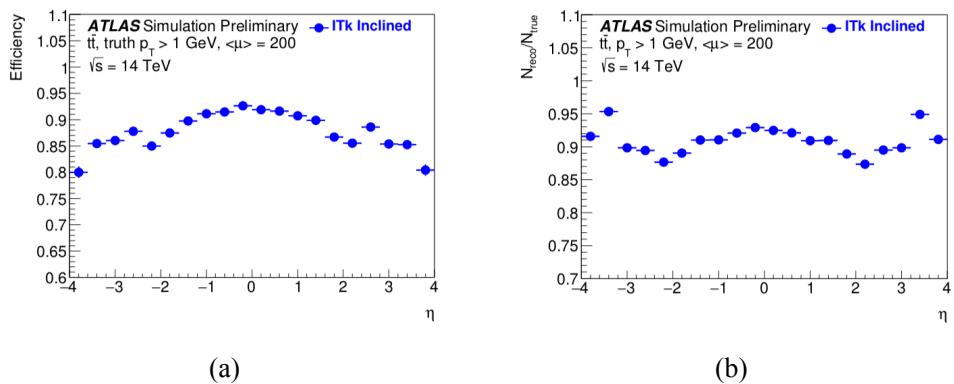


图 3.18 (a) 径迹重建效率随  $\eta$  分布 (matching criteria); (b) 重建径迹与真实粒子之比随  $\eta$  分布 (no matching criteria)。[8]

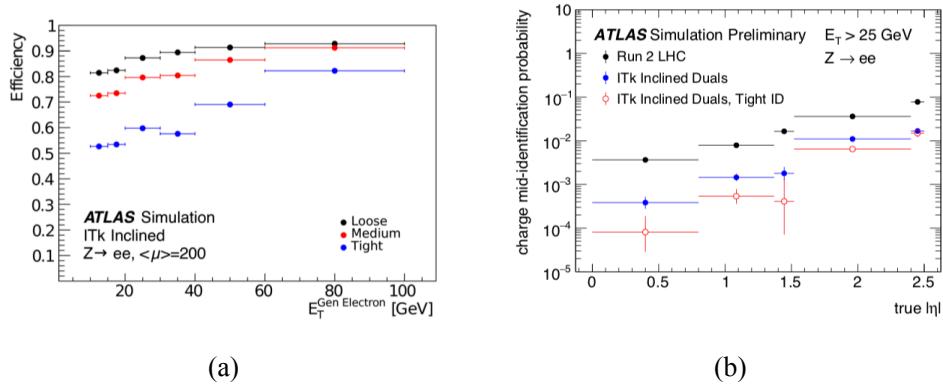


图 3.19 (a) 不同工作点的电子鉴别效率随  $E_T$  分布; (b) 电子电荷误判率随  $|\eta|$  分布。[9]

## 3.4 事例重建

重建是指将探测器各个子系统的着火点或者能量沉积的低级信息转换成与对撞中产生的粒子相关的高级信息的过程。ATLAS 中的重建是一个由集中式软件框架中的众多算法执行的复杂的多步骤过程 [74]，其最终输出是用于各种物理分析的物理对象（也简称为“对象”），包括电子，光子， $\mu$  子，喷注和强子  $\tau$  候选者，以及 MET。下面将概述重建这些物理对象的基本步骤，更多地关注与本文中  $hh$  和  $t\bar{t}h$  搜索相关的对象。

### 3.4.1 径迹和能量簇射

重建的基本输入是径迹和能量簇射。

径迹是由带电粒子经过 ID 或者 MS 造成的一系列着火点构成的。径迹重建 [75] 的初始种子是探测器（Pixel 和 SCT）中的三个空间着火点。它们通过组合迭代算法形成径迹候选者，随后拟合到螺旋轨迹 [76]，同时需要考虑材料效应，能量损失和多次散射以及磁场非均匀性。然后通过根据每个候选者的属性（例如重合测量数量和拟合质量）对轨迹进行排序来解决模糊性。最后轨迹被外推到 TRT，并且在完整轨迹上执行新的拟合。然后基于重建径迹使用专业算法 [77] 决定每个束团对撞的顶点候选者，以及可用于识别重味喷注的次级顶点。

$\mu$  子候选者的径迹通过连接 ID 中的轨迹与 MS 重建的轨迹得到。MS 轨道搜索算法 [78] 首先搜索精密室中的命中模式，以在每层中形成直线轨道段；然后通过片段种子组合算法找到  $\mu$  子 MS 径迹候选者，并且根据全局  $\chi^2$  拟合得分接受或拒绝与每个候选者相关联的着火点。

来自量能器的能量簇射是 ATLAS 中粒子重建的另一个基本输入。穿过量能器的电子，光子和强子与活性材料相互作用而失去能量，并在纵向和横向留下几个量能器单元的信号。来自电子和光子的簇射主要包含在 EM 量能器中，而强子通常在 HCal 中产生簇射。簇射算法 [79] 将着火单元组合在一起，根据粒子种类使用不同的逻辑，并将每个簇射内的总沉积能量相加，同时确定位置。根据进入的粒子类型（电子和光子，或强子射流），校准能量以补偿簇射外或者死区的能量沉积。

结合径迹和量能器簇射信息最终可以鉴别物理对象，图 3.20 显示 ATLAS 不同粒子的径迹和能量沉积模式。

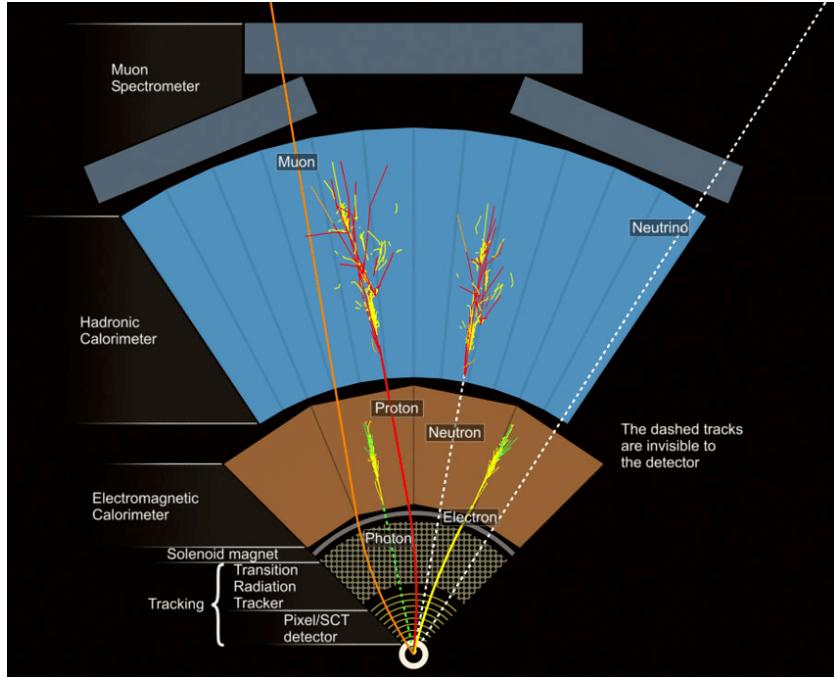


图 3.20 不同粒子在 ATLAS 探测器 ( $r - \phi$  平面) 的径迹和能量沉积情况。

### 3.4.2 电子

电子和光子在 EM 量能器中有非常相似的特征。两个对象之间的主要区别在于电子也会在 ID 中留下径迹。ATLAS 有许多基于光子末态的物理分析，因为它们具有非常好的能量分辨率。然而，本文分析并没有涉及光子，所以不述光子鉴别，光子重建的细节可以在参考文献 [80] 中找到。

对于电子，其簇射通过滑动窗口算法进行 [79]，即在一定范围内搜索使  $3 \times 5$  单元窗口（单元大小为  $0.025 \times 0.025$ ,  $\eta \times \phi$ ）内具有最大沉积能量并将其作为初始簇射种子，即塔 (tower<sup>3</sup>)，电子径迹重建如前面讲述，但考虑到电子通过 ID 时因韧致辐射造成的稍大的能量损失，会使用特定的模式识别和拟合假设。使用高斯和滤波器 (Gaussian Sum Filter)[81] 重新拟合在  $(\eta, \phi)$  平面与 EM 簇射松散匹配的电子轨迹，以更好地考虑致辐射过程中的非线性。然后在更严格的条件下匹配重新拟合后的轨迹与簇射，例如要求一定的最小硅着火点数以及在最内层 Pixel 中存在着火点以排除在 ID 中转换的光子。电子能量由 EM 簇射给出，其最终校准基于蒙特卡罗模拟 [82]，而  $\eta$  和  $\phi$  坐标由相应的轨道参数给出。

电子重建仅针对  $|\eta| < 2.47$  和  $E_T > 7 \text{ GeV}$ ，对于  $p_T > 15 \text{ GeV}$  电子，重建效率大概在 97% 到 99%。重建效率的测量基于  $Z \rightarrow ee$  和  $J/\Psi \rightarrow ee$  事例 [10]，其结果如图3.21所示，数据和模拟样本中的效率差别在  $O(1)\%$  水平，而且在实际

<sup>3</sup> 代表一系列着火单元，形状如塔。

分析中此相对差别会作为修正因子考虑在 MC 中。

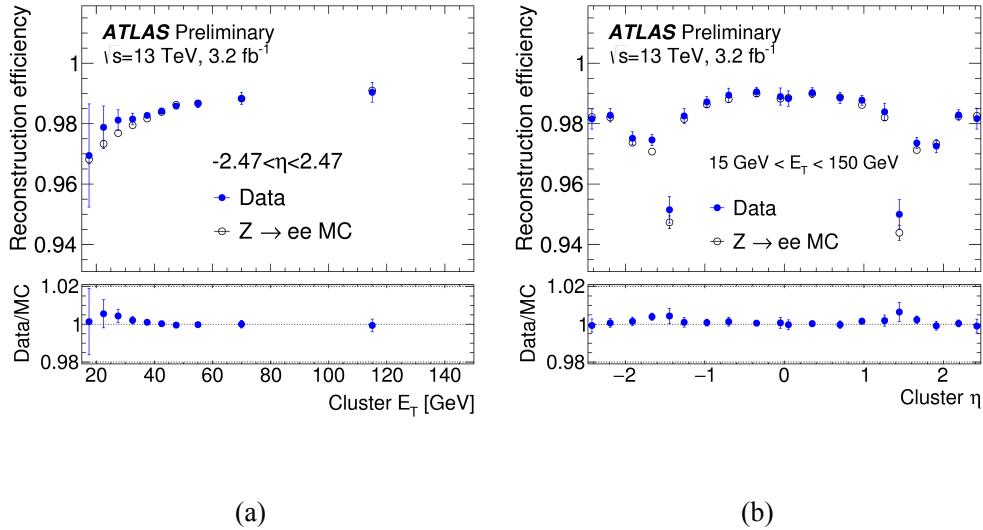


图 3.21 2015 年数据与  $Z \rightarrow ee$  MC 中的电子重建效率随簇射  $E_T$  (a) 和簇射  $\eta$  (b) 分布情况 [10]。

电子鉴别 (ID) 通过基于似然函数多变量判别式 [10] 进行。算法的输入变量包括量能器簇射形状，基于 TRT 穿越辐射的似然概率和轨道-簇射匹配相关量，以及轨迹的测量总数和 IBL 中的测量数量和韧致辐射变量。基于不同鉴别效率，定义三个电子鉴别工作点，分别命名为 Loose, Medium 和 Tight。对于  $E_T = 25$  GeV 真实电子而言，它们的鉴别效率在 78-90%，而相应的本底误判率为 0.3-0.8%。图3.22展示各个工作点随 pileup 数的变化情况，基本上其效率比较稳定。

$Z \rightarrow ee$  和  $J/\Psi \rightarrow ee$  事例也用来测量触发效率 [10]。图3.23展示 2015 年使用的单电子触发器<sup>4</sup>效率随  $E_T$  和  $\eta$  的变化，在  $E_T > 27$  GeV 时，触发效率可达 95%，数据与 MC 之间的差别在 5% 以内。最大的偏差发生在 24 GeV 附近，这是因为在 L1 阶段，数据与 MC 使用了不同的阈值，MC 会根据这些差别进行修正。

### 3.4.3 $\mu$ 子

$\mu$  子重建联合利用 ID 和 MS 的径迹，以及量能器信息，它有四类：

- Combined muons (CB). 这些  $\mu$  子通过同时拟合 ID 和 MS 的着火点得到，在拟合过程中，MS 着火点可以被添加或者移除以改善拟合质量。

<sup>4</sup>HLT\_e24\_1hmedium\_L1EM20VH

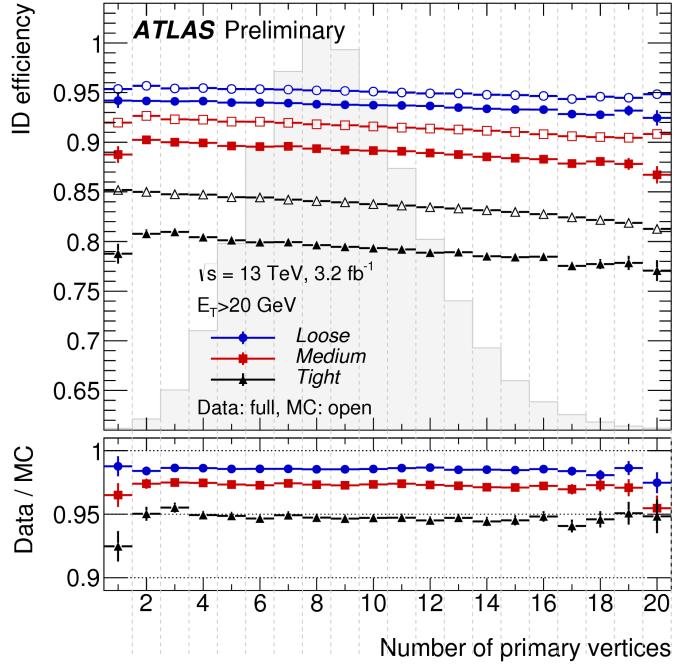


图 3.22 2015 年数据和  $Z \rightarrow ee$  MC 在不同工作点的鉴别效率随顶点数分布情况 [10]，背景中的灰色直方图为顶点数的分布情况。

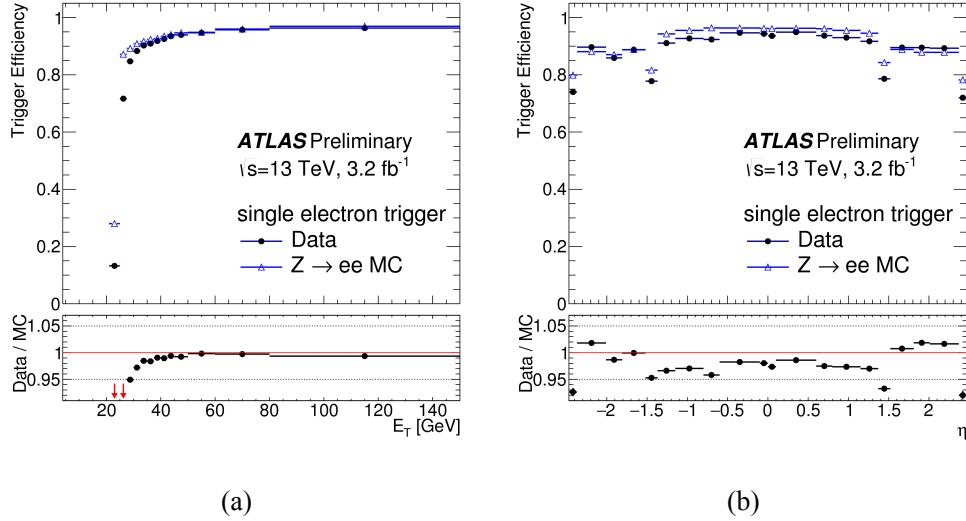
- Segment tagged muons (ST). 这类  $\mu$  子代表当完整 ID 轨迹仅与 MDT 或 CSC 中的一个轨道段 (segment) 匹配时的情况，这要么是因为  $p_T$  低或者因为它们穿过 MS 接收度低的区域。

- Calorimeter tagged muons (CT). 来自电弱衰变的高动量  $\mu$  子在穿过量能器时仅沉积很少的能量，与最小的电离损失相当。当 ID 轨迹与一个这样的簇射匹配时，则定义为 CT  $\mu$  子候选者。这些  $\mu$  子是假的概率较高，但可以在 MS 探测器件较少的  $|\eta| < 0.1$  区找回一些。

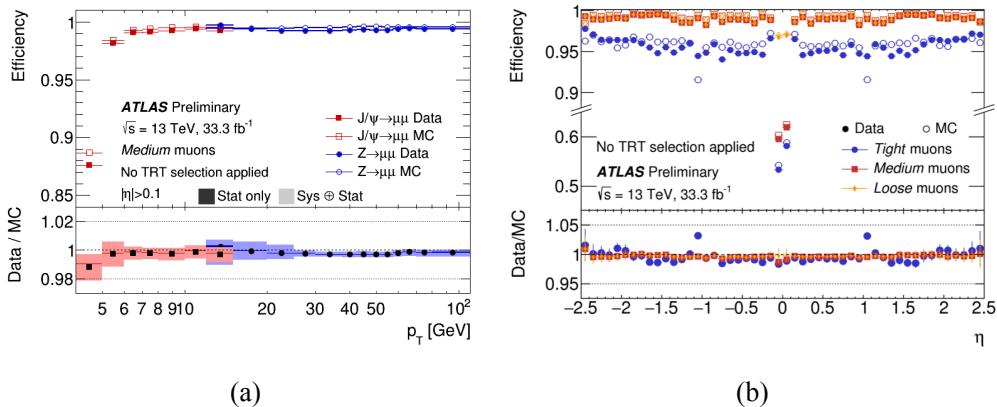
- Extrapolated muons (ME). 为了处理 ID 未覆盖的前向区  $2.5 < |\eta| < 2.7$ ，可以仅重建 MS 的轨迹，然后考虑在量能器内的能量损失后外推回初级顶点。

不同类别的  $\mu$  子重叠消除之后，才定义物理分析可用的对象粒子。值得指出的是， $\mu$  子重建可到 4 GeV。与电子类似，有三个  $\mu$  子质量工作点：Loose, Medium 和 Tight。Tight  $\mu$  子仅包括 CB 类，并且有额外的径迹质量要求以压低不是来自初级顶点的  $\mu$  子；Medium  $\mu$  子也包括  $|\eta| > 2.5$  的 ME 类，但是要求至少存在要个 MS 径迹 segment；Loose  $\mu$  子也包括 ST 和 CT 类。

$\mu$  子重建效率的评估与电子类似，利用  $Z \rightarrow \mu\mu$  和  $J/\Psi \rightarrow \mu\mu$  事例 [83]。对于 Loose 类和 Medium 类，重建效率为 98%，而对于 Tight 类，平均为 95%。图 3.24 总结 2016 年  $\mu$  子重建效率情况，可以看到，数据与 MC 的差别在几个百

图 3.23 2015 年电子和  $Z \rightarrow ee$  MC 的单电子触发效率随  $E_T$  (a) 和  $\eta$  (b) 的分布情况 [10]。

分点，主要集中在 MDT 对齐稍差的桶部区。

图 3.24 2015+2016 年数据与  $Z \rightarrow \mu\mu$ ,  $J/\Psi \rightarrow \mu\mu$  MC 中的  $\mu$  子重建效率随  $p_T$  (a) 和  $\eta$  (b) 分布情况, (b) 中  $|\eta| < 0.1$  区间 Loose  $\mu$  子效率的回升是因为使用 calorimeter-tagged 的  $\mu$  子定义。

$\mu$  子触发效率 [11] 表现估计与电子类似。图 3.25 展示 L1 MU20 触发器的效率, 这类触发要求 MS 中至少存在一个  $p_T > 20$  GeV 的  $\mu$  子候选者。L1 桶部触发效率大约为 70%, 而在前向区为 90%, 这是因为 RPC 比 TGC 更少的几何接收度。然而对于通过 L1 的  $\mu$  子, HLT 触发效率可达 100%。数据与 MC 之间的触发效率相差在几个百分比水平。MC 中  $\mu$  子动量大小和分辨率会根据对撞数据校准 [83], 其相对分辨率在 1.7% 与 2.9% 之间, 在校准之后, 对于大部分  $|\eta|$  区域数据与 MC 的分辨率相差在 5% 以内。

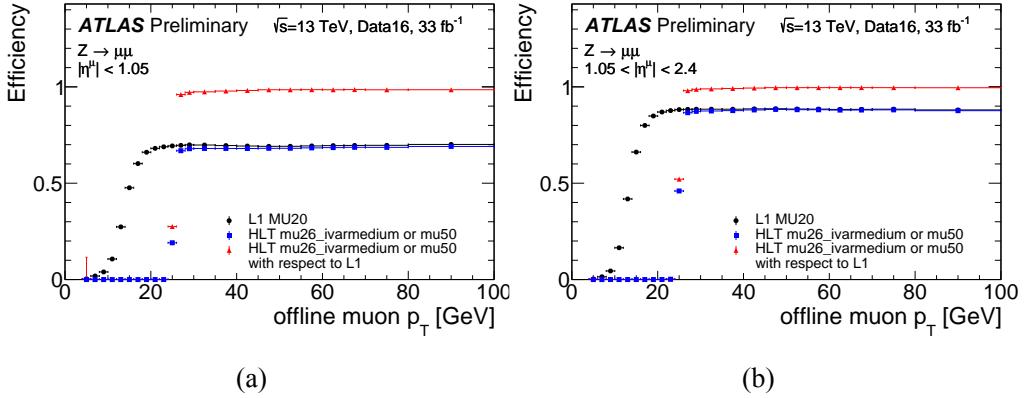


图 3.25 2015+2016 年数据中 L1 MU20 seed 的触发效率随  $p_T$  分布 [11], HLT 的在线筛选对  $\mu$  子有一定的 isolation 要求。

### 3.4.4 喷注

硬散射过程中的末态夸克和胶子（也包括初态辐射）会通过虚胶子的微扰辐射产生部分子簇射，当簇射能量传递下降到典型的强子尺度  $\Lambda_{\text{QCD}} \approx 200 \text{ MeV}$  时，QCD 微扰论不再适用，强子化过程开始，即形成无色荷的束缚态。

从探测器角度看，强子化的结果是一束相互比较靠近的强子，被称为喷注 (jet)，显然，喷注的能量和方向是与初始部分子直接相关的。ATLAS 喷注重建算法的输入是相邻的着火单元簇射 (topoclusters)[84]。本文使用的喷注是由在电磁能量标度 (EM) 下刻度的 topoclusters 构建的。

本文使用的喷注是利用 anti- $k_t$  算法 [85] 在  $\Delta R=0.4$  范围基于 topoclusters 构建的，其 ( $p_T > 25 \text{ GeV}$ ) 能量大小和分辨最终通过仿真的技术校准到真实部分子能量，而且在 data-driven 中得到证实 [86, 87]。

$p_T < 60 \text{ GeV}, |\eta| < 2.4$  的喷注有一定概率的来自 pileup，一个称为喷注顶点标记 (JVT)[88] 的算法通过关联喷注径迹与顶点可以压低 pileup 影响。在  $t\bar{t}h$  分析对该算法的应用中，每个喷注的平均关联效率为 92%。JVT 的效率利用  $Z \rightarrow \mu\mu + \text{jets}$  事例校准，最终的 MC 的修正因子在 1-5% 之间。

顶夸克是标准模型中最重的粒子，不会强子化，几乎百分百衰变到  $W + b$ 。来源于  $b$  夸克的喷注一般会包含  $B^\pm$  介子，而  $B^\pm$  介子衰变之前会经过一段宏观可探测到的距离 ( $c\tau_{B^\pm} \approx 0.5 \text{ mm}$ )。这个性质可以用来标记来源于  $b$  夸克的喷注，从而间接标记顶夸克。在 ATLAS 实际应用中，一个联合利用喷注径迹影响参数，次级顶点，以及  $b$  或  $c$  强子衰变拓扑结构的多变量学习算法 MV2[89, 90] 开发出来用于标记  $b$  喷注。在本文的  $hh$  和  $t\bar{t}h$  分析中使用的是 MV210，它的训练样本

是  $t\bar{t}$ , 并且假设本底是 93% 轻夸克喷注与 7%  $c$  夸克喷注, 所使用的工作点对应 70%  $b$ -tagging 效率, 以及对  $c$  喷注 (轻味喷注) 的排除因子 (rejection factor) 为 12 (381)。而后使用与 Run 1 类似的方法 [91] 校准 MC  $b$ -tagging 效率到数据, 基本上修正因子在 5% 以内, 最大的系统误差不超过 10%。

### 3.4.5 $\tau_{\text{had}}$

$\tau$  轻子有较大的质量 ( $\approx 1.77 \text{ GeV}$ ), 而且不稳定, 大约 36% 衰变到电子或者  $\mu$  子, 而剩下的 64% 衰变到强子。对于强子化衰变的  $\tau$  子, 标记为  $\tau_{\text{had}}$ , 主要有两类, 一类是末态有一个带电  $\pi$  介子 (1-prong), 另一类是有三个带电  $\pi$  介子 (3-prong)。因为  $\tau$  轻子的衰变长度很短 ( $c\tau \approx 87 \mu\text{m}$ ), 非常靠近顶点, 区分来源于  $\tau$  轻子与直接来源于顶点的电子或  $\mu$  子比较困难, 而  $\tau_{\text{had}}$  在 ID 中有 1 条或者 3 条径迹, 并且相对准直的径迹与能量簇射使得重建比较可行。关于  $\tau_{\text{had}}$  的重建及鉴别可参见 [92]。 $t\bar{t}h$  分析中几个分析道都包含  $\tau_{\text{had}}$  末态, 它可以用来压低 QCD 喷注本底。

### 3.4.6 丢失横动量

在横截面平面, 总动量为零, 那么可以定义丢失横动量如下:

$$\vec{E}_T^{\text{miss}} = \vec{E}_x^{\text{miss}} + \vec{E}_y^{\text{miss}} = - \sum \vec{E}_T^{\text{vis}} \quad (3.5)$$

$\vec{E}_T^{\text{miss}}$  包含不与探测器反应的中微子或者刚好穿过探测器死区的粒子。丢失横动量的大小定义为:

$$E_T^{\text{miss}} = \sqrt{(E_x^{\text{miss}})^2 + (E_y^{\text{miss}})^2} \quad (3.6)$$

$$E_{x(y)}^{\text{miss}} = - \sum E_{x(y)}^{\text{vis}}. \quad (3.7)$$

ATLAS  $E_T^{\text{miss}}$  重建算法 [93] 会考虑所有校准之后的重建粒子作为方程 3.7 右端的输入, 即:

$$\begin{aligned} E_{x(y)}^{\text{miss}} = & E_{x(y)}^{\text{miss},e} + E_{x(y)}^{\text{miss},\gamma} + E_{x(y)}^{\text{miss},\tau} + E_{x(y)}^{\text{miss,jet}} + \\ & E_{x(y)}^{\text{miss,TST}} + E_{x(y)}^{\text{miss},\mu} \end{aligned} \quad (3.8)$$

其中, TST (Track Soft Term) 指 ID 中未与其他粒子重建联系起来的低动量径迹, 需要指出的是, 这一项也可以使用量能器中未被其他粒子重建使用的能量, 但会导致  $E_T^{\text{miss}}$  有很强的 pileup 依赖。 $E_T^{\text{miss}}$  的重建表现可见 [93]

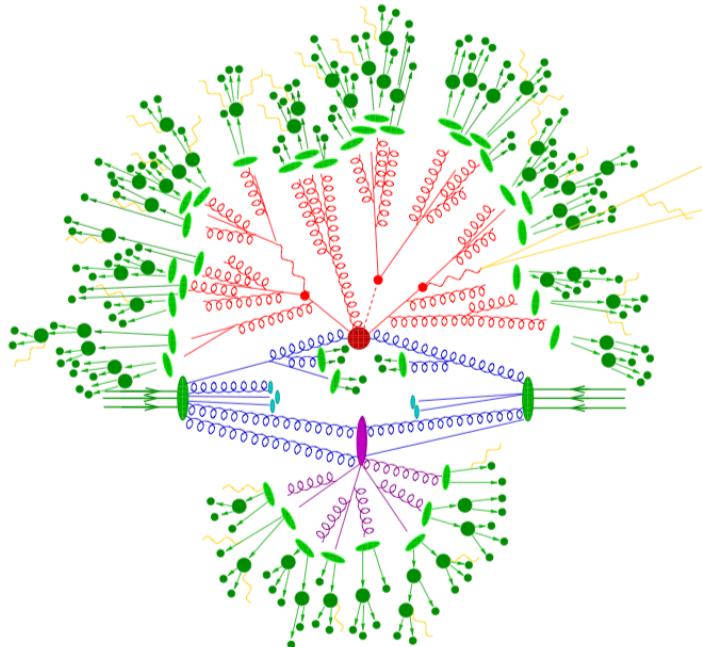


图 3.26 产生子中  $t\bar{t}h$  事例演化过程 [12]。首先携带大动量的硬散射过程发生（大红色圆），随后  $t$  和  $h$  衰变（小红色圆），衰变产物发生 QCD 硬辐射（红色）；除硬散射之外，次要散射（由参与硬散射之外的部分子参与）也可能发生（紫色）；最后辐射到一定低能量时，强子化过程发生（浅绿），强子化产物衰变到稳定粒子（深绿）。光子辐射可在任一阶段发生（黄色）。

### 3.5 事例仿真

物理分析的一项重要目标是验证或排除理论预测，在对撞实验中，理论预测需要与观测数据进行比较，为实现这一目的，需要对理论模型进行仿真。同时仿真事例也可用来理解本底组成和新信号运动学分布。

ATLAS 的仿真包括事例产生和探测器模拟的多步骤过程。一个典型的质子-质子对撞过程如图 3.26 所示，首先是携带大动量的部分子的碰撞，即硬散射过程，而后衰变，发生部分子簇射，最后强子化到稳定粒子，这些都通过蒙特卡罗事件产生子 (Monte-Carlo generator) 模拟 [94]。最后，模拟稳定粒子与探测器的相互作用。ATLAS 的事例仿真过程如下：

- 整合所仿真的物理过程的相空间（运动学，自旋），在一定的 QCD 或者 QED 微扰展开级数下计算并模拟硬散射过程 (Matrix element)。
- 利用专用程序模拟硬散射过程的部分子的初态和末态辐射胶子以及紧接的部分子簇射过程 (PS)，在这一般是使用微扰 QCD 来模拟粒子级联，通常能到次级对数精度 (NLL)，这个过程直到微扰 QCD 不再适用的尺度  $\Lambda_{\text{QCD}} \approx 200 \text{ MeV}$  才停止。类似 PS，QED 过程的辐射光子利用等价的数学框架模拟。

- 强子化过程不依赖于初始的物理过程(即硬散射过程), 它不能使用微扰 QCD 论, 目前从第一性原理出发也未能理解, 所以一般通过基于实验数据的唯象模型描述, 所使用的方法在不同的软件环境中有不同的实现。
- 仿真 `underlying event` (UE)。UE 代表了碰撞质子中未参与硬散射过程的部分子的强子化, 或者它们之间的相互作用, 它们可以是微扰 QCD 尺度, 也可以在非微扰尺度。同样地。导致 pileup 的 `minimum bias` 事件也会叠加在硬散射事例中。
- 利用 GEANT4 软件 [95] 模拟前面步骤产生的稳定粒子与探测器的相互作用, 探测器的几何形状与材料分布都会考虑 [96]。这个步骤是整个 ATLAS 实验耗费计算资源最多的一环, 所以对某些过程使用所谓的快速模拟技术 (fast simulation)[22] 以节省计算资源和加快模拟过程。
- 探测器着火点被复现并数字化, 而后进行与对撞数据完全一样的事例重建过程, 并且以相同的文件格式存储。在这过程中, 也对触发决策进行模拟。

如章节3.4所述, 仿真样本的重建效率, 鉴别效率, 触发效率和能量刻度以及能量校准都会乘上一定的修正因子使之与真实数据匹配, 需要注意的是, pileup 仿真强烈依赖假设的对撞条件。



## 第4章 通过多轻子道寻找 $t\bar{t}h$ 产生模式

### 4.1 $t\bar{t}h$ 发现

目前 ATLAS 实验搜寻  $t\bar{t}h$  通过以下衰变道进行：

- $t\bar{t}(h \rightarrow b\bar{b})$
- $t\bar{t}(h \rightarrow \gamma\gamma)$
- $t\bar{t}h \rightarrow \text{多轻子}$ <sup>1</sup>

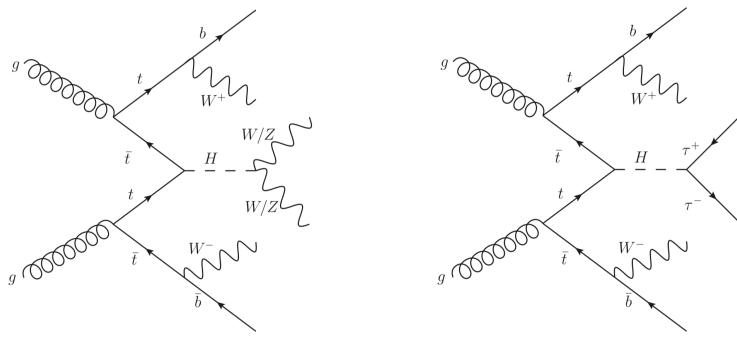
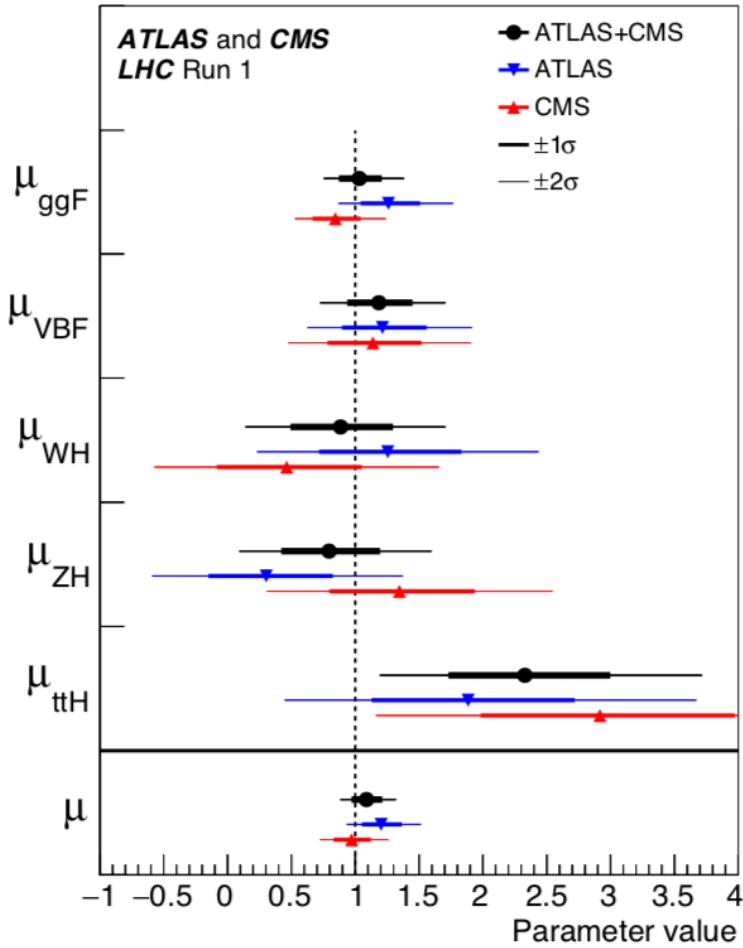
$t\bar{t}(h \rightarrow b\bar{b})$  具有最大的衰变分支比，其主要信号特征是很高的  $b$  喷注数。 $t\bar{t}(h \rightarrow \gamma\gamma)$  虽然衰变分支比很小，但得益于双光子的良好的分辨，这个分析道有很好的希格斯质量极点和信号纯度。tthML 并不显性关注某个中间过程，它根据轻子数或者  $\tau_{\text{had}}$  数分类，主要针对  $h \rightarrow WW^*$ ,  $h \rightarrow \tau\tau$  和  $h \rightarrow ZZ^*$ <sup>2</sup>，相应的数图阶费曼图见4.1。这种搜寻策略是因为我们当前的目标是确定  $t\bar{t}h$  的产生率，而不是耦合常数测量。在 Run 1 ATLAS 和 CMS 已通过以上衰变道进行  $t\bar{t}h$  寻找 [13, 97–101]，联合 ATLAS 和 CMS 结果（图4.3）给出信号强度  $\mu_{t\bar{t}h} = \sigma/\sigma_{SM} = 2.3^{+0.7}_{-0.6}$ ，超出主要来自 tthML 测量，其结果为  $\mu_{t\bar{t}h} = 2.1^{+1.4}_{-1.2}$ ，95% 置信度下上限为  $\mu_{t\bar{t}h} < 4.7$ ，对应观测（期望）显著性为  $1.8\sigma$  ( $0.9\sigma$ )。

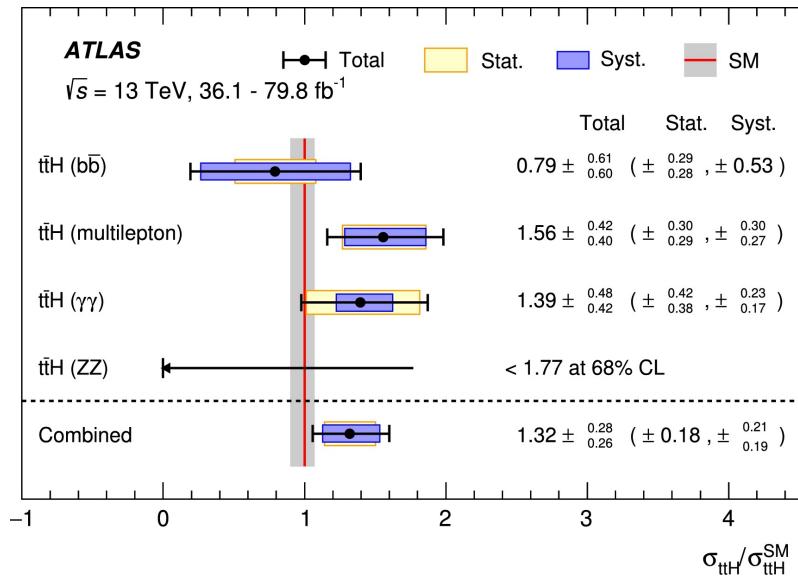
13 TeV  $t\bar{t}h$  总截面相比 8 TeV 结果增加了 3.9 倍 [47, 102]，并且随着更多数据的累积， $\mu_{t\bar{t}h}$  测量精度会得到显著提升。2017 年 ATLAS 利用 Run 2 36.1  $\text{fb}^{-1}$  数据报告了  $t\bar{t}h$  存在证据 [14]，联合以上衰变道给出观测（期望）显著性为  $4.2\sigma$  ( $3.8\sigma$ )， $\mu_{t\bar{t}h}$  的最佳拟合值为  $1.2 \pm 0.2(\text{stat})^{+0.3}_{-0.2}(\text{syst})$ ，与标准模型预期基本一致，值得指出的是，tthML 最敏感，其观测（期望）显著性为  $4.1\sigma$  ( $2.8\sigma$ )。2018 年 ATLAS 与 CMS 联合 Run 1 和 Run 2 部分数据分别宣告发现  $t\bar{t}h$  [103, 104]，相应的信号强度测量结果 ATLAS 为  $\mu_{t\bar{t}h} = 1.32 \pm 0.18(\text{stat})^{+0.21}_{-0.19}(\text{syst})$ ，CMS 为  $\mu_{t\bar{t}h} = 1.26^{+0.31}_{-0.26}$ ，其中 ATLAS tthML 给出  $\mu_{t\bar{t}h} = 1.56^{+0.30}_{-0.29}(\text{stat})^{+0.30}_{-0.27}(\text{syst})$ 。本章将叙述利用 Run 2 2015-2017 年数据进行的 tthML 分析，主要关注  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  衰变道，并分别给出  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  拟合结果和 tthML 联合拟合结果。

---

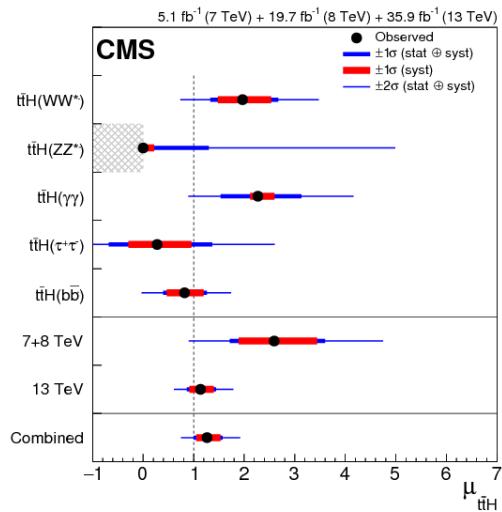
<sup>1</sup>本文称 tthML

<sup>2</sup>不包括  $t\bar{t}h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$

图 4.1 tthML 树图阶费曼图, 左图:  $h \rightarrow WW^*/ZZ^*$ , 右图:  $h \rightarrow \tau\tau$ 。图 4.2 Run 1 联合 ATLAS 与 CMS 数据给出的希格斯产生模式最佳拟合值 [13], 粗线表示  $1\sigma$ , 细线表示  $2\sigma$ 。



(a) ATLAS 结果 [103]



(b) CMS 结果 [104]

图 4.3 Run 2  $t\bar{t}h$  信号强度测量结果。

## 4.2 tthML 分类

为了最大限度利用 tthML 数据, tthML 会根据轻子数或者  $\tau_{\text{had}}$  数分类, 最后联合拟合所有分析道得到信号强度。对于 2015-2017 年数据分析, tthML 有以下六个分析道 (图4.4):

- $2\ell\text{SS}$ : 两个相同电荷轻子, 并且没有  $\tau_{\text{had}}$ 。
- $3\ell$ : 三个轻子, 总电荷为  $\pm 1$ , 并且没有  $\tau_{\text{had}}$ 。
- $4\ell$ : 四个轻子, 总电荷为 0。
- $2\ell\text{SS} + 1\tau_{\text{had}}$ : 两个相同电荷轻子, 一个  $\tau_{\text{had}}$ 。
- $3\ell + 1\tau_{\text{had}}$ : 三个轻子, 总电荷为  $\pm 1$ , 一个  $\tau_{\text{had}}$ 。
- $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ : 一个轻子, 两个相反电荷的  $\tau_{\text{had}}$ 。

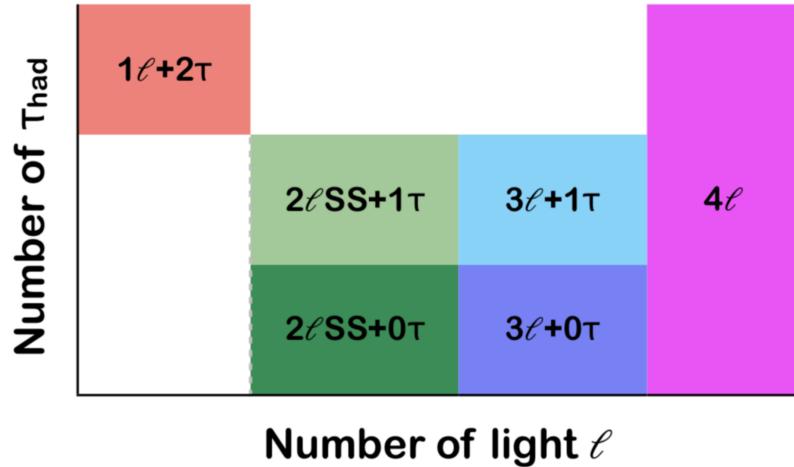


图 4.4 tthML 分类图示。

如图4.5所示, 不同类别对不同希格斯衰变敏感,  $2\ell\text{SS}$ ,  $3\ell$  以及  $4\ell$  的 80% 信号来自  $h \rightarrow WW^*$ , 并且  $3\ell$  和  $4\ell$  的一部分信号为  $h \rightarrow ZZ^*$ , 大约为 5%~10%, 还观察到随着  $\tau_{\text{had}}$  数增加,  $h \rightarrow \tau\tau$  贡献越大, 其中  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  98% 信号贡献是  $h \rightarrow \tau\tau$ , 这是  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  的独特之处。另外,  $4\ell$  信号纯度 ( $S/B$ ) 最高, 但是受限于统计量, 显著性 ( $S/\sqrt{B}$ ) 一般, 最高显著性为  $2\ell\text{SS}$  和  $3\ell$ 。

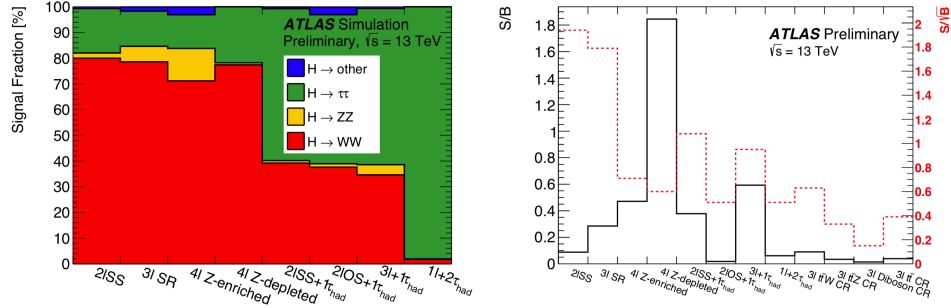


图 4.5 左图: tthML 信号类别中希格斯衰变来源分布; 右图:  $S/B$  (黑色),  $S/\sqrt{B}$  (红色)。其中'other' 主要贡献来自  $h \rightarrow \mu\mu$  和  $h \rightarrow b\bar{b}$ 。[14]

### 4.3 数据与 MC

本文 tthML 分析使用 2015-2017 年的对撞数据, 总共  $80 \text{ fb}^{-1}$ , 具体收集情况可参见亮度章节3.3。

表4.1总结信号与背景 MC 产生情况, 所有希格斯粒子质量均设为  $125 \text{ GeV}$ 。  
 $t\bar{t}h$  通过 Powheg-Box 产生,  $t\bar{t}Z$  通过 MadGraph5\_aMC@NLO 在 QCD 次领头阶产生, 两种样本而后均使用 Pythia 8 模拟部分子簇射和强子化过程。单举  $t\bar{t}\ell\ell$  过程 (包括  $t\bar{t}\ell\ell$ ,  $t\bar{t}\ell\ell + q/g$  及  $t\bar{t}\ell\ell + 2q/g$ ) 的硬散射模拟考虑了不在壳的 Z 玻色子和虚光子 ( $\gamma^*$ ) 贡献, 要求  $m(\ell\ell) > 5 \text{ GeV}$ 。  
 $t\bar{t}W$  MC 使用 Sherpa 2.2.5 产生, 对于具有最多一个出射额外部分子事例在次领头阶计算, 而对于其他事例在领头阶计算。  
 $t\bar{t}h$  总截面为  $507.1 \text{ fb}$ , 在 QCD 次领头阶和使用电弱参数 [105–111] 计算得到 [47, 102], 来自 QCD 重整化和因子化的误差为  $^{+5.8\%}_{-9.2\%}$ , 来自 PDF 和  $\alpha_s$  的误差为  $\pm 3.6\%$ 。  
 $t\bar{t}V$  (包括  $pp \rightarrow t\bar{t}\ell^+\ell^- + X$ ) 产生截面计算到 QCD 次领头阶 [16, 111],  $\sigma_{t\bar{t}\ell\ell}=123.7 \text{ fb}$ ,  $\sigma_{t\bar{t}W}=600.8 \text{ fb}$ , 它们的 QCD scale 误差大约  $12\%$ , PDF+ $\alpha_s$  误差为  $3\text{--}4\%$ 。

$t\bar{t}$  事例使用 Powheg v2.0 和 Pythia 8 仿真, 其中 Pythia 8 使用 A14 tune。 $t\bar{t}$  的产生截面  $832 \text{ pb}$ 。Powheg 也用于仿真其他单顶夸克过程, 比如  $Wt$ 。

$VV$  (包括  $VV + q/g$ ,  $VV + 2q/g$  及  $VV + 3q/g$ ) 事例使用 Sherpa v2.2.2 仿真, 其中对于  $4\ell$ ,  $3\ell + \nu$  及  $2\ell + 2\nu$  事例, 如果最多有一个额外出射部分子, 在次领头阶计算, 其他事例在领头阶计算。 $W^\pm W^\pm jj$  MC 分为 QCD 类 ( $O(\alpha_{em}^4 \alpha_s^2)$ ) 与 VBS (Vector Boson Scattering) 类 ( $O(\alpha_{em}^6)$ ), 各自在领头阶产生<sup>3</sup>。额外的 VBS 过程,  $qq \rightarrow 3\ell\nu jj$ ,  $qq \rightarrow 4\ell$  和圈图过程  $gg \rightarrow WZ^*/ZZ^*$  也使用同样的方法产生。

最后如章节3.5所述, 所有的 MC 经过 ATLAS 探测器仿真, 通过 Pythia 8 产

<sup>3</sup>忽略相互干涉项

生的 pileup 事例<sup>4</sup>也会叠加到一起。

Process	Generator (alternative)	Parton Shower PDF (alternative)	Tune	
$t\bar{t}h$	Powheg-BOX [112]	Pythia 8	NNPDF 3.0 NLO [113]/ A14	
			NNPDF 2.3 LO [114]	
	(-)	(Herwig++)		
$thqb$	MG5_aMC	Pythia 8	CT10 [115]	A14
$thW$	MG5_aMC	Herwig++	CT10 /CTEQ6L1 [117, 118]	UE-EE-5 [116]
$t\bar{t}W$	Sherpa 2.2.5 [119] (MG5_aMC)	Sherpa 2.2.5 (Pythia 8)	NNPDF 3.0 NNLO	Sherpa default
$t\bar{t}(Z/\gamma^*)$	MG5_aMC	Pythia 8	NNPDF 3.0 NLO /2.3 LO	A14
	(Sherpa)	(Sherpa)		
$t(Z/\gamma^*)$	MG5_aMC	Pythia 8	CTEQ6L1	Perugia2012 [120]
$tW(Z/\gamma^*)$	MG5_aMC	Pythia 8	NNPDF 2.3 LO	A14
$t\bar{t}t, t\bar{t}t\bar{t}$	MG5_aMC	Pythia 8	NNPDF 2.3 LO	A14
$t\bar{t}W^+W^-$	MG5_aMC	Pythia 8	NNPDF 2.3 LO	A14
$t\bar{t}$	Powheg-BOX [112]	Pythia 8	CT10/CTEQ6L1	Perugia2012
$t\bar{t}\gamma$	MG5_aMC	Pythia 8	NNPDF 2.3 LO	A14
$s-, t$ -channel, Powheg-BOX [121, 122]	Pythia 6	CT10 /CTEQ6L1		Perugia2012
$Wt$ single top				
$VV, qqVV,$ Sherpa 2.2.2 [119]	Sherpa	NNPDF 3.0 NNLO	Sherpa default	
$VVV$				
$Z \rightarrow \ell^+\ell^-$	Sherpa 2.2	Sherpa	NNPDF 3.0 NLO	Sherpa default

表 4.1 信号与背景 MC 产生子总结。对每一项过程，如果表中只有一个 PDF，则表示硬散射和部分子簇射过程使用相同的 PDF；如果有两个 PDF，则前者用于硬散射，后者用于部分子簇射。 $V$  指代  $W$  或者  $Z/\gamma^*$ 。Tune 指代部分子簇射产生子使用的次级碰撞微调器 (underlying-event tune)。MG5\_aMC 是 MadGraph5\_aMC@NLO 2.2.1 [16]，Pythia 6 指代版本 6.427 [17]，Pythia 8 指代版本 8.2 [18]，Herwig++ 指代版本 2.7 [19]。通过 Pythia 6 或者 Pythia 8 产生的 MC 使用 EvtGen 1.2.0 [20] 模拟，所有 MC 均考虑领头阶对数光子辐射 (leading-logarithm photon emission)，这通过部分子簇射产生子或者 PHOTOS [21] 仿真。

#### 4.4 粒子定义

粒子重建及鉴别遵循章节3.4所述的一般方法。不同研究组对一般方法得到的重建粒子会进行适用于实际分析的筛选，称为粒子定义。出于本底研究，信号

<sup>4</sup>包括同时发生的  $pp$  对撞 (in-time pileup) 和附近不同时的 pileup (out-of-time pileup)

优化，假粒子压低等等目的，一般粒子会有两套甚至多套定义，不同定义之间可以互斥，可以相交。比如可定义筛选条件较松的 `Loose` 粒子，用于事例初步筛选或者本底研究，在 `Loose` 基础上定义 `Tight` 粒子，用于最终的信号区。本文将在随后的分析中涉及到此类定义。`tthML` 对不同粒子有（多套）不同定义，下面小节记录主要用于  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  分析的基本粒子筛选条件。

电子要求  $p_T > 10 \text{ GeV}$ ,  $|\eta| < 2.47$  (排除电磁量能器过渡区), `LooseLH` ID, 横向径迹参数显著性 (trasverse impact parameter significance)  $|d_0|/\sigma_{d0} < 5$ , 轴向径迹参数 (longitudinal impact parameter)  $|z_0 \sin\theta| < 0.5 \text{ mm}$ 。 $\mu$  子要求  $p_T > 10 \text{ GeV}$ ,  $|\eta| < 2.5$ , `Loose` ID,  $|d_0|/\sigma_{d0} < 3$ ,  $|z_0 \sin\theta| < 0.5 \text{ mm}$ 。值得一提的是，`tthML` 分析大量使用了利用多变量方法开发的压低来自重味强子衰变轻子的变量 (`PromptLeptonVeto`) 和压低电子电荷误判的变量 (`ElectronChargeIDSelectionTool`)<sup>5</sup>。

$\tau_{\text{had}}$  要求  $p_T > 25 \text{ GeV}$ ,  $|\eta| < 2.5$  (排除电磁量能器过渡区)。基于量能器和径迹信息训练的 BDT 变量用于鉴别真实  $\tau_{\text{had}}$  和压低喷注本底。所选的工作点对 one-(three-)prong  $\tau_{\text{had}}$  有 75% (59%) 的选择效率<sup>6</sup>。BDT 方法也用于排除被误判成 one-prong  $\tau_{\text{had}}$  的电子，该方法基于  $Z \rightarrow ee$  事例（重建后含有一个电子和一个  $\tau_{\text{had}}$ ）训练，分析中使用的工作点对于真实  $\tau_{\text{had}}$  选择效率为 95%，对应的排除因子 (rejection factor) 依赖  $\eta$  与  $p_T$ ，大约在 30 到 100。源自  $\mu$  子误判的  $\tau_{\text{had}}$  如果与  $\mu$  子 ( $p_T > 2 \text{ GeV}$ ) 距离很近，并且  $\mu$  子没有在量能器沉积能量 (Calo-tagged)，则丢掉  $\tau_{\text{had}}$ 。 $\tau_{\text{had}}$  也可能源自  $b$  喷注，与  $\mu$  子误判类似，如果  $\tau_{\text{had}}$  与  $b$  喷注 (70% WP) 距离很近，则丢掉  $\tau_{\text{had}}$ 。最后，为了压低 pileup 喷注的影响， $\tau_{\text{had}}$  要求匹配初始顶点。

喷注筛选基本与章节3.4.4所述一致。分析使用的喷注要求  $|\eta| < 2.5$ ，而压低 pileup 喷注的 JVT 条件仅针对  $|\eta| < 2.4$ ，所以在  $2.4 < |\eta| < 2.5$  区间内软喷注仍可以来自 pileup。图4.6检查了数据，信号 MC,  $t\bar{t}$  MC 中的喷注随  $|\eta|$  分布，可以看到在  $2.4 < |\eta| < 2.5$  区间内并未看到明显喷注数增长，所以可以排除以上担忧。

$b$  喷注定义与章节3.4.4所述一致，使用 70% WP。

$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$  定义遵循章节3.4.6所述，TST 项使用径迹探测器信息。

<sup>5</sup>因为  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  轻子纯度较高，并未使用这两个变量。

<sup>6</sup>对应 `medium`  $\tau_{\text{had}}$  ID working point.

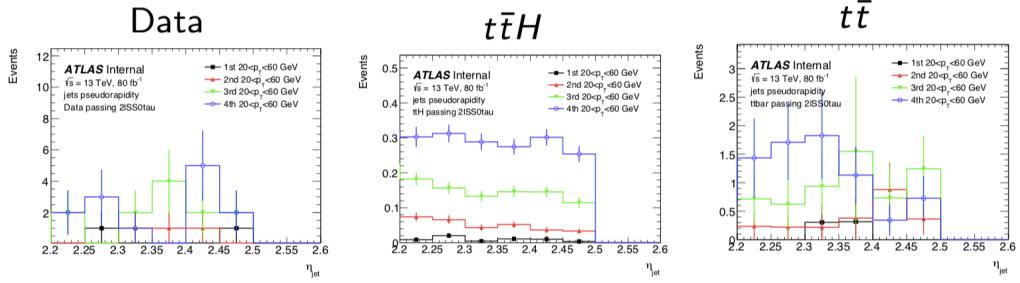


图 4.6 喷注随  $|\eta|$  分布，所选事例通过  $2\ell\text{SS}$  初步筛选，喷注按照  $p_T$  排序，所以领头喷注的总事例数最少。总体上，分布没有明显的  $|\eta|$  依赖，可以排除由于 JVT 造成的影响。

#### 4.5 重叠移除

不同的粒子流算法利用不同的输入有可能把实际上一个对象最终重建成相距很近的两个不同对象，比如强子衰变出射一个轻子，重建之后得到一个喷注和一个轻子。为了避免此类重复计数问题，需要进行相应的重叠移除 (overlap removal)[123]，其方法就是移除相距较近粒子的其中一个。 $t\bar{t}\text{ML}$  的具体移除顺序可见表4.2，不再赘述，需要注意的是所有粒子应当已通过章节4.4所述的基本定义条件。

Keep	Remove	Cone size ( $\Delta R$ )
electron	electron (low $p_T$ )	0.1
muon	electron	0.1
electron	jet	0.3
jet	muon	$\min(0.4, 0.04 + 10[\text{GeV}] / p_T(\text{muon}))$
electron	tau	0.2
muon	tau	0.2
tau	jet	0.3

表 4.2  $t\bar{t}\text{ML}$  重叠移除总结，移除顺序从上到下。

#### 4.6 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 分析

$1\ell+2\tau_{\text{had}}$  聚焦于通过  $t\bar{t}H \rightarrow \tau^+\tau^-$  衰变道寻找  $t\bar{t}h$ ，其分析基本遵循文献 [14] 的方法，但是对于 2015-2017 年的数据分析，考虑到 ATLAS 对  $\tau$  的鉴别效率的提升， $\tau$  的选择条件有一定的加强。 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  的基本策略是经过初步的事例筛选

之后 (pre-MVA)，利用 BDTG[124] 方法进一步区分信号与主要本底，即  $t\bar{t}$  (其中至少一个  $\tau_{\text{had}}$  是来源于  $b$  喷注，强子化衰变的  $W$  玻色子或者部分子簇射)。最后  $0 < \text{BDT} \leq 0.6$  和  $0.6 < \text{BDT} \leq 1.0$  为信号比例较高的区域， $\text{BDT} < 0.$  为信号比例较低的区域，同时拟合三个区域得到信号强度。

#### 4.6.1 事例筛选

$1\ell+2\tau_{\text{had}}$  使用单轻子触发器，列出如下：

- 2015 年数据: HLT\_mu20\_iloose\_L1MU15 || HLT\_mu50 || HLT\_e60\_lhmedium || HLT\_e24\_lhmedium\_L1EM20VH || HLT\_e120\_iloose;
- 2016 年和 2017 年数据: HLT\_mu26\_ivarmedium || HLT\_mu50 || HLT\_e140\_lhloose\_nod0 || HLT\_e26\_lhtight\_nod0\_ivarloose || HLT\_e60\_lhmedium\_nod0.

在 2016 年和 2017 年数据中要求触发轻子  $p_T > 27 \text{ GeV}$ ，2015 年数据中要求触发电子  $p_T > 25 \text{ GeV}$ ， $\mu$  子  $p_T > 21 \text{ GeV}$ 。

根据章节4.4所述筛选粒子，轻子还须通过 `isolationFixedCutLoose`。而后根据如下条件进行初步事例筛选：

- 两个通过 `tight` ID 具有相反电荷的  $\tau_{\text{had}}, p_T > 25 \text{ GeV}$ ，并且都没有  $b$ -tagged；
- 两个  $\tau_{\text{had}}$  必须来自初始顶点；
- 一个匹配任一触发判选条件的孤立电子或  $\mu$  子；
- 至少三个喷注，其中至少一个是  $b$ -tagged 的。

#### 4.6.2 Fakes 本底估计

虽然利用多变量学习方法构建的  $\tau_{\text{had}}$  ID 能够过滤掉大部分假  $\tau_{\text{had}}$ ，但是  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  经过初步事例筛选之后主要本底仍然是假  $\tau_{\text{had}}$  (90%)。另一方面通过检查所选轻子的来源，发现接近 99% 是真实的。所以，只需估计假  $\tau_{\text{had}}$  即可。通过检查 MC 可以对假  $\tau_{\text{had}}$  来源有一定的了解，定义来自希格斯玻色子或者矢量玻色子的为真 (real)  $\tau_{\text{had}}$ ，来自 QCD 喷注的为假 (fake)  $\tau_{\text{had}}$ 。图4.7 中两  $\tau_{\text{had}}$  分为 fake-fake, fake-real, 来自于  $H \rightarrow \tau\tau$  的 real-real，以及其他；可以发现  $t\bar{t}h$  的 real-real 比例非常高，达到 90%，而主要来源于  $t\bar{t}$  的本底至少有一个 fake。图4.7 也给出假  $\tau_{\text{had}}$  的源头 (origin) 分布，大部分来源胶子喷注，其次为 B 介子。由图中还可以发现相反电荷与相同电荷事例具有非常相似的分布，这给随后的假  $\tau_{\text{had}}$  估计方法给予一定的支持。

虽然 MC 在一定程度上可以帮助了解假  $\tau_{\text{had}}$  分布，但是考虑到探测器的复杂

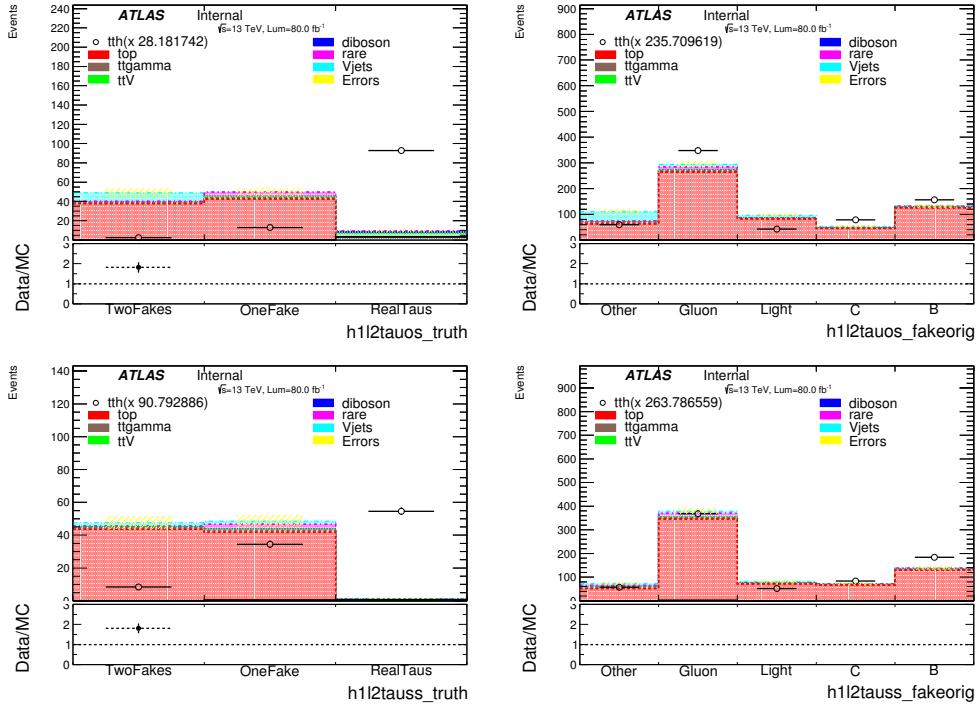


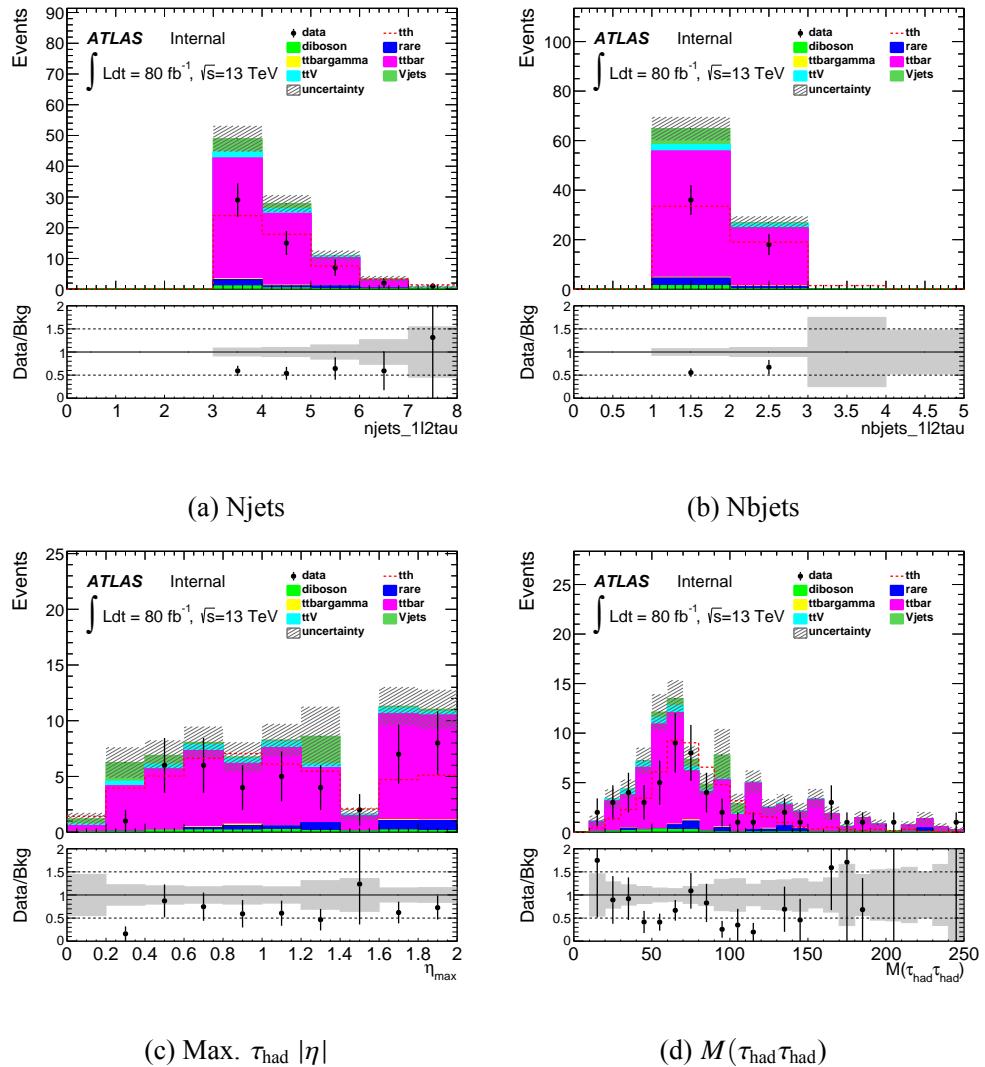
图 4.7 左列展示根据 MC 真实信息双  $\tau_{\text{had}}$  事例分为 fake-fake, fake-real, real-real 和其他的分布, 右列展示假  $\tau_{\text{had}}$  的源头分布, 第一行对应 SS 双  $\tau_{\text{had}}$ , 第二行对应 OS 双  $\tau_{\text{had}}$ 。

环境以及误判机制的复杂性, 它并不能准确地模拟假  $\tau_{\text{had}}$ , 一个佐证可见图 4.8, 图中利用一系列运动学变量比较了观测数据与全部使用 MC 的预期本底, 它们不能在误差范围内吻合。所以利用 data-driven 方法<sup>7</sup>去估计  $\tau_{\text{had}}$  是非常有必要的。喷注被误判成  $\tau_{\text{had}}$  时, 其有相同概率被标定成带正电或者负电, 所以, 假本底中相同电荷 (SS) 两  $\tau_{\text{had}}$  和相反电荷 (OS) 两  $\tau_{\text{had}}$  事例比例应该相当。所以可以利用 SS 数据去估计 OS 信号区的假本底, 即:

$$\begin{aligned} \text{Expected fakes : } & \text{OS}_{\text{fake}} = \text{SS}_{\text{data}} - \text{SS}_{\text{truth}} \\ \text{Expected total yield : } & \text{OS}_{\text{exp}} = \text{OS}_{\text{fake}} + \text{OS}_{\text{truth}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

其中,  $\text{OS}/\text{SS}_{\text{data}}$  是观测到的数据中的 OS/SS 事例数,  $\text{OS}/\text{SS}_{\text{truth}}$  则是 MC 中 (包括信号 MC) 真实  $\tau_{\text{had}}$  事例数。表 4.3 在两个控制区验证此假设, 分别是低信号区 ( $\text{BDT} < 0.5$ ,  $\text{njet} > 3$ ) 和低喷注区 ( $\text{njet} < 3$ ), 总体而言, 总期望值与 OS 数据是一致的, 最大的偏差在低信号区,  $\text{OS}_{\text{exp}}/\text{OS}_{\text{data}}$  为  $1.00 \pm 0.22$ , 22% 将作为此假本底估计方法的内禀误差 (closure test)。图 4.9 也显示低信号区的观测数据与预期本底在误差范围内是基本吻合的。

<sup>7</sup>data-driven 表示利用数据去估计本底的一类方法。



Samples	$\text{SS}_{\text{data}}$	$\text{SS}_{\text{truth}}$	$\text{OS}_{\text{truth}}$	$\text{OS}_{\text{exp}}$	$\text{OS}_{\text{data}}$	$\text{OS}_{\text{exp}}/\text{OS}_{\text{data}}$
$\text{njet} < 3$	$112 \pm 11$	$1.2 \pm 0.1$	$10.8 \pm 1.0$	$121.6 \pm 11.0$	108	$1.13 \pm 0.10$
$\text{njet} \geq 3, \text{BDT} < 0.5$	$62 \pm 7.8$	$0.55 \pm 0.07$	$4.69 \pm 0.18$	$66.1 \pm 7.9$	54	$1.22 \pm 0.15$

表 4.3 假  $\tau_{\text{had}}$  估计方法在低喷注数区和低信号区的 closure test。

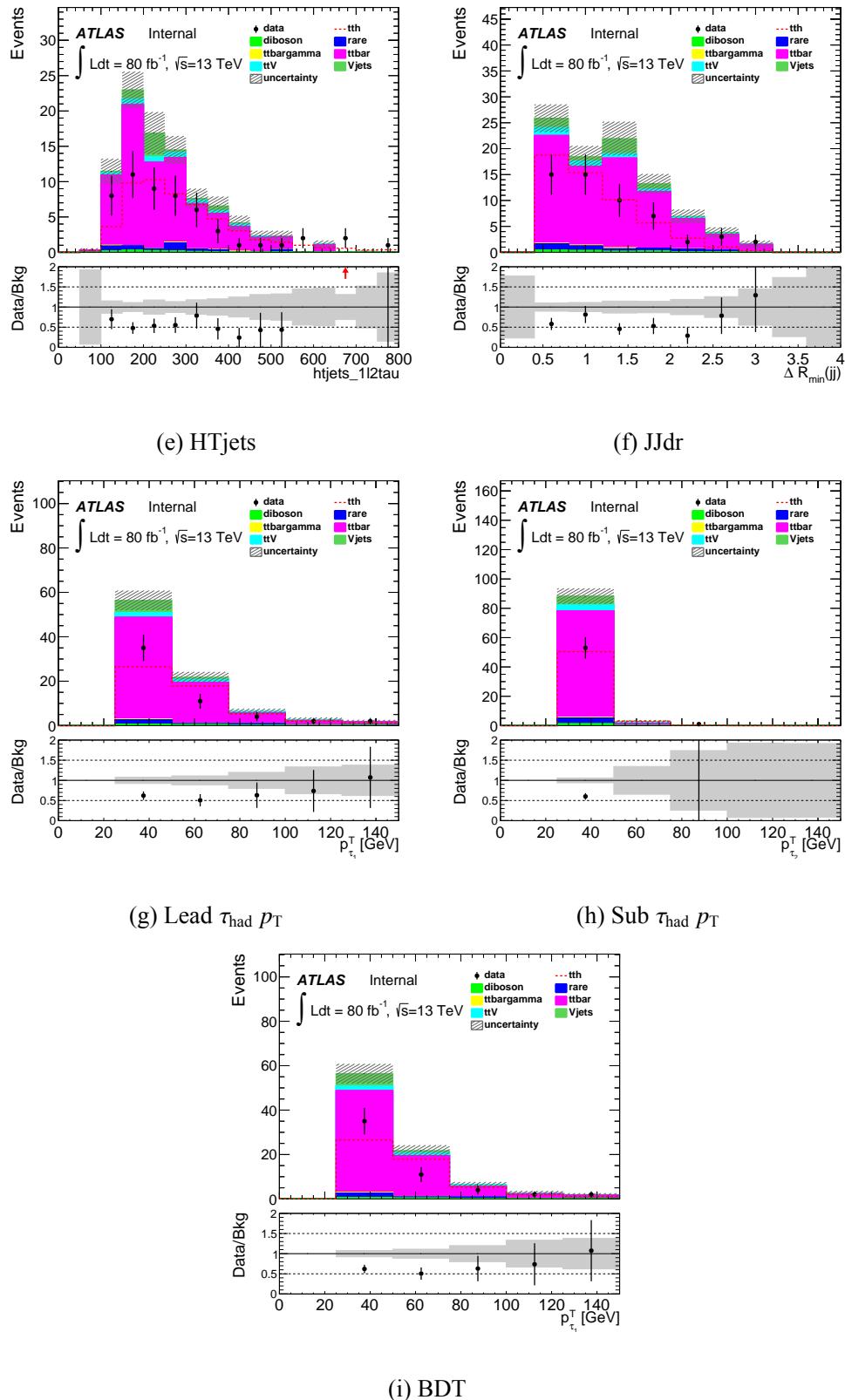
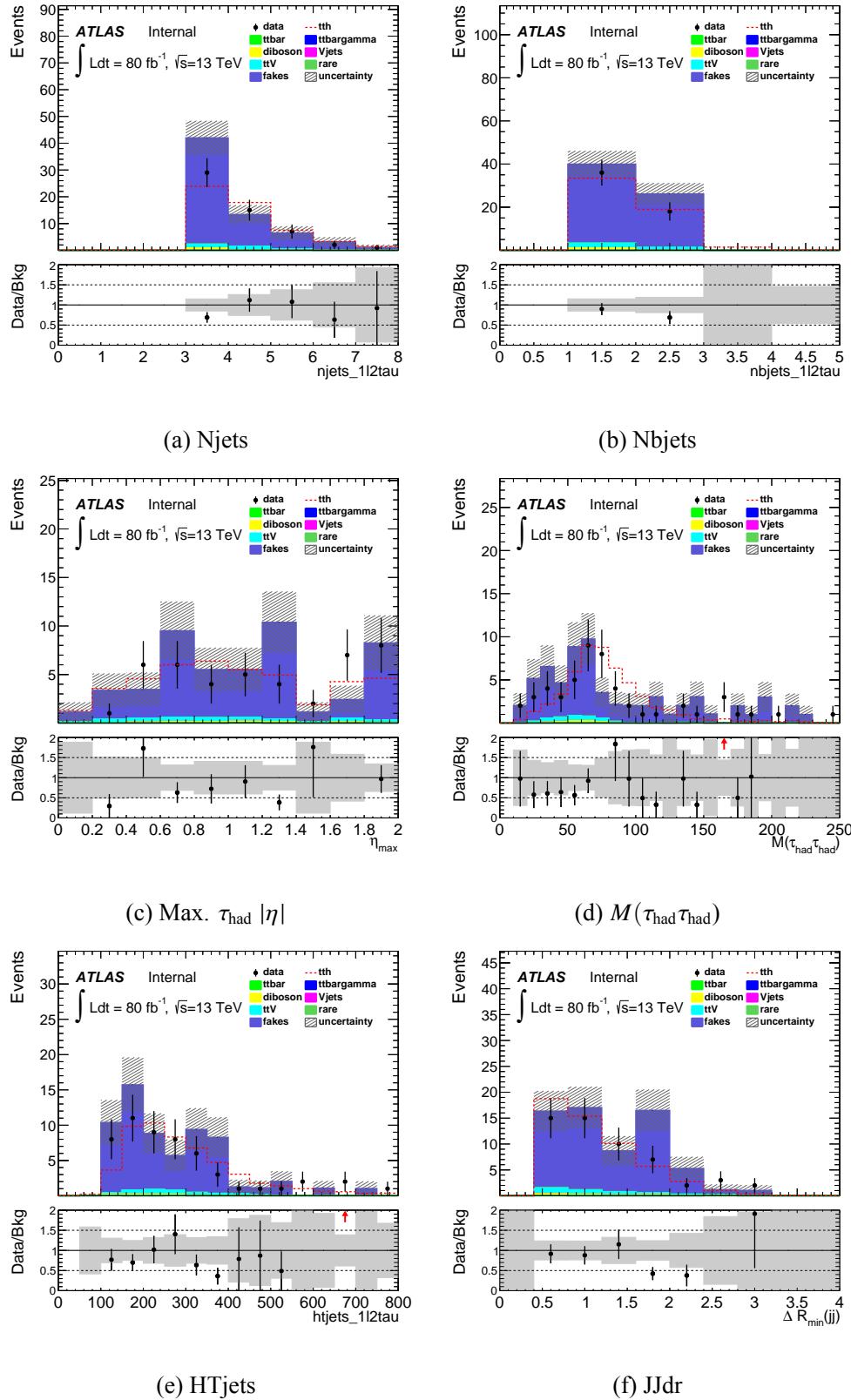


图 4.8 经过  $1\ell+2\tau_{had}$  事例初始筛选（以及  $BDT < 0.5$ ）之后的观测数据与全部使用 MC 的预期本底比较，不确定度仅包括 MC 统计误差。各运动学变量含义将在下一小节说明。



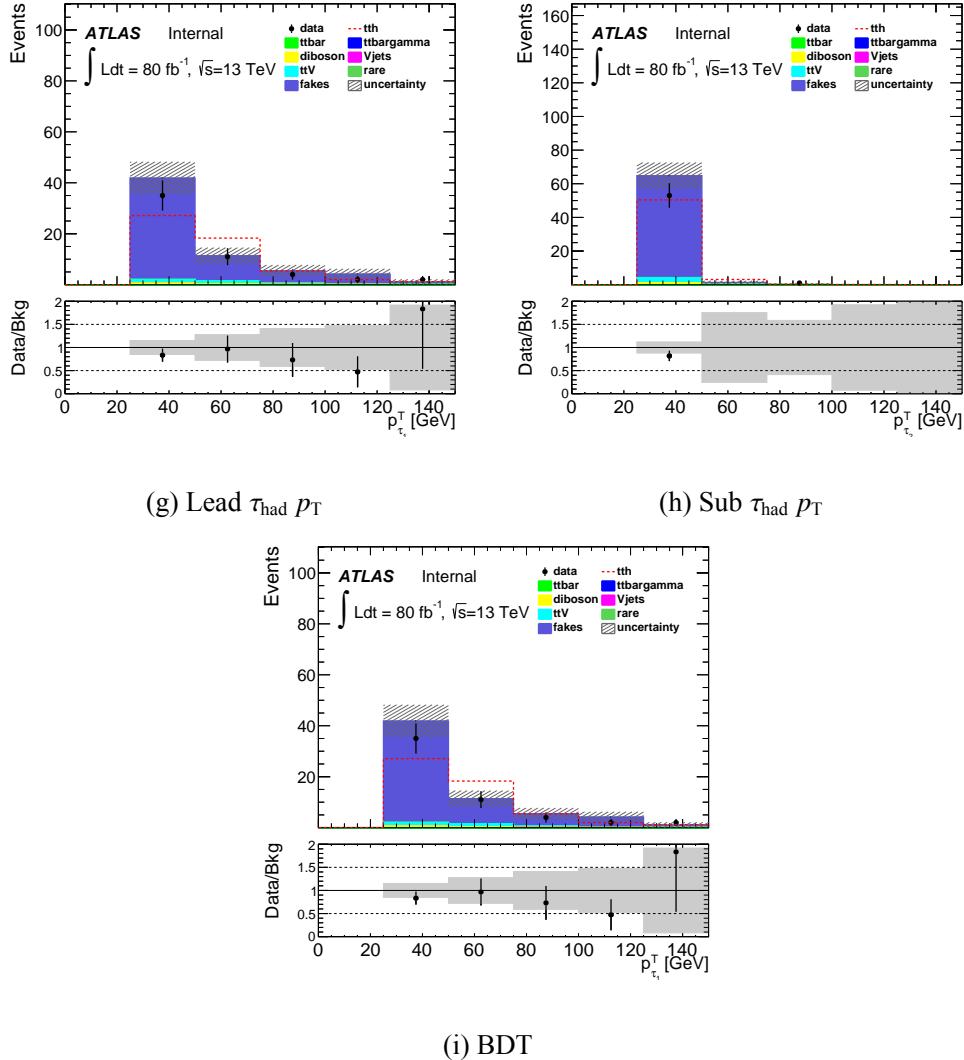


图 4.9 经过  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  事例初始筛选（以及  $\text{BDT} < 0.5$ ）之后的观测数据与预期本底比较，其中 fakes 使用 data-driven 方法估计，其他本底均是 truth MC。各运动学变量含义将在下一小节说明。

SS 数据作为 OS 信号区的 fake  $\tau_{had}$ , 这有可能引入偏差, 可以再次利用 MC 检查 OS 与 SS 的形状, 如图4.10所示, SS 与 OS 的形状无明显差别, 可以认为 SS 数据应用到信号区是可行的。并且此处 SS 与 OS 的相对差别将作为 fake  $\tau_{had}$  的形状误差。

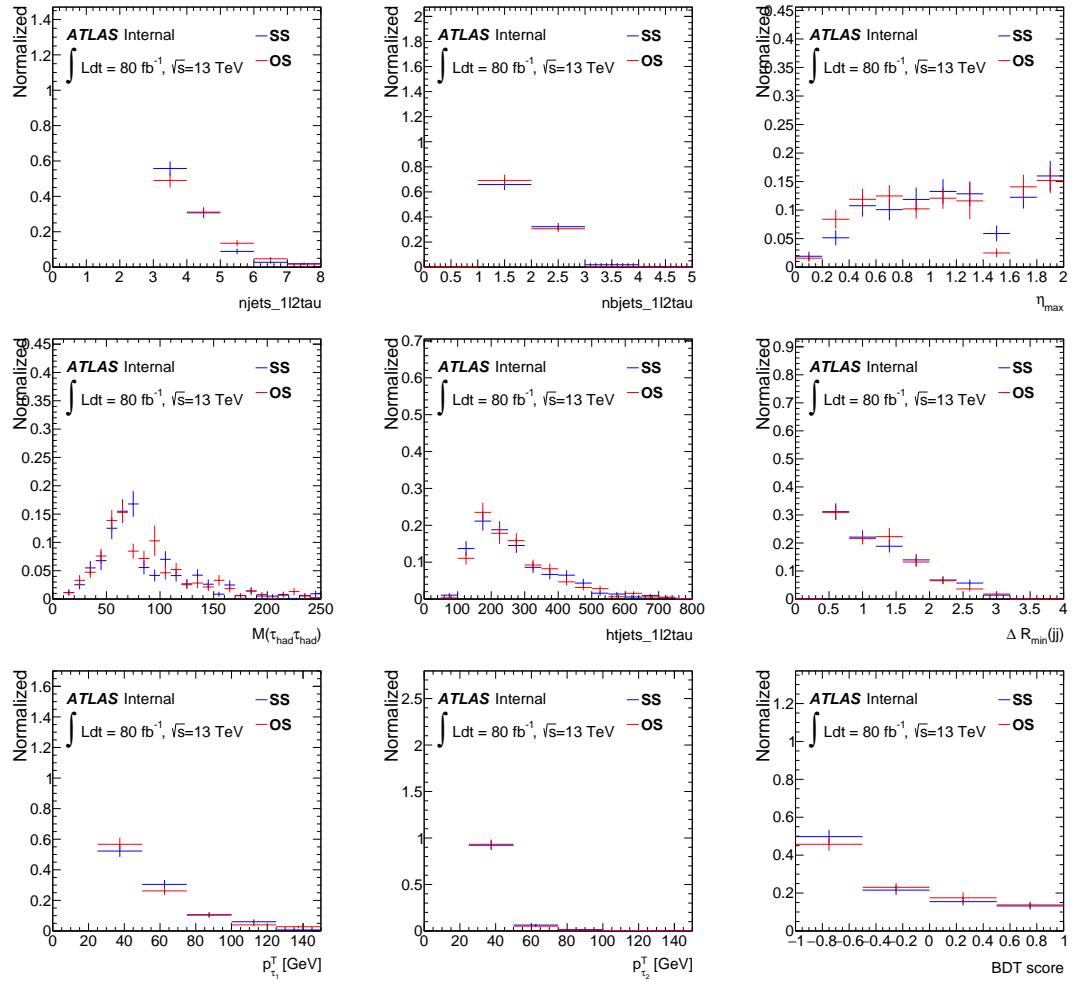


图 4.10 MC OS 与 SS 形状比较。

### 4.6.3 MVA 研究

多变量方法 (MVA) 可以进一步压低  $t\bar{t}$  本底，作为训练变量的 8 个运动学变量如下：

- Njets: 喷注数 (若大于 5 则设为 5);
- Nbjets: 标定为  $b$  的喷注数 (若大于 3 则设为 3);
- HTjets: 喷注  $p_T$  的标量和 (MeV);
- LeadPt: 高动量  $\tau_{had} p_T$  (GeV);
- SubPt: 低动量  $\tau_{had} p_T$  (GeV);
- Mtautau: 两  $\tau_{had}$  不变质量 (GeV);
- JJdr: 所选喷注的两两组合中的最小  $\Delta R$ ;
- Etamax: 两  $\tau_{had}$  中的较大  $|\eta|$ 。

这些变量的分布如图 4.11 所示，可以看到每个变量的区分度一般，并不足以支持应用一个简单的筛选条件，所以把这些变量输入 BDTG，希望能够充分开发其筛选潜能，提高信号显著性。在训练中，所选信号的两  $\tau_{had}$  均是真实的，而为了增加本底事例数， $t\bar{t}$  MC 包括 OS 和 SS，总共有 8258 个信号事例与 1268 个本底事例。值得指出的是，根据事例标签，信号 MC 分为奇事例与偶事例，通过奇（偶）事例得到的训练配置在实际使用中会应用到偶（奇）事例中，这样可以避免训练偏差。从图 4.12 看到，训练分布与测试分布是非常接近的，说明没有过度训练。表 4.4 给出输入变量的重要性排序，Etamax 具有最高的重要性。在图 4.12 还可以看到本底压低随信号效率变化的曲线。在实际应用中，可以直接进行一个简单的 BDT 筛选或者拟合 BDT 分布去提高信号显著性，但一般来讲，联合拟合多个信号区会给出更高的信号显著性。所以，根据 BDT 分为三个信号区域： $0.6 < \text{BDT} \leq 1.0$ ,  $0 < \text{BDT} \leq 0.6$  和  $\text{BDT} < 0.$ ，最后的统计分析会联合拟合这三个区域得到最终的信号强度。

值得注意的是，以上多变量训练使用的本底是  $t\bar{t}$  MC，而 BDT 将应用到章节 4.6.2 得到的 fake  $\tau_{had}$ ，即 SS data。所以图 4.13 比较 SS data 与  $t\bar{t}$  MC 的形状，输入变量以及 BDT 的分布是非常相似的，说明此应用是安全的。最后，表 4.5 总结了三个信号区的事例数以及预期信号强度。

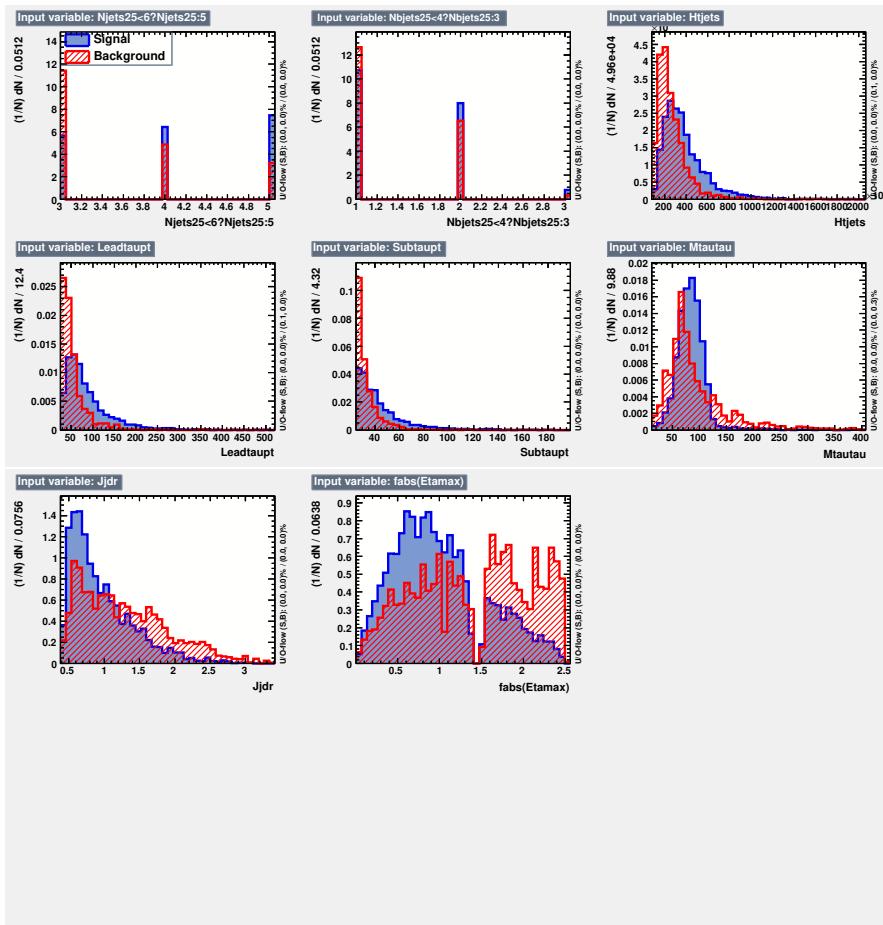


图 4.11 第一行: njet, nbjet, Htjets; 第二行: LeadPt, SubPt, Mttau; 第三行: Jjdr, Etamax.

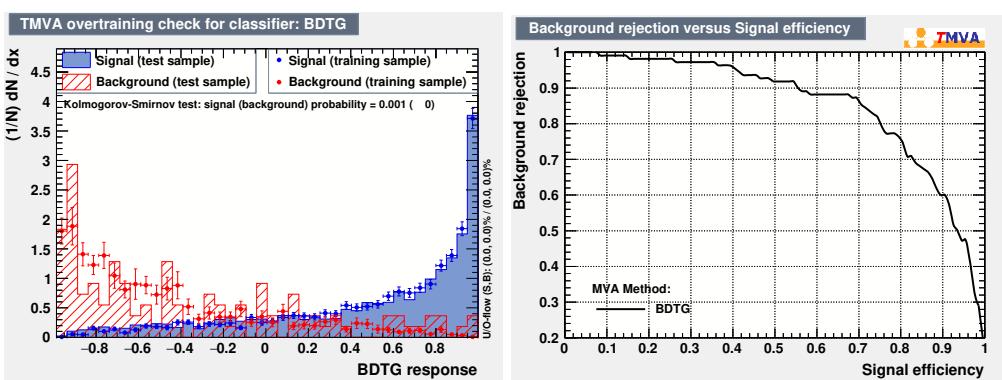
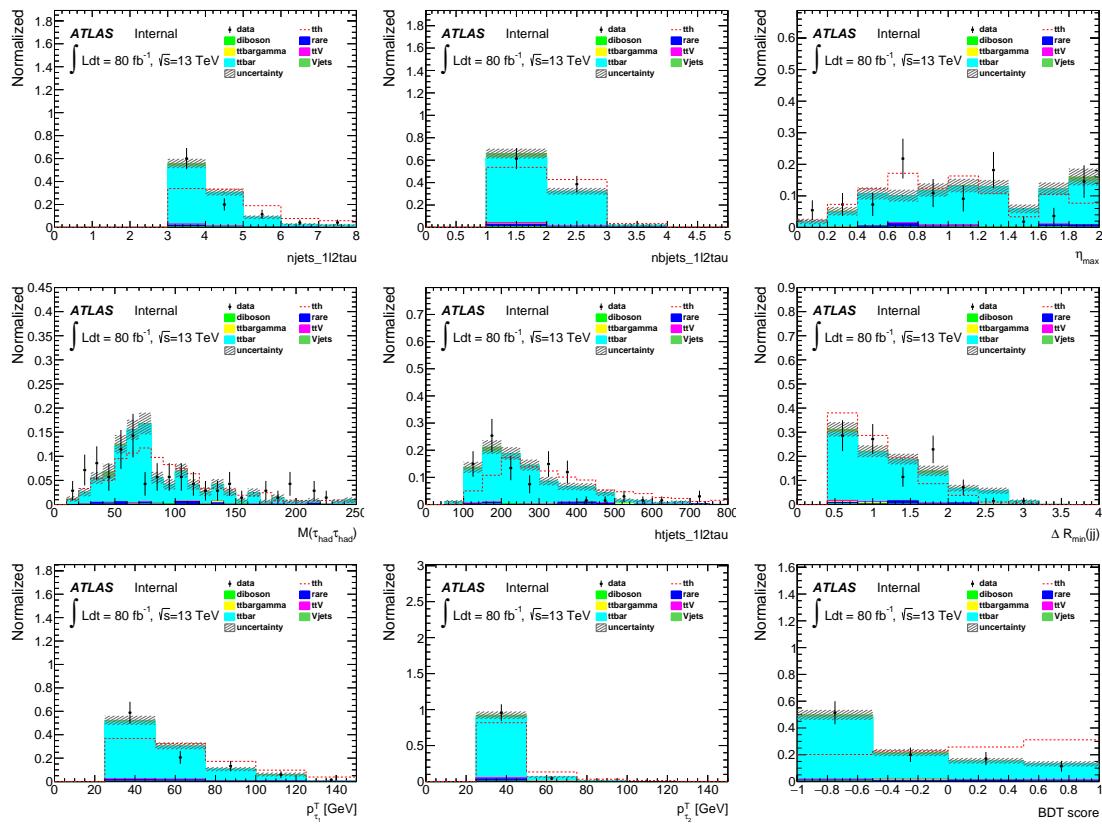


图 4.12 左图: BDTG 过度训练检查; 右图: BDTG 本底排除效率随信号效率分布。

Rank	Input variable	Importance
1	Etamax	0.18
2	Mtautau	0.15
3	Jjdr	0.14
4	Htjets	0.13
5	LeadPt	0.125
6	SubPt	0.12
7	Njets	0.089
8	Nbjets	0.068

表 4.4 训练变量重要性排名。

图 4.13 SS 数据与  $t\bar{t}$  MC 形状比较。

OS Sample	$BDT \leq 0.$	$0 < BDT \leq 0.6$	$0.6 < BDT \leq 1.0$	Total
ttH(truth)	$1.25 \pm 0.19$	$1.71 \pm 0.25$	$4.17 \pm 0.98$	$7.13 \pm 1.34$
ttV(truth)	$1.65 \pm 0.29$	$1.62 \pm 0.31$	$3.03 \pm 0.52$	$6.31 \pm 1.02$
Diboson(truth)	$0.70 \pm 0.39$	$0.48 \pm 0.26$	$0.72 \pm 0.39$	$1.90 \pm 1.01$
Rare(truth)	$0.09 \pm 0.05$	$0.09 \pm 0.05$	$0.19 \pm 0.10$	$0.36 \pm 0.19$
Fake(SS)	$50.0 \pm 13.1$	$15.0 \pm 5.1$	$5.0 \pm 2.5$	$70.0 \pm 17.5$
Total B	$52.4 \pm 13.1$	$17.2 \pm 5.1$	$8.9 \pm 2.6$	$78.6 \pm 17.6$
$z_0$	0.09	0.23	0.73	0.98

表 4.5 预期信号与本底数。

#### 4.6.4 系统误差

$1\ell+2\tau_{\text{had}}$  系统误差来源包括截面计算值, QCD scales, 产生子, PDF 以及探测器响应等等。所有系统误差可分为三类, 一类是只影响归一化, 比如截面计算值; 第二类只影响形状, 比如 fake  $\tau_{\text{had}}$  形状误差; 第三类是同时影响归一化和 BDT 形状, 比如产生子。信号和本底都考虑的系统误差有触发, 亮度, 粒子鉴别, MC 模拟; 所有的系统误差如图 4.15 所示。对于主要本底假  $\tau_{\text{had}}$ , 因为其是利用 SS 数据模拟, 也许跟 OS 假  $\tau_{\text{had}}$  的形状有偏差, 所以可以把 OS  $t\bar{t}$  与 SS  $t\bar{t}$  的相对差异作为假  $\tau_{\text{had}}$  形状误差, 在图 4.14 中, 可以看到在高 BDT 区, 其大小可达 15%; 图 4.14 还列出了产生子带来的形状误差。

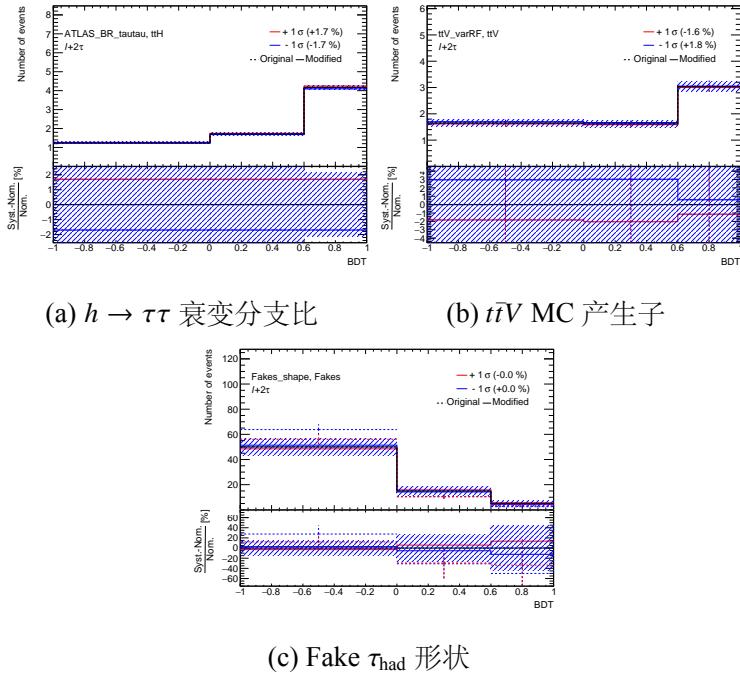


图 4.14 系统误差举例。

#### 4.7 统计模型

观测数据, 预期信号和本底以及系统误差必须通过合理的统计模型处理之后得到信号强度  $\mu_{tth} = \sigma/\sigma_{SM}$ 。对于 tthML 分析, 使用 TRexFitter[125] 软件包进行统计处理, 该软件包基于利用 RooFit/RooStat 开发的 HistFactory[126]。下面几小节简要建设本文涉及的统计模型, 详情可参见 [127]。

### 4.7.1 似然函数

考虑事例中的测量变量  $x$  (比如 BDT)，则  $N$  个事例会构建一个直方图  $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_N)$ ，对于每个 bin 有：

$$\begin{aligned} E[n_i] &= \lambda = \mu s_i + B_i = \mu s_i + \sum_{b \in \{bkg\}} b_i \\ s_i &= n_s \int f_s(x, \boldsymbol{\theta}_s) dx \\ b_i &= n_b \int f_b(x, \boldsymbol{\theta}_b) dx \end{aligned} \quad (4.2)$$

- $E[n_i]$  为期望值， $s_i$  与  $B_i$  分别为信号与本底均值，且  $B_i$  有多个本底成分。
- $\mu$  为信号强度， $\mu=0$  表示 background-only 假设， $\mu=1$  表示 S+B 假设。
- $n_s$  与  $n_b$  分别为信号与本底事例数，即归一化因子， $n_s$  为常数，由信号模型决定。
- $f_s$  与  $f_b$  分别为信号与本底概率分布函数 ( $pdf$ )，它们由参数  $\boldsymbol{\theta}$  决定。

$\mu$  在构建的模型中是一个自由参数，是我们感兴趣的参数 (Parameter of Interest, 简称 PoI)。而  $\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{\theta}_s, \boldsymbol{\theta}_b, n_b)$  为所谓的冗余参数 (nuisance parameters<sup>8</sup>)，它代表所有影响  $pdf$  形状或者归一化的不确定性。NP 也会被附属测量或理论预期限制，比如章节4.6.4所述的各种误差 ( $\boldsymbol{\theta}_0$ )。每个 NP 可以影响  $s_i$  和  $B_i$  中一项或者多项，也就是所谓的系统误差关联性处理 (correlation)。

每个 bin 的观测事例数一般假设为泊松分布，则有：

$$\begin{aligned} \text{Pois}(n, \lambda) &= \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} \\ \lambda &= \mu s(\boldsymbol{\theta}_0) + b(\boldsymbol{\theta}_0) \end{aligned} \quad (4.3)$$

相应地，每项 NP 有各自的概率分布函数，一般形状相关的 NP 可以有正的影响，也可以有负的影响，这种 NP 一般假设为高斯分布：

$$\text{Gaus}(\theta; \theta_0, \sigma_{\theta_0}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\theta_0}} \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma_{\theta_0}^2}\right) \quad (4.4)$$

$\theta_0$  为中心值 (一般假设为 0)， $\sigma_{\theta_0}$  为误差大小。

亮度，效率，截面等这类影响归一化的 NP 一般假设为对数正态分布，以避免不合理的对事例数的负面影响：

$$\begin{aligned} \text{LogN}(\theta; \theta_0, \kappa_0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ln(\kappa_0)} \frac{1}{\theta} \exp\left(-\frac{\ln^2(\theta/\theta_0)}{2\ln^2(\kappa_0)}\right) \\ \kappa_0 &= \exp(2\theta_0 + \sigma_{\theta_0}^2) [\exp(\sigma_{\theta_0}^2) - 1] \end{aligned} \quad (4.5)$$

<sup>8</sup>本文使用 PoI 代表感兴趣的参数，NP 代表冗余参数。

与 MC 大小和 data-driven 本底大小相关的 NP 假设服从伽玛分布：

$$\text{Gamma}(\gamma; \gamma_0) = \frac{1}{\Gamma(\gamma_0 + 1)} \gamma^{\gamma_0} e^{-\gamma} \quad (4.6)$$

那么似然函数则构造为这些函数的乘积：

$$\begin{aligned} L(n_{obs}, \boldsymbol{\theta}_0 | \mu, \boldsymbol{\theta}) &= L_{evt}(n_{obs} | \mu) \times L_{sub}(\boldsymbol{\theta}_0 | \boldsymbol{\theta}) = \\ &\prod_i^N \text{Pois}(n_i | \lambda_i(\boldsymbol{\theta})) \times \\ &\prod_{j \in \{\text{shape NPs}\}} \text{Gaus}(\theta_0 j, \sigma_{\theta_0 j} | \theta_j) \times \\ &\prod_{k \in \{\text{norm. NPs}\}} \text{LogN}(\theta_{0k}, \kappa_{0k} | \theta_k) \times \\ &\prod_l^N \text{Gamma}(\gamma_{0l} | \gamma_l) \end{aligned} \quad (4.7)$$

给定观测值  $n_{obs}$  和误差大小  $\boldsymbol{\theta}_0$ , 对似然函数取极大值则可得到  $\mu$  和  $\boldsymbol{\theta}$  的最大似然估计值 (MLE)  $\hat{\mu}$  和  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 。在实际操作中, 首先会对以上似然函数取对数, 以简化计算。

#### 4.7.2 假设检验量

假设检验量为似然函数比 (profile likelihood ratio):

$$q_\mu = -2\ln\Lambda(\mu) = \begin{cases} -2 \ln \frac{L(\mu, \hat{\boldsymbol{\theta}}(\mu))}{L(0, \hat{\boldsymbol{\theta}}(0))} & \text{if } \hat{\mu} < 0 \\ -2 \ln \frac{L(\mu, \hat{\boldsymbol{\theta}}(\mu))}{L(\hat{\mu}, \hat{\boldsymbol{\theta}})} & \text{if } \hat{\mu} \geq 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

其中  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  表示无条件拟合 (unconditional fit),  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  表示有条件拟合 (conditional fit, 即固定  $\mu$ )。 $q_\mu$  越大, 观测数据与具有信号强度  $\mu$  的假设越不吻合。

不吻合度的定量表述为:

$$p_\mu = \int_{q_{\mu, obs}}^{\infty} f(q_\mu | \mu) dq_\mu \quad (4.9)$$

$q_{\mu, obs}$  为假设检验量的观测值,  $f(q_\mu | \mu)$  为具有信号强度  $\mu$  的假设的概率分布函数。

当定量表述发现时, 比如  $t\bar{t}h$  信号, 需要检验的假设是 background-only, 即  $\mu=0$ , 那么式4.8变为:

$$q_0 = \begin{cases} -2\ln\Lambda(0) & \text{if } \hat{\mu} \geq 0 \\ 0 & \text{if } \hat{\mu} < 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

相应的  $p$  值为  $p_0 = \int_{q_{0,obs}}^{\infty} f(q_0|0) dq_0$ ,  $p$  值可以转换成显著性 (significance)  $Z$ :

$$Z = \Phi^{-1}(1 - p) \quad (4.11)$$

$\Phi^{-1}$  为标准高斯函数的反函数。在粒子物理实验中, 如果  $Z \geq 5$  时, 则代表发现 (discovery), 对应的  $p$  值为  $p \leq 2.87 \times 10^{-7}$ , 这就是著名的宣称发现新现象的  $5\sigma$ ; 如果  $Z \geq 3$ , 则宣称证据 (evidence)。

为了计算  $Z$ , 我们需要知道  $f(q_0|0)$  的实际分布。一般情况下, 可以产生大量伪实验 (pseudo-experiments), 这需要大量的计算资源。然而, 对于基于似然比和它的  $pdf$  的假设检验量, 它可以在渐近大样本极限下得到独立于 NP 的解析函数, 渐近有限性已被证明适用于  $O(10)$  的数据中。那么式4.8仅依赖于  $\hat{\mu}$  和它的方差, 方差可以使用所谓的 Asimov 数据估计。Asimov 数据是一种人造数据, 所有的观测值等于期望值, 统计涨落也被压低。 $q_0$  则变为:

$$q_0 = \begin{cases} \hat{\mu}^2 / \sigma^2 & \text{if } \hat{\mu} \geq 0 \\ 0 & \text{if } \hat{\mu} < 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

$\hat{\mu}$  服从均值为  $\mu'$ , 方差为  $\sigma^2$  的高斯分布。对于发现实验,  $\mu'=0$ , 可以推出:

$$Z_0 = \Phi^{-1}(1 - p_0) = \sqrt{q_0} \quad (4.13)$$

Asimov 数据可用来描述期望显著性, 即在特定  $\mu'$  信号假设下排除本底的中间  $p$  值 (median  $p$ -value), 在 tthML 分析中, 为了检验信号存在, 则  $\mu'=1$ .

除了发现实验, 往往还需要为新信号设置上限, 这种情况下, 式4.8则变为:

$$q_\mu = \begin{cases} -2\ln\Lambda(\mu) & \text{if } \hat{\mu} \leq \mu \\ 0 & \text{if } \hat{\mu} > \mu \end{cases} \quad (4.14)$$

在随后的  $hh$  搜索中通过此式为产生截面设置上限。

## 4.8 $tth$ 分析结果

### 4.8.1 $1\ell+2\tau_{had}$ 结果

首先忽略归一化或者形状影响低于 0.5% 的系统误差, 最终考虑的系统误差如图 4.15 所列。图 4.16 展示冗余参数拟合前和拟合后对信号强度的影响 ( $\theta_{fit} - \theta_0 / \Delta\theta$ ); 图 4.17 给出拟合前和拟合后 BDT 的分布。最终给出的期望信号强度为:

$$\mu_{tth} = 1.00^{+0.88}_{-0.75} (stat)^{+0.85}_{-0.69} (syst) = 1.00^{+1.22}_{-1.02} (total)$$

, 对应 0.98 个标准偏差。系统误差间的相关性和系统误差影响排序如图 4.18 所示, 最大的误差是假  $\tau_{had}$  的统计误差。

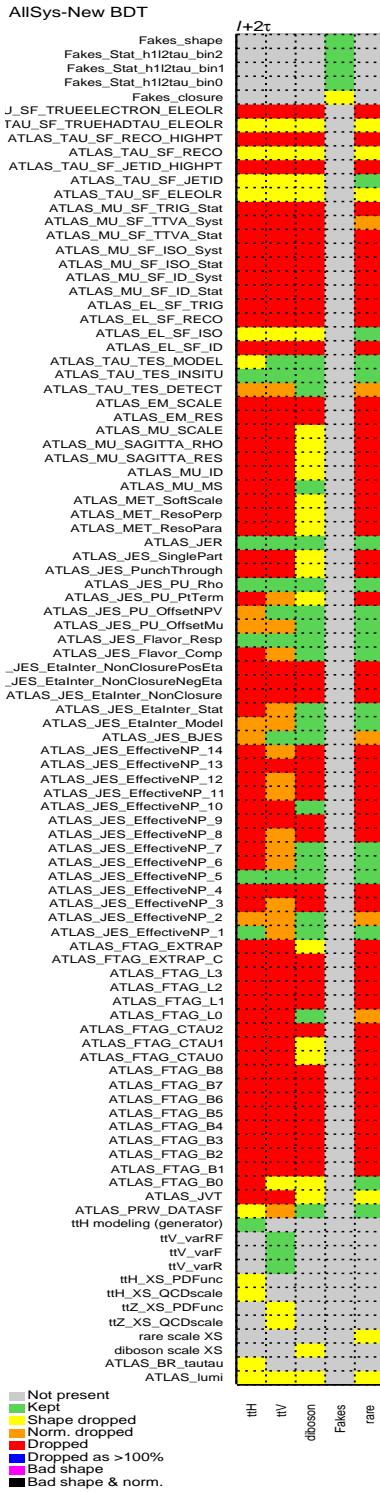
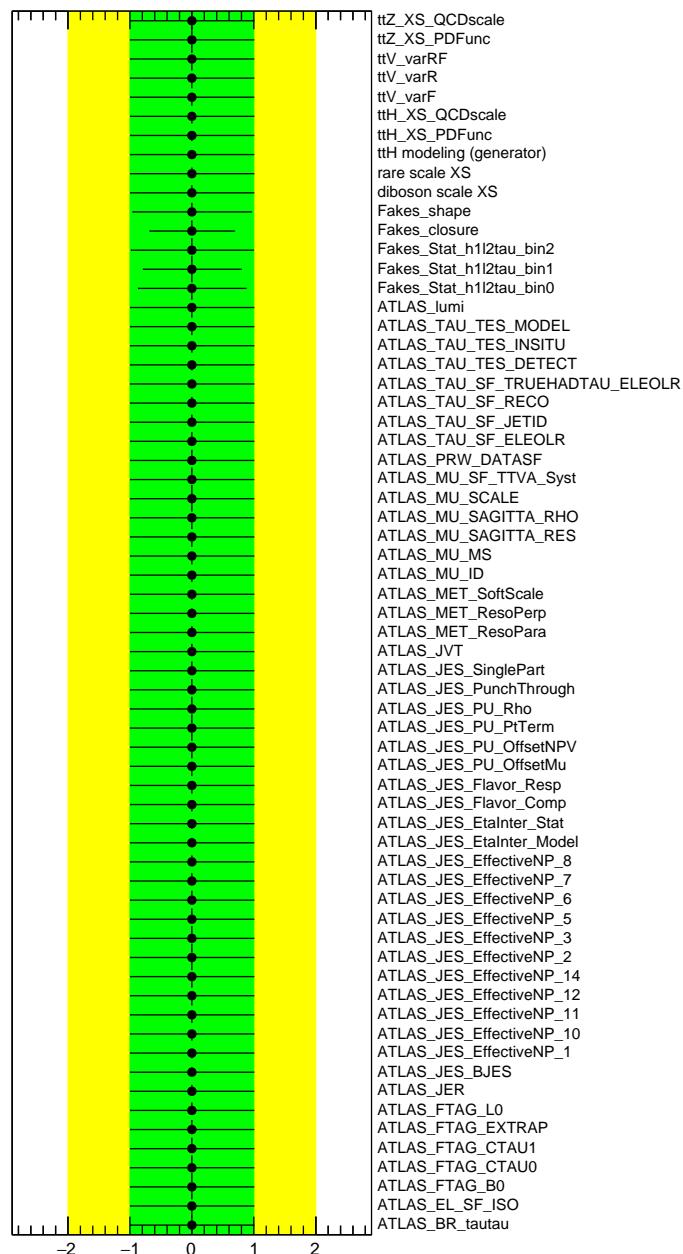


图 4.15  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  拟合中考虑的系统误差总结, 绿色表示存在 (同时影响形状和大小), 黄色表示只影响大小。

图 4.16  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  系统误差 pull。

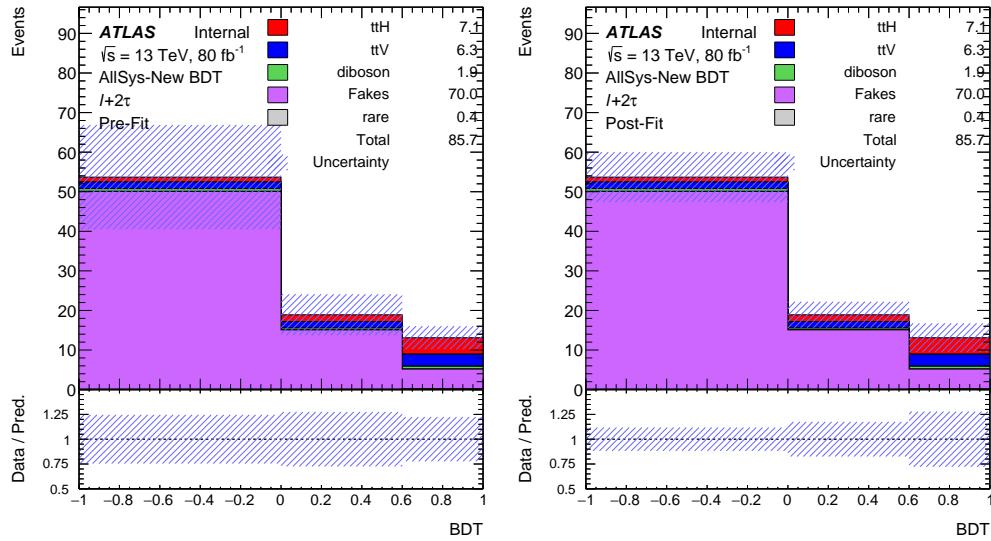


图 4.17 Asimov 数据 pre-fit 与 post-fit 结果。

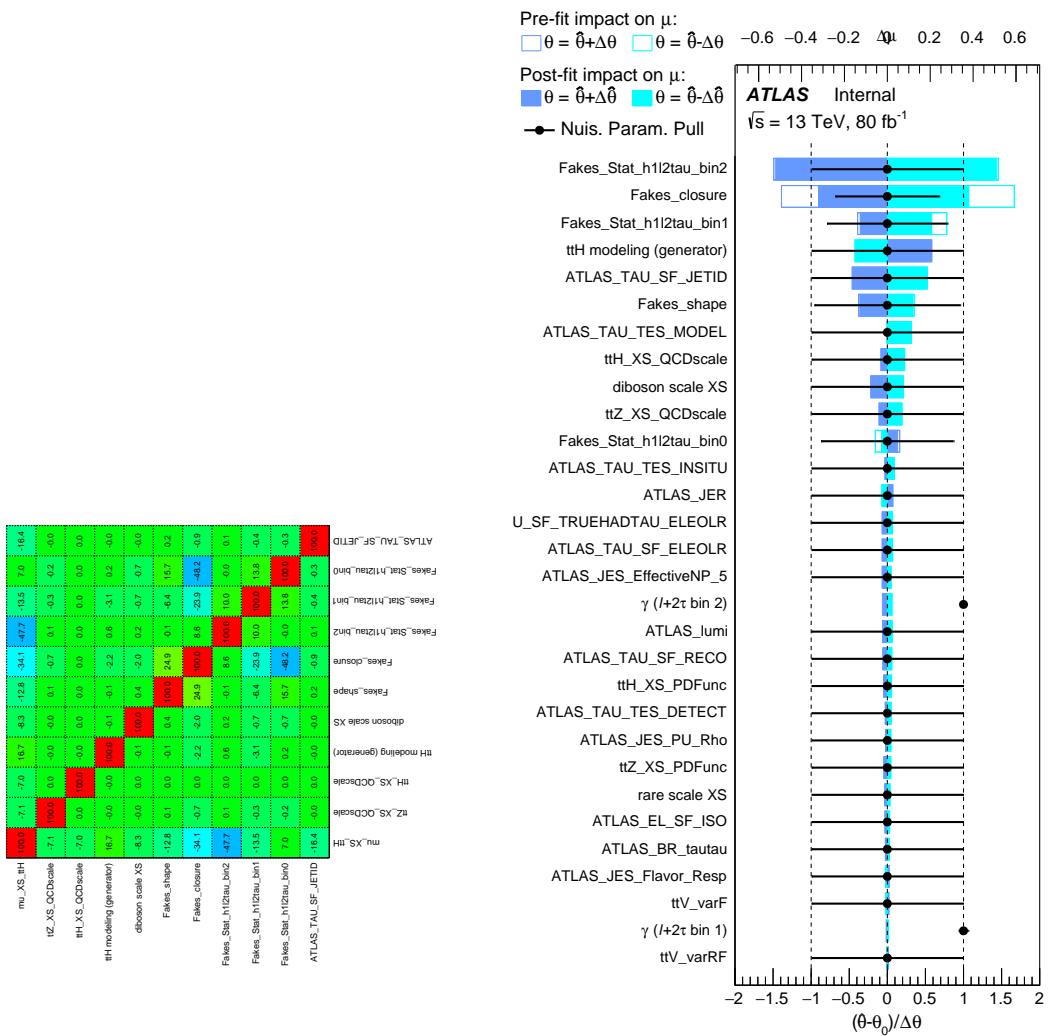


图 4.18 左图：系统误差之间的关联性；右图：系统误差影响排名。

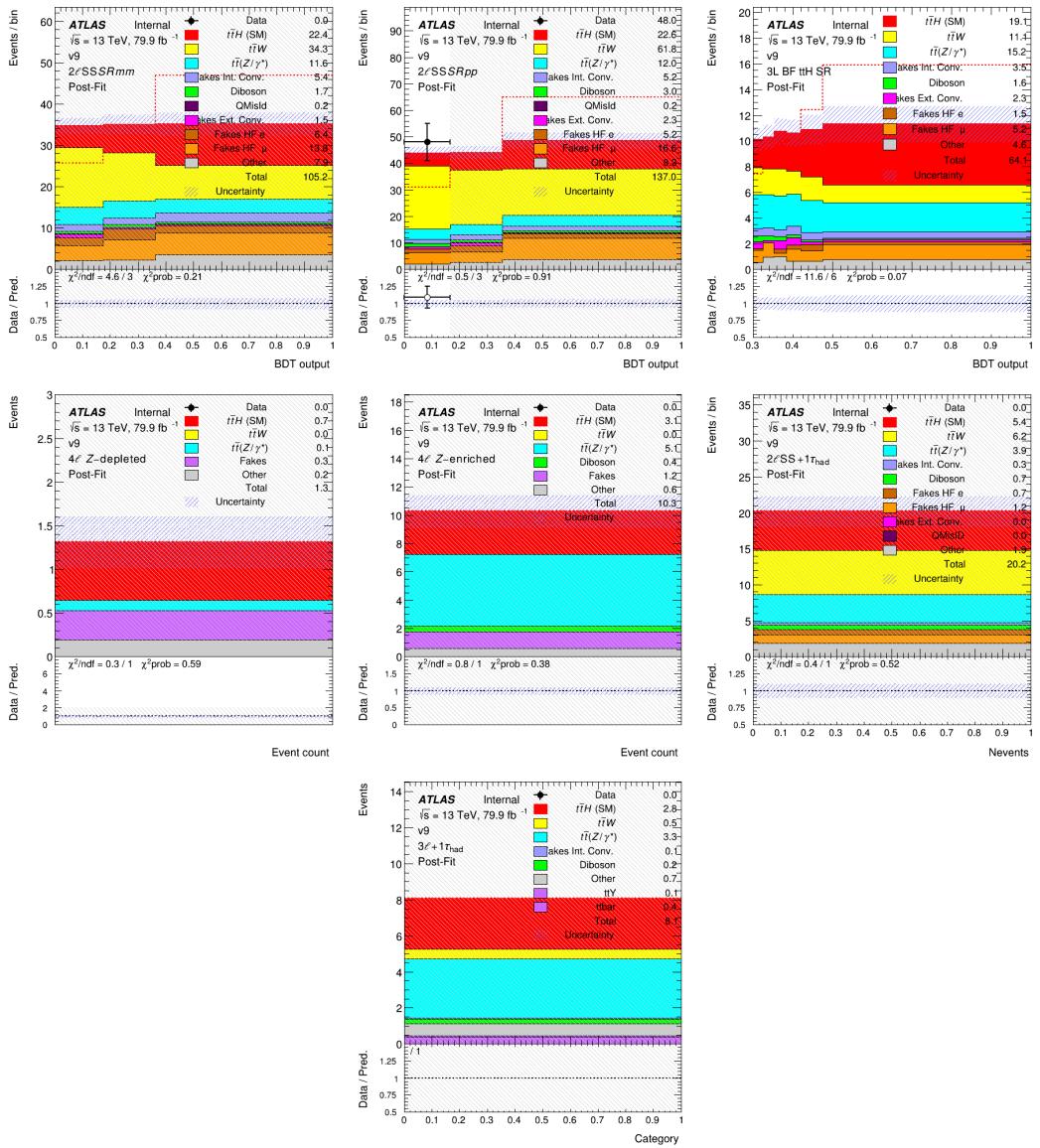
### 4.8.2 ttML 联合统计结果

与  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$  分析道一样, 其他分析道最终的信号强度也通过拟合构建的 MVA 变量得到。 $2\ell\text{SS}$  总共有 13 个区域, 包括  $t\bar{t}h$  信号区, 以及为各种本底专门设计的区域, 分为  $t\bar{t}W$ ,  $t\bar{t}$ , 来源于探测器材料反应的假轻子, 光子转换的假轻子。 $3\ell$  总共有 7 个区域, 包括信号区, 以及为各种本底专门设计的区域, 分为  $t\bar{t}W$ ,  $t\bar{t}$ ,  $t\bar{t}Z$ ,  $VV$ , 来源于探测器材料反应的假轻子和光子转换的假轻子。 $2\ell\text{SS}$  与  $3\ell$  均使用所谓的 template fit 方法去估计本底, 即通过拟合得到以上本底的归一化因子。 $4\ell$  根据  $Z$  本底的大小分为两个区域。 $2\ell\text{SS} + 1\tau_{\text{had}}$  和  $3\ell + 1\tau_{\text{had}}$  均只有一个信号区。最终拟合中各个分析道所使用的控制区域和信号区域总结在表4.6。

Channel	Selection criteria
Common	$N_{\text{jets}} \geq 2$ and $N_{b-\text{jets}} \geq 1$
$2\ell\text{SS}$	<p>Two same-charge T* leptons, <math>p_{\text{T}} &gt; 20</math> GeV            Zero <math>\tau_{\text{had}}</math>  <b>13 categories:</b> enriched with <math>t\bar{t}h</math>, <math>t\bar{t}W</math>, <math>t\bar{t}</math>, mat. conv, int. conv.,            split by lepton flavor, charge, jet and b-jet multiplicity</p>
$3\ell$	<p>Three L light leptons with <math>p_{\text{T}} &gt; 10</math> GeV; sum of light lepton charges <math>\pm 1</math>            Two same-charge T* leptons, <math>p_{\text{T}} &gt; 15</math> GeV            Opposite-charge L* lepton, <math>p_{\text{T}} &gt; 10</math> GeV            Zero <math>\tau_{\text{had}}</math>  <math>m(\ell^+\ell^-) &gt; 12</math> GeV and <math> m(\ell^+\ell^-) - 91.2</math> GeV  <math>&gt; 10</math> GeV for all SFOC pairs  <math> m(3\ell) - 91.2</math> GeV  <math>&gt; 10</math> GeV  <b>7 categories:</b> enriched with <math>t\bar{t}h</math>, <math>t\bar{t}W</math>, <math>t\bar{t}Z</math>, diboson, <math>t\bar{t}</math>, mat. conv, int. conv</p>
$4\ell$	<p>Four L* leptons; sum of light lepton charges 0  <math>m(\ell^+\ell^-) &gt; 12</math> GeV and <math> m(\ell^+\ell^-) - 91.2</math> GeV  <math>&gt; 10</math> GeV for all SFOC pairs  <math>m(4\ell) &lt; 115</math> GeV and <math>m(4\ell) &gt; 130</math> GeV  <b>2 categories:</b> Z-depleted (0 SFOC pairs) and Z-enriched (2 or 4 SFOC pairs)</p>
$1\ell+2\tau_{\text{had}}$	<p>One T lepton, <math>p_{\text{T}} &gt; 27</math> GeV            Two OC <math>\tau_{\text{had}}</math>            At least one tight <math>\tau_{\text{had}}</math>  <math>N_{\text{jets}} \geq 3</math></p>
$2\ell\text{SS} + 1\tau_{\text{had}}$	2 $\ell\text{SS}$ selection, except: One $\tau_{\text{had}}$
$3\ell + 1\tau_{\text{had}}$	<p><math>3\ell</math> selection, except:            One <math>\tau_{\text{had}}</math>, of opposite charge to the total charge of the light leptons            Two T same-charge leptons. <math>p_{\text{T}} &gt; 10</math> GeV</p>

表 4.6 ttML 各个分析道拟合所涉及到的信号区域控制区。L 指代通过基本筛选条件, 加‘\*’表示额外的孤立化条件, SFOC 指代相同味道, 相反电荷轻子对。

图4.19展示各个分析道利用 Asimov 数据拟合之后的信号与本底分布。表4.7给出各个分析道的期望信号强度与联合统计结果，并且分别给出了含  $\tau_{had}$  与不含  $\tau_{had}$  的联合统计结果，在  $80 \text{ fb}^{-1}$  积分亮度下仅通过多轻子道可期望达到  $3\sigma$ ，其中  $2\ell\text{SS}$  与  $3\ell$  贡献最大。相应的信号强度为  $0.99^{+0.37}_{-0.31}$ ，如图4.20左侧所示，并且给出了各种假本底的归一化因子拟合值，图右侧为 NP 对应拟合结果的排序，最大的系统误差为  $t\bar{t}h$  的 scale 理论误差，其次是  $t\bar{t}W$  截面，喷注能量刻度， $t\bar{t}Z$  的 scale 理论误差及 pileup， $\gamma(\ell + 2\tau)$  为  $1\ell+2\tau_{had}$  的 fakes 统计误差，因为其直接使用 SS data 估计，误差大小由数据量决定。



Channels.	Expected significance [ $\sigma$ ]: stat.+syst. (stat.)
$2\ell$ SS	2.16 (2.56)
$3\ell$	2.59 (2.89)
$4\ell$	1.23 (1.27)
Combined Non-Tau	3.14 (3.70)
$1\ell+2\tau_{\text{had}}$	0.96 (1.07)
$3\ell + 1\tau_{\text{had}}$	1.09 (1.13)
$2\ell$ SS + $1\tau_{\text{had}}$	1.22 (1.36)
Combined Tau	1.82 (2.07)
Combined	3.39 (4.12)

表 4.7 tthML 各个分析道的期望信号显著性与联合统计结果。

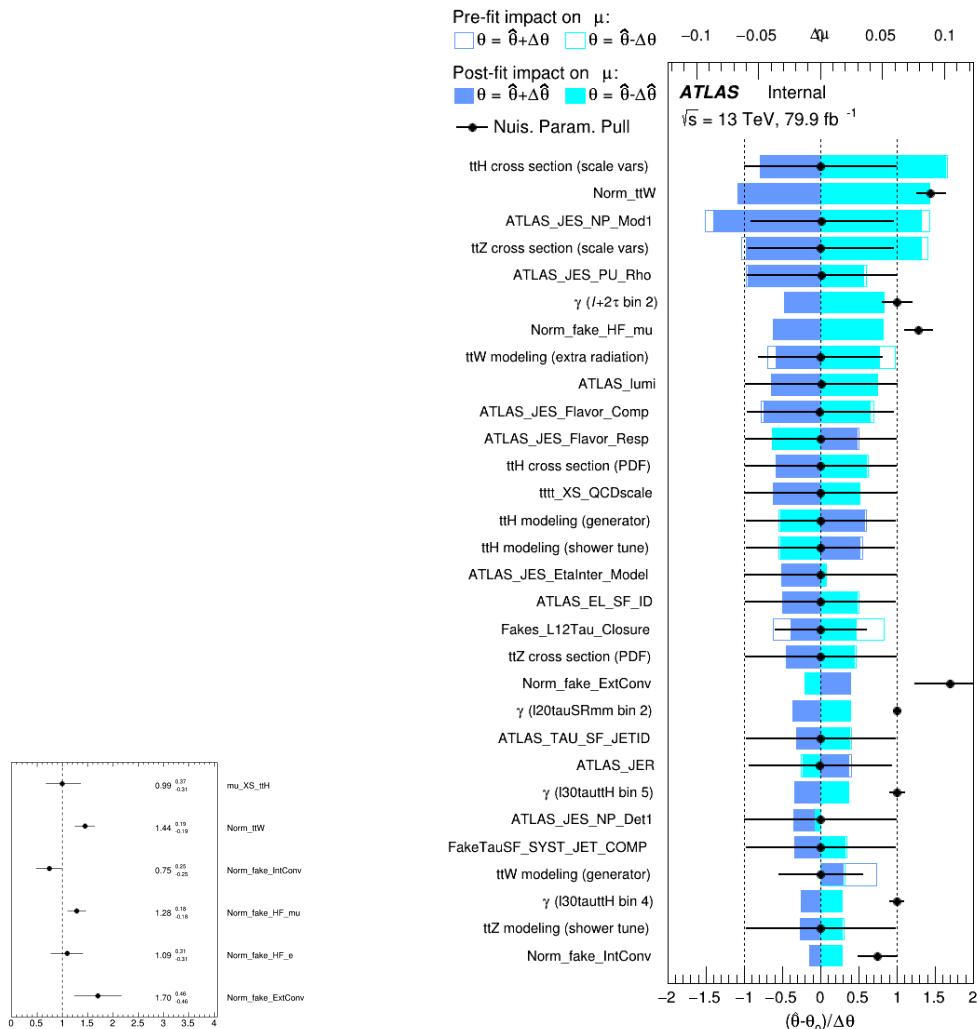


图 4.20 左: 信号强度与各本底归一化 Asimov 拟合值; 右: NP 排序。



## 第 5 章 希格斯粒子对寻找

### 5.1 希格斯对衰变

希格斯粒子的寿命只有  $1.56 \times 10^{-22}$  s, 在对撞顶点即衰变, 表5.1总结了  $hh$  的主要衰变道的分支比。在 Run 1, ATLAS 研究过  $b\bar{b}b\bar{b}$ [128],  $b\bar{b}\gamma\gamma$  [129],  $b\bar{b}\tau^+\tau^-$  和  $WW^*\gamma\gamma$ , 均没有观测到数据与预期的明显偏差。对于非共振态模式, 其截面上限为 0.69 pb, 对应  $\kappa < 70$ 。共振态模式的联合拟合截面上限总结在图5.2。

BR	$b\bar{b}$	$WW^*$	$\tau\tau$	$ZZ$	$\gamma\gamma$
$b\bar{b}$	33%				
$WW^*$	25%	4.6%			
$\tau\tau$	7.4%	2.5%	0.4%		
$ZZ$	3.1%	1.2%	0.3%	0.08%	
$\gamma\gamma$	0.26%	0.1%	0.029%	0.013%	0.005%

图 5.1  $hh$  主要衰变道分支比, 计算时假设  $m_h=125$  GeV。

Run 2 ATLAS 和 CMS 均继续希格斯对的寻找, 以下对一些衰变道及其最新结果作出简要概述:

- $b\bar{b}b\bar{b}$ : 它具有最大的衰变分支比, 是  $hh$  搜寻的主要分析道, 能够重建 Higgs 以及  $X$  的质量, 但是其分辨率受限于  $b$  喷注重建及鉴别。在低  $m_X$  区, 因为  $b$  喷注触发效率太低, 其显著性较低; 但是在高  $m_X$  区, 两个  $b$  喷注倾向合并, 可以重建两个 large- $R$   $b$  喷注, 而且得益于提高的  $b$  喷注触发效率, 其显著性得到提高。目前 ATLAS 给出的 SM  $hh$  最新截面上限为 13 倍 SM 预期 [130](95% 置信度, 以下相同), CMS 对共振态模式进行了寻找 [131]。

- $b\bar{b}W^+W^-$ : 具有第二大分支比, 但是  $t\bar{t}$  本底限制了显著性。SM  $hh$  寻找的 ATLAS 最新结果为 300 倍 SM 预期 [132], 而 CMS 最新结果为 79 倍 SM 预期

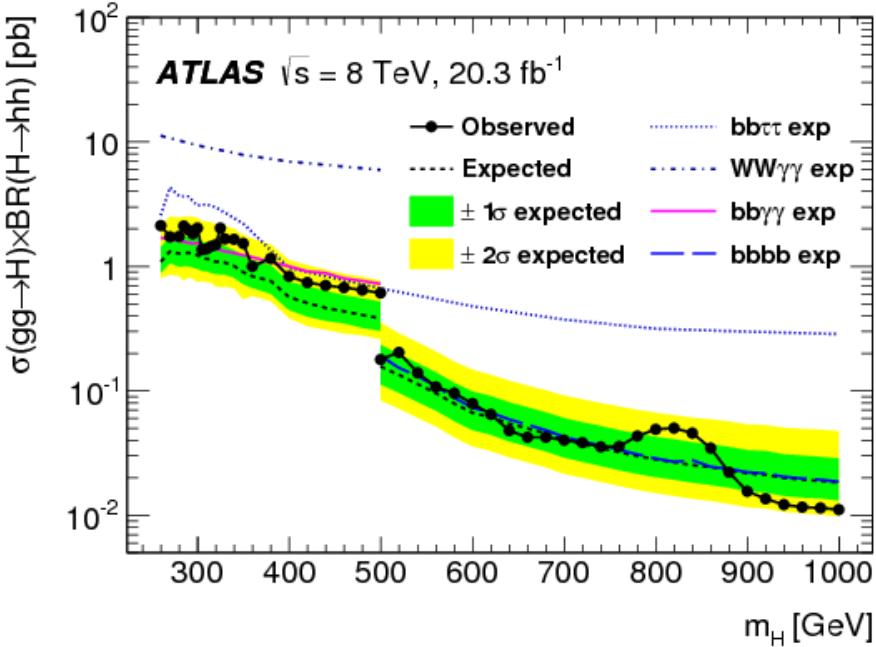


图 5.2 在 8 TeV 质心系能量时  $\sigma(gg \rightarrow H) \times BR(H \rightarrow hh)$  的 95% 置信度下的观测上限值与期望上限值, 结果联合拟合了  $b\bar{b}\tau\tau$ ,  $WW^*\gamma\gamma$ ,  $b\bar{b}\gamma\gamma$  以及  $b\bar{b}b\bar{b}$  分析道。绿色和黄色区分别表示期望上限值的  $\pm 1\sigma$  和  $\pm 2\sigma$ , 500 GeV 以上的提升得益于  $b\bar{b}b\bar{b}$  的加入。

[133]。

- $b\bar{b}\gamma\gamma$ : 虽然截面不大, 但是受益于较干净的双光子本底以及很好的光子分辨, 在低  $m_X$  区有显著优势, 但在高质量区, 双光子的合并对光子鉴别造成影响, 使得显著性下降。SM  $hh$  寻找的 ATLAS 最新结果为 22 倍 SM 预期 [134], CMS 则为 24 倍预期 [135]。
- $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ : 该道与  $b\bar{b}b\bar{b}$  和  $b\bar{b}\gamma\gamma$  具有相当的显著性, 尤其是在低  $m_X$  区, 其主要挑战是赝  $\tau$  的本底处理。SM  $hh$  寻找的 ATLAS 最新结果为 12.7 倍 SM 预期 [136], CMS 则为 30 倍预期 [137]。
- $WW^*\gamma\gamma$ : 该道与上述衰变道相比具有较差的显著性, 但是得益于双光子以及轻子化衰变的  $W$  玻色子, 本底较少, 是  $hh$  搜寻的重要补充。ATLAS 实验给出的 SM  $hh$  最新结果为 162 倍 SM 预期 [138]。
- $WW^*WW^*$ : 本章  $hh$  分析的研究题目, 关于此道已有唯象研究 [139], 但在 ATLAS 是首次寻找。它具有较大衰变分支比, 以轻子末态为信号特征可极大压低 QCD 本底。
- $WW^*\tau\tau, \tau\tau\gamma\gamma, \tau\tau\tau\tau, b\bar{b}ZZ, WWZZ$ : 这些衰变道的分支比都很小, 均不能或者部分重建 Higgs, 还未公开发表过结果。但是随着 ATLAS 累积更多的数据,

使用单举策略<sup>1</sup>，即以它们的衰变物进行分类，如轻子数，不明显关注  $hh$  衰变中间态，而后进行优化，最后联合拟合得出结果，也许可以为  $hh$  搜寻作出重要贡献。

本章论述通过  $WW^*WW^*$  衰变道寻找  $hh$ (以及  $SS$ ) 产生模式，在此分析道，目前已开展三个末态分析，包括相同电荷双轻子(2LSS)，三轻子(3L)和四轻子(4L)，本章将给出 2LSS 衰变道分析的研究过程及结果，并联合三个末态给出统计结果。

## 5.2 数据和蒙特卡罗样本

### 5.2.1 数据

本分析利用 2015 年和 2016 年 ATLAS 探测器收集的质心系能量为 13 TeV 的数据，排除掉受损或者探测器未完全运作时的数据，其积分亮度为  $36.1 \text{ fb}^{-1}$ 。其中，2015 年和 2016 年的数据收集情况如图3.3所示。

### 5.2.2 信号样本

信号样本包含两种模型，分别为希格斯粒子对 ( $pp \rightarrow (X) \rightarrow hh$ ) 和类希格斯粒子对 ( $gg \rightarrow X \rightarrow SS$ )[56]。

1. SM 信号（非共振态模式）目前只考虑胶子融合过程，即  $gg \rightarrow hh$ ，利用包含 NLO 修正的双希格斯粒子模型 [2]，在 MadGraph5\_aMC@NLO [140, 141] 中产生。

2. 共振态模式 ( $gg \rightarrow X \rightarrow hh$ ) 利用包含 NLO 修正的 2HDMCP\_EFT 的信号模型 [142]，在 MadGraph5\_aMC@NLO 中产生。其中重标量粒子  $X$ ，即共振态粒子，被假设具有远小于实验精度的衰变宽度；在实际模拟中，其宽度设为 10 MeV，并考虑四个质量点，分别为 260 GeV, 300 GeV, 400 GeV 和 500 GeV。此过程产生截面假设为 1 pb。

两个希格斯粒子均要求衰变到  $W$  玻色子对，随后，其中两个  $W^+(W^-)$  衰变到轻子(包括  $\tau$ )，而另两个  $W^-(W^+)$  则到强子对。这一系列衰变通过 Herwig++[143] 实现，也包括随后的部分子簇射和强子化过程，其衰变分支比为  $BR(hh \rightarrow 4W \rightarrow \ell^\pm \nu \ell^\pm qqqq) = 4.4 \times 10^{-3}$ 。两种模式的信号样本的产生情况总结如表 5.1 所示。

$gg \rightarrow X \rightarrow SS$  利用 Pythia 8 [18] 在 LO 阶产生，PDF 为 A14NNPDF2.3LO，模型为 HiggsBSM:gg2A3， $X$  和  $S$  均假设具有远小于实验分辨率的宽度，为各自质

<sup>1</sup> $WW^*\gamma\gamma$  和  $WW^*WW^*$  也纳入其中

DSID	lepton charge	$m_X$ [GeV]	Num. Events	Simulation
344133	++	Non-res	500000	AFII
344134	--	Non-res	500000	AFII
343704	++	260	100000	AFII
343712	--	260	100000	AFII
343706	++	300	100000	AFII
343714	--	300	100000	AFII
343709	++	400	100000	AFII
343717	--	400	100000	AFII
343711	++	500	100000	AFII
343719	--	500	100000	AFII

表 5.1  $hh$  MC 产生情况，每个质量点的 MC 包含 ++ ( $\ell^+\ell^+$ ) 和 -- ( $\ell^-\ell^-$ )，在 ATLAS 产生环境中每个 MC 样本对应唯一的 DSID，AFII 表示探测器反应使用快速仿真 [22]。

量的 1%。与  $gg \rightarrow (X) \rightarrow hh$  类似， $S$  被要求衰变到两个  $W$  玻色子，其中两个  $W^+(W^-)$  被要求衰变到轻子（包括  $\tau$ ），而另两个  $W^-(W^+)$  则到强子对。随后的部分子簇射与强子化过程也由 Pythia 8 实现。 $m_X$  和  $m_S$  选择使得 4W 末态能够最显著。同样的， $gg \rightarrow X \rightarrow SS$  截面假设为 1 pb，而  $BR(S \rightarrow WW)$  则依赖于  $m_S$ ，即希格斯粒子在不同质量点的衰变分支比 [144]。表 5.2 总结了此信号样本产生情况。

### 5.2.3 背景样本

多玻色子 (VV/VVV) 和  $V\gamma$  样本通过 Sherpa 2.1 [119] 在 NLO 阶产生； $V + jets$  则通过 Sherpa 2.2 在 NLO 阶产生，此两种过程均采用 CT10 PDF。 $VH$  利用 Pythia 8 在 LO 阶产生，采用 NNPDF2.3LO PDF。 $t\bar{t}$  通过 Powheg-Box 2.0 [145] 在 NLO 阶产生，而后传递到 Pythia 8 进行部分子簇射和强子化模拟，采用 PDF 为 NNPDF2.3LO。单顶夸克过程 ( $t + X$ ) 同样通过 Powheg-Box 2.0 在 NLO 阶产生，但传递到 Pythia 6.4 [17] 进行后续模拟，采用 PDF 则为 CT10。 $t\bar{t}V$  样本则在 NLO 阶通过 MadGraph5\_aMC@NLO +Pythia 8 产生，采用 PDF 为 NNPDF2.3LO。 $t\bar{t}h$  样本通过 MadGraph5\_aMC@NLO +Herwig++ 产生，PDF 为 NNPDF3.0 [146]。更多关于这些背景过程的产生及模拟过程可参考文献 [147–149]。

Charge	$m_X$	$m_S$	BR(two SS leptons)	DSID	$N_{\text{events}}$
++	280 GeV	135 GeV	$1.47 \times 10^{-2}$	344927	25000
	300 GeV	135 GeV	$1.535 \times 10^{-2}$	344928	25000
	320 GeV	135 GeV	$1.535 \times 10^{-2}$	344930	25000
	340 GeV	135 GeV	$1.535 \times 10^{-2}$	344933	25000
	340 GeV	145 GeV	$3.454 \times 10^{-2}$	344934	25000
	340 GeV	155 GeV	$6.049 \times 10^{-2}$	344935	24000
	340 GeV	165 GeV	$8.842 \times 10^{-2}$	344936	25000
--	280 GeV	135 GeV	$1.47 \times 10^{-2}$	344937	25000
	300 GeV	135 GeV	$1.535 \times 10^{-2}$	344938	25000
	320 GeV	135 GeV	$1.535 \times 10^{-2}$	344940	25000
	340 GeV	135 GeV	$1.535 \times 10^{-2}$	344943	25000
	340 GeV	145 GeV	$3.454 \times 10^{-2}$	344944	24000
	340 GeV	155 GeV	$6.049 \times 10^{-2}$	344945	25000
	340 GeV	165 GeV	$8.842 \times 10^{-2}$	344946	25000

表 5.2  $X \rightarrow SS$  MC 产生总结, 每个质量包含  $++(\ell^+\ell^+)$  与  $--(\ell^-\ell^-)$ , 分支比  $BR$  对应  $pp \rightarrow X \rightarrow SS \rightarrow \ell^\pm\ell^\pm qqqq$ 。

### 5.3 事例筛选

#### 5.3.1 粒子定义与重叠移除

与前文4.4类似，首先须进行粒子定义和重叠移除。4W 分析的粒子定义总结在表5.3。通过 Baseline 筛选的粒子会用于控制区域或者本底估计的研究，而通过 Tight 筛选的粒子才会作为信号区的输入。随后的重叠移除总结在表5.4。

粒子		选择条件	
		Baseline	Tight
电子	$E_T > 10 \text{ GeV}$		TightLH ID
	$ \eta  < 2.47$ , 排除 $1.37 <  \eta  < 1.52$ 区间		FixedCutTight
	LooseLH ID, Loose isolation $ z_0 \sin \theta  < 0.5 \text{ mm}$ , $d_0/\sigma(d_0) < 5$		$(E_T^{\text{cone}20}/p_T < 0.06, p_T^{\text{varcone}20}/p_T < 0.06)$
$\mu$	$p_T > 10 \text{ GeV}$		Tight ID
	$ \eta  < 2.5$		FixedCutTightTrackOnly
	Loose ID, Loose isolation $ z_0 \sin \theta  < 0.5 \text{ mm}$ , $d_0/\sigma(d_0) < 3$		$(p_T^{\text{varcone}20}/p_T < 0.06)$
Jet	$p_T > 25 \text{ GeV}$ , $ \eta  < 2.5$ $ \text{JVT}  < 0.59$ if $p_T < 60 \text{ GeV}$ and $ \eta  < 2.4$		
$E_T^{\text{miss}}$		$E_T^{\text{miss,TRK}}$	

表 5.3 4W 物理分析粒子筛选条件总结

Keep	Remove	Cone size ( $\Delta R$ )
muon	electron	0.1
electron	electron(lower $p_T$ )	0.1
electron	jet	0.3
jet	muon	$\min(0.4, 0.04 + 10[\text{GeV}]/p_T(\mu))$

表 5.4 4W 分析重叠移除总结, 移除顺序从上到下。

### 5.3.2 初步筛选

完成粒子筛选和重叠移除之后，所选事例应当通过如下初步筛选条件：

- **GRL (Good Run List)**, ATLAS 定义的物理分析可以使用的数据：

2015 年数据: `data15_13TeV.periodAllYear_DetStatus-v79-repro20-02_DQDefects-00-02-02_PHYS_StandardGRL_All_Good_25ns.xml`

2016 年数据: `data16_13TeV.periodAllYear_DetStatus-v88-pro20-21_DQDefects-00-02-04_PHYS_StandardGRL_All_Good_25ns.xml`

- **事例清洁 (Event cleaning criteria)**: 去除量能器信息不全的事例。
- **初始顶点**: 事例至少有一个包含两条径迹的初始顶点。
- **触发判选**

2015 年数据:

- 单轻子触发: `HLT_mu20_iloose_L1MU15 || HLT_mu50 || HLT_e24_lhmedium_L1EM20VH || HLT_e60_lhmedium || HLT_e120_iloose`
- 双轻子触发: `HLT_2e12_iloose_L12EM10VH || HLT_e17_iloose_mu14 || HLT_mu18_mu8noL1`

2016 年数据:

- 单轻子触发: `HLT_mu24_ivarmedium || HLT_mu50 || HLT_e24_lhtight_nod0_ivarloose || HLT_e60_lhmedium_nod0 || HLT_e140_iloose_nod0`
- 双轻子触发: `HLT_2e17_lhvloose_nod0 || HLT_e17_iloose_nod0_mu14 || HLT_mu22_mu8noL1`

需要指出的是，与数据一样，MC 样本也应当满足以上触发条件，其相应的触发效率修正已添加到每个样本事例中。

- 选择通过章节 5.3.1 所述的粒子。
- **轻子数**
- 两个相同电荷的轻子，可有效压低  $Z/\gamma^*$  和 QCD 本底。
- 每个 `tight` 电子应当满足 `ChargeIDBDTTight > 0.067`，此变量用于压低电荷误判电子。
- 至少有一个轻子应当能匹配以上任一或多个 trigger，除此之外，领头轻子  $p_T$  应大于 30 GeV，次领头轻子大于 20 GeV。
- 排除掉任何含有 *b-jet* 的事例。
- $E_T^{\text{miss,TRK}} > 10 \text{ GeV}$ 。
- 因为 Drell-Yan 过程目前并不能被 MC 很好模拟，所以为了避免此问题，双

	GRL
	Event clean criteria
	Pass any trigger applied
	Select objects following object definitions
	Overlap removal
Pre-selections	<p>Two tight same-signed leptons, with at least one trigger matched</p> $p_T(\ell_1) > 30 \text{ GeV}, p_T(\ell_2) > 20 \text{ GeV}$ $b$ veto
	$E_T^{miss} > 10 \text{ GeV}$ $M(\ell\ell) > 15 \text{ GeV}$ $ M(\ell\ell) - M(Z)  > 10 \text{ GeV}$ in $ee$ channel
	$N_{jet} \geq 2(3)$

表 5.5 4W 事例初步筛选条件。

轻子不变质量应大于 15 GeV。

- 为了压低来自于  $Z+jets$  过程的本底(电荷误判), 需满足  $|M(\ell\ell)-M(Z)| > 10 \text{ GeV}$  条件。
- 喷注数的要求依赖于质量点的选择, 低(高)质量点要求至少 2(3) 个喷注。此项会在 5.3.3.1 深入讨论。

以上的事例筛选过程总结在表 5.5。最后, 通过以上筛选条件的事例根据轻子味道分为三个分析道, 为  $ee$ ,  $\mu\mu$  和  $e\mu$ 。表 5.6 展示了标准模型希格斯粒子对信号经过以上一系列条件时的事例数和效率变化, 此处对应亮度为  $36.1 \text{ fb}^{-1}$ , 截面 ( $gg \rightarrow hh$ ) 为  $33.4 \text{ fb}$ 。图 5.3 (图 5.4) 展示所有  $hh$  ( $SS$ ) 信号样本经过初步筛选之后的效率, 随着  $m_X$  或者  $m_S$  的增加, 效率相应增加 (对于  $SS$ , 在  $m_X = 340 \text{ GeV}, m_S = 135 \text{ GeV}$  质量点的效率下降是因为从此点开始要求至少三个喷注);  $e\mu$  道具有最大的效率值,  $\mu\mu$  次之,  $ee$  最低, 这是因为理论上  $e\mu$  的分支比是其他两个道的两倍, 以及  $\mu$  比  $e$  具有更好的鉴别效率。

### 5.3.3 喷注数分类

#### 5.3.3.1 $hh$ 喷注数分类

本分析中的显著信号是两个相同电荷的轻子。两个希格斯粒子倾向于出射到两个相反的半球, 随后, 两个希格斯粒子均衰变到  $W$  玻色子, 总共四个  $W$  玻色子中有两个是不在壳的, 而不在壳的  $W$  玻色子会贡献相当部分的低动量的喷注 ( $p_T < 25 \text{ GeV}$ )。在图 5.5a 到 5.5e 中可以看到 (此图未通过初步筛选条件), 很

Cut flow	Event yield			Efficiency		
Evgen	-			100%		
HIGG8D1	2.76			56.34%		
Event cleaning	2.76			56.34%		
Trigger	2.10			44.84%		
Channel	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$
OB, OLR	0.29	0.28	0.56	5.86%	6.23%	11.96%
Tight leptons, trigger match	0.14	0.20	0.33	2.33%	3.46%	5.68%
$p_T(\ell)$	0.11	0.15	0.24	1.93%	2.70%	4.53%
b veto	0.10	0.14	0.23	1.79%	2.49%	4.18%
MET	0.10	0.14	0.22	1.76%	2.45%	4.10%
Drell-Yan cut	0.10	0.14	0.22	1.76%	2.44%	4.10%
Z veto	0.08	0.14	0.22	1.58%	2.44%	4.10%
$N_{jet} \geq 3$	$0.05 \pm 0.002$	$0.09 \pm 0.002$	$0.14 \pm 0.003$	1.03%	1.92%	2.99%

表 5.6 SM  $hh$  信号 MC 的初步筛选效率。结果归一到  $\sigma_{\ell^\pm\ell^\pm} \times \mathcal{L}$ , 最后一行误差项为统计误差。

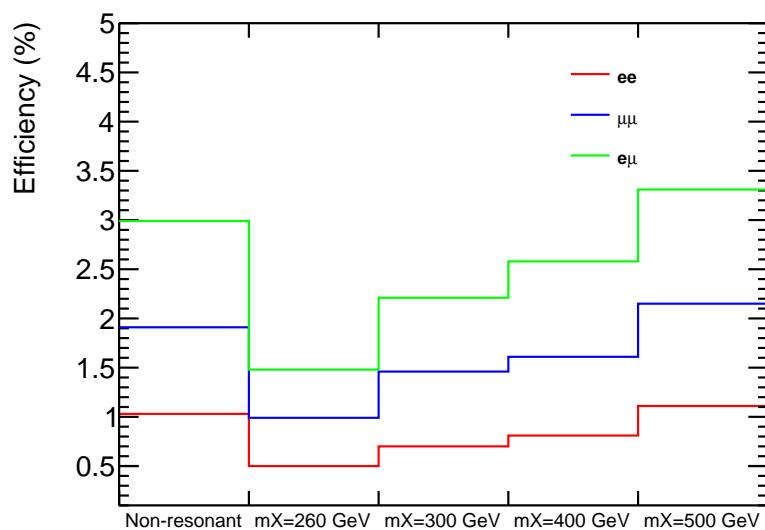


图 5.3  $hh$  MC 的初步筛选效率。

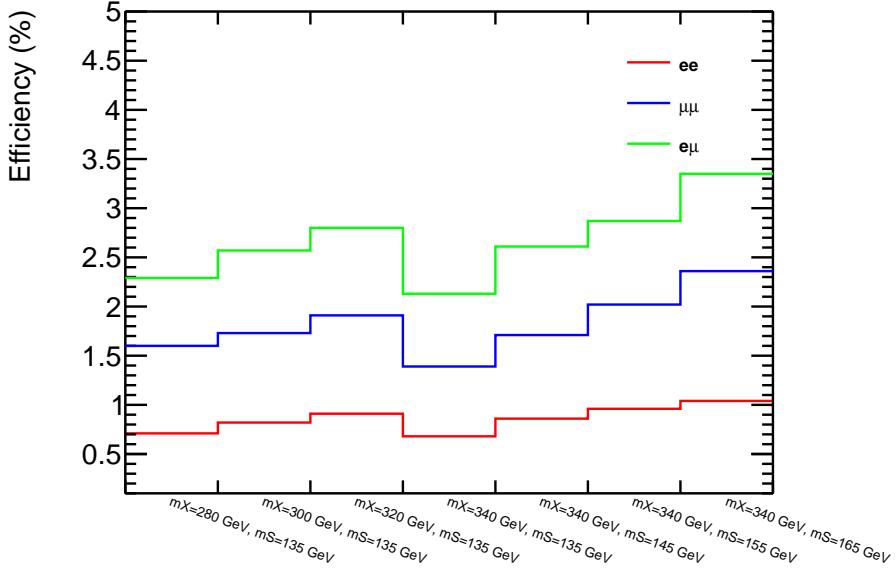


图 5.4 SS MC 的初步筛选效率。

大一部分的第四条喷注  $p_T$  是低于 25 GeV 的，甚至发生在高质量信号点。加上基本的筛选条件之后，大部分信号事例只有三条喷注，如图 5.5f 所示。对于低质量点，即  $m_X=260 \text{ GeV}$  和  $m_X=300 \text{ GeV}$ ，其大部分事例最多只有 2 条喷注。所以，对于不同的质量点，应当应用不同的喷注数条件，对于低质量点，要求  $N_{\text{jet}} \geq 2$ ，而对于高质量点，要求  $N_{\text{jet}} \geq 3$ 。最后，一系列运动学变量被重建以用于信号优化（以及本底估计验证），具体优化方法会在章节 5.5 讨论。以下列出一些能够较好区分信号与本底的变量：

- $M(\ell\ell)$ , 双轻子的不变质量;
- $M(jj)^W$ , 两个距离最近喷注的不变质量;
- $M(l_1jj)$ , 领头轻子与两个距离最近喷注的不变质量;
- $M(all)$ , 所有粒子的不变质量;
- $M_T$ , 所有粒子的横向质量;
- $\Delta R_{min}(\ell_1, j)$ , 领头轻子与最近喷注的角距离;
- $\Delta R_{min}(\ell_2, j)$ , 次领头轻子与最近喷注的角距离。

### 5.3.3.2 SS 喷注数分类

$S$  标量粒子所取质量从 135 GeV 到 165 GeV,  $X$  粒子从 280 GeV 到 340 GeV。 $SS$  与  $hh$  具有类似的动力学性质，为了尽可能增加信号显著性， $N_{\text{jet}}$  分类适用于此，具体如下：

- 固定  $m_S = 135 \text{ GeV}$ :  $m_X = 280 \text{ GeV}, m_X = 300 \text{ GeV}$  and  $m_X = 320 \text{ GeV}$ ;

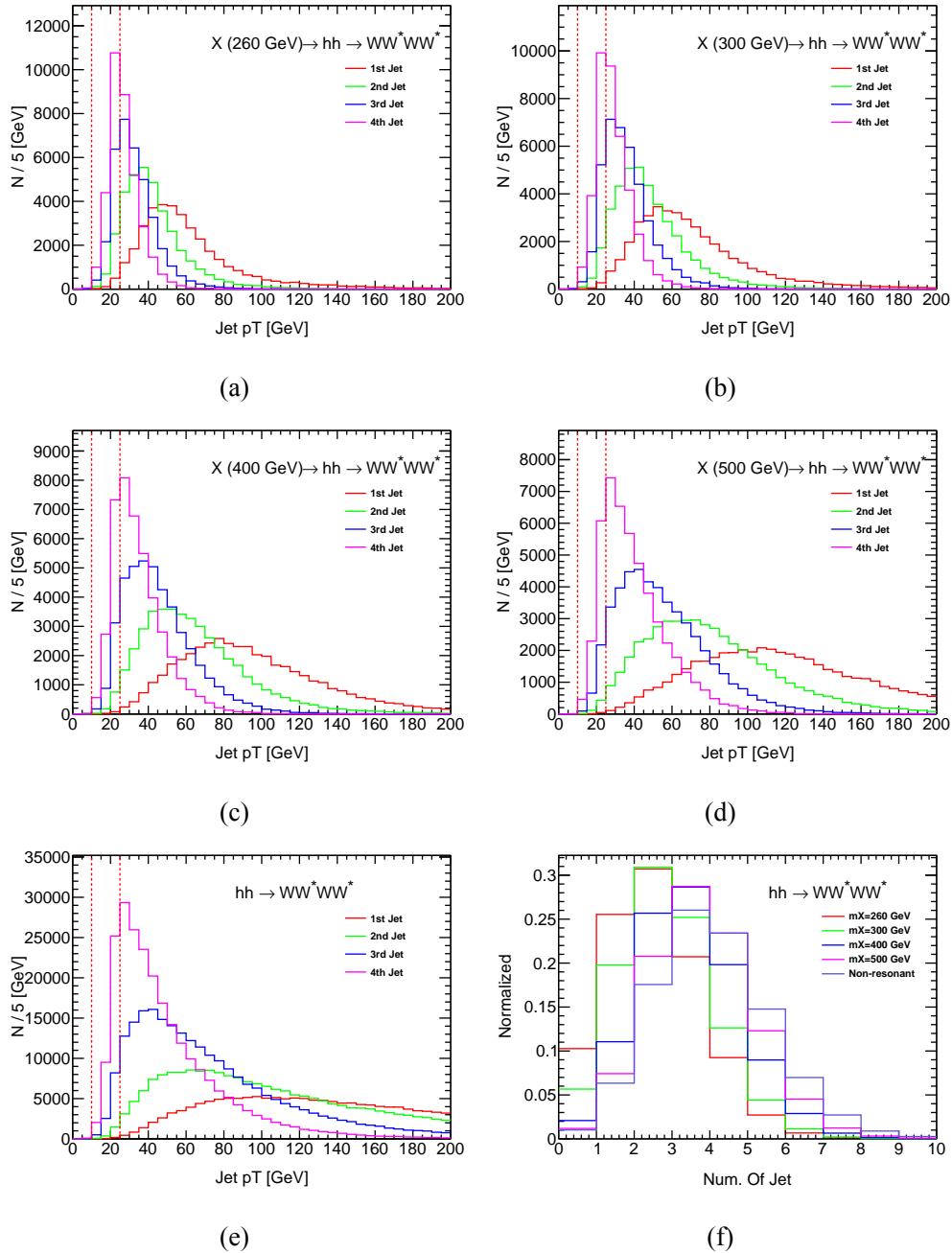


图 5.5  $hh$  信号的喷注  $p_T$  分布和喷注数分布。图5.5a到5.5e是不同质量点的喷注未加  $p_T > 25\text{ GeV}$  条件之前的  $p_T$  分布，红色虚线分别对应  $p_T = 10\text{ GeV}$  和  $p_T = 25\text{ GeV}$ 。图5.5f是喷注加上  $p_T > 25\text{ GeV}$  条件之后的喷注数分布。

$N_{\text{jet}} \geq 2$ 。

- 固定  $m_X = 340$  GeV:  $m_S = 135$  GeV,  $m_S = 145$  GeV,  $m_S = 155$  GeV and  $m_S = 165$  GeV;  $N_{\text{jet}} \geq 3$ 。

前述章节 5.3.3.1 的动力学变量也可用于信号优化。

## 5.4 本底估计

4W 物理分析背景分为可以贡献两个相同电荷轻子的过程 (promptSS), 电荷误鉴别 (QmisID) 和“假”轻子过程 (fakes)。promptSS 主要来自  $t\bar{t}V, VV, tV$  以及  $t\bar{t}h$  过程, 该背景可用 MC 估计。QmisID 一般来自于  $Z + jets$  和  $t\bar{t}$  (轻子衰变过程)。fakes 来自于  $W + jets, t\bar{t}$  (半轻子衰变) 过程, 其中一个喷注被误判成轻子或者一个轻子来源于  $b$ -jet (non-prompt)。目前 ATLAS MC 不能很好地描述 QmisID 和 fakes, 如图 5.6 所示, 如果所有背景均用 MC 模拟, 数据跟预期有非常大的偏差。所以, 这表明使用 data-driven 方法去估计 QmisID 和 fakes 是有必要的。在以下章节中, 将分别讲述 QmisID 和 fakes 的估计方法。

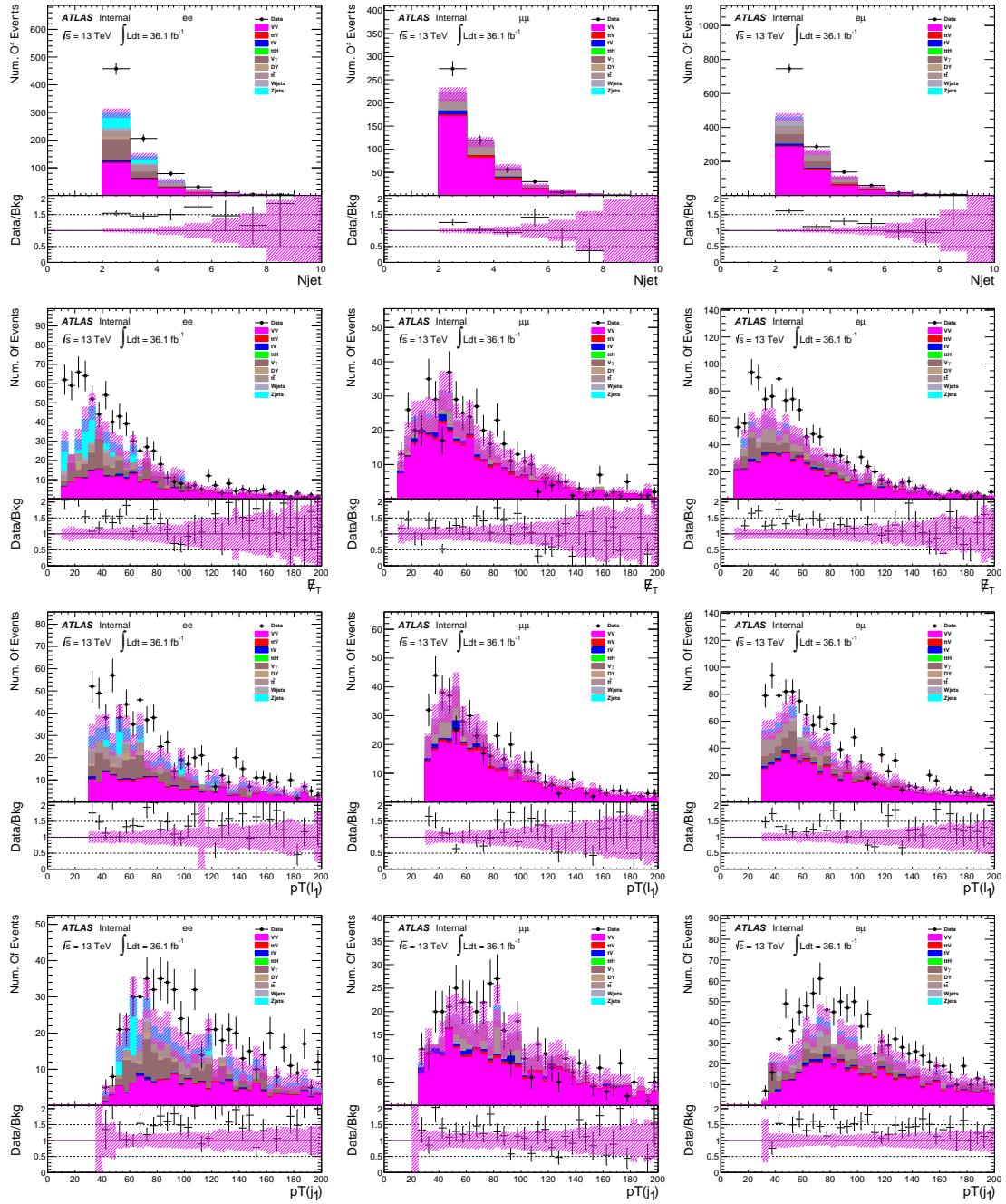


图 5.6 经过事例初始筛选之后数据与预期背景比较，预期背景全部使用 MC 估计，并且归一到  $\sigma \times \mathcal{L}$ ，图上部的粉色斜纹代表背景统计误差。

### 5.4.1 QmisID 估计

相同电荷双轻子和相同味道双轻子的  $Z$  veto 选择条件，会极大地压低  $t\bar{t}$  和  $Z + jets$  背景，但对于电子电荷误判，即使较低的误判率，但考虑到这两种过程的极大截面，仍有相当一部分的 QmisID 会贡献到最终背景中。根据 8 TeV 的研究 [150]， $\mu$  电荷误判率非常低（一般低于  $10^{-5}$ )<sup>2</sup> 所以只考虑电子电荷误判背景。电子电荷误判有两种原因：

- 当电子穿过探测器材料时，出射一个光子（韧致辐射）；而后这个光子转换成一对正负电子，然而在随后的径迹重建中，带相反电荷的电子被重建，从而导致电荷误判。韧致辐射依赖于探测器材料密度，而探测器材料密度随着  $|\eta|$  变化，所以电子的电荷误判率也依赖于  $|\eta|$ 。
- 因为测量精度有限，当电子径迹的曲率很小或者内部探测器径迹与量能器的簇射匹配错误时，得到完全相反曲率的径迹，从而导致电荷误判。当电子具有高横动量时这个效应比较明显，误判率也依赖于  $p_T$ 。这种贡献相对来讲比较小。

#### 5.4.1.1 似然函数方法

一般假设电子电荷误判率不依赖于产生模式，因为  $Z$  玻色子产生截面大，而且其不变质量峰重建比较好，所以  $Z$  过程可以用来测量电子电荷误判率，采用似然函数技术 [151]，构建的似然函数如下：

$$\ln L(\varepsilon | N_{SS}, N) = \sum_{i,j} \ln[N^{ij}(\varepsilon_i + \varepsilon_j - 2\varepsilon_i\varepsilon_j)]N_{SS}^{ij} - N^{ij}(\varepsilon_i + \varepsilon_j - 2\varepsilon_i\varepsilon_j) \quad (5.1)$$

其中， $\varepsilon_i$  和  $\varepsilon_j$  分别为落在  $\eta - p_T$  二维区间中第  $i$  个小区间和第  $j$  个小区间的电子电荷误判率， $N_{SS}$  和  $N$  是观察到的相同电荷事例数和总事例数。 $\eta - p_T$  区域总共分为 28 个小区域，其  $|\eta|$  和  $p_T$  的分界线分别为  $[0., 0.60, 1.1, 1.37, 1.52, 1.70, 2.00, 2.47]$  和  $[10, 60, 90, 130, 1000]$  GeV。随后，为了得到电子电荷误判率，需按照以下过程进行：

1. 按照  $Z$  玻色子过程筛选双轻子数据，其中轻子质量要求应与章节5.3.1所述一致。
2. 在所选数据中通过高斯函数拟合  $Z$  不变质量谱，得到  $Z$  不变质量拟合值  $\kappa$  和标准偏差  $\sigma$ 。而后分为表5.7所示的三个区间。
3. 为了进一步提高  $Z$  玻色子纯度，剩余本底会被减去，即  $N_Z = n_B - \frac{n_A + n_C}{2}$ 。

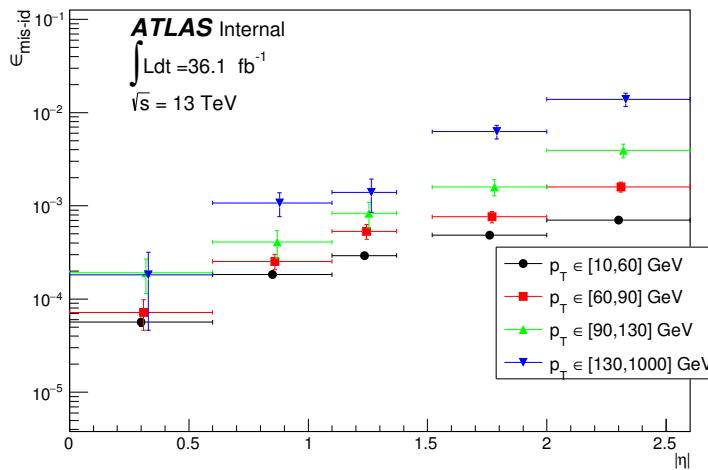
<sup>2</sup> $\mu$  子的径迹重建会联合使用内部探测器和  $\mu$  子谱仪使得其曲率误判概率极小。

A	B	C
$(\kappa - 8\sigma, \kappa - 4\sigma)$	$(\kappa \pm 2\sigma)$	$(\kappa + 4\sigma, \kappa + 8\sigma)$

表 5.7  $Z$  玻色子不变质量区间定义。

4. 所选数据根据电荷分为 SS 和 OS，利用最大似然函数法得到各个  $|\eta| - p_T$  区间的误判率。

图 5.7 展示电子电荷误判率随着  $|\eta|$  增加而增大，因为在高  $|\eta|$  粒子会穿过更多探测器材料；误判率也随着  $p_T$  增大而增大，这与前面的讨论一致。最后，利用公式 5.2 计算出  $ee$  和  $e\mu$  道经过初步筛选后，在  $N_{jet} \geq 2$  时 ( $N_{jet} \geq 3$ ) 的误判事例数分别为  $101.47 \pm 0.60$  ( $35.60 \pm 0.38$ ) 和  $18.21 \pm 0.23$  ( $8.38 \pm 0.16$ )。

图 5.7 似然函数方法给出的数据中电子电荷误判率随  $(|\eta|, p_T)$  分布。

$$N_{ee}^{QmisID} = \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_j - 2\varepsilon_i\varepsilon_j}{1 - \varepsilon_i - \varepsilon_j + 2\varepsilon_i\varepsilon_j} N^{OS}, N_{e\mu}^{QmisID} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} N^{OS} \quad (5.2)$$

#### 5.4.1.2 系统误差

在 QmisID 估计中，考虑了三种系统误差：

1. 每个  $|\eta| - p_T$  小区域中的统计误差；
2. 为了证实似然函数方法的可靠性，可以利用  $Z$  MC 进行以上的误判率估计，因为在 MC 中，电子误判率是已知的，从而比较似然函数估计值与真实值就可判断该方法的可信程度 (closure test)。图 5.8 比较了真实值与似然函数估计值，总体上是一致的。该项差距将作为 QmisID 的系统误差之一。

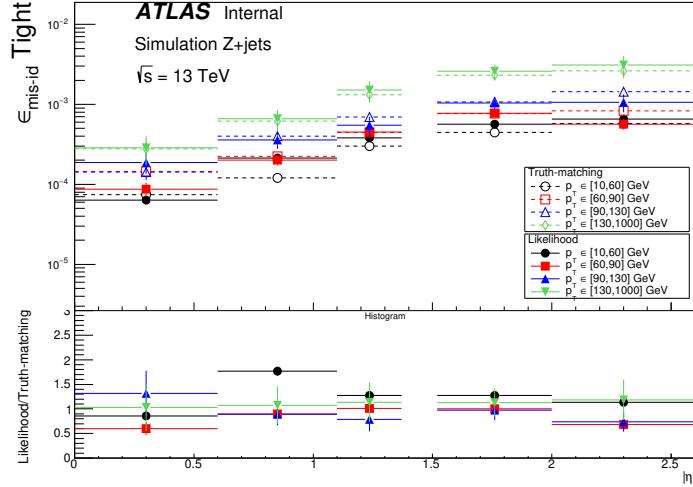


图 5.8 似然函数方法（实线）和 truth-matching（虚线，通过 MC 记录检查电子的真实电荷得到）给出的  $Z + jets$  MC 中电子电荷误判率。

3.  $Z$  峰区间的变动会影响 QmisID 的估计。偏移  $Z$  峰  $1\sigma$ ，QmisID 率的相对变化作为系统误差。

图 5.9 总结了几种系统误差在不同  $|\eta| - p_T$  区间的相对大小，随着  $p_T$  的增加统计误差越来越大，因为大部分电子是低动量的，其次是似然函数误差在低动量区更显著。

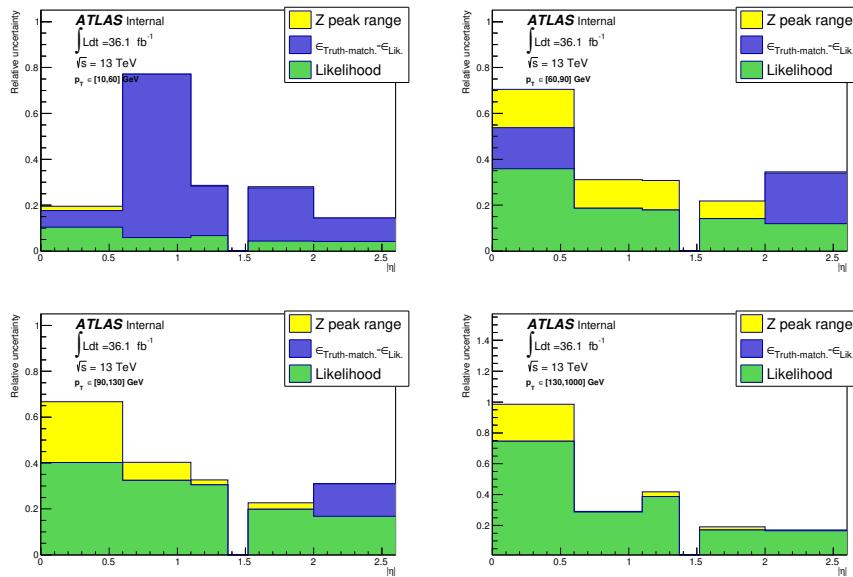


图 5.9 电子电荷误判率的系统误差。此处 Likelihood 指代统计误差。

## 5.4.2 Fakes 估计

误鉴别粒子是一项非常重要的本底，因为对其形成机制理解不够准确，MC 并不能很好地描述，所以有必要使用 data-driven 的方法去估计该项本底。在该分析中，我们使用误判系数 (fake factor) 方法。

### 5.4.2.1 Fake factor 方法

在 4W 分析中，Fake factor 方法的假设是 fake factor 不依赖于喷注数，其定义是具有两个 tight SS 轻子的事例数与具有一个 tight 和一个 anti-tight 的轻子的事例数比例，如等式 5.3 所示。

$$\theta_\ell = \frac{N_{\ell\ell}}{N_{\ell\ell'}} \quad (5.3)$$

其中， $\ell$  为 tight 电子或者  $\mu$  子， $\ell'$  是 anti-tight 的轻子。通常，分母的选择是 fake factor 中最困难的部分：分母的选择应当使得真实轻子极大地压低，而尽量增大误鉴别轻子的比例。如果分母选择条件越严格，与外延相关的系统误差越小，但是另一方面，事例越少，相应的统计误差越大。所以，为了优化整体的系统误差，必须考虑到这些相反的影响。一般来讲，利用 ID 和 isolation 条件可以很好地压低误鉴别的电子，而 isolation 和碰撞参数可以用来压低误鉴别  $\mu$  子 [152]。在本分析中， $\ell$  和  $\ell'$  的定义如表 5.8 和表 5.9 所示。

	tight electron	anti-tight electron
ID	TightLH	fail TightLH
isolation	isolationFixedCutTight	-
QmisID	ChargeIDBDTTight>0.067	ChargeIDBDTTight>0.067

表 5.8 tight 与 anti-tight 电子定义，两者都应通过轻子 baseline 筛选。

	tight muon	anti-tight muon
ID	Tight	-
isolation	isolationFixedCutTightTrackOnly	fail isolationFixedCutTightTrackOnly

表 5.9 tight 与 anti-tight  $\mu$  子定义，两者都应通过轻子 baseline 筛选。

需要指出的是，因为在本分析中，有两个  $N_{jet}$  类别，所以对于低质量点，计算 fake factor 时要求一个喷注；对于高质量点，要求 1 到 2 个喷注。总结如表 5.10 所示。接下来，作为例子，我们将只展示高质量点的 fakes 的计算方式。本底包括

Region		Fake factor CR (low jet multiplicity region)	SR (high jet multiplicity region)
Low mass $hh: m_X=260, 300 \text{ GeV}$ SS: Fixing $m_S=135 \text{ GeV}, m_X=280, 300, 320 \text{ GeV}$		$N_{\text{jet}}=1$	$N_{\text{jet}} \geq 2$
High mass $hh: m_X=400, 500 \text{ GeV, no-resonant}$ SS: Fixing $m_X=340 \text{ GeV}, m_S=135, 145, 155 \text{ and } 165 \text{ GeV}$		$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$	$N_{\text{jet}} \geq 3$

表 5.10 Fake factor 方法中对应不同质量点的区域定义，需要区分的是，进入最终拟合的信号区 (SR) 两个轻子须满足 tight 筛选。

fakes, QmisID,  $V\gamma$  和 promptSS，为了不重复考虑这些本底，实际计算 fake factor 时应当减去这些本底，如公式5.4和5.5所示。

$$\theta_e(1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2) = \frac{N_{ee}^{\text{data}} - N_{ee}^{\text{promptSS}} - N_{ee}^{V\gamma} - N_{ee}^{\text{QmisID}}}{N_{e\neq}^{\text{data}} - N_{e\neq}^{\text{promptSS}} - N_{e\neq}^{V\gamma} - N_{e\neq}^{\text{QmisID MC}}}(1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2) \quad (5.4)$$

$$\theta_\mu(1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2) = \frac{N_{\mu\mu}^{\text{data}} - N_{\mu\mu}^{\text{promptSS}} - N_{\mu\mu}^{V\gamma}}{N_{\mu\neq}^{\text{data}} - N_{\mu\neq}^{\text{promptSS}} - N_{\mu\neq}^{V\gamma}}(1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2) \quad (5.5)$$

promptSS, QmisID 和  $V\gamma$  在分子分母中均被减去。promptSS 用 MC 估计，并且要求其中一个轻子能够匹配到真实轻子 (truth-matching)。 $V\gamma$  也利用 MC 估计，但是并不要求 truth-matching，因为其中一个轻子很可能来自于  $\gamma$  转化。对于 QmisID，分子中的  $N_{ee}^{\text{QmisID}}$  计算如章节 5.4.1 所述，而  $N_{e\neq}^{\text{QmisID MC}}$  直接利用 MC 估计，其中要求电子 truth-matching。表5.11到表5.14总结在不同  $N_{\text{jet}}$  类别下，用来计算 fake factor 的各个成分的值。表5.15列出计算出的各种类别的 fake factor 值。

Selections		$VV$	$t\bar{t}V$	$tV$	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	QmisID	Data
$N_{\text{jet}} == 1$	$ee$	$204.64 \pm 19.13$	$1.09 \pm 0.08$	$5.08 \pm 0.93$	$0.03 \pm 0.01$	$135.94 \pm 12.84$	$164.46 \pm 0.65$	976
	$e\neq$	$44.26 \pm 3.51$	$0.13 \pm 0.03$	$8.25 \pm 1.32$	$0.00 \pm 0.00$	$67.33 \pm 10.49$	$135.54 \pm 71.62$	1116

表 5.11 电子 Fake factor CR ( $N_{\text{jet}} == 1$ ) 中的数据与预期本底数，不确定度仅是统计误差。

Selections		$VV$	$t\bar{t}V$	$tV$	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	Data
$N_{\text{jet}} == 1$	$\mu\mu$	$296.37 \pm 9.72$	$1.92 \pm 0.11$	$5.91 \pm 1.01$	$0.02 \pm 0.02$	$0.00 \pm 0.00$	455
	$\mu\neq$	$56.84 \pm 5.00$	$0.13 \pm 0.03$	$20.80 \pm 2.34$	$0.00 \pm 0.00$	$0.63 \pm 0.45$	378

表 5.12  $\mu$  子 Fake factor CR ( $N_{\text{jet}} == 1$ ) 中的数据与预期本底数，不确定度仅是统计误差。

Selections		$VV$	$t\bar{t}V$	$tV$	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	QmisID	Data
$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$	$ee$	$309.38 \pm 19.75$	$3.67 \pm 0.16$	$11.27 \pm 1.47$	$0.10 \pm 0.02$	$213.30 \pm 17.29$	$230.40 \pm 0.81$	1434
	$e\ell$	$66.58 \pm 5.19$	$0.39 \pm 0.06$	$15.85 \pm 1.89$	$0.02 \pm 0.01$	$104.00 \pm 12.71$	$187.16 \pm 78.65$	1591

表 5.13 电子 Fake factor CR ( $1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$ ) 中的数据与预期本底数, 不确定度仅是统计误差。

Selections		$VV$	$t\bar{t}V$	$tV$	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	Data
$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$	$\mu\mu$	$463.01 \pm 11.61$	$6.14 \pm 0.21$	$15.20 \pm 2.26$	$0.17 \pm 0.03$	$0.01 \pm 0.01$	729
	$\mu\ell$	$74.30 \pm 5.40$	$0.45 \pm 0.06$	$43.59 \pm 3.37$	$0.02 \pm 0.01$	$1.62 \pm 0.74$	658

表 5.14  $\mu$  子 Fake factor CR ( $1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$ ) 中的数据与预期本底数, 不确定度仅是统计误差。

Selections	Fake factor	Value
$N_{\text{jet}} == 1$	$\theta_e$	$0.5401 \pm 0.0311$
	$\theta_\mu$	$0.5033 \pm 0.0503$
$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$	$\theta_e$	$0.5472 \pm 0.0264$
	$\theta_\mu$	$0.4544 \pm 0.0350$

表 5.15 电子与  $\mu$  子的 fake factor 计算值, 不确定度仅是统计误差。

接下来，就可以计算在信号区，即高  $N_{\text{jet}}$  区，的 fakes 估计值。计算方法如下：

$$N_{ee}^{\text{fakes}}(N_{\text{jet}} \geq 3) = (N_{e\ell}^{\text{data}} - N_{e\ell}^{\text{promptSS}} - N_{e\ell}^{V\gamma} - N_{e\ell}^{\text{QmisID MC}})(N_{\text{jet}} \geq 3) \times \theta_e \quad (5.6)$$

$$N_{\mu\mu}^{\text{fakes}}(N_{\text{jet}} \geq 3) = (N_{\mu\mu}^{\text{data}} - N_{\mu\mu}^{\text{promptSS}} - N_{\mu\mu}^{V\gamma})(N_{\text{jet}} \geq 3) \times \theta_\mu \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} N_{e\mu}^{\text{fakes}}(N_{\text{jet}} \geq 3) &= (N_{e\mu} - N_{e\mu}^{\text{promptSS}} - N_{e\mu}^{V\gamma} - N_{e\mu}^{\text{QmisID MC}})(N_{\text{jet}} \geq 3) \times \theta_\mu \\ &+ (N_{\mu e} - N_{\mu e}^{\text{promptSS}} - N_{\mu e}^{V\gamma} - N_{\mu e}^{\text{QmisID MC}})(N_{\text{jet}} \geq 3) \times \theta_e \end{aligned} \quad (5.8)$$

各个成分的选择同样遵循计算 fake factor 时的要求，表5.16（表5.17）总结各种成分在  $N_{\text{jet}} \geq 2$  ( $N_{\text{jet}} \geq 3$ ) 时的数值。最后，计算得到信号区的 fakes 结果如表5.18所

Selections		$VV$	$t\bar{t}V$	$tV$	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	QmisID	Data
$N_{\text{jet}} \geq 2$	$e\ell$	$37.39 \pm 4.24$	$1.67 \pm 0.12$	$11.55 \pm 1.62$	$0.19 \pm 0.04$	$51.74 \pm 8.67$	$137.17 \pm 33.00$	829
	$\mu\ell$	$32.41 \pm 2.83$	$1.44 \pm 0.15$	$38.97 \pm 3.15$	$0.12 \pm 0.03$	$1.01 \pm 0.59$	-	583
	$\ell\mu$	$39.71 \pm 3.06$	$2.02 \pm 0.17$	$15.46 \pm 2.13$	$0.19 \pm 0.04$	$53.50 \pm 9.21$	$195.94 \pm 19.80$	708
	$e\mu$	$17.89 \pm 2.50$	$0.42 \pm 0.10$	$17.00 \pm 1.99$	$0.03 \pm 0.02$	$0.75 \pm 0.39$	$0.43 \pm 0.03$	267

表 5.16 Fake factor SR ( $N_{\text{jet}} \geq 2$ ) 中的数据与预期本底数，不确定度仅是统计误差。

Selections		$VV$	$t\bar{t}V$	$tV$	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	QmisID	Data
$N_{\text{jet}} \geq 3$	$e\ell$	$15.07 \pm 1.83$	$1.41 \pm 0.11$	$3.96 \pm 0.90$	$0.17 \pm 0.03$	$15.07 \pm 4.85$	$85.54 \pm 6.45$	354
	$\mu\ell$	$14.95 \pm 1.94$	$1.12 \pm 0.13$	$16.18 \pm 2.01$	$0.10 \pm 0.03$	$0.03 \pm 0.03$	-	303
	$\ell\mu$	$17.84 \pm 2.04$	$1.60 \pm 0.16$	$6.71 \pm 1.62$	$0.18 \pm 0.04$	$17.98 \pm 5.18$	$102.56 \pm 5.64$	287
	$e\mu$	$4.78 \pm 1.06$	$0.36 \pm 0.09$	$7.68 \pm 1.24$	$0.02 \pm 0.02$	$0.44 \pm 0.27$	$0.21 \pm 0.03$	149

表 5.17 Fake factor SR ( $N_{\text{jet}} \geq 3$ ) 中的数据与预期本底数，不确定度仅是统计误差。

示。其中，只考虑了统计误差，其计算方式为  $\theta_\ell \times \sqrt{N_{\ell\ell}^{\geq 2\text{jet}(3\text{jet})}}$  [152]。

Selections	$N_{\text{jet}} \geq 2$			$N_{\text{jet}} \geq 3$		
	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$
Event yield	$318.27 \pm 9.64$	$256.20 \pm 8.06$	$332.69 \pm 9.62$	$127.38 \pm 6.10$	$122.97 \pm 5.58$	$138.25 \pm 6.16$

表 5.18 Fake factor 方法给出的 fakes 计算值，不确定度仅是统计误差。

#### 5.4.2.2 系统误差

计算 fake factor 时有如下系统误差：

1. 统计误差，低  $N_{\text{jet}}$  区的统计误差会传递到 fake factor;

2. **QmisID**, QmisID 的贡献在  $ee$  道是比较大的, 其系统误差也会传递到  $\theta_\ell$  的计算。

3. **Closure test**, 此分析中 fake factor 的假设是其值不依赖于喷注数, 但此假设本身是有偏差的, 所以为了考虑此项误差, 可以利用 MC (semi-leptonic  $t\bar{t}$ ) 重复一遍 fake factor 方法, 将真实 fakes 与预测值差别作为系统误差。具体流程如下:

- 要求  $1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$ , 其中为了增大统计量, 去除  $b$ -veto,  $Z$  veto 和轻子  $p_T$  选择条件。

- 选择  $ee$  ( $e\ell$ ) 和  $\mu\mu$  ( $\mu\ell$ ) 事例, 计算 fake factor ( $\frac{N_{\ell\ell}}{N_{e\ell}}$ ):  
 $\theta_e = 0.32 \pm 0.12$ ,  $\theta_\mu = 0.12 \pm 0.04$ ;

- 预测高  $N_{\text{jet}}$  区的 fakes 数 ( $\theta \times N_{\ell\ell}$ )。

表 5.19 的总结了  $t\bar{t}$  MC 中的真实 fakes, 预测值以及它们之间的相对差别, 表中最大的相对差别会作为 fake factor closure 系统误差。

	Predicted	Real	Relative difference
$ee$	$24.69 \pm 9.47$	$26.92 \pm 2.06$	9.03%
$\mu\mu$	$30.44 \pm 10.00$	$34.88 \pm 2.35$	14.59%
$e\mu$	$40.80 \pm 11.31$	$56.63 \pm 3.01$	38.80%

表 5.19 利用  $t\bar{t}$  MC 得出的  $\theta_e$  与  $\theta_\mu$  的 non-closure 系统误差, 其中为了减小 MC 统计误差, 初步筛选并未要求双轻子相同电荷, 轻子  $p_T$  条件以及  $M(l\bar{l}) > 15$  GeV。

4. **本底成分**, 低  $N_{\text{jet}}$  与高  $N_{\text{jet}}$  区的一个显著区别是背景成分, 以表 5.20 作为例证, 可以看到, 随着喷注数的增加,  $t\bar{t}$  的比例相应增大。不同味道的喷注具有不同的误鉴别率, 从而不同本底会有不同的 fake factor。在此估计中, fake factor 是在低  $N_{\text{jet}}$  区估计的, 而后应用在高  $N_{\text{jet}}$ , 那么从表 5.20 推论出,  $t\bar{t}$  本底被低估了。为了补偿此项偏差, 可以重复以上 fake factor 方法, 但是加上至少一个  $b$ -jet 的条件。最后, 把他们之间的差别作为系统误差, 结果如表 5.21 所示。

5. **prompt SS 产生截面**, 在 fake factor 计算中, prompt SS 作为减去项, 那么它们的截面理论值也会影响 fake factor 的结果, 它们的理论误差会传递到 fake factor 的误差中, 其中低于 1% 影响的过程被忽略。

Fake factor 的所有系统误差总结在表 5.22 和表 5.23 中。最显著的误差是 Non-closure 和本底成分; 对于  $\mu$  而言,  $WZ$  的产生截面有 30% 到 40% 的影响, 而对于电子 fake factor, QmisID 误差大小约为 30%; 统计误差最小, 只有不到 10%

Pre-selections	$N_{\text{jet}}=1$			$N_{\text{jet}}=2$			$N_{\text{jet}} \geq 3$		
	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$
Sherpa W+jets	38.84	30.74	152.01	4.49	13.98	49.85	5.20	3.96	19.88
Sherpa $t\bar{t}$	7.20	-0.34	10.32	9.62	37.35	62.95	15.66	28.04	59.79
$N_{t\bar{t}}/N_{W+\text{jets}}$	0.19	-0.011	0.068	2.14	2.67	1.26	3.01	7.08	3.00

表 5.20  $t\bar{t}$ (semi-leptonic) 与  $W + jets$  在不同喷注数要求时的预期数比较，两者均利用 Sherpa 产生。

$N_{\text{jet}}=1$	with b veto	with $b$ -jet	uncer.
$\theta_e$	$0.5401 \pm 0.0311$	$0.7228 \pm 0.1919$	33.83%
$\theta_\mu$	$0.5033 \pm 0.0503$	$0.3438 \pm 0.0856$	31.69%
$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$	with b veto	with $b$ -jet	uncer.
$\theta_e$	$0.5472 \pm 0.0264$	$0.8000 \pm 0.1171$	46.20%
$\theta_\mu$	$0.4544 \pm 0.0350$	$0.3060 \pm 0.0413$	48.50%

表 5.21 Fake factor 在要求与不要求  $b$  喷注时计算值，其相对差别作为一项系统误差。

的影响，说明轻子选择条件是比较合理的，没有引入较大统计误差；虽然在各个  $N_{\text{jet}}$  类别，电子 fake factor 误差略高于  $\mu$  子的，但它们总误差都在 60% 到 72% 之间。

	$N_{\text{jet}} == 1$	$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$
Statistics	5.76	4.82
QmisID	33.0	30.0
$\theta_e$ syst.	38.80	38.80
Sample dependence	33.83	46.20
$W^\pm W^\pm$	1.22	2.08
$WZ$	8.93	7.94
$V\gamma$	11.15	12.28
QmisID MC	1.50	2.00
Total	63.09	69.18

表 5.22 电子 fake factor 的系统误差(%) 总结。

	$N_{\text{jet}} == 1$	$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$
Statistics	9.99	7.70
$\theta_\mu$ syst.	38.80	38.80
Sample dependence	31.69	48.50
$W^\pm W^\pm$	6.06	10.39
$WZ$	39.0	33.6
Total	64.55	71.79

表 5.23  $\mu$  子 fake factor 的系统误差 (%) 总结。

#### 5.4.2.3 总预期本底估计

表 5.24 和表 5.25 分别总结在  $N_{\text{jet}} \geq 2$  和  $N_{\text{jet}} \geq 3$  时，经过初步筛选之后的各项本底的估计值与观测数据数；表内的误差考虑了 fakes 的统计误差和 fake factor 的系统误差，假设它们相互独立，总的误差为  $\sqrt{(\theta_\ell^{\text{sys.}} \times N_{\text{jet fakes}}^{\text{median}})^2 + \theta_\ell \times N_{\text{jet fakes}}^{\text{median}}}$ ，其中  $\theta_\ell^{\text{sys.}}$  是 fake factor 系统误差值， $N_{\text{jet fakes}}^{\text{median}}$  是 fakes 预期值。在三个轻子道中，fakes 都占有比较大的比例，都高于 30%，尤其在  $ee$  中，fakes 作为最大的本底成分，高达 44%。图 5.10 和图 5.11 是  $N_{\text{jet}}$  的分布，分别对应  $N_{\text{jet}} \geq 2$  和  $N_{\text{jet}} \geq 3$ ，相比图 5.6，数据与预期本底吻合度得到极大地提升，其偏差基本控制在 2 个标准偏差之内。

	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$
Jet fakes	$318.27 \pm 201.23$	$256.20 \pm 165.77$	$332.69 \pm 156.43$
PromptSS	$208.92 \pm 6.64$	$334.71 \pm 8.74$	$560.18 \pm 10.63$
$V + \gamma$	$105.39 \pm 12.43$	$0.01 \pm 0.01$	$107.99 \pm 15.17$
QmisID	$101.47 \pm 0.60$	$0.00 \pm 0.00$	$18.21 \pm 0.23$
Total backgrounds	$734.07 \pm 201.72$	$590.93 \pm 166.00$	$1019.06 \pm 157.52$
Observed	790	487	1257

表 5.24 经过初步筛选之后的预期事例数，对应  $N_{\text{jet}} \geq 2$ 。Fakes 的不确定度包括统计误差和系统误差，其他本底和信号仅包含统计误差。PromptSS 和  $V + \gamma$  归一到  $\sigma \times \mathcal{L}$ 。

	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$
Jet fakes	$127.38 \pm 88.52$	$122.97 \pm 88.60$	$138.25 \pm 69.55$
PromptSS	$95.34 \pm 4.30$	$154.40 \pm 5.64$	$262.03 \pm 7.04$
$V + \gamma$	$28.03 \pm 4.52$	$0.01 \pm 0.01$	$51.62 \pm 13.75$
QmisID	$35.60 \pm 0.38$	$0.00 \pm 0.00$	$8.38 \pm 0.16$
Total backgrounds	$286.35 \pm 88.74$	$277.38 \pm 88.78$	$460.27 \pm 71.25$
Observed	332	213	511

表 5.25 经过初步筛选之后的预期事例数，对应  $N_{jet} \geq 3$ 。Fakes 的不确定度包括统计误差和系统误差，其他本底和信号仅包含统计误差。PromptSS 和  $V + \gamma$  归一到  $\sigma \times \mathcal{L}$ 。

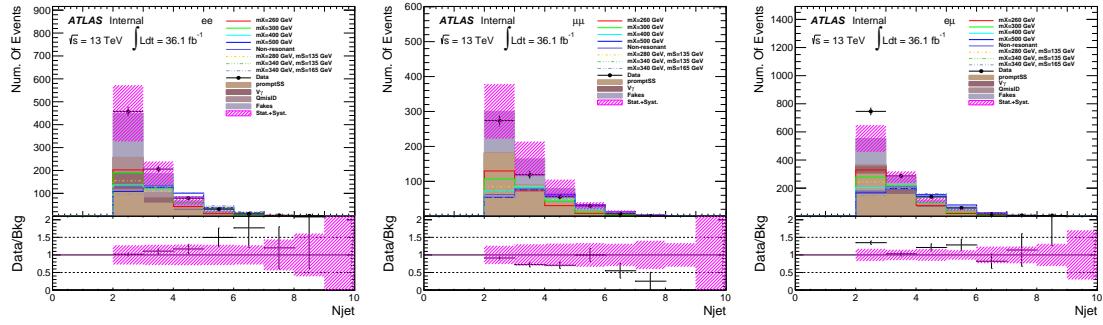


图 5.10 经过事例初始筛选之后数据与预期背景比较，对应  $N_{jet} \geq 2$ ，promptSS 和  $V\gamma$  使用 MC 估计，并且归一到  $\sigma \times \mathcal{L}$ ，QmisID 与 fakes 均用 data-driven 方法估计，粉色斜纹代表误差相对大小，包括 fakes 的所有误差项和其他本底的统计误差。

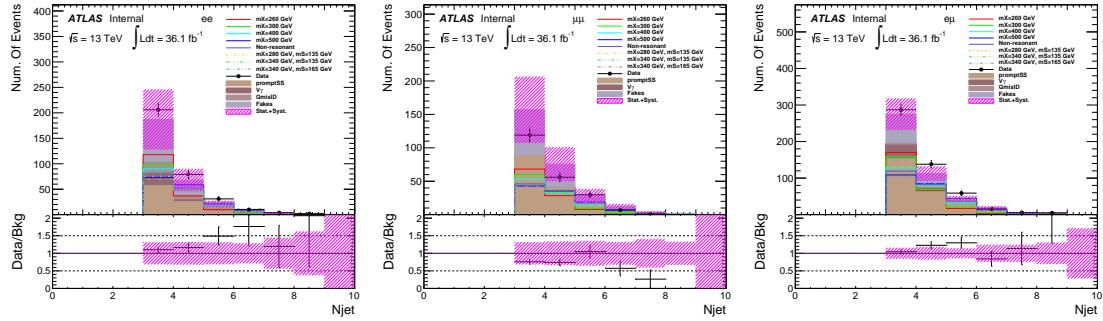


图 5.11 经过事例初始筛选之后数据与预期背景比较，对应  $N_{jet} \geq 3$ ，promptSS 和  $V\gamma$  使用 MC 估计，并且归一到  $\sigma \times \mathcal{L}$ ，QmisID 与 fakes 均用 data-driven 方法估计，粉色斜纹代表误差相对大小，包括 fakes 的所有误差项和其他本底的统计误差。

## 5.5 信号优化

在初步筛选之后，为了进一步加强信号显著性，利用运动学性质进行信号优化是有必要的。因为各个信号质量点的运动学性质差别较大，所以，每个质量点都会进行信号优化过程，而后通过各自运动学优化条件之后的区域才作为每个质量点的最终信号区。

### 5.5.1 优化策略

MVA 方法用于确定不同运动学变量的分离能力，并考虑所有变量之间的相关性。最终，前五个运动学变量用于形成优化选择，分别是  $M(\ell\ell)$ ,  $\Delta R_{min}(\ell_2, j)$ ,  $\Delta R_{min}(\ell_1, j)$ ,  $M_{\ell_1 jj}$  和  $M(all)$ ，它们具有很强的分离能力，而且相互之间的相关性很低(图 5.12)。 $M(\ell\ell)$  和  $M_{\ell_1 jj}$  对低质量点敏感，而其余对高质量和非共振信号敏感。基于这些知识， $\Delta R_{min}(\ell_1, j)$ ,  $M(\ell\ell)$ ,  $M_{\ell_1 jj}$  和  $M(all)$  用于在低质量搜索中，而  $\Delta R_{min}(\ell_2, j)$ ,  $\Delta R_{min}(\ell_1, j)$ ,  $M(\ell\ell)$  和  $M_{\ell_1 jj}$  用于高质量搜索中。它们的相应分布分别见图 5.13 和图 5.14。

TMVA 包 (CutsSA 选项) [124] 用于实现最佳筛选。所有本底: promptSS,  $V\gamma$ , QmisID 和 fakes 都包含在训练中。为了减少对变量筛选顺序的依赖，每次仅训练 2 个变量。对于每个信号效率工作点 (WP)，在测试样本中应用对应的选择条件，并计算显著性 ( $S/\sqrt{B}$ )。随后，选择具有最高信号显著性的 WP，对该 WP 的 2 个变量筛选值即为最佳选择，最后再对剩下两个变量重复以上步骤。图 5.15 展示 SM 希格斯粒子对搜寻中  $\mu\mu$  分析道效率变化，各个运动学变量的最佳选择上下限以及显著性随信号效率 WP 的分布。对剩余的分析道或者其他质量点重复此操作，即可得到所有质量点的不同味道子类的最佳优化选择条件。值得指出的是，对于  $SS$  信号优化，因为各个质量点之间的运动学性质比较接近，所以只针对  $m_S = 135 \text{ GeV}, m_X = 300 \text{ GeV}$  ( $m_X = 340 \text{ GeV}, m_S = 145 \text{ GeV}$ ) 进行优化，而后应用在所有的低（高）质量点。

最终考虑从低到高（和非共振）质量点筛选值的单调性，一定的选择调整被执行。最终的选择总结在表 5.26, 表 5.27 和表 5.28 中，分别对应于  $hh$  低质量， $hh$  高质量和  $SS$  信号寻找。

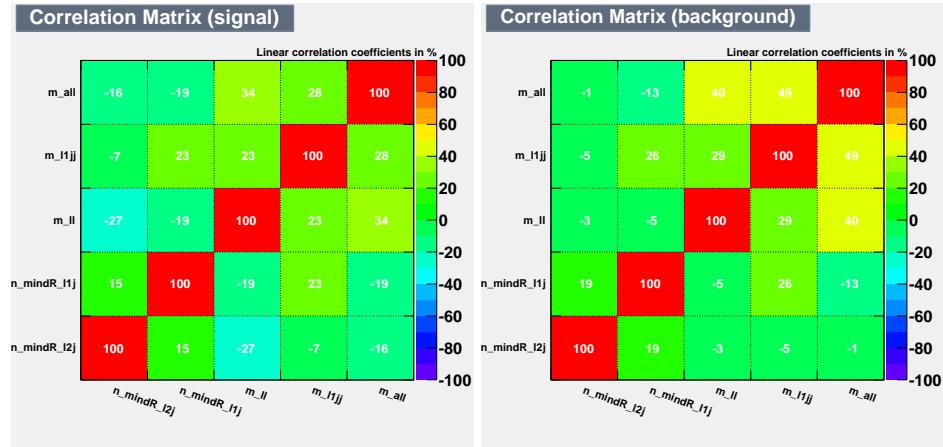


图 5.12 训练变量之间的相关性。

	Channel	$\Delta R_{min}(\ell_1, j)$	$M(ll)$	$M_{\ell_1 jj}$	$M(all)$
$m_X=260$ GeV	$ee$	0.35, 1.85	<100	<145	<1100
	$\mu\mu$	0.25, 2.10	<80	<115	<700
	$e\mu$	0.25, 1.80	<85	<135	<650
$m_X=300$ GeV	$ee$	0.35, 1.75	<120	<160	<1400
	$\mu\mu$	0.20, 1.75	<115	<185	<1000
	$e\mu$	0.20, 1.80	<135	<160	<800

表 5.26 基于运动学变量  $X \rightarrow hh$  信号优化总结, 对应  $m_X=260, 300$  GeV, 所有不变质量单位为 GeV。

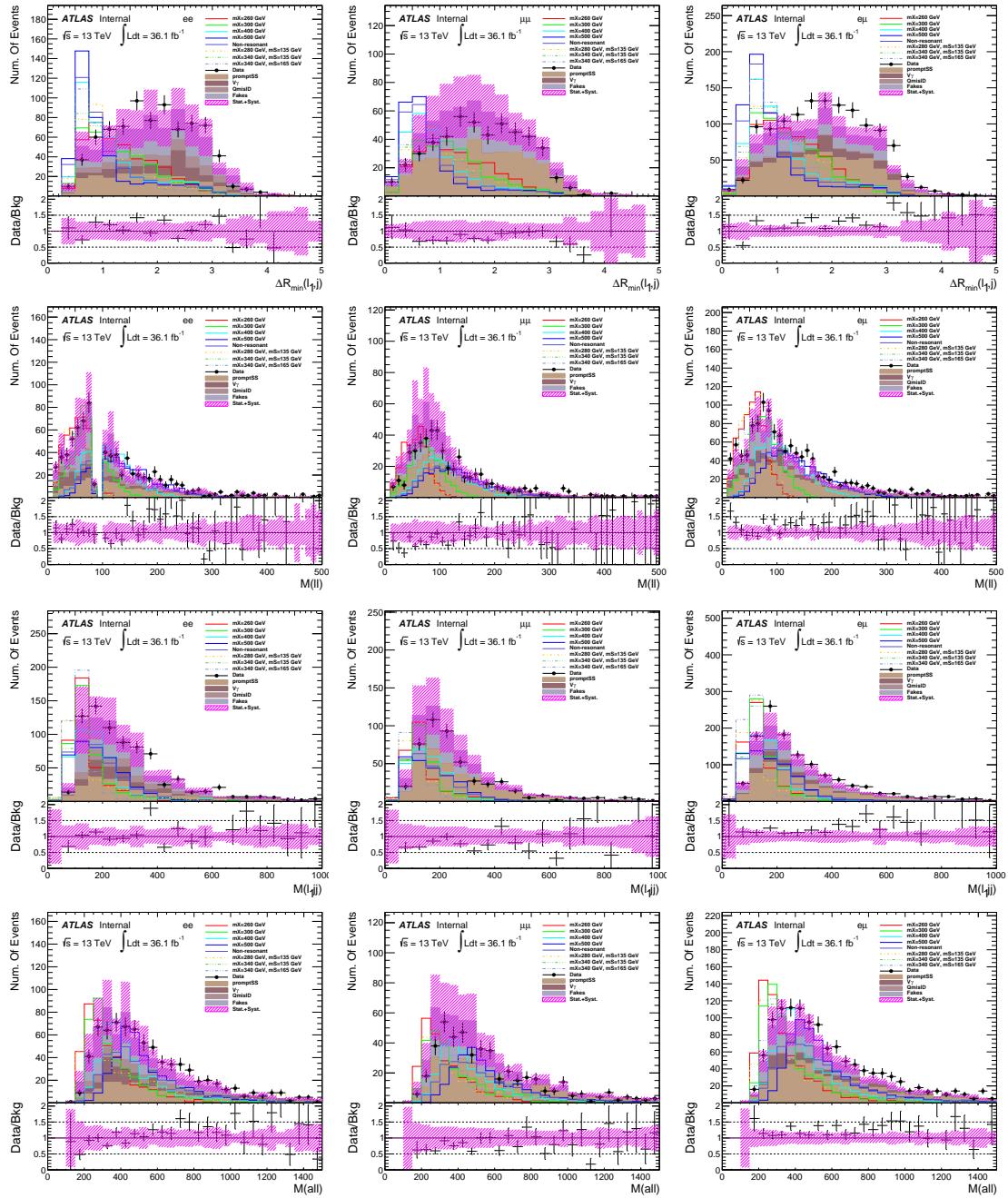
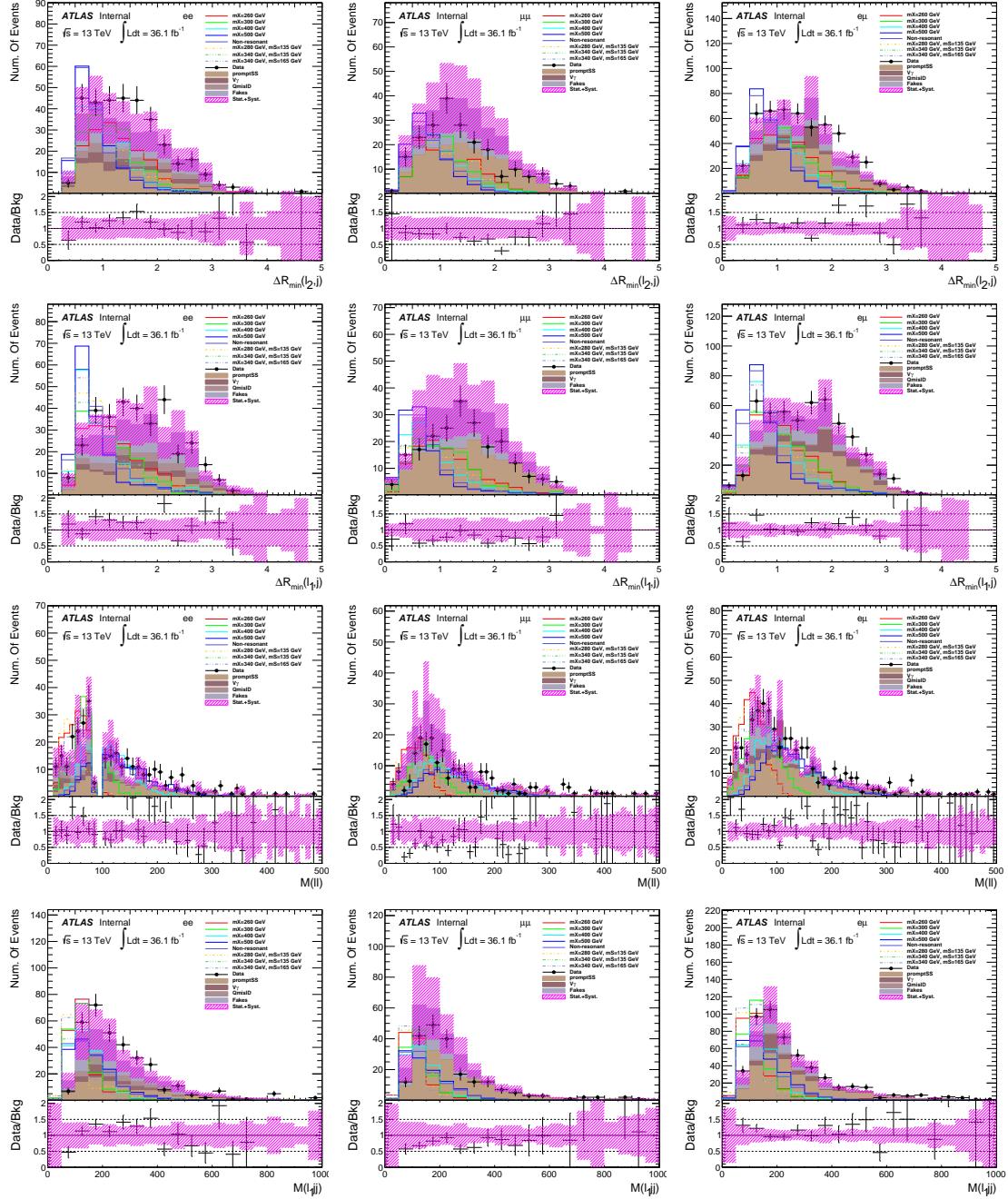


图 5.13 用于低质量信号优化的运动学变量分布，对应  $N_{\text{jet}} \geq 2$ 。左: ee, 中:  $\mu\mu$ , 右:  $e\mu$ 。

图 5.14 用于低质量信号优化的运动学变量分布，对应  $N_{jet} \geq 3$ 。左:  $ee$ , 中:  $\mu\mu$ , 右:  $e\mu$ 。

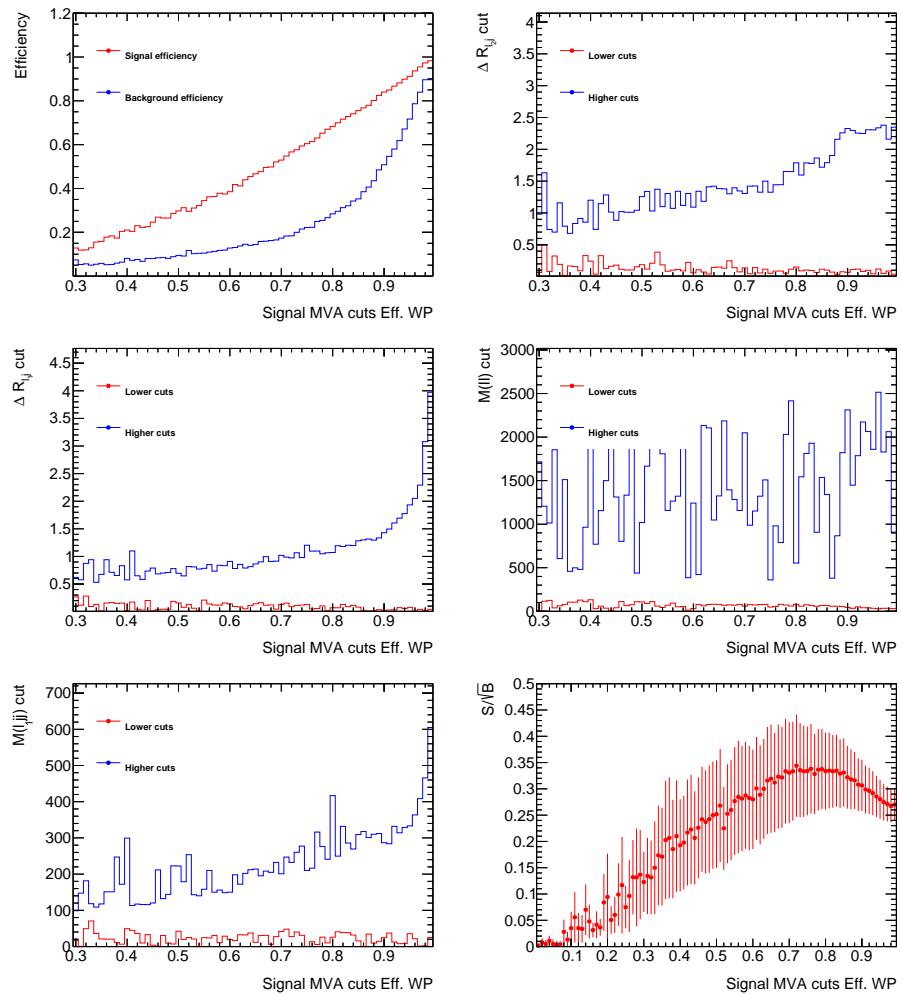


图 5.15 左上：信号效率和本底效率变化，右下：SM  $hh \mu\mu$  信号显著性随给定效率分布情况，其他：运动学变化最佳筛选上下限随信号效率变化情况。显著性计算的信号与本底均考虑了统计误差，0.72 选作 SM  $hh \mu\mu$  的最佳工作点，其相应的运动学变量筛选值则用作最终信号优化条件（会进行一定的平滑性选择）。

	Channel	$\Delta R_{min}(\ell_2, j)$	$\Delta R_{min}(\ell_1, j)$	$M(l\bar{l})$	$M_{\ell_1 jj}$
$m_X=400$ GeV	$ee$	0.35, 1.50	0.30, 1.25	45, 235	40, 285
	$\mu\mu$	0.20, 1.20	0.20, 1.20	40, 215	30, 260
	$e\mu$	0.20, 1.50	0.20, 1.05	35, 195	30, 235
$m_X=500$ GeV	$ee$	0.20, 1.15	0.20, 1.15	100, 270	40, 285
	$\mu\mu$	0.20, 1.05	0.20, 0.75	60, 250	30, 310
	$e\mu$	0.20, 1.00	0.20, 0.80	75, 250	35, 350
Non- resonant	$ee$	0.20, 1.40	0.20, 1.15	55, 270	40, 285
	$\mu\mu$	0.20, 1.05	0.20, 0.75	60, 250	30, 310
	$e\mu$	0.20, 1.15	0.20, 0.80	75, 250	35, 350

表 5.27 基于运动学变量  $X \rightarrow hh$  信号优化总结, 对应  $m_X=400, 500$  GeV 以及 SM  $hh$ , 所有不变质量单位为 GeV。

	Channel	$\Delta R_{min}(\ell_2, j)$	$\Delta R_{min}(\ell_1, j)$	$M(l\bar{l})$	$M_{\ell_1 jj}$
$m_X=300$ GeV, $m_S=135$ GeV	$ee$	0.35, 2.5	0.4, 1.65	<80	50, 150
	$\mu\mu$	0.25, 2.05	0.2, 1.85	< 95	50, 150
	$e\mu$	0.25, 1.7	0.25, 1.65	< 95	50, 150
$m_X=340$ GeV, $m_S=145$ GeV	$ee$	0.35, 1.85	0.2, 1.65	< 130	50, 190
	$\mu\mu$	0.2, 2.0	0.2, 1.65	< 115	50, 185
	$e\mu$	0.25, 1.6	0.25, 1.6	< 150	50, 150

表 5.28 基于运动学变量  $X \rightarrow SS$  信号优化总结, 所有不变质量单位为 GeV。

### 5.5.2 优化效率检查

为了防止过度优化或者欠优化的情况，可以检查每个信号 MC 经过以上选择条件之后的效率。图 5.16 和图 5.17 分别表示  $hh$  和  $SS$  信号相对于经过初步筛选条件之后的选择效率。总体上大多数质量点的选择效率相当接近，但是由于优化时每两个变量一组，它们之间的相关性在三个分析道中略有不同，并且各个分析道具有不同的背景组成，导致不同质量点不同分析道具有不同效率的趋势。

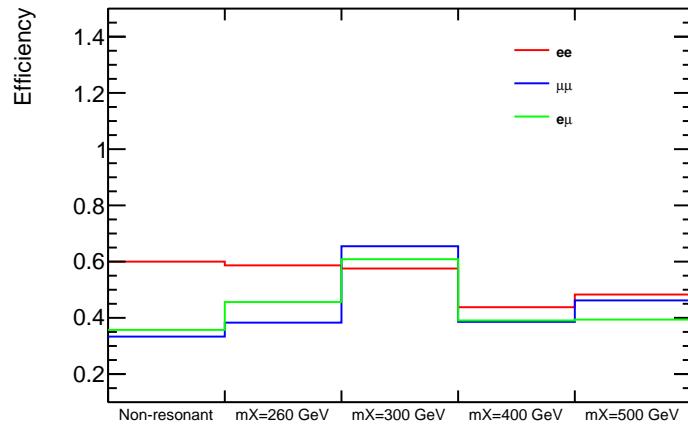


图 5.16  $hh$  信号优化效率（相比于初步筛选）。

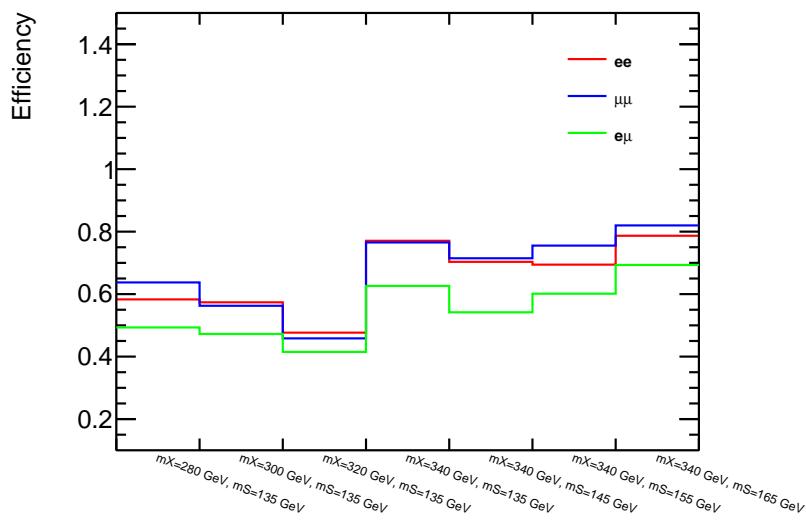


图 5.17  $SS$  信号优化效率（相比于初步筛选）。

### 5.5.3 优化结果

经过所有筛选条件之后, 表 5.29 到表 5.49 展示各个质量点不同分析道中的各种背景, 预期信号以及观测事例数的结果。总预期本底的误差包括了所有的系统误差, 并考虑了非 fakes 本底的系统误差 (syst1) 与 fakes 本底的系统误差 (syst2) 的反相关性质。图 5.18 到图 5.24 展示对应的子类的运动学分布。总体而言, 所有子类中没有发现明显超出。

#### 5.5.3.1 $hh$ 搜索筛选结果

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$46.87 \pm 2.91(\text{stat.}) \pm 14.06(\text{syst.})$	$16.25 \pm 3.99(\text{stat.}) \pm 8.12(\text{syst.})$	$15.60 \pm 0.24(\text{stat.}) \pm 5.15(\text{syst.})$	$64.87 \pm 5.96(\text{stat.}) \pm 44.88(\text{syst.})$	$143.59 \pm 7.74(\text{stat.}) \pm 17.04(\text{syst1.}) \pm 44.88(\text{syst2.})$	158	$0.04 \pm 0.00$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$16.38 \pm 1.80(\text{stat.}) \pm 4.91(\text{syst.})$	$2.89 \pm 1.04(\text{stat.}) \pm 1.45(\text{syst.})$	$5.23 \pm 0.13(\text{stat.}) \pm 1.72(\text{syst.})$	$26.32 \pm 3.79(\text{stat.}) \pm 18.21(\text{syst.})$	$50.81 \pm 4.43(\text{stat.}) \pm 5.40(\text{syst1.}) \pm 18.21(\text{syst2.})$	62	$0.03 \pm 0.00$
$M(\ell\ell)$	$11.70 \pm 1.65(\text{stat.}) \pm 3.5(\text{syst.})$	$0.95 \pm 0.34(\text{stat.}) \pm 0.48(\text{syst.})$	$3.38 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 1.12(\text{syst.})$	$21.24 \pm 3.14(\text{stat.}) \pm 14.70(\text{syst.})$	$37.28 \pm 3.80(\text{stat.}) \pm 3.72(\text{syst1.}) \pm 14.70(\text{syst2.})$	46	$0.03 \pm 0.00$
$M(l_1 jj)$	$8.37 \pm 1.04(\text{stat.}) \pm 2.51(\text{syst.})$	$0.54 \pm 0.24(\text{stat.}) \pm 0.27(\text{syst.})$	$2.61 \pm 0.09(\text{stat.}) \pm 0.86(\text{syst.})$	$17.46 \pm 3.09(\text{stat.}) \pm 12.08(\text{syst.})$	$28.98 \pm 3.27(\text{stat.}) \pm 2.67(\text{syst1.}) \pm 12.08(\text{syst2.})$	35	$0.03 \pm 0.00$

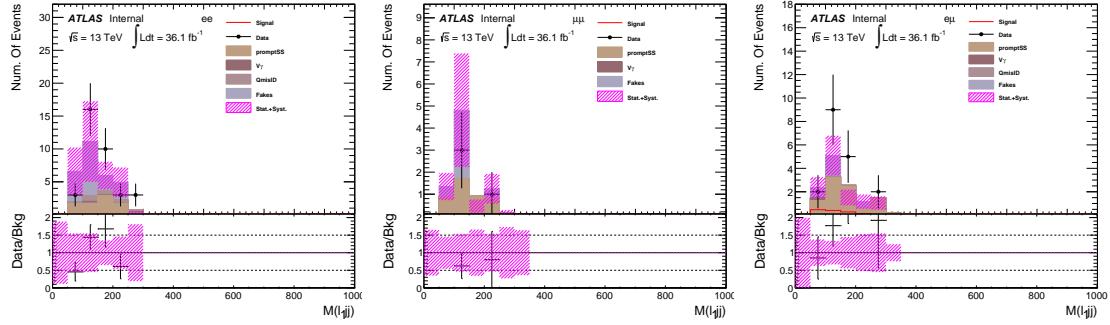
表 5.29 SM  $hh ee$  类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$47.41 \pm 2.70(\text{stat.}) \pm 14.22(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$37.76 \pm 4.14(\text{stat.}) \pm 27.11(\text{syst.})$	$85.17 \pm 4.94(\text{stat.}) \pm 14.22(\text{syst1.}) \pm 27.11(\text{syst2.})$	72	$0.07 \pm 0.00$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$9.52 \pm 1.17(\text{stat.}) \pm 2.86(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$5.59 \pm 1.59(\text{stat.}) \pm 4.01(\text{syst.})$	$15.11 \pm 1.98(\text{stat.}) \pm 2.86(\text{syst1.}) \pm 4.01(\text{syst2.})$	10	$0.04 \pm 0.00$
$M(\ell\ell)$	$6.21 \pm 0.97(\text{stat.}) \pm 1.86(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$4.01 \pm 1.35(\text{stat.}) \pm 2.88(\text{syst.})$	$10.22 \pm 1.66(\text{stat.}) \pm 1.86(\text{syst1.}) \pm 2.88(\text{syst2.})$	4	$0.04 \pm 0.00$
$M(l_1 jj)$	$4.50 \pm 0.74(\text{stat.}) \pm 1.35(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$3.56 \pm 1.27(\text{stat.}) \pm 2.55(\text{syst.})$	$8.05 \pm 1.47(\text{stat.}) \pm 1.35(\text{syst1.}) \pm 2.55(\text{syst2.})$	4	$0.03 \pm 0.00$

表 5.30 SM  $hh \mu\mu$  类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$94.91 \pm 3.97(\text{stat.}) \pm 28.47(\text{syst.})$	$15.89 \pm 4.14(\text{stat.}) \pm 7.95(\text{syst.})$	$3.46 \pm 0.11(\text{stat.}) \pm 1.14(\text{syst.})$	$48.27 \pm 4.96(\text{stat.}) \pm 24.35(\text{syst.})$	$162.53 \pm 7.59(\text{stat.}) \pm 29.58(\text{syst1.}) \pm 24.35(\text{syst2.})$	194	$0.11 \pm 0.00$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$19.61 \pm 1.80(\text{stat.}) \pm 5.88(\text{syst.})$	$1.88 \pm 0.94(\text{stat.}) \pm 0.94(\text{syst.})$	$0.68 \pm 0.05(\text{stat.}) \pm 0.22(\text{syst.})$	$9.16 \pm 2.20(\text{stat.}) \pm 5.30(\text{syst.})$	$31.33 \pm 2.99(\text{stat.}) \pm 5.96(\text{syst1.}) \pm 5.30(\text{syst2.})$	44	$0.06 \pm 0.00$
$M(\ell\ell)$	$11.34 \pm 1.29(\text{stat.}) \pm 3.40(\text{syst.})$	$0.24 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 0.12(\text{syst.})$	$0.34 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{syst.})$	$1.73 \pm 0.94(\text{stat.}) \pm 0.89(\text{syst.})$	$13.65 \pm 1.61(\text{stat.}) \pm 3.41(\text{syst1.}) \pm 0.89(\text{syst2.})$	21	$0.05 \pm 0.00$
$M(l_1 jj)$	$9.28 \pm 1.15(\text{stat.}) \pm 2.79(\text{syst.})$	$0.24 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 0.12(\text{syst.})$	$0.27 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.09(\text{syst.})$	$1.33 \pm 0.82(\text{stat.}) \pm 0.66(\text{syst.})$	$11.13 \pm 1.43(\text{stat.}) \pm 2.79(\text{syst1.}) \pm 0.66(\text{syst2.})$	18	$0.05 \pm 0.00$

表 5.31 SM  $hh e\mu$  类别的优化结果。

图 5.18 SM hh 质量点经过优化筛选之后  $M(\ell_1 jj)$  分布。

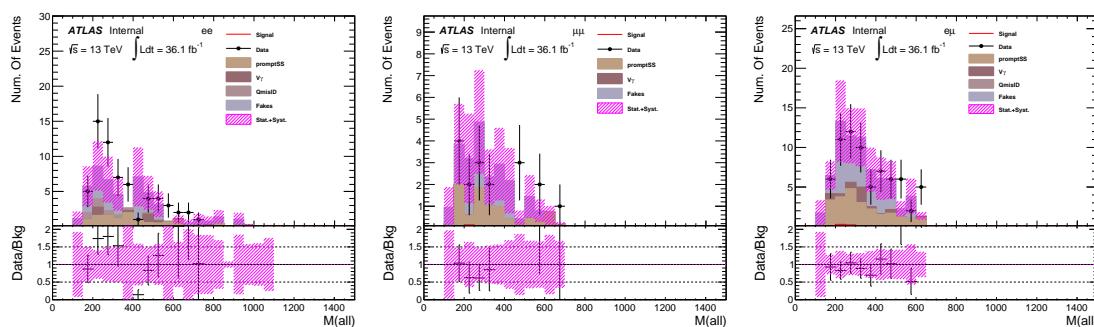
	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$110.96 \pm 4.65(\text{stat}) \pm 33.29(\text{syst})$	$37.23 \pm 6.02(\text{stat}) \pm 18.61(\text{syst})$	$39.43 \pm 0.35(\text{stat}) \pm 13.01(\text{syst})$	$145.41 \pm 8.86(\text{stat}) \pm 91.74(\text{syst})$	$333.03 \pm 11.69(\text{stat}) \pm 40.30(\text{syst1}) \pm 91.74(\text{syst2})$	371	$0.59 \pm 0.03$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$39.91 \pm 2.89(\text{stat}) \pm 11.97(\text{syst})$	$21.34 \pm 4.74(\text{stat}) \pm 10.67(\text{syst})$	$17.43 \pm 0.18(\text{stat}) \pm 5.75(\text{syst})$	$86.67 \pm 6.84(\text{stat}) \pm 54.68(\text{syst})$	$165.35 \pm 8.81(\text{stat}) \pm 17.04(\text{syst1}) \pm 54.68(\text{syst2})$	173	$0.58 \pm 0.03$
$M(\ell\ell)$	$12.41 \pm 1.74(\text{stat}) \pm 3.72(\text{syst})$	$3.34 \pm 1.26(\text{stat}) \pm 1.67(\text{syst})$	$4.78 \pm 0.06(\text{stat}) \pm 1.58(\text{syst})$	$28.20 \pm 3.90(\text{stat}) \pm 17.79(\text{syst})$	$48.72 \pm 4.45(\text{stat}) \pm 4.37(\text{syst1}) \pm 17.79(\text{syst2})$	63	$0.44 \pm 0.03$
$M(l_1 jj)$	$11.71 \pm 1.71(\text{stat}) \pm 3.51(\text{syst})$	$3.34 \pm 1.26(\text{stat}) \pm 1.67(\text{syst})$	$4.68 \pm 0.06(\text{stat}) \pm 1.55(\text{syst})$	$27.96 \pm 3.89(\text{stat}) \pm 17.64(\text{syst})$	$47.70 \pm 4.43(\text{stat}) \pm 4.19(\text{syst1}) \pm 17.64(\text{syst2})$	62	$0.44 \pm 0.02$

表 5.32  $m_X=260$  GeV ee 类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$207.37 \pm 6.74(\text{stat}) \pm 62.21(\text{syst})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$181.81 \pm 9.57(\text{stat}) \pm 117.36(\text{syst})$	$389.18 \pm 11.70(\text{stat}) \pm 62.21(\text{syst1}) \pm 117.36(\text{syst2})$	309	$1.21 \pm 0.04$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$73.92 \pm 4.34(\text{stat}) \pm 22.18(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$91.31 \pm 6.78(\text{stat}) \pm 58.94(\text{syst})$	$165.23 \pm 8.05(\text{stat}) \pm 22.18(\text{syst1}) \pm 58.94(\text{syst2})$	102	$1.07 \pm 0.04$
$M(\ell\ell)$	$10.34 \pm 1.52(\text{stat}) \pm 3.10(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$17.80 \pm 2.99(\text{stat}) \pm 1.49(\text{syst})$	$28.13 \pm 3.36(\text{stat}) \pm 3.10(\text{syst1}) \pm 1.49(\text{syst2})$	20	$0.56 \pm 0.03$
$M(l_1 jj)$	$8.79 \pm 1.47(\text{stat}) \pm 2.64(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$14.91 \pm 2.74(\text{stat}) \pm 9.63(\text{syst})$	$23.70 \pm 3.11(\text{stat}) \pm 2.64(\text{syst1}) \pm 9.63(\text{syst2})$	17	$0.54 \pm 0.03$

表 5.33  $m_X=260$  GeV  $\mu\mu$  类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$282.43 \pm 7.10(\text{stat}) \pm 84.73(\text{syst})$	$36.01 \pm 5.38(\text{stat}) \pm 18.00(\text{syst})$	$9.42 \pm 0.16(\text{stat}) \pm 3.11(\text{syst})$	$169.37 \pm 9.45(\text{stat}) \pm 78.88(\text{syst})$	$497.22 \pm 12.99(\text{stat}) \pm 86.67(\text{syst1}) \pm 78.88(\text{syst2})$	589	$1.69 \pm 0.05$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$105.47 \pm 4.54(\text{stat}) \pm 31.64(\text{syst})$	$18.73 \pm 4.47(\text{stat}) \pm 9.37(\text{syst})$	$2.02 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.67(\text{syst})$	$103.33 \pm 7.37(\text{stat}) \pm 47.60(\text{syst})$	$229.55 \pm 9.74(\text{stat}) \pm 33.00(\text{syst1}) \pm 47.60(\text{syst2})$	244	$1.53 \pm 0.05$
$M(\ell\ell)$	$29.17 \pm 2.42(\text{stat}) \pm 8.75(\text{syst})$	$5.89 \pm 1.87(\text{stat}) \pm 2.95(\text{syst})$	$0.54 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.18(\text{syst})$	$45.62 \pm 4.90(\text{stat}) \pm 20.94(\text{syst})$	$81.23 \pm 5.77(\text{stat}) \pm 9.23(\text{syst1}) \pm 20.94(\text{syst2})$	80	$1.04 \pm 0.04$
$M(l_1 jj)$	$23.61 \pm 2.14(\text{stat}) \pm 7.08(\text{syst})$	$4.87 \pm 1.66(\text{stat}) \pm 2.44(\text{syst})$	$0.46 \pm 0.01(\text{stat}) \pm 0.15(\text{syst})$	$41.89 \pm 4.69(\text{stat}) \pm 19.28(\text{syst})$	$70.84 \pm 5.42(\text{stat}) \pm 7.49(\text{syst1}) \pm 19.28(\text{syst2})$	70	$0.99 \pm 0.04$

表 5.34  $m_X=260$  GeV  $e\mu$  类别的优化结果。图 5.19  $m_X=260$  GeV 质量点经过优化筛选之后  $M(\text{all})$  分布。

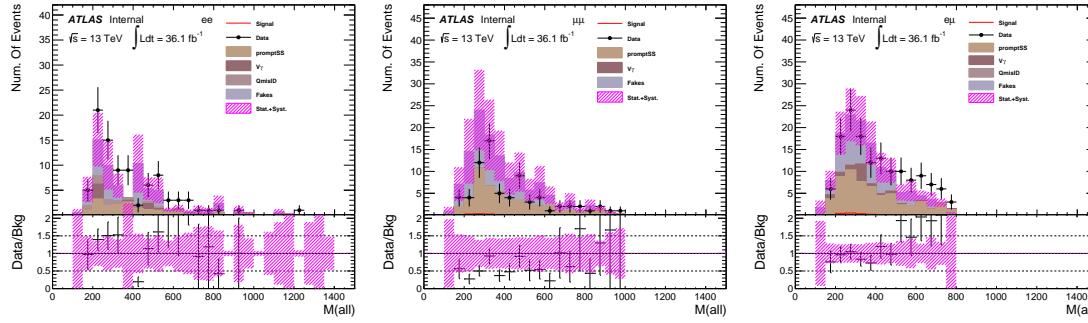
	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$102.50 \pm 4.47(\text{stat}) \pm 30.75(\text{syst})$	$33.03 \pm 5.51(\text{stat}) \pm 16.52(\text{syst})$	$35.61 \pm 0.33(\text{stat}) \pm 11.75(\text{syst})$	$128.89 \pm 8.34(\text{stat}) \pm 81.32(\text{syst})$	$300.04 \pm 10.96(\text{stat}) \pm 36.83(\text{syst1}) \pm 81.32(\text{syst2})$	343	$0.80 \pm 0.03$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$49.48 \pm 3.15(\text{stat}) \pm 14.84(\text{syst})$	$22.72 \pm 5.05(\text{stat}) \pm 11.36(\text{syst})$	$22.09 \pm 0.21(\text{stat}) \pm 7.29(\text{syst})$	$92.54 \pm 7.07(\text{stat}) \pm 58.38(\text{syst})$	$186.83 \pm 9.25(\text{stat}) \pm 20.06(\text{syst1}) \pm 58.38(\text{syst2})$	194	$0.74 \pm 0.03$
$M(\ell\ell)$	$18.49 \pm 1.92(\text{stat}) \pm 5.55(\text{syst})$	$5.31 \pm 2.21(\text{stat}) \pm 2.65(\text{syst})$	$7.27 \pm 0.08(\text{stat}) \pm 2.40(\text{syst})$	$36.86 \pm 4.46(\text{stat}) \pm 23.25(\text{syst})$	$67.93 \pm 5.34(\text{stat}) \pm 6.60(\text{syst1}) \pm 23.25(\text{syst2})$	90	$0.61 \pm 0.03$
$M(l_1 jj)$	$18.15 \pm 1.91(\text{stat}) \pm 5.44(\text{syst})$	$5.31 \pm 2.21(\text{stat}) \pm 2.65(\text{syst})$	$7.22 \pm 0.08(\text{stat}) \pm 2.38(\text{syst})$	$36.34 \pm 4.43(\text{stat}) \pm 22.93(\text{syst})$	$67.02 \pm 5.31(\text{stat}) \pm 6.51(\text{syst1}) \pm 22.93(\text{syst2})$	89	$0.61 \pm 0.03$

表 5.35  $m_X=300$  GeV ee 类别的优化结果。

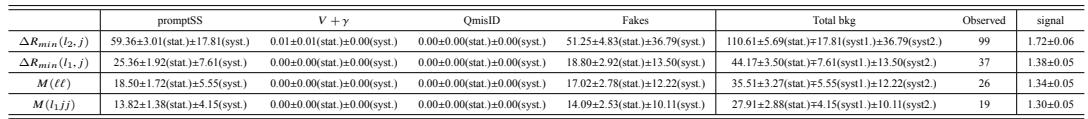
	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$169.68 \pm 6.15(\text{stat.}) \pm 50.90(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$142.15 \pm 8.46(\text{stat.}) \pm 91.75(\text{syst.})$	$311.83 \pm 10.46(\text{stat.}) \pm 50.90(\text{syst1.}) \pm 91.75(\text{syst2.})$	245	$1.80 \pm 0.06$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$97.25 \pm 4.96(\text{stat.}) \pm 29.17(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$120.11 \pm 7.77(\text{stat.}) \pm 77.53(\text{syst.})$	$217.36 \pm 9.22(\text{stat.}) \pm 29.17(\text{syst1.}) \pm 77.53(\text{syst2.})$	141	$1.66 \pm 0.06$
$M(\ell\ell)$	$50.83 \pm 3.33(\text{stat.}) \pm 15.25(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$78.24 \pm 6.28(\text{stat.}) \pm 50.51(\text{syst.})$	$129.07 \pm 7.11(\text{stat.}) \pm 15.25(\text{syst1.}) \pm 50.51(\text{syst2.})$	79	$1.47 \pm 0.05$
$M(l_1jj)$	$47.98 \pm 3.29(\text{stat.}) \pm 14.39(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$77.49 \pm 6.25(\text{stat.}) \pm 50.02(\text{syst.})$	$125.47 \pm 7.06(\text{stat.}) \pm 14.39(\text{syst1.}) \pm 50.02(\text{syst2.})$	74	$1.46 \pm 0.05$

表 5.36  $m_X=300$  GeV  $\mu\mu$  类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$285.01 \pm 7.13(\text{stat.}) \pm 85.50(\text{syst.})$	$36.28 \pm 5.39(\text{stat.}) \pm 18.14(\text{syst.})$	$9.46 \pm 0.16(\text{stat.}) \pm 3.12(\text{syst.})$	$170.21 \pm 9.47(\text{stat.}) \pm 79.34(\text{syst.})$	$500.96 \pm 13.02(\text{stat.}) \pm 87.46(\text{syst1.}) \pm 79.34(\text{syst2.})$	596	$2.64 \pm 0.07$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$182.33 \pm 5.88(\text{stat.}) \pm 54.70(\text{syst.})$	$26.12 \pm 4.79(\text{stat.}) \pm 13.06(\text{syst.})$	$3.99 \pm 0.07(\text{stat.}) \pm 1.32(\text{syst.})$	$139.61 \pm 8.57(\text{stat.}) \pm 64.37(\text{syst.})$	$352.05 \pm 11.44(\text{stat.}) \pm 56.25(\text{syst1.}) \pm 64.37(\text{syst2.})$	397	$2.57 \pm 0.07$
$M(\ell\ell)$	$68.67 \pm 3.59(\text{stat.}) \pm 20.60(\text{syst.})$	$10.73 \pm 2.76(\text{stat.}) \pm 5.36(\text{syst.})$	$1.41 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.47(\text{syst.})$	$66.72 \pm 5.92(\text{stat.}) \pm 30.48(\text{syst.})$	$147.52 \pm 7.45(\text{stat.}) \pm 21.29(\text{syst1.}) \pm 30.48(\text{syst2.})$	163	$2.05 \pm 0.06$
$M(l_1jj)$	$59.41 \pm 3.38(\text{stat.}) \pm 17.82(\text{syst.})$	$8.94 \pm 2.50(\text{stat.}) \pm 4.47(\text{syst.})$	$1.24 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.41(\text{syst.})$	$62.47 \pm 5.47(\text{stat.}) \pm 28.94(\text{syst.})$	$132.33 \pm 7.12(\text{stat.}) \pm 18.38(\text{syst1.}) \pm 28.94(\text{syst2.})$	144	$1.99 \pm 0.06$

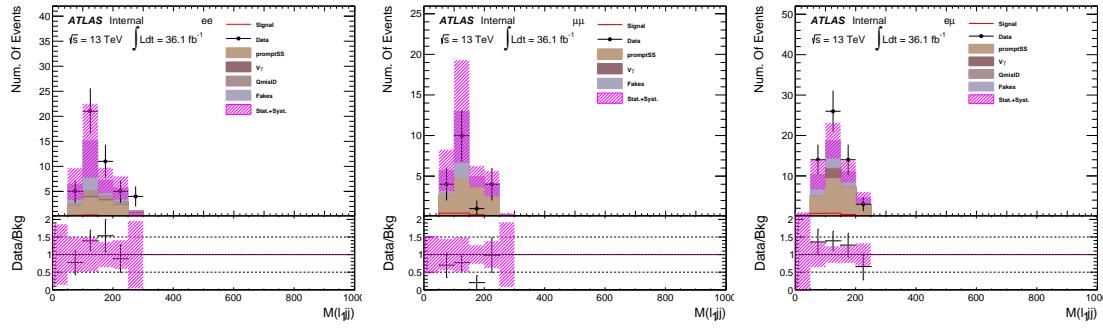
表 5.37  $m_X=300$  GeV  $e\mu$  类别的优化结果。图 5.20  $m_X=300$  GeV 质量点经过优化筛选之后  $M(\text{all})$  分布。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$52.12 \pm 3.04(\text{stat.}) \pm 15.64(\text{syst.})$	$17.85 \pm 4.08(\text{stat.}) \pm 8.93(\text{syst.})$	$17.54 \pm 0.26(\text{stat.}) \pm 5.79(\text{syst.})$	$69.22 \pm 6.15(\text{stat.}) \pm 47.89(\text{syst.})$	$156.73 \pm 7.99(\text{stat.}) \pm 18.91(\text{syst1.}) \pm 47.89(\text{syst2.})$	182	$3.33 \pm 0.08$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$20.98 \pm 1.96(\text{stat.}) \pm 6.29(\text{syst.})$	$3.51 \pm 1.10(\text{stat.}) \pm 1.76(\text{syst.})$	$6.68 \pm 0.15(\text{stat.}) \pm 2.20(\text{syst.})$	$27.96 \pm 3.91(\text{stat.}) \pm 19.35(\text{syst.})$	$59.14 \pm 4.52(\text{stat.}) \pm 6.90(\text{syst1.}) \pm 19.35(\text{syst2.})$	75	$2.34 \pm 0.07$
$M(\ell\ell)$	$16.15 \pm 1.83(\text{stat.}) \pm 4.85(\text{syst.})$	$1.25 \pm 0.42(\text{stat.}) \pm 0.63(\text{syst.})$	$4.50 \pm 0.12(\text{stat.}) \pm 1.49(\text{syst.})$	$21.82 \pm 3.46(\text{stat.}) \pm 15.09(\text{syst.})$	$43.73 \pm 3.93(\text{stat.}) \pm 5.11(\text{syst1.}) \pm 15.09(\text{syst2.})$	59	$2.27 \pm 0.07$
$M(l_1jj)$	$11.56 \pm 1.25(\text{stat.}) \pm 3.47(\text{syst.})$	$0.83 \pm 0.34(\text{stat.}) \pm 0.41(\text{syst.})$	$3.46 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 1.4(\text{syst.})$	$19.09 \pm 3.23(\text{stat.}) \pm 13.21(\text{syst.})$	$34.94 \pm 3.48(\text{stat.}) \pm 3.67(\text{syst1.}) \pm 13.21(\text{syst2.})$	46	$2.16 \pm 0.07$

表 5.38  $m_X=400$  GeV  $ee$  类别的优化结果。表 5.39  $m_X=400$  GeV  $\mu\mu$  类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$59.36 \pm 3.01(\text{stat.}) \pm 17.81(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$51.25 \pm 4.83(\text{stat.}) \pm 36.79(\text{syst.})$	$110.61 \pm 5.69(\text{stat.}) \pm 17.81(\text{syst1.}) \pm 36.79(\text{syst2.})$	99	$1.72 \pm 0.06$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$25.36 \pm 1.92(\text{stat.}) \pm 7.61(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$18.80 \pm 2.92(\text{stat.}) \pm 13.50(\text{syst.})$	$44.17 \pm 3.50(\text{stat.}) \pm 7.61(\text{syst1.}) \pm 13.50(\text{syst2.})$	37	$1.38 \pm 0.05$
$M(\ell\ell)$	$18.50 \pm 1.72(\text{stat.}) \pm 5.55(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$17.02 \pm 2.78(\text{stat.}) \pm 12.22(\text{syst.})$	$35.51 \pm 3.27(\text{stat.}) \pm 5.55(\text{syst1.}) \pm 12.22(\text{syst2.})$	26	$1.34 \pm 0.05$
$M(l_1jj)$	$13.82 \pm 1.38(\text{stat.}) \pm 4.15(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$14.09 \pm 2.53(\text{stat.}) \pm 10.11(\text{syst.})$	$27.91 \pm 2.88(\text{stat.}) \pm 4.15(\text{syst1.}) \pm 10.11(\text{syst2.})$	19	$1.30 \pm 0.05$

表 5.40  $m_X=400$  GeV  $e\mu$  类别的优化结果。

图 5.21  $m_X=400$  GeV 质量点经过优化筛选之后  $M(\ell_1jj)$  分布。

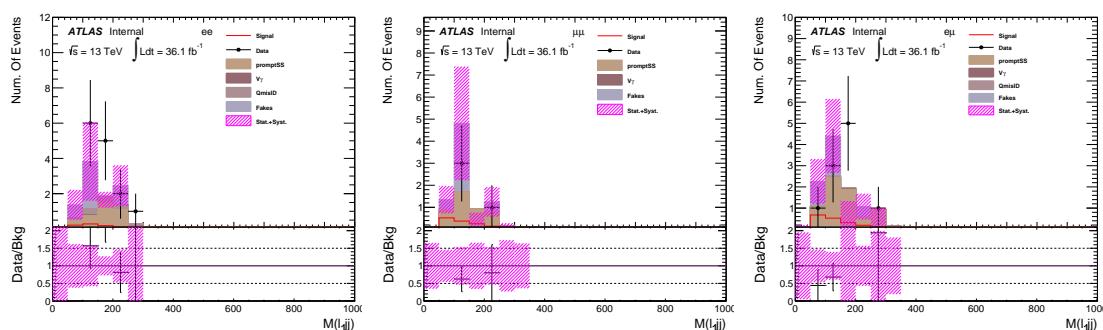
	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$36.10 \pm 2.66(\text{stat}) \pm 10.83(\text{syst})$	$12.21 \pm 3.77(\text{stat}) \pm 6.10(\text{syst})$	$11.32 \pm 0.21(\text{stat}) \pm 3.73(\text{syst})$	$49.72 \pm 5.22(\text{stat}) \pm 34.39(\text{syst})$	$109.34 \pm 6.96(\text{stat}) \pm 12.98(\text{syst1}) \pm 34.39(\text{syst2})$	117	$1.40 \pm 0.05$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$13.11 \pm 1.68(\text{stat}) \pm 3.93(\text{syst})$	$1.89 \pm 0.95(\text{stat}) \pm 0.94(\text{syst})$	$4.00 \pm 0.12(\text{stat}) \pm 1.32(\text{syst})$	$17.81 \pm 1.32(\text{stat}) \pm 12.32(\text{syst})$	$36.81 \pm 3.67(\text{stat}) \pm 4.26(\text{syst1}) \pm 12.32(\text{syst2})$	47	$1.13 \pm 0.04$
$M(\ell\ell)$	$5.40 \pm 0.79(\text{stat}) \pm 1.62(\text{syst})$	$0.36 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.18(\text{syst})$	$1.59 \pm 0.08(\text{stat}) \pm 0.53(\text{syst})$	$6.65 \pm 1.91(\text{stat}) \pm 4.60(\text{syst})$	$14.01 \pm 2.08(\text{stat}) \pm 1.71(\text{syst1}) \pm 4.60(\text{syst2})$	21	$0.90 \pm 0.04$
$M(l_1jj)$	$3.92 \pm 0.70(\text{stat}) \pm 1.17(\text{syst})$	$0.12 \pm 0.05(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst})$	$1.24 \pm 0.07(\text{stat}) \pm 0.41(\text{syst})$	$4.03 \pm 1.48(\text{stat}) \pm 2.79(\text{syst})$	$9.31 \pm 1.64(\text{stat}) \pm 1.25(\text{syst1}) \pm 2.79(\text{syst2})$	14	$0.85 \pm 0.04$

表 5.41  $m_X=500$  GeV ee 类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$47.41 \pm 2.70(\text{stat}) \pm 14.22(\text{syst})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$37.76 \pm 4.14(\text{stat}) \pm 27.11(\text{syst})$	$85.17 \pm 4.96(\text{stat}) \pm 14.22(\text{syst1}) \pm 27.11(\text{syst2})$	72	$2.29 \pm 0.06$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$9.52 \pm 1.17(\text{stat}) \pm 2.86(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$5.59 \pm 1.59(\text{stat}) \pm 4.01(\text{syst})$	$15.11 \pm 1.98(\text{stat}) \pm 2.86(\text{syst1}) \pm 4.01(\text{syst2})$	10	$1.50 \pm 0.04$
$M(\ell\ell)$	$6.21 \pm 0.97(\text{stat}) \pm 1.86(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$4.01 \pm 1.35(\text{stat}) \pm 2.88(\text{syst})$	$10.22 \pm 1.66(\text{stat}) \pm 1.86(\text{syst1}) \pm 2.88(\text{syst2})$	4	$1.43 \pm 0.04$
$M(l_1jj)$	$4.50 \pm 0.74(\text{stat}) \pm 1.35(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat}) \pm 0.00(\text{syst})$	$3.56 \pm 1.27(\text{stat}) \pm 2.55(\text{syst})$	$8.05 \pm 1.47(\text{stat}) \pm 1.35(\text{syst1}) \pm 2.55(\text{syst2})$	4	$1.40 \pm 0.04$

表 5.42  $m_X=500$  GeV  $\mu\mu$  类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$71.26 \pm 3.23(\text{stat}) \pm 21.38(\text{syst})$	$12.92 \pm 3.94(\text{stat}) \pm 6.46(\text{syst})$	$2.74 \pm 0.10(\text{stat}) \pm 0.90(\text{syst})$	$40.57 \pm 4.57(\text{stat}) \pm 20.90(\text{syst})$	$127.48 \pm 6.85(\text{stat}) \pm 22.35(\text{syst1}) \pm 20.90(\text{syst2})$	152	$3.41 \pm 0.07$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$15.07 \pm 1.61(\text{stat}) \pm 4.52(\text{syst})$	$0.63 \pm 0.23(\text{stat}) \pm 0.31(\text{syst})$	$0.53 \pm 0.05(\text{stat}) \pm 0.18(\text{syst})$	$6.42 \pm 1.86(\text{stat}) \pm 4.17(\text{syst})$	$22.64 \pm 2.47(\text{stat}) \pm 4.53(\text{syst1}) \pm 4.17(\text{syst2})$	30	$2.19 \pm 0.06$
$M(\ell\ell)$	$8.61 \pm 1.15(\text{stat}) \pm 2.58(\text{syst})$	$0.03 \pm 0.03(\text{stat}) \pm 0.02(\text{syst})$	$0.27 \pm 0.03(\text{stat}) \pm 0.09(\text{syst})$	$2.10 \pm 1.04(\text{stat}) \pm 1.10(\text{syst})$	$11.01 \pm 1.55(\text{stat}) \pm 2.59(\text{syst1}) \pm 1.10(\text{syst2})$	13	$1.94 \pm 0.05$
$M(l_1jj)$	$7.07 \pm 1.04(\text{stat}) \pm 2.12(\text{syst})$	$0.03 \pm 0.03(\text{stat}) \pm 0.01(\text{syst})$	$0.21 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.07(\text{syst})$	$1.70 \pm 0.93(\text{stat}) \pm 0.86(\text{syst})$	$9.01 \pm 1.40(\text{stat}) \pm 2.12(\text{syst1}) \pm 0.86(\text{syst2})$	10	$1.91 \pm 0.05$

表 5.43  $m_X=500$  GeV  $e\mu$  类别的优化结果。图 5.22  $m_X=500$  GeV 质量点经过优化筛选之后  $M(\ell_1jj)$  分布。

### 5.5.3.2 SS 搜索筛选结果

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	177.91 $\pm$ 6.06(stat.) $\pm$ 53.37(syst.)	84.84 $\pm$ 11.72(stat.) $\pm$ 42.42(syst.)	81.84 $\pm$ 0.54(stat.) $\pm$ 27.01(syst.)	257.46 $\pm$ 11.79(stat.) $\pm$ 162.43(syst.)	602.05 $\pm$ 17.70(stat.) $\pm$ 73.33(syst1.) $\pm$ 162.43(syst2.)
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	84.62 $\pm$ 3.98(stat.) $\pm$ 25.39(syst.)	29.21 $\pm$ 5.40(stat.) $\pm$ 14.60(syst.)	29.29 $\pm$ 0.30(stat.) $\pm$ 9.67(syst.)	102.28 $\pm$ 7.43(stat.) $\pm$ 64.53(syst.)	245.41 $\pm$ 10.02(stat.) $\pm$ 30.84(syst1.) $\pm$ 64.53(syst2.)
$M(\ell\ell)$	29.09 $\pm$ 2.45(stat.) $\pm$ 8.73(syst.)	18.51 $\pm$ 4.62(stat.) $\pm$ 9.25(syst.)	12.04 $\pm$ 0.15(stat.) $\pm$ 3.97(syst.)	58.21 $\pm$ 5.61(stat.) $\pm$ 36.73(syst.)	117.84 $\pm$ 7.67(stat.) $\pm$ 13.32(syst1.) $\pm$ 36.73(syst2.)
$M(l_1jj)$	10.16 $\pm$ 1.50(stat.) $\pm$ 3.05(syst.)	3.34 $\pm$ 1.26(stat.) $\pm$ 1.67(syst.)	3.77 $\pm$ 0.06(stat.) $\pm$ 1.24(syst.)	20.43 $\pm$ 3.32(stat.) $\pm$ 12.89(syst.)	37.69 $\pm$ 3.86(stat.) $\pm$ 3.69(syst1.) $\pm$ 12.89(syst2.)
	X280, S135	X300, S135	X320, S135	Observed	
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	3.04 $\pm$ 0.21	3.54 $\pm$ 0.19	4.09 $\pm$ 0.22	647	
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	2.48 $\pm$ 0.19	2.92 $\pm$ 0.18	3.40 $\pm$ 0.20	284	
$M(\ell\ell)$	2.38 $\pm$ 0.18	2.61 $\pm$ 0.17	2.70 $\pm$ 0.18	128	
$M(l_1jj)$	1.86 $\pm$ 0.16	2.10 $\pm$ 0.15	2.04 $\pm$ 0.16	50	

表 5.44  $m_X=280$  GeV,  $m_X=300$  GeV and  $m_X=320$  GeV(fixing  $m_S=135$  GeV)  $ee$  类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	229.53 $\pm$ 6.81(stat.) $\pm$ 68.86(syst.)	0.01 $\pm$ 0.01(stat.) $\pm$ 0.00(syst.)	0.00 $\pm$ 0.00(stat.) $\pm$ 0.00(syst.)	188.45 $\pm$ 9.74(stat.) $\pm$ 121.65(syst.)	417.99 $\pm$ 11.88(stat.) $\pm$ 68.86(syst1.) $\pm$ 121.65(syst2.)
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	137.67 $\pm$ 5.13(stat.) $\pm$ 41.30(syst.)	0.01 $\pm$ 0.01(stat.) $\pm$ 0.00(syst.)	0.00 $\pm$ 0.00(stat.) $\pm$ 0.00(syst.)	121.81 $\pm$ 7.83(stat.) $\pm$ 78.63(syst.)	259.49 $\pm$ 9.36(stat.) $\pm$ 41.30(syst1.) $\pm$ 78.63(syst2.)
$M(\ell\ell)$	65.75 $\pm$ 3.73(stat.) $\pm$ 19.73(syst.)	0.00 $\pm$ 0.00(stat.) $\pm$ 0.00(syst.)	0.00 $\pm$ 0.00(stat.) $\pm$ 0.00(syst.)	87.44 $\pm$ 6.63(stat.) $\pm$ 56.44(syst.)	153.19 $\pm$ 7.61(stat.) $\pm$ 19.73(syst1.) $\pm$ 56.44(syst2.)
$M(l_1jj)$	21.62 $\pm$ 2.05(stat.) $\pm$ 6.49(syst.)	0.00 $\pm$ 0.00(stat.) $\pm$ 0.00(syst.)	0.00 $\pm$ 0.00(stat.) $\pm$ 0.00(syst.)	43.90 $\pm$ 4.70(stat.) $\pm$ 28.34(syst.)	65.52 $\pm$ 5.13(stat.) $\pm$ 6.49(syst1.) $\pm$ 28.34(syst2.)
	X280, S135	X300, S135	X320, S135	Observed	
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	6.37 $\pm$ 0.27	7.13 $\pm$ 0.29	7.74 $\pm$ 0.31	355	
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	5.71 $\pm$ 0.26	6.23 $\pm$ 0.28	6.82 $\pm$ 0.29	210	
$M(\ell\ell)$	5.51 $\pm$ 0.26	5.51 $\pm$ 0.26	5.43 $\pm$ 0.26	104	
$M(l_1jj)$	4.43 $\pm$ 0.24	4.31 $\pm$ 0.22	3.96 $\pm$ 0.23	46	

表 5.45  $m_X=280$  GeV,  $m_X=300$  GeV and  $m_X=320$  GeV(fixing  $m_S=135$  GeV)  $\mu\mu$  类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	305.75 $\pm$ 7.53(stat.) $\pm$ 91.72(syst.)	47.54 $\pm$ 6.37(stat.) $\pm$ 23.77(syst.)	10.98 $\pm$ 0.19(stat.) $\pm$ 3.62(syst.)	174.03 $\pm$ 9.56(stat.) $\pm$ 79.98(syst.)	538.30 $\pm$ 13.74(stat.) $\pm$ 94.82(syst1.) $\pm$ 79.98(syst2.)
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	155.59 $\pm$ 5.15(stat.) $\pm$ 46.68(syst.)	19.51 $\pm$ 4.02(stat.) $\pm$ 9.76(syst.)	5.65 $\pm$ 0.13(stat.) $\pm$ 1.87(syst.)	92.23 $\pm$ 6.96(stat.) $\pm$ 42.10(syst.)	272.99 $\pm$ 9.54(stat.) $\pm$ 47.72(syst1.) $\pm$ 42.10(syst2.)
$M(\ell\ell)$	69.36 $\pm$ 3.51(stat.) $\pm$ 20.81(syst.)	12.81 $\pm$ 3.74(stat.) $\pm$ 6.41(syst.)	1.40 $\pm$ 0.04(stat.) $\pm$ 0.46(syst.)	66.56 $\pm$ 5.91(stat.) $\pm$ 30.43(syst.)	150.14 $\pm$ 7.83(stat.) $\pm$ 21.78(syst1.) $\pm$ 30.43(syst2.)
$M(l_1jj)$	25.91 $\pm$ 2.24(stat.) $\pm$ 7.77(syst.)	4.70 $\pm$ 1.66(stat.) $\pm$ 2.35(syst.)	0.49 $\pm$ 0.02(stat.) $\pm$ 0.16(syst.)	39.17 $\pm$ 4.54(stat.) $\pm$ 18.25(syst.)	70.27 $\pm$ 5.33(stat.) $\pm$ 8.12(syst1.) $\pm$ 18.25(syst2.)
	X280, S135	X300, S135	X320, S135	Observed	
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	8.34 $\pm$ 0.33	9.25 $\pm$ 0.33	10.86 $\pm$ 0.40	649	
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	6.87 $\pm$ 0.29	7.74 $\pm$ 0.31	8.98 $\pm$ 0.37	302	
$M(\ell\ell)$	6.52 $\pm$ 0.28	6.87 $\pm$ 0.29	7.18 $\pm$ 0.32	155	
$M(l_1jj)$	5.15 $\pm$ 0.23	5.46 $\pm$ 0.26	5.37 $\pm$ 0.28	62	

表 5.46  $m_X=280$  GeV,  $m_X=300$  GeV and  $m_X=320$  GeV(fixing  $m_S=135$  GeV)  $e\mu$  类别的优化结果。

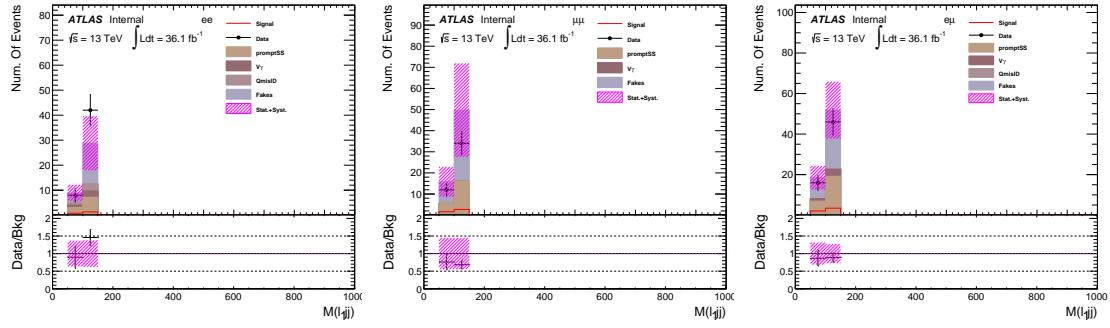


图 5.23 经过 SS 低质量点优化筛选条件的  $M(l_1jj)$  分布, 图中展示的信号是  $m_X=300$  GeV,  $m_S=135$  GeV。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$67.65 \pm 3.53 (\text{stat.}) \pm 20.30 (\text{syst.})$	$20.22 \pm 4.14 (\text{stat.}) \pm 10.11 (\text{syst.})$	$23.49 \pm 0.31 (\text{stat.}) \pm 7.75 (\text{syst.})$	$84.19 \pm 6.79 (\text{stat.}) \pm 58.24 (\text{syst.})$	$195.54 \pm 8.70 (\text{stat.}) \pm 23.96 (\text{syst.1}) \pm 58.24 (\text{syst.2})$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$39.86 \pm 2.57 (\text{stat.}) \pm 11.96 (\text{syst.})$	$10.52 \pm 2.58 (\text{stat.}) \pm 5.26 (\text{syst.})$	$13.01 \pm 0.21 (\text{stat.}) \pm 4.29 (\text{syst.})$	$43.87 \pm 4.90 (\text{stat.}) \pm 30.35 (\text{syst.})$	$107.26 \pm 6.11 (\text{stat.}) \pm 13.75 (\text{syst.1}) \pm 30.35 (\text{syst.2})$
$M(\ell\ell)$	$22.40 \pm 2.12 (\text{stat.}) \pm 6.72 (\text{syst.})$	$7.57 \pm 2.41 (\text{stat.}) \pm 3.79 (\text{syst.})$	$8.57 \pm 0.15 (\text{stat.}) \pm 2.83 (\text{syst.})$	$35.70 \pm 4.42 (\text{stat.}) \pm 24.70 (\text{syst.})$	$74.24 \pm 5.47 (\text{stat.}) \pm 8.21 (\text{syst.1}) \pm 24.70 (\text{syst.2})$
$M(l_1jj)$	$11.57 \pm 1.34 (\text{stat.}) \pm 3.47 (\text{syst.})$	$3.51 \pm 1.21 (\text{stat.}) \pm 1.75 (\text{syst.})$	$4.22 \pm 0.08 (\text{stat.}) \pm 1.39 (\text{syst.})$	$24.59 \pm 3.67 (\text{stat.}) \pm 17.01 (\text{syst.})$	$43.89 \pm 4.09 (\text{stat.}) \pm 4.13 (\text{syst.1}) \pm 17.01 (\text{syst.2})$
	X340, S135	X340, S145	X340, S155	X340, S165	Observed
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$2.95 \pm 0.52$	$9.19 \pm 0.52$	$17.48 \pm 0.94$	$29.64 \pm 1.58$	
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$2.56 \pm 0.19$	$8.26 \pm 0.50$	$15.41 \pm 0.86$	$27.84 \pm 1.51$	
$M(\ell\ell)$	$2.38 \pm 0.19$	$7.83 \pm 0.49$	$15.31 \pm 0.85$	$27.84 \pm 1.51$	
$M(l_1jj)$	$2.22 \pm 0.18$	$7.15 \pm 0.47$	$13.95 \pm 0.82$	$25.66 \pm 1.44$	

表 5.47  $m_S=135$  GeV,  $m_S=145$  GeV,  $m_S=155$  GeV and  $m_S=165$  GeV(fixing  $m_X=340$  GeV)  $ee$  类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$116.18 \pm 4.57 (\text{stat.}) \pm 34.85 (\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01 (\text{stat.}) \pm 0.00 (\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00 (\text{stat.}) \pm 0.00 (\text{syst.})$	$102.27 \pm 8.82 (\text{stat.}) \pm 73.42 (\text{syst.})$	$218.45 \pm 8.21 (\text{stat.}) \pm 34.85 (\text{syst.1}) \pm 73.42 (\text{syst.2})$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$72.61 \pm 3.46 (\text{stat.}) \pm 21.78 (\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01 (\text{stat.}) \pm 0.00 (\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00 (\text{stat.}) \pm 0.00 (\text{syst.})$	$64.78 \pm 5.43 (\text{stat.}) \pm 46.50 (\text{syst.})$	$137.39 \pm 6.44 (\text{stat.}) \pm 21.78 (\text{syst.1}) \pm 46.50 (\text{syst.2})$
$M(\ell\ell)$	$39.34 \pm 2.56 (\text{stat.}) \pm 11.80 (\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01 (\text{stat.}) \pm 0.00 (\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00 (\text{stat.}) \pm 0.00 (\text{syst.})$	$55.61 \pm 5.03 (\text{stat.}) \pm 39.92 (\text{syst.})$	$94.96 \pm 5.64 (\text{stat.}) \pm 11.80 (\text{syst.1}) \pm 39.92 (\text{syst.2})$
$M(l_1jj)$	$22.92 \pm 1.79 (\text{stat.}) \pm 6.88 (\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00 (\text{stat.}) \pm 0.00 (\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00 (\text{stat.}) \pm 0.00 (\text{syst.})$	$39.33 \pm 4.23 (\text{stat.}) \pm 28.24 (\text{syst.})$	$62.25 \pm 4.59 (\text{stat.}) \pm 6.88 (\text{syst.1}) \pm 28.24 (\text{syst.2})$
	X340, S135	X340, S145	X340, S155	X340, S165	Observed
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$5.92 \pm 0.26$	$19.02 \pm 0.83$	$38.96 \pm 1.50$	$64.54 \pm 2.19$	172
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$5.39 \pm 0.25$	$17.52 \pm 0.81$	$36.36 \pm 1.47$	$61.47 \pm 2.14$	113
$M(\ell\ell)$	$4.89 \pm 0.24$	$16.51 \pm 0.79$	$35.05 \pm 1.44$	$61.31 \pm 2.14$	66
$M(l_1jj)$	$4.34 \pm 0.23$	$14.90 \pm 0.75$	$32.26 \pm 1.39$	$56.55 \pm 2.06$	38

表 5.48  $m_S=135$  GeV,  $m_S=145$  GeV,  $m_S=155$  GeV and  $m_S=165$  GeV(fixing  $m_X=340$  GeV)  $\mu\mu$  类别的优化结果。

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$158.05 \pm 5.26 (\text{stat.}) \pm 47.42 (\text{syst.})$	$24.53 \pm 4.99 (\text{stat.}) \pm 12.26 (\text{syst.})$	$5.42 \pm 0.13 (\text{stat.}) \pm 1.79 (\text{syst.})$	$79.82 \pm 6.56 (\text{stat.}) \pm 39.91 (\text{syst.})$	$267.81 \pm 9.65 (\text{stat.}) \pm 49.01 (\text{syst.1}) \pm 39.91 (\text{syst.2})$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$93.10 \pm 4.03 (\text{stat.}) \pm 27.93 (\text{syst.})$	$13.51 \pm 3.65 (\text{stat.}) \pm 6.76 (\text{syst.})$	$3.28 \pm 0.10 (\text{stat.}) \pm 1.08 (\text{syst.})$	$49.78 \pm 5.03 (\text{stat.}) \pm 25.05 (\text{syst.})$	$159.67 \pm 7.41 (\text{stat.}) \pm 28.76 (\text{syst.1}) \pm 25.05 (\text{syst.2})$
$M(\ell\ell)$	$65.27 \pm 3.46 (\text{stat.}) \pm 19.58 (\text{syst.})$	$10.94 \pm 3.53 (\text{stat.}) \pm 5.47 (\text{syst.})$	$1.47 \pm 0.04 (\text{stat.}) \pm 0.49 (\text{syst.})$	$42.40 \pm 4.64 (\text{stat.}) \pm 21.29 (\text{syst.})$	$120.08 \pm 6.78 (\text{stat.}) \pm 20.34 (\text{syst.1}) \pm 21.29 (\text{syst.2})$
$M(l_1jj)$	$23.53 \pm 2.01 (\text{stat.}) \pm 7.06 (\text{syst.})$	$3.53 \pm 1.29 (\text{stat.}) \pm 1.76 (\text{syst.})$	$0.52 \pm 0.02 (\text{stat.}) \pm 0.17 (\text{syst.})$	$25.49 \pm 3.64 (\text{stat.}) \pm 13.58 (\text{syst.})$	$53.07 \pm 4.36 (\text{stat.}) \pm 7.28 (\text{syst.1}) \pm 13.58 (\text{syst.2})$
	X340, S135	X340, S145	X340, S155	X340, S165	Observed
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$8.50 \pm 0.34$	$24.75 \pm 0.83$	$49.33 \pm 1.64$	$85.30 \pm 2.45$	308
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$7.51 \pm 0.31$	$21.64 \pm 0.78$	$43.74 \pm 1.54$	$79.38 \pm 2.37$	179
$M(\ell\ell)$	$7.41 \pm 0.31$	$21.53 \pm 0.78$	$43.57 \pm 1.54$	$79.38 \pm 2.37$	131
$M(l_1jj)$	$5.58 \pm 0.27$	$16.64 \pm 0.68$	$35.70 \pm 1.41$	$69.41 \pm 2.23$	64

表 5.49  $m_S=135$  GeV,  $m_S=145$  GeV,  $m_S=155$  GeV and  $m_S=165$  GeV(fixing  $m_X=340$  GeV)  $e\mu$  类别的优化结果。

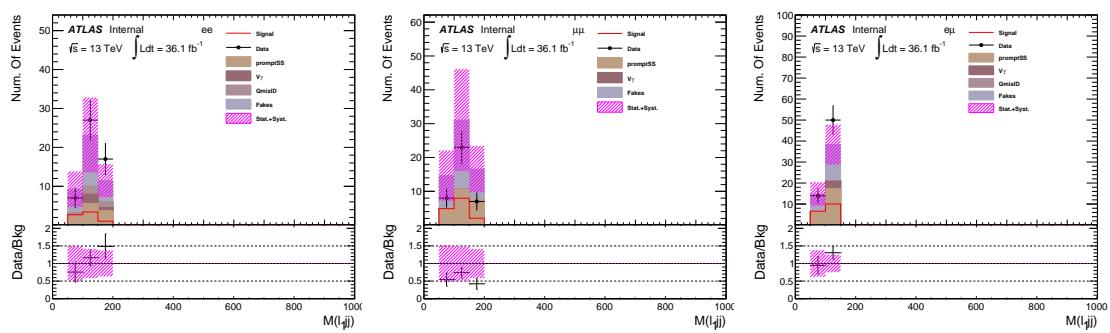


图 5.24 经过 SS 高质量点优化筛选条件的  $M(\ell_1jj)$  分布，图中展示的信号是  $m_X=340$  GeV,  $m_S=145$  GeV。

## 5.6 系统误差

### 5.6.1 对撞亮度

2015 年和 2016 年的联合亮度的不确定性为 2.1%，将应用到信号样本和 promptSS 本底上。亮度误差估计利用与文献 [153] 类似的方法得出，来自于 2015 年 8 月和 2016 年 5 月进行的 xy 束流分离扫描对亮度的初步校准结果。

### 5.6.2 信号模型

- 标准模型希格斯对的信号样本的理论误差依据推荐 [154] 是  $^{+4.3}_{-6.0}(\text{scale})^{+5.0}_{-5.0}(\text{Th.})^{+2.1}_{-2.1}(\text{PDF})^{+2.3}_{-2.3}(\alpha_S)\%$ 。
- 共振态希格斯对信号样本利用 CT10 PDF (具有 26 个相互独立参数) 产生，其来源于 PDF 的误差通过 LHAPDF6 [155] 估计，每个产生的事例会根据 PDF 参数变动被重新赋予权重：

$$w_i = \frac{x_1 f_{1i}(x_1; Q) x_2 f_{2i}(x_2; Q)}{x_1 f_{10}(x_1; Q) x_2 f_{20}(x_2; Q)} (i = 1, 2, \dots, 52), \quad (5.9)$$

其中“1”和“2”表示硬散射过程中的两个入射部分子，“0”是 PDF 的最佳拟合值，即基准值，而  $i$  对应 PDF 参数的一次向上或向下变动。每项 PDF 参数变动之后的事例数与使用基准值的事例数差别作为单项误差，而总的 PDF 误差取它们的平方和。对于  $SS$  样本，PDF 误差则是 NNPDF23 中的 100 项参数变动带来的误差的平方和，结果大约为 6%。

- QCD 重整化和因子化参数同时或者单独加倍（或者减半），然后计算相应变动之后的事例数，最终把与基准值差别最大的一次作为系统误差，对于  $hh$  ( $SS$ ) 可达到 10% (4%)。

• 部分子簇射产生子的选择可影响信号的接收效率。对于  $hh$  信号，使用 Pythia 8 作为部分子簇射产生子的信号样本被产生，而后比较其与使用 Herwig++ 的基准信号接收效率的差别，此差别将作为部分子簇射产生模型的系统误差，随着  $m_X$  的增大，其值从 40% 到 10%；而对于  $SS$ ，Pythia 8 内部的所有部分子簇射模型参数变动带来的差别的平方和将作为此项误差，其值大概为 10%。

所有的信号样本的理论误差总结在表 5.50 和表 5.51 中。

### 5.6.3 data-driven 本底

QmisID 和 fakes 本底的误差如章节 5.4 所示，值得指出的是 QmisID 的系统误差对其本身和 fakes 上具有相反的影响。

$hh$	SM Higgs pair				$m_X=260$ GeV				$m_X=300$ GeV				$m_X=400$ GeV				$m_X=500$ GeV				
	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$
PDF	4.01	4.07	4.09	3.88	3.80	3.92	3.87	3.78	3.86	3.85	3.75	3.83	3.98	3.94	3.95						
PS	13.24	18.18	10.00	26.58	42.65	19.28	30.72	31.65	18.96	22.02	24.48	33.14	1.64	16.59	12.76						
Scale	1.39	1.15	6.96	5.78	3.97	0.06	0.13	4.85	0.02	9.86	0.09	3.07	3.91	0.98	1.05						

表 5.50  $X \rightarrow hh$  理论误差。

$hh$	$m_X=280$ GeV, $m_S=135$ GeV	$m_X=300$ GeV, $m_S=135$ GeV	$m_X=320$ GeV, $m_S=135$ GeV	$m_X=340$ GeV, $m_S=135$ GeV	$m_X=340$ GeV, $m_S=145$ GeV	$m_X=340$ GeV, $m_S=155$ GeV	$m_X=340$ GeV, $m_S=165$ GeV														
	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$	$ee$	$\mu\mu$	$e\mu$
PDF	5.75	5.79	5.80	5.86	5.87	5.86	5.98	6.06	6.06	6.07	6.37	6.22	6.06	6.14	6.10	6.05	6.22	6.25	6.10	6.18	6.14
PS	4.97	6.50	6.95	5.97	8.12	2.86	3.90	10.69	7.44	8.65	6.16	5.83	10.15	6.24	6.51	7.41	7.32	9.18	9.29	8.74	7.85
Scale	0.55	2.22	3.90	0.55	2.22	3.90	0.55	2.22	3.90	0.36	3.32	1.16	0.36	3.32	1.16	0.36	3.32	1.16	0.36	3.32	1.16

表 5.51  $X \rightarrow SS$  理论误差。

### 5.6.4 MC 本底预期截面

$\text{promptSS}$  和  $V\gamma$  本底利用 MC 估计，其中主要部分是  $WZ$  (70%)，根据三轻子分析道的估计， $WZ$  的截面误差为 25%。 $W^\pm W^\pm$  本底在  $\text{promptSS}$  占据大约 10%，其误差假设为 50%。剩下的  $V\gamma$ ,  $tV$ ,  $t\bar{t}V$  和  $t\bar{t}h$  的预期截面误差均假设为 50%，为了支持 50% 是一个足够保守的估计，可参见标准模型截面测量实验， $tZ$  和  $ttW$  ( $ttZ$ ) 的截面测量误差分别为 15% [156] 和 53.3% (33%) [157]。

### 5.6.5 实验相关

实验相关误差主要有以下几项：

- 影响信号运动学分布的系统误差
  - 电子沉积能量测量和分辨率
  - 受低动量径迹影响的  $E_T^{\text{miss}}$  重建误差
  - 喷注能量测量及分辨误差
- 末态粒子重建及选择带来的效率修正误差
  - 轻子重建，鉴别以及孤立效率
  - Pile-up reweighting
  - JVT event weight
  - $b$ -tagging 效率

信号 MC,  $\text{promptSS}$  和  $V\gamma$  同时考虑了这些误差，但在实际操作中，每个分析道每个信号区各自舍弃掉整体影响低于 0.5% 的系统误差。作为一个例子，表 5.52 总结了在  $hh$  搜寻中  $e\mu$  分析道的系统误差大小。

Uncertainty source	Non-resonant $hh$	PromptSS	$V\gamma$	Fakes	QmisID
Luminosity	$\pm 2.1$	$\pm 2.1$	$\pm 2.1$	$\mp 2.1$	
PDF	$\pm 2.1$				
Scale	$+4.3/-6.0$				
Top mass	$\pm 5.0$				
$\alpha_S$	$\pm 2.3$				
$WZ$ cross-section		$\pm 12.5$		$\mp 19.8$	
$ssWW$ cross-section		$\pm 8.3$		$\mp 6.1$	
$ttV$ cross-section		$\pm 8.1$			
$tV$ cross-section		$\pm 1.2$			
$ttH$ cross-section		$\pm 1.9$			
$V\gamma$ cross-section			$\pm 50$		
Pile-up reweighting	$\pm 3.63$	$\pm 2.24$	$\pm 20.48$		
b-tagging	$\pm 2.63$	$\pm 2.8$			
JVT	$\pm 0.78$	$\pm 0.61$	$\pm 0.6$		
lepton ID	$\pm 1.1$	$\pm 1.2$	$\pm 1.0$		
JES/JER	$\pm 4.0$	$\pm 14.7$	$\pm 98$		
MET	$\pm 0.8$	$\pm 1.24$			
QmisID				$\mp 16.1$	$\pm 30$

表 5.52 对应 non-resonant  $hh e\mu$  搜索的系统误差 (%) 总结。

## 5.7 2LSS 统计结果

在此搜寻中，没有发现明显超出，所以依据章节5.4所述模型，利用  $CL_s$  方法 [158] 设置产生截面上限。在 95% 置信度下，标准模型希格斯粒子对 ( $pp \rightarrow hh$ ) 观测（期望）产生截面上限为 5.6 pb (4.8 pb)，即 168 倍 (145 倍) 标准模型预测值。

在 95% 置信度下，共振态希格斯粒子对 ( $pp \rightarrow X \rightarrow hh$ ) 的产生截面上限如表5.53所示，对应图5.25。 $X \rightarrow hh$  的产生截面上限随着  $m_X$  增加而减小，观测（期望）值从 32 pb (37 pb) 到 3.0 pb (3.4 pb)。

在 95% 置信度下， $SS$  ( $pp \rightarrow X \rightarrow SS$ ) 随  $m_S$  或  $m_X$  变化的产生截面上限如表5.54和图5.26所示。其上限值基本随着质量增加而减小，对于  $m_S = 135$  GeV

( $280 \text{ GeV} \leq m_X \leq 320 \text{ GeV}$ ), 观测 (期望) 值在  $4.6 \text{ pb}$  ( $5.7 \text{ pb}$ ) 与  $4.9 \text{ pb}$  ( $6.1 \text{ pb}$ ) 之间; 对于  $m_X = 340 \text{ GeV}$  ( $135 \text{ GeV} \leq m_S \leq 165 \text{ GeV}$ ), 观测 (期望) 值在  $5.0 \text{ pb}$  ( $4.9 \text{ pb}$ ) 与  $0.38 \text{ pb}$  ( $0.37 \text{ pb}$ ) 之间。

	SM Higgs pair	260 GeV	300 GeV	400 GeV	500 GeV
Median	144.96	36.96	30.06	12.09	3.37
Observed	168.01	31.53	26.85	11.72	3.04
$+2\sigma$	292.48	87.71	66.75	29.44	7.18
$+1\sigma$	206.69	56.13	44.18	18.33	4.89
$-1\sigma$	104.45	26.63	21.66	8.71	2.43
$-2\sigma$	77.80	19.84	16.14	6.49	1.81

表 5.53 95% 置信度下  $X \rightarrow hh$  产生截面上限, SM  $hh$  列对应  $\sigma/\sigma_{SM}$ , 其余列对应  $\sigma(\text{pb})$ 。

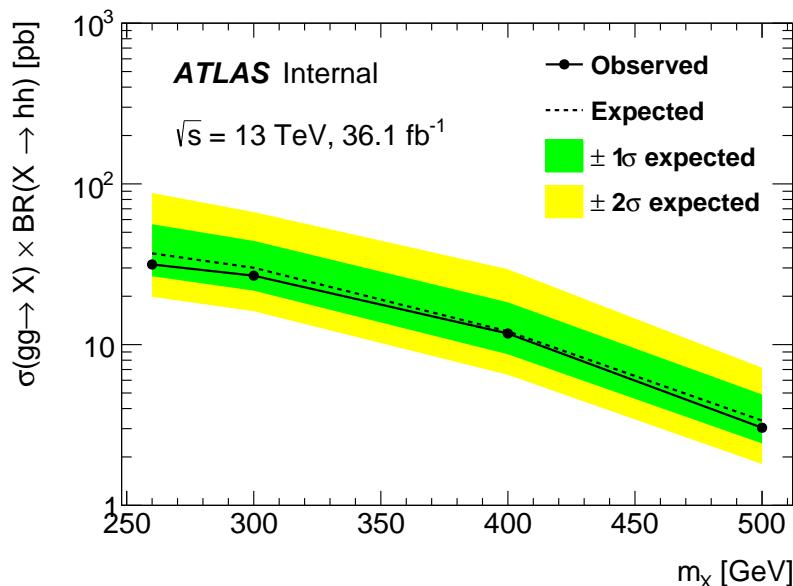
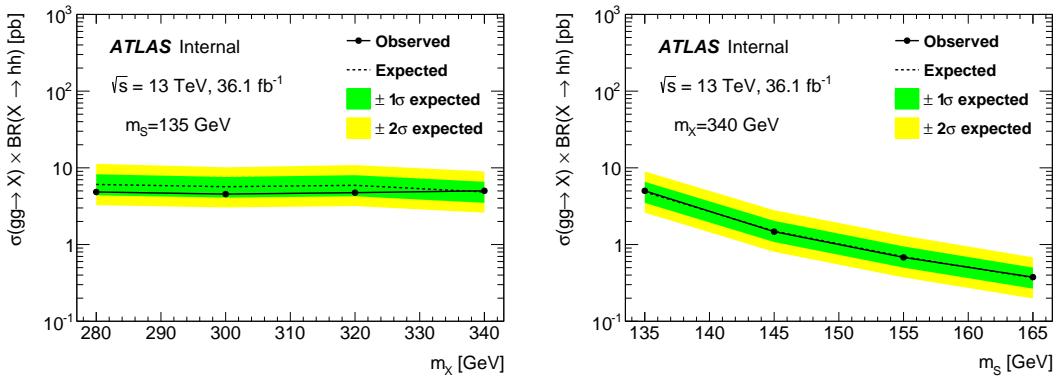


图 5.25  $pp \rightarrow X \rightarrow hh$  产生截面上限随  $m_X$  分布。

	X280, S135	X300, S135	X320, S135	X340, S135	X340, S145	X340, S155	X340, S165
Median	6.07	5.68	5.91	4.85	1.50	0.69	0.37
Observed	4.85	4.55	4.75	5.02	1.47	0.68	0.38
+2 $\sigma$	11.28	10.15	10.86	8.98	2.80	1.31	0.68
+1 $\sigma$	8.24	7.60	8.01	6.58	2.03	0.95	0.50
-1 $\sigma$	4.38	4.09	4.26	3.50	1.08	0.50	0.27
-2 $\sigma$	3.26	3.05	3.17	2.60	0.80	0.37	0.20

表 5.54 95% 置信度下  $X \rightarrow SS$  产生截面上限，所有列单位为 pb。图 5.26  $pp \rightarrow X \rightarrow hh$  产生截面上限，左图对应 fixing  $m_S=135$  GeV，右图对应 fixing  $m_X=340$  GeV。

## 5.8 4W 联合统计结果

为了最大化 4W 分析道的灵敏度，对 3 个现有衰变分析道进行统计组合，包括 2LSS, 3Lep 和 4Lep。统计处理与参考文献 [159, 160] 中描述的相同。每个 bin 的事例数采用泊松假设，联合乘积即可构建似然函数；其中系统误差，即冗余参数，利用高斯函数模拟。值得注意的是，影响多个分析道的系统误差应当使用相同的冗余参数，这样子系统误差对整个实验的影响才能有效一致的传递。检验统计量使用参考文献 [161] 中定义的 profile 似然比  $\Lambda(\mu)$ 。最终应用渐近逼近式修改的频率方法在 95% CL<sub>s</sub> [162] 置信度下提取上限。

### 5.8.1 系统误差关联性

影响多个衰变分析道的系统误差关联考虑，具体关联情况见表 5.55。亮度， $\mu$  子，轻子，光子，味道鉴别，pile-up 和 MET 相关的系统误差是相互关联的，而 fakes 相关的误差没有关联，因为 fakes 是在不同的区域估计的。

Sys source	number of NP	correlation strategy
Lumi	1NP	correlated
Jet systematic	JES 21NP <sup>3</sup> , JER 1NP	21NP JES is not correlated, JER is correlated
EGam systematic	EG Scale 1NP, EG resolution 1NP	correlated
Electron systematic	4(ID,RECO,TRIG,ISO) for SS2L/3L, 33(15 uncorr+15corr+3 ISO, reco, TRIG) for 4L	only correlate SS2L and 3L
Muon systematic	Trigger(2NP),ID(4),TTVA(2NP),ISO(2NP),Momentum(3NP)	correlated
Flavor tagging	6(B)+4(C)+15(Light)+2(Extrap)	correlated
MET	3NP	correlated
Pileup	1NP	correlated
MC Stat		not correlated
Fake factor uncertainty	6(2L)+2(3L)+1(4L)	not correlated

表 5.55 4W 分析中各种系统误差关联策略。

alpha_ATLAS_JET_21NP_JET_Pileup_OffsetMu	background		signal		observed
	ThreeLep_SFOS0_m500	0.000(+1 $\sigma$ )/-0.004(-1 $\sigma$ )(in percentage)	0.00/-0.00(yield)	-0.490(+1 $\sigma$ )/-0.001(-1 $\sigma$ )	
ThreeLep_SFOS12_m500	0.000(+1 $\sigma$ )/0.000(-1 $\sigma$ )(in percentage)	0.00/0.00(yield)	-0.485(+1 $\sigma$ )/0.006(-1 $\sigma$ )	-0.43/0.01(yield)	1

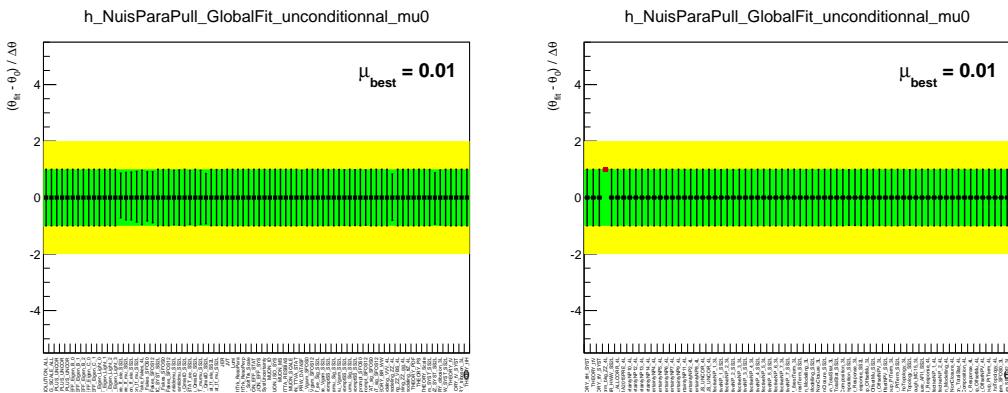
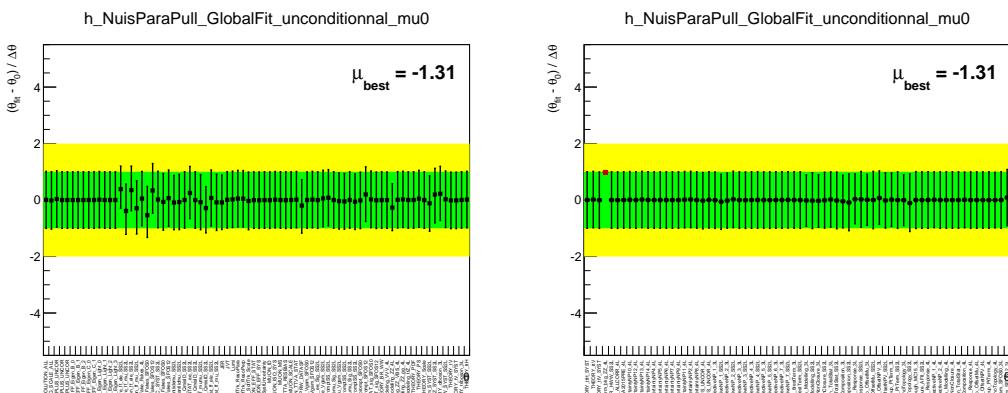
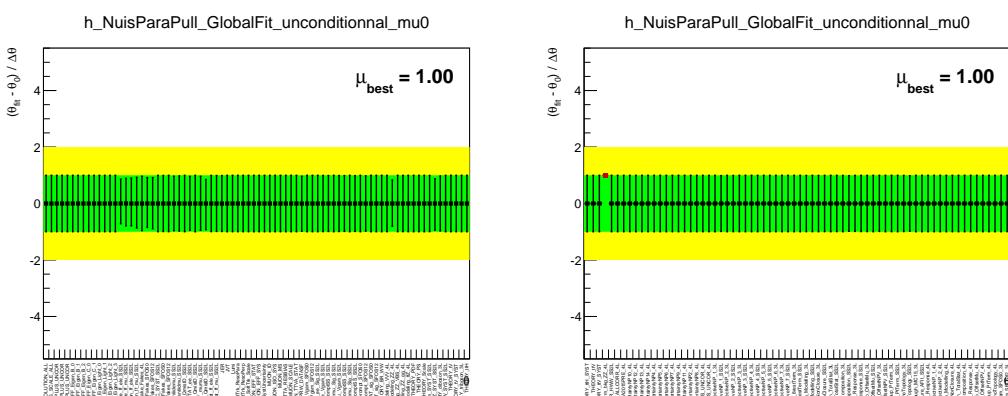
表 5.56 系统误差 JET\_Pileup\_OffsetMu 对信号本底的相对影响，其正反变化不对称。

### 5.8.2 统计模型检查

本节检查建立的统计模型中的 NP 在数据影响下的偏移 (pull)，NP 相关性以及影响排序。为了使得图像更清晰，所有的 pull 图分为两张，其中红点是 4Lep 中的  $ZZ$  归一因子，因为它并不是高斯函数所模拟，所以其中心值为 1，在联合拟合中的误差大约为 5%。作为展示例子，接下来将只给出  $m_X=260 \text{ GeV}$  和  $m_X=500 \text{ GeV}$  的检查结果。

图 5.27 到图 5.32 展示在  $m_X=260 \text{ GeV}$  和  $m_X=500 \text{ GeV}$  两个质量点搜寻中系统误差在不同假设下的拟合结果。在无信号假设和 S+B 的假设下，pull 的表现是非常合理的。而在实际观测数据的拟合中，因为数据的涨落，2L 的 fakes 误差偏移较大。在图 5.33 和图 5.34 还可以看到，系统误差之间没有较大相关性。图 5.35 和图 5.36 是系统误差影响的排序，虚线阴影区表示截面上限随 NP 向上或向下变化一个标准偏差时的变化，并分别展示拟合前和拟合后的变化情况。fake factor 的系统误差对最终结果影响最大。在  $m_X=500 \text{ GeV}$  的 S+B asimov 拟合和观测值拟合中，JET Pileup OffsetMu 对 3L 只有单边的影响，这是源于其对信号和本底的影响是单边的，见表 5.56。

另一个重要检查是在拟合中固定住单个或者多个系统误差，观察结果变化。表 5.57，表 5.58 和表 5.59 总结在固定住某些系统误差后，拟合截面上限的变化，得出结论拟合结果对 fakes 的误差最敏感，与前述的影响排序是一致的。

图 5.27 无信号 Asimov 数据给出的  $m_X=260$  GeV pull 图。图 5.28 观测数据给出的  $m_X=260$  GeV pull 图。图 5.29 S+B Asimov 数据给出的  $m_X=260$  GeV pull 图。

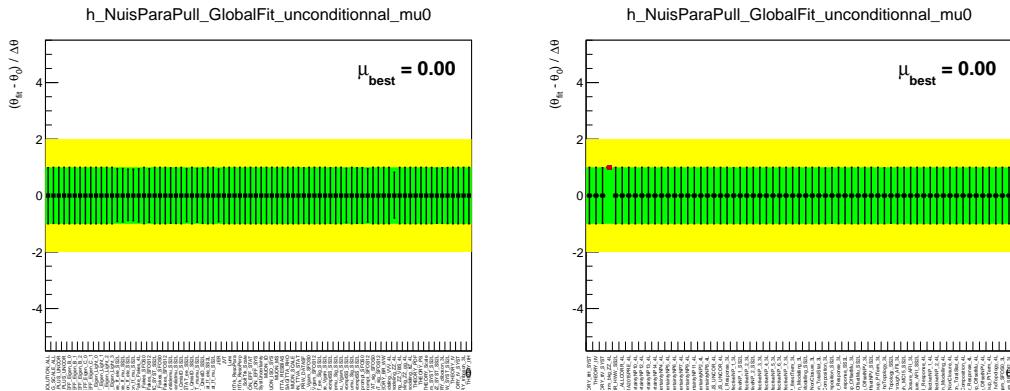


图 5.30 无信号 Asimov 数据给出的  $m_X=500$  GeV pull 图。

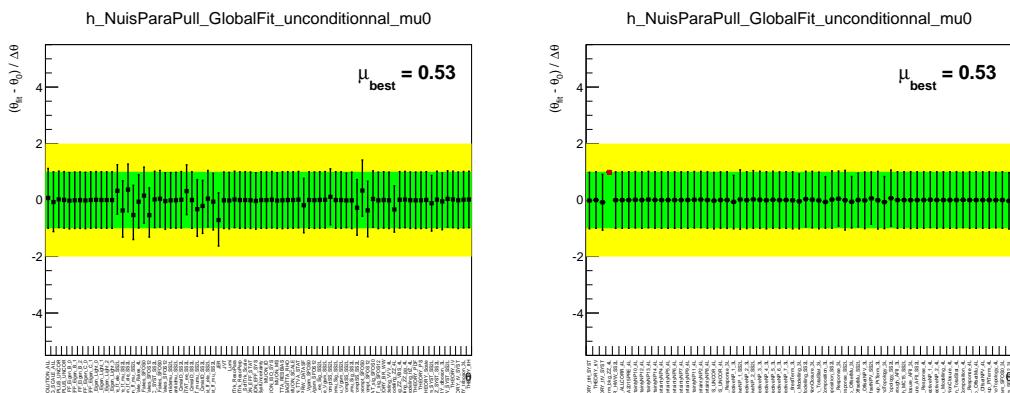


图 5.31 观测数据给出的  $m_X=500$  GeV pull 图。

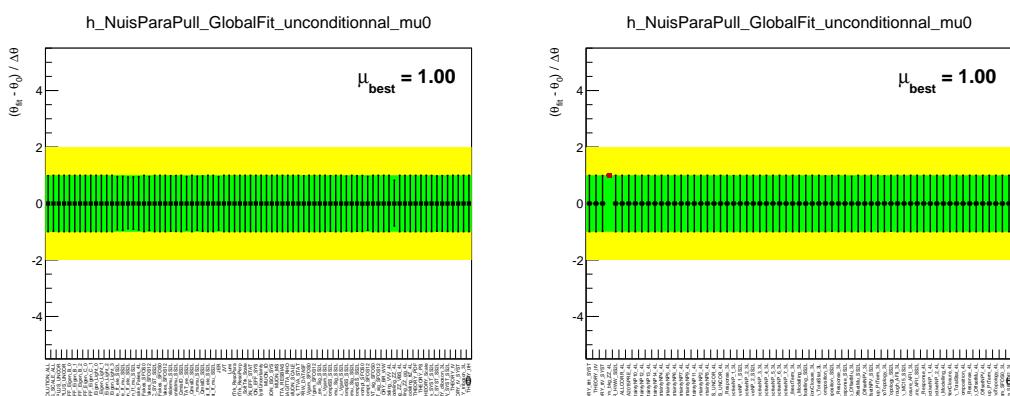


图 5.32 S+B Asimov 数据给出的  $m_X=500$  GeV pull 图。

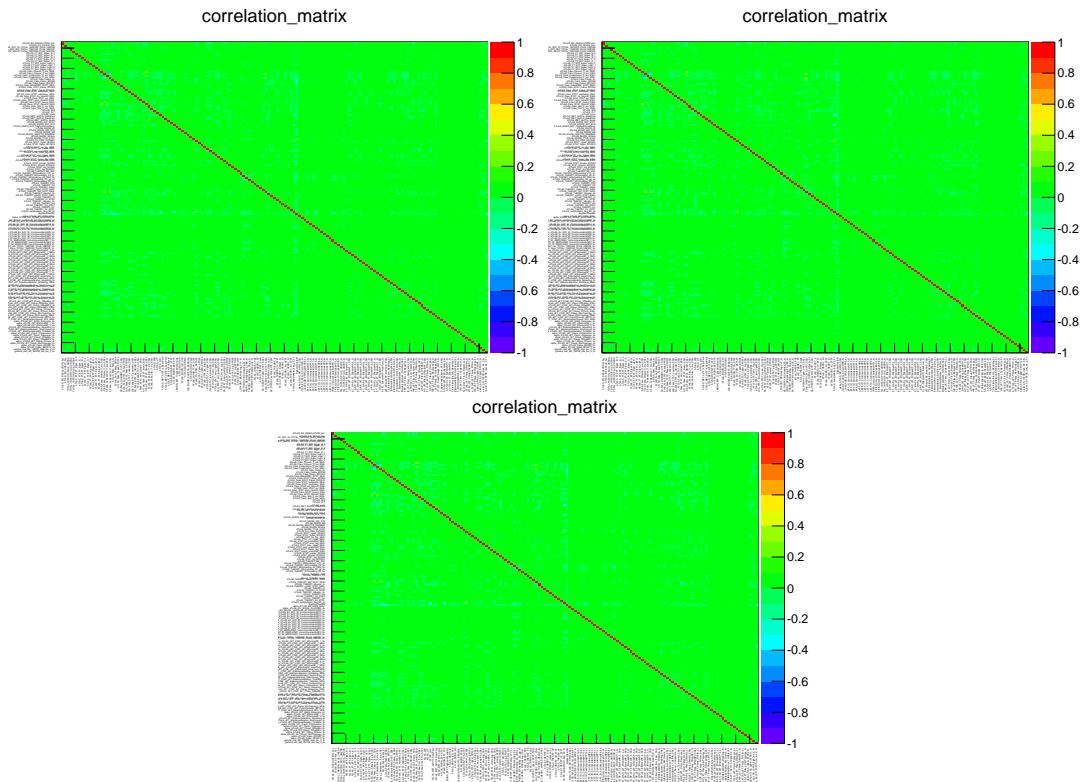


图 5.33  $m_X=260 \text{ GeV}$  分析 NP 相关性检查，分别对应无信号 Asimov 数据，观测数据和 S+B Asimov 数据。

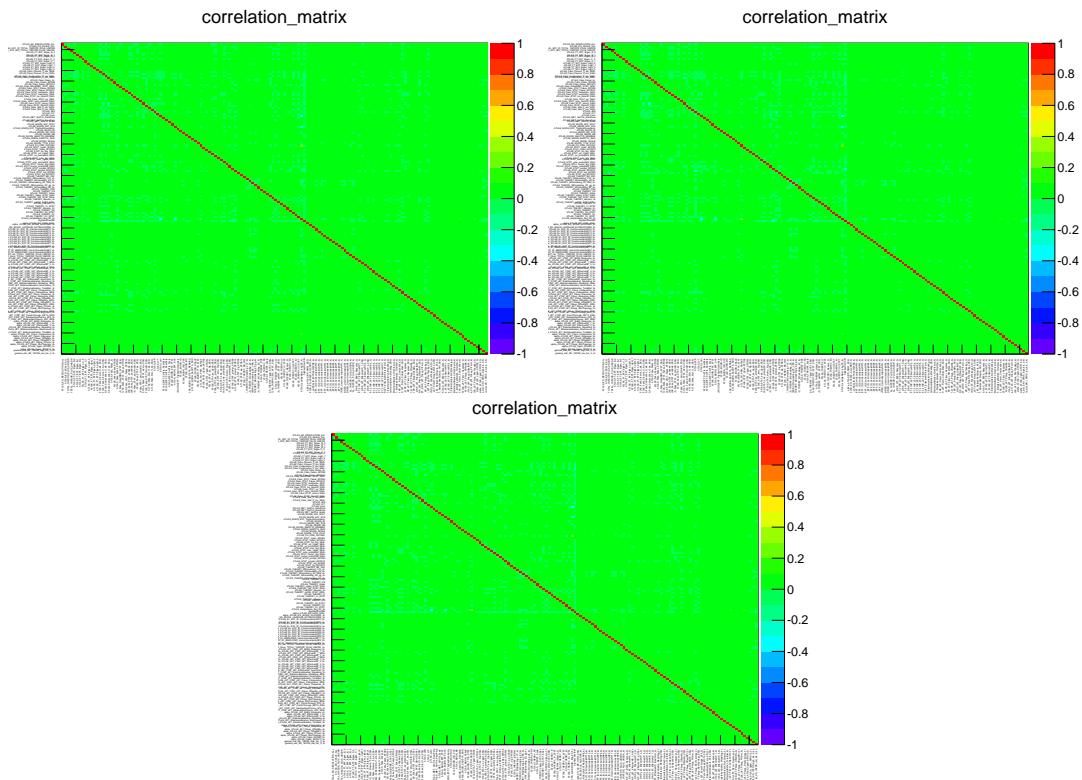


图 5.34  $m_X=500 \text{ GeV}$  分析 NP 相关性检查，分别对应无信号 Asimov 数据，观测数据和 S+B Asimov 数据。

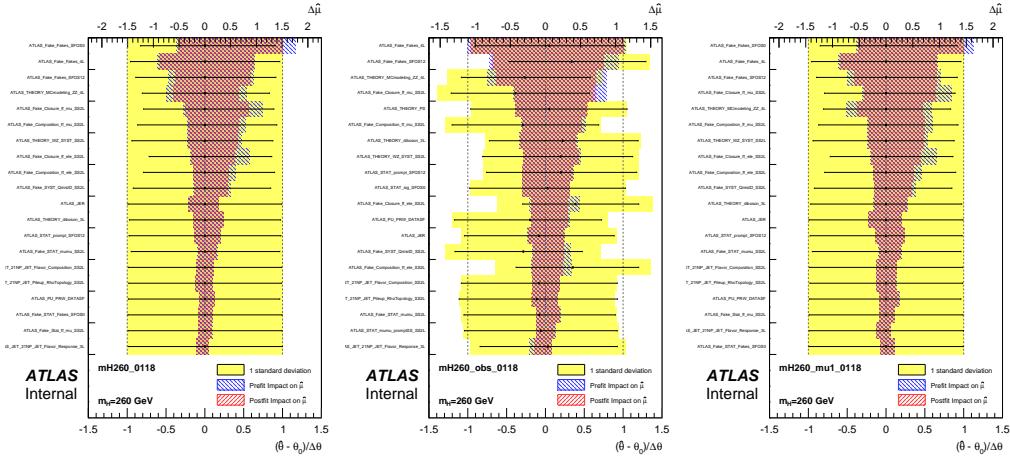


图 5.35  $m_X=260$  GeV 分析 NP 影响排名，分别对应无信号 Asimov 数据，观测数据和 S+B Asimov 数据。

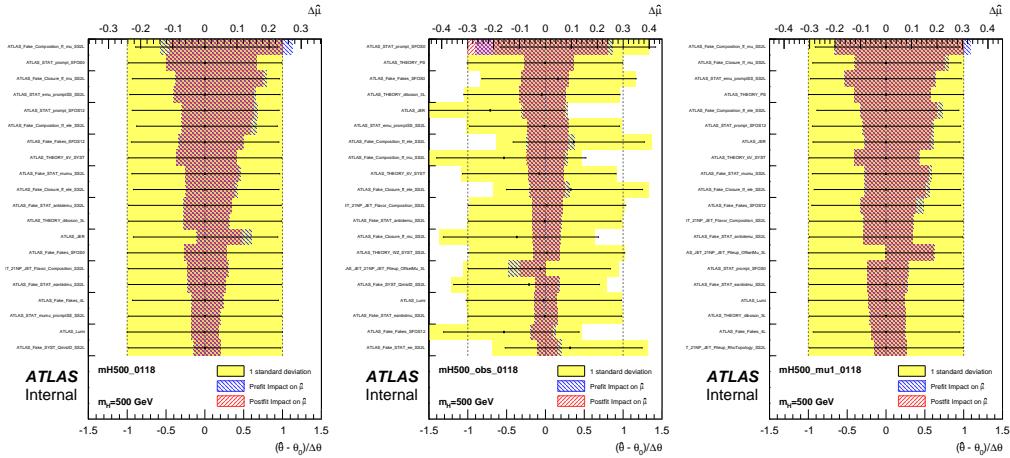


图 5.36  $m_X=500$  GeV 分析 NP 影响排名，分别对应无信号 Asimov 数据，观测数据和 S+B Asimov 数据。

$\Delta limit/limit$	nonres	$m_H = 260GeV$	$m_H = 300GeV$	$m_H = 400GeV$	$m_H = 500GeV$
Lumi	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
JET	0.10	0.02	0.05	0.11	0.07
FT	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00
EG	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
EL	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
MUON	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
MET	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
MC STAT	0.02	0.01	0.03	0.04	0.03
Fake	0.08	0.10	0.12	0.21	0.11
THEORY	0.05	0.05	0.06	0.10	0.04

表 5.57  $hh$   $\Delta limit/limit$  总结，每行对应去掉该项 NP 之后上限的变化。

$\Delta\text{limit}/\text{limit}$	H280S135	H300S145	H320S155	H340S135
Lumi	0.004	0.001	0.006	0.044
JET	0.011	0.031	0.040	0.086
FT	0.003	0.001	0.004	0.042
EG	0.003	0.001	0.004	0.041
EL	0.003	0.001	0.004	0.042
MUON	0.003	0.001	0.004	0.042
MET	0.003	0.000	0.004	0.042
MC STAT	0.008	0.007	0.012	0.051
Fake	0.131	0.154	0.174	0.190
THEORY	0.030	0.034	0.045	0.071

表 5.58 SS  $\Delta\text{limit}/\text{limit}$  总结, 每行对应去掉该项 NP 之后上限的变化。

$\Delta\text{limit}/\text{limit}$	H340S135	H340S145	H340S155	H340S165
Lumi	0.044	0.036	0.029	0.023
JET	0.086	0.075	0.026	0.006
FT	0.042	0.037	0.031	0.012
EG	0.041	0.037	0.034	0.000
EL	0.042	0.037	0.034	0.006
MUON	0.042	0.037	0.034	0.006
MET	0.042	0.037	0.034	0.000
MC STAT	0.051	0.037	0.037	0.006
Fake	0.190	0.275	0.289	0.234
THEORY	0.071	0.067	0.055	0.023

表 5.59  $SS(m_X = 340 \text{ GeV}) \Delta\text{limit}/\text{limit}$  总结, 每行对应去掉该项 NP 之后上限的变化。

### 5.8.3 联合统计结果

最终提取出的  $hh$  95% CL<sub>s</sub> 的截面上限如表 5.60 和图 5.37 所示。标准模型希格斯对的观测（期望）截面上限值 ( $pp \rightarrow hh$ ) 为 160 倍 (120 倍) 标准模型预测值；共振态 ( $pp \rightarrow X \rightarrow hh$ ) 的观测（期望）截面上限值随着  $m_X$  增加从 9.3 pb (10 pb) 到 2.8 pb (2.6 pb)；观测值均在一倍  $\sigma$  以内。在低质量区，4L 具有最高的期望显著性，3L 次之，2LSS 最低，而在高质量区，其顺序刚好相反。在 SS 信号 ( $pp \rightarrow SS$ ) 搜寻中，所有质量点的观测值均在期望值的一个标准偏差以内，观测（期望）截面上限值随  $m_X$  或  $m_S$  增大从 2.5 pb (2.5 pb) 减小到 0.16 pb (0.17 pb)，其中在低质量区 4L 同样地具有最高的显著性，而在高质量区三个分析道显著性非常接近。

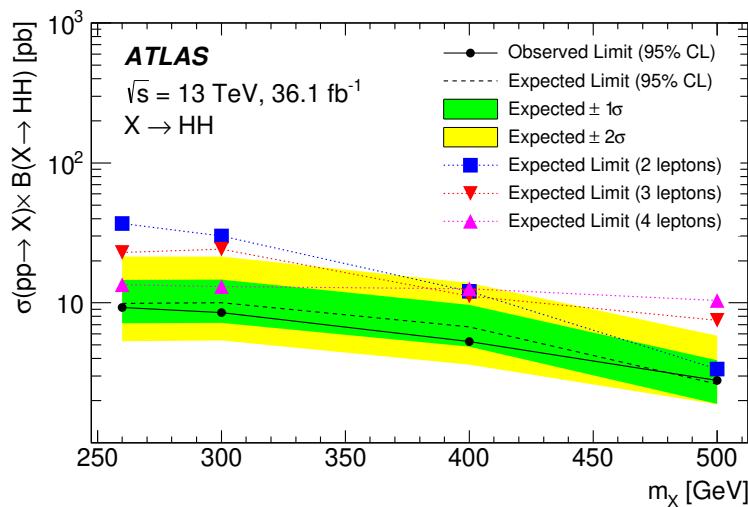


图 5.37 通过 4W 分析给出的  $X \rightarrow hh$  截面上限值 (pb) 随  $m_X$  分布，包括各个衰变道的期望值和联合结果。

$\sigma/\sigma_{SM}$	$m_X = 260 \text{ GeV}$ [pb]	$m_X = 300 \text{ GeV}$ [pb]	$m_X = 400 \text{ GeV}$ [pb]	$m_X = 500 \text{ GeV}$ [pb]
Expected: 2 leptons	150	37	30	12
Expected: 3 leptons	270	23	24	11
Expected: 4 leptons	400	13	13	13
Expected	120	9.9	10	6.7
+2 $\sigma$	230	21	21	14
+1 $\sigma$	170	15	15	9.7
-1 $\sigma$	83	7.1	7.2	4.9
-2 $\sigma$	62	5.3	5.4	3.6
Observed	160	9.3	8.5	5.3
				2.8

表 5.60 通过 4W 分析给出的  $X \rightarrow hh$  截面上限值，包括各个衰变道的期望值和联合结果。

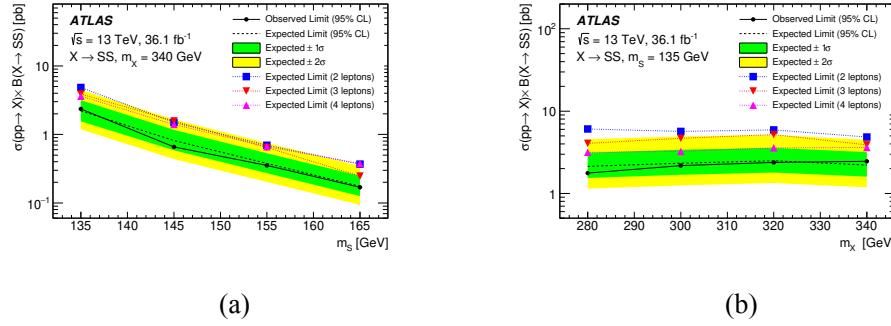


图 5.38 通过 4W 分析给出的  $X \rightarrow SS$  截面上限值 (pb) 随 (a)  $m_S$  与 (b)  $m_X$  分布, 包括各个衰变道的期望值和联合结果。

	$m_X = 280 \text{ GeV}$	$m_X = 300 \text{ GeV}$	$m_X = 320 \text{ GeV}$	$m_X = 340 \text{ GeV}$
	[pb]	[pb]	[pb]	[pb]
Expected: 2 leptons	6.1	5.7	5.9	4.9
Expected: 3 leptons	4.1	4.7	5.2	3.9
Expected: 4 leptons	3.2	3.2	3.6	3.6
Expected	2.1	2.3	2.5	2.2
+ $2\sigma$	4.6	4.9	5.1	4.5
+ $1\sigma$	3.1	3.4	3.6	3.2
- $1\sigma$	1.5	1.7	1.8	1.6
- $2\sigma$	1.1	1.3	1.3	1.2
Observed	1.8	2.2	2.4	2.5

表 5.61 通过 4W 分析给出的  $X \rightarrow SS$  截面上限值, 对应  $m_S = 135$  GeV, 包括各个衰变道的期望值和联合结果。

	$m_S = 145 \text{ GeV}$ [pb]	$m_S = 155 \text{ GeV}$ [pb]	$m_S = 165 \text{ GeV}$ [pb]
Expected: 2 leptons	1.5	0.69	0.37
Expected: 3 leptons	1.6	0.65	0.25
Expected: 4 leptons	1.4	0.66	0.37
Expected	0.82	0.38	0.17
+2 $\sigma$	1.7	0.75	0.35
+1 $\sigma$	1.2	0.53	0.25
-1 $\sigma$	0.59	0.27	0.13
-2 $\sigma$	0.44	0.20	0.094
Observed	0.66	0.35	0.16

表 5.62 通过 4W 分析给出的  $X \rightarrow SS$  截面上限值, 对应  $m_X = 340 \text{ GeV}$ , 包括各个衰变道的期望值和联合结果。

## 5.9 $hh$ 联合拟合结果

对于 2015 年到 2016 年数据的分析,  $hh$  各个衰变道概述如下:

- $b\bar{b}b\bar{b}$  分为 resolved 与 boosted。对于 resolved 分析, 使用  $b$  喷注触发, 末态要求仅有四个  $b$  喷注 ( $|\eta| < 2.5, p_T > 40 \text{ GeV}, \text{MV2c10 70\% WP}$ ); 对于 boosted 分析, 使用 large-R  $b$  喷注触发, 末态要求仅有两个 R=1.0 的“胖”喷注 ( $|\eta| < 2, p_T > 450 \text{ GeV}/250 \text{ GeV}$ ), 并且排除掉能够通过 resolved 筛选的事例, 每个喷注要求有一或两个  $b$  标记的径迹喷注 (track jet)。Resolved 研究共振态区间为 260 GeV 到 1400 GeV, boosted 区间为 800 GeV 到 3000 GeV, 中间的重叠区域则被联合起来。Resolved 使用  $m_{4j}$  作为最后的判别变量 (discriminant), boosted 则使用  $m_{2J}$ 。对于非共振态分析,  $b\bar{b}b\bar{b}$  使用 resolved 策略。

- $b\bar{b}\tau\tau$  分为轻子 +  $\tau_{\text{had}}$ (lephad) 与双  $\tau_{\text{had}}$ (hadhad) 两个衰变道。对于 lephad, 使用单轻子触发 (标记为 SLT) 和单轻子 +  $\tau_{\text{had}}$  触发 (标记为 LTT, 并且排除掉 SLT), 要求仅有一个电子或者  $\mu$  子, 一个相反电荷的  $\tau_{\text{had}}$ 。对于 hadhad, 使用单  $\tau_{\text{had}}$  和双  $\tau_{\text{had}}$  触发, 排除掉带电子或  $\mu$  子的事例, 要求仅有两个相反电荷的  $\tau_{\text{had}}$ 。两个衰变道均要求两个  $b$  喷注 (MV2c10 70% WP)。该分析最终的判别变量为 BDT。

- $b\bar{b}\gamma\gamma$  使用双光子触发, 末态要求两个光子和至少两个喷注 ( $|\eta| < 2.5, p_T > 25 \text{ GeV}$ ), 并根据  $b$  喷注数量分为 2-tag 子类 (仅有两个  $b$  喷注, 使用 MV2c10 70% WP) 和 1-tag 子类 (仅有一个  $b$  喷注, 使用 MV2c10 60% WP, 并且不能通过 2-tag 子类筛选)。对于非共振态, 分析使用  $m_{\gamma\gamma}$  作为最终的判别变量, 而对于共振态, 使用  $m_{\gamma\gamma jj}$ 。

- $WW^*\gamma\gamma$  只考虑半轻子衰变道, 末态要求至少一个电子或  $\mu$  子, 双光子,

无  $b$  喷注。

- $b\bar{b}WW^*$  分为 resolved 与 boosted, resolved 末态要求一个轻子, 两个  $b$  喷注以及 MET, boosted 末态要求一个轻子, 一个“胖”喷注以及 MET, 两者均使用  $hh$  不变质量作为判别变量。

联合统计  $hh$  与处理 4W 时无本质区别, 同样是设定统一的 PoI, 采用同样的方法给出最佳拟合值。但其复杂度变大, 比如各个衰变道系统误差的正确关联, 对各个衰变道的各种控制区、信号区的正确处理等等。图5.39和图5.40分别展示非共振态和共振态的联合统计结果, 整体而言,  $b\bar{b}b\bar{b}, b\bar{b}\tau\tau$  和  $b\bar{b}\gamma\gamma$  最敏感, 而  $WW^*\gamma\gamma, b\bar{b}WW^*$  和  $WW^*WW^*$  则贡献较小。在 95% 置信度下, 标准模型希格斯对的观测(期望)产生截面上限为 6.9 倍(10.3 倍)预期。

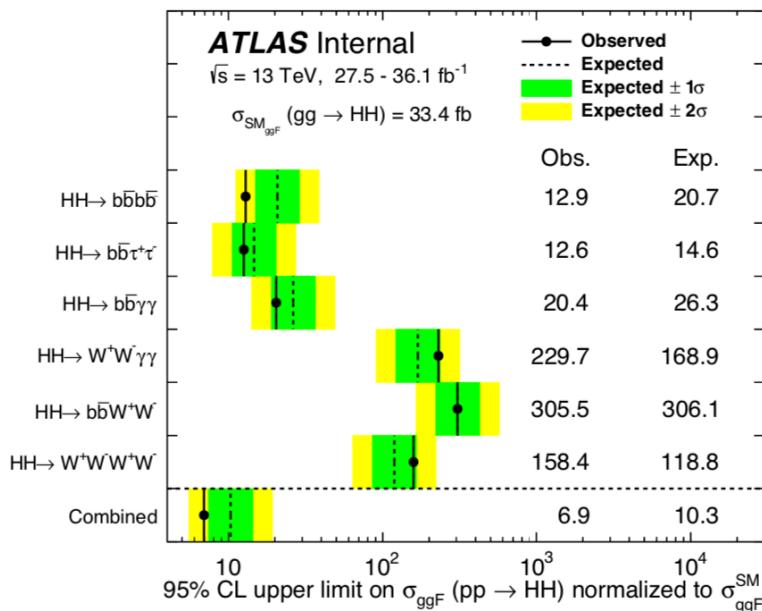


图 5.39 联合  $hh$  各衰变道给出的标准模型希格斯粒子对的产生截面上限 (归一化到  $\sigma_{SM}$ )。

在自耦合参数的限定实验中, 只考虑了  $b\bar{b}b\bar{b}$ ,  $b\bar{b}\tau\tau$  和  $b\bar{b}\gamma\gamma$ , 因为其他三者贡献不大。自耦合参数的限定比较复杂, 因为信号接收度和形状依赖于  $\kappa_\lambda$ , 所以在  $\kappa_\lambda$  的扫描中, 对于每个点, 一个专门产生的对应该  $\kappa_\lambda$  的信号模板被输入<sup>4</sup>, 而后拟合得到  $hh$  的产生截面上限。每个  $\kappa_\lambda$  点预期截面则根据 LHCHXSWG (YR4)[3] 推荐, 假设 QCD 的高阶修正和  $\kappa_\lambda$  修正是可因子化的, 在 NNLO+NNLL 准确性下计算得到一系列随  $\kappa_\lambda$  变化的相对于  $33.41 \text{ fb}$  (即  $\kappa_\lambda=1$ ) 的修正因子。在上限设置中, 每个点的系统误差均采用  $\kappa_\lambda=1$  时的结果。图5.41比较了产生截面上限与理论预期, 在 95% 置信度下,  $\kappa_\lambda$  的观测(期望)上限在  $-5.0 < \kappa_\lambda < 12.1$

<sup>4</sup>考虑到不同  $\kappa_\lambda$  对信号的影响, 实际上每个分析道还采用了专门的筛选。

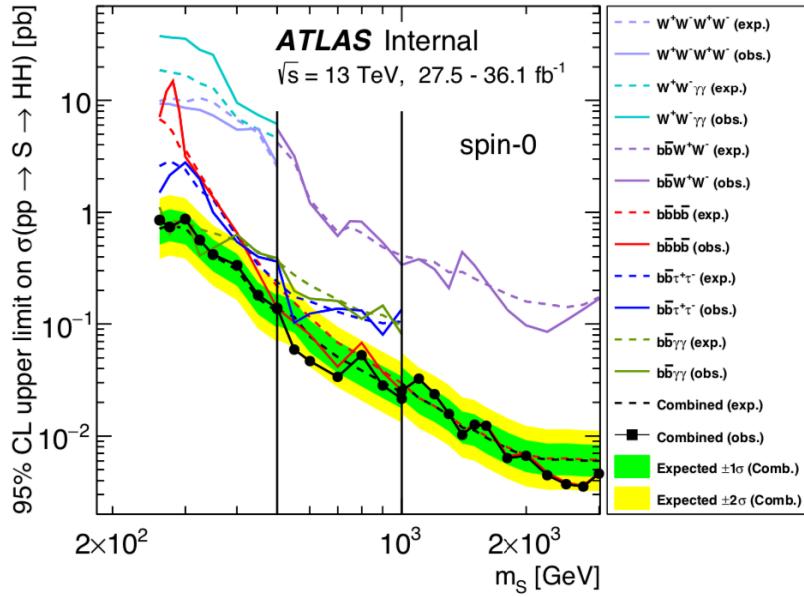


图 5.40 联合  $hh$  各衰变道给出的共振态的产生截面上限 (pb)。

$(-5.8 < \kappa_\lambda < 12.0)$  内。

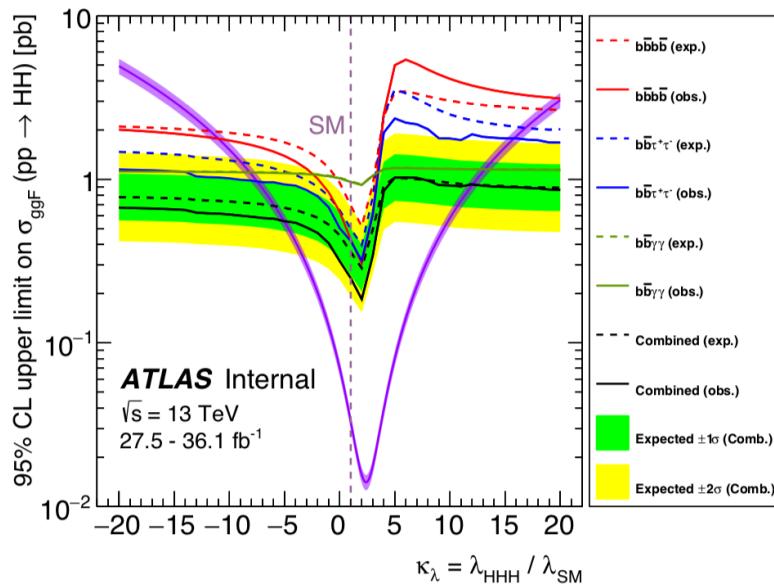


图 5.41 联合  $hh$  各衰变道给出的标准模型希格斯粒子对产生截面上限随  $\kappa_\lambda$  变化结果，其中紫色曲线表示理论预期。

## 第 6 章 总结与展望

本文论述了通过多轻子衰变道寻找标准模型 (SM) 希格斯粒子关联顶夸克对产生模式, 使用 2015 年到 2017 年 ATLAS 探测器收集的积分亮度为  $\int \mathcal{L} dt = 80 \text{ fb}^{-1}$  的质子-质子对撞数据。主要研究末态是由一个轻子和两个强子化衰变的  $\tau$  组成的分析道  $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ , 大部分信号来自  $t\bar{t}h(\rightarrow \tau\tau)$ , 主要本底是来源于  $t\bar{t}$  的假  $\tau_{\text{had}}$ 。利用相同电荷两  $\tau_{\text{had}}$  数据 (SS data) 可以很好地模拟假  $\tau_{\text{had}}$  本底, 并且在控制区域得到证实, 其相对偏差和 SS data 本身统计误差将作为假  $\tau_{\text{had}}$  本底的系统误差。其余本底主要是  $t\bar{t}Z$ , 利用 MC 估计。因为  $t\bar{t}$  MC 与模拟假  $\tau_{\text{had}}$  本底的 SS data 的形状差异较小, 可用于多变量方法训练以进行信号优化。事例根据 BDTG 划分为三个区域, 同时拟合这三个区域给出信号强度为  $\mu_{t\bar{t}h} = \sigma/\sigma_{\text{SM}} = 1.00^{+1.22}_{-1.02}$ , 相当于  $0.96\sigma$  的信号显著性。

本文随后论述了通过多轻子道寻找一对衰变到四个  $W$  玻色子的中性标量玻色子, 使用 2015 年到 2016 年 ATLAS 探测器收集的积分亮度为  $\int \mathcal{L} dt = 36.1 \text{ fb}^{-1}$  的质子-质子对撞数据。该搜寻包括三种信号模型: SM 非共振态产生 ( $hh$ ), 共振态产生 ( $X \rightarrow hh$ ) 和有两个重质量类希格斯粒子的共振态产生 ( $X \rightarrow SS$ )。主要研究了相同电荷双轻子衰变道, 根据轻子味道分为  $ee$ ,  $\mu\mu$  以及  $e\mu$  子类。 $ee$  和  $e\mu$  子类本底主要有可贡献双轻子末态过程 (promptSS), 光子转换电子 ( $V\gamma$ ), 假轻子 (fakes) 以及电子电荷误判 (QmisID), 而  $V\gamma$  和 QmisID 本底在  $\mu\mu$  子类基本可忽略。promptSS 和  $V\gamma$  使用 MC 估计。对于 QmisID 本底, 首先在  $Z$  控制区利用似然函数方法得到电子电荷误判率, 随后应用到信号区相反电荷双轻子事例而得到。Fakes 使用所谓的 fake factor method 估计, 该方法假设 fakes 中通过 tight 轻子筛选的事例与通过 anti-tight 轻子的事例的比例在控制区和信号区一致, 计算出控制区的比例 (fake factor) 则可推出信号区的 fakes。Fakes 本底的估计误差对结果影响最大。随后利用多变量方法实现基于运动学变量的最佳筛选条件。因为总体上通过筛选之后的事例数不高, 所以采用单 bin 拟合 (event counting experiment)。最后联合其他两个分析道, 三轻子 (3L) 和四轻子 (4L), 结果显示无明显超出标准模型迹象。所以在 95% 置信度下设置截面上限, SM 非共振态产生截面观测 (期望) 上限值为 160 倍 (120 倍) 预期。 $X \rightarrow hh$  在  $260 \text{ GeV} \leq m_X \leq 500 \text{ GeV}$  的质量区间内的产生截面观测 (期望) 上限值为  $9.3$  ( $10$ )  $\text{pb}$  到  $2.8$  ( $2.6$ )  $\text{pb}$ 。 $X \rightarrow SS$  在  $280 \text{ GeV} \leq m_X \leq 340 \text{ GeV}$ ,  $135 \text{ GeV} \leq m_S \leq 165 \text{ GeV}$  的质量区间内产生截面观

测（期望）上限值为  $2.5(2.5)$  pb 到  $0.16(0.17)$  pb。

对于以上物理分析结果，大致可以通过以下几方面得到提升：

- 更多数据：利用全部 Run 2 数据，联合希格斯粒子的其他衰变道分析 ( $h \rightarrow \gamma\gamma, h \rightarrow b\bar{b}$ )，将有望达到  $5\sigma$  信号显著性。随着在 Run 3 以及 Phase-II 升级之后的 HL-LHC 累积更多数据，也许还可通过比  $t\bar{t}h$  产生截面更小的单顶夸克产生 ( $th$  或  $tWh$ ) 限制顶夸克汤川耦合。对于  $hh$  分析，类似地，更多的数据必将压低  $hh$  的产生截面（如果没有信号）从而更加严格地验证标准模型或者发现新物理。
- 分析技术优化：比如假  $\tau_{had}$  本底的估计，可以增大 SS data 统计量以减小系统误差；2LSS 分析中寻找更优的轻子筛选条件以压低 fakes 和减小系统误差。
- ATLAS 实验改进：从底层到数据分析的每一环的改进也会有利于最终的物理结果呈现，比如触发，寻迹，粒子重建及鉴别等等，特别是不断发展的机器学习方法对 ATLAS 实验有极大的裨益。

最后值得一提的是， $t\bar{t}h$  对  $hhh$  顶点修正最敏感 [163]，所以通过单希格斯粒子产生模式可间接限制  $\kappa_\lambda$ ，未来还可期望联合拟合单希格斯粒子与希格斯粒子对实验结果以提高显著性。总而言之， $t\bar{t}h$  和  $hh$  寻找仅是一个开端，希格斯物理是 LHC 未来的研究重点，因为希格斯粒子是一个窗口，通过它，可以验证标准模型，也可指明新物理方向。

## 参考文献

- [1] PATRIGNANI C, et al. Review of Particle Physics[J/OL]. Chin. Phys., 2016, C40(10): 100001. DOI: [10.1088/1674-1137/40/10/100001](https://doi.org/10.1088/1674-1137/40/10/100001).
- [2] FREDERIX R, FRIXIONE S, HIRSCHI V, et al. Higgs pair production at the LHC with NLO and parton-shower effects[J/OL]. Phys. Lett., 2014, B732:142-149. DOI: [10.1016/j.physletb.2014.03.026](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.03.026).
- [3] GROUP L H C S W. Sm higgs branching ratios and total decay widths[EB/OL]. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CERNYellowReportPageBR>.
- [4] Atlas Collaboration, AABOUD M, AAD G, et al. Performance of the atlas trigger system in 2015[J/OL]. The European Physical Journal C, 2017, 77(5):317. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4852-3>.
- [5] G. A, I. B A, O. B, et al. Cern yellow reports: Monographs: High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Technical Design Report V. 0.1[M/OL]. Geneva: CERN, 2017. <https://cds.cern.ch/record/2284929>.
- [6] Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Strip Detector[J]. 2017.
- [7] COLLABORATION A. Properties of clusters and seeds for the itk[EB/OL]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/IDTR-2016-011>.
- [8] Expected Performance of the ATLAS Inner Tracker at the High-Luminosity LHC: ATL-PHYS-PUB-2016-025[R/OL]. Geneva: CERN, 2016. <https://cds.cern.ch/record/2222304>.
- [9] Expected performance of the ATLAS detector at the High-Luminosity LHC: ATL-PHYS-PUB-2019-005[R/OL]. Geneva: CERN, 2019. <https://cds.cern.ch/record/2655304>.
- [10] Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using the 2015 LHC proton-proton collision data: ATLAS-CONF-2016-024[R/OL]. Geneva: CERN, 2016. <https://cds.cern.ch/record/2157687>.
- [11] COLLABORATION A. Muon trigger public results[EB/OL]. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/MuonTriggerPublicResults>.
- [12] GLEISBERG T, HOECHE S, KRAUSS F, et al. Event generation with SHERPA 1.1[J/OL]. JHEP, 2009, 02:007. DOI: [10.1088/1126-6708/2009/02/007](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2009/02/007).
- [13] AAD G, et al. Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV[J/OL]. JHEP, 2016, 08:045. DOI: [10.1007/JHEP08\(2016\)045](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2016)045).
- [14] AABOUD M, et al. Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector[J/OL]. Phys. Rev., 2018, D97(7):072003. DOI: [10.1103/PhysRevD.97.072003](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.072003).

- [15] Atlas data summary[EB/OL]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/DATAPREPARATION/DataSummary/2016/records.py>.
- [16] ALWALL J, et al. The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations[J/OL]. JHEP, 2014, 07:079. DOI: [10.1007/JHEP07\(2014\)079](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2014)079).
- [17] SJÖSTRAND T, STEPHEN M, PETER S. PYTHIA 6.4 physics and manual[J/OL]. JHEP, 2006, 05:026. DOI: [10.1088/1126-6708/2006/05/026](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2006/05/026).
- [18] SJÖSTRAND T, MRENNNA S, SKANDS P Z. A Brief Introduction to PYTHIA 8.1[J/OL]. Comput. Phys. Commun., 2008, 178:852-867. DOI: [10.1016/j.cpc.2008.01.036](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2008.01.036).
- [19] BAHR M, et al. Herwig++ physics and manual[J/OL]. Eur. Phys. J. C, 2008, 58:639. DOI: [10.1140/epjc/s10052-008-0798-9](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-008-0798-9).
- [20] LANGE D J. The EvtGen particle decay simulation package[J/OL]. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2001, 462:152. DOI: [10.1016/S0168-9002\(01\)00089-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00089-4).
- [21] GOLONKA P, WAS Z. PHOTOS Monte Carlo: A Precision tool for QED corrections in  $Z$  and  $W$  decays[J/OL]. Eur. Phys. J., 2006, C45:97-107. DOI: [10.1140/epjc/s2005-02396-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s2005-02396-4).
- [22] LUKAS W. Fast Simulation for ATLAS: Atlfast-II and ISF[C/OL]//2012. <http://cdsweb.cern.ch/record/1458503/files/ATL-SOFT-PROC-2012-065.pdf>.
- [23] GELL-MANN M. A schematic model of baryons and mesons[J/OL]. Physics Letters, 1964, 8(3):214 - 215. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031916364920013>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0031-9163\(64\)92001-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9163(64)92001-3).
- [24] ZWEIG G. An  $SU_3$  model for strong interaction symmetry and its breaking; Version 1: CERN-TH-401[R/OL]. Geneva: CERN, 1964. <https://cds.cern.ch/record/352337>.
- [25] ZWEIG G. An  $SU_3$  model for strong interaction symmetry and its breaking; Version 2[J/OL]. 1964(CERN-TH-412):80 p. <https://cds.cern.ch/record/570209>.
- [26] GLASHOW S L. Partial-symmetries of weak interactions[J/OL]. Nuclear Physics, 1961, 22 (4):579 - 588. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029558261904692>. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-5582\(61\)90469-2](https://doi.org/10.1016/0029-5582(61)90469-2).
- [27] WEINBERG S. A model of leptons[J/OL]. Phys. Rev. Lett., 1967, 19:1264-1266. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.19.1264>.
- [28] SALAM A, WARD J C. Gauge theory of elementary interactions[J/OL]. Phys. Rev., 1964, 136:B763-B768. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.136.B763>.
- [29] GROSS D J, WILCZEK F. Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories[J/OL]. Phys. Rev. Lett., 1973, 30:1343-1346. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.30.1343>.
- [30] 'T HOOFT G, VELTMAN M. Regularization and renormalization of gauge fields[J/OL]. Nuclear Physics B, 1972, 44(1):189 - 213. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0550321372902799>. DOI: [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(72\)90279-9](https://doi.org/10.1016/0550-3213(72)90279-9).
- [31] ENGLERT F, BROUT R. Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons[J/OL]. Phys. Rev. Lett., 1964, 13:321-323. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.321>.

- [32] HIGGS P. Broken symmetries, massless particles and gauge fields[J/OL]. Physics Letters, 1964, 12(2):132 - 133. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031916364911369>. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(64\)91136-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91136-9).
- [33] HIGGS P W. Broken symmetries and the masses of gauge bosons[J/OL]. Phys. Rev. Lett., 1964, 13:508-509. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.508>.
- [34] GURALNIK G S, HAGEN C R, KIBBLE T W B. Global conservation laws and massless particles[J/OL]. Phys. Rev. Lett., 1964, 13:585-587. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.585>.
- [35] HIGGS P W. Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons[J/OL]. Phys. Rev., 1966, 145:1156-1163. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.145.1156>.
- [36] KIBBLE T W B. Symmetry breaking in non-abelian gauge theories[J/OL]. Phys. Rev., 1967, 155:1554-1561. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.155.1554>.
- [37] AAD G, et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC[J/OL]. Phys. Lett., 2012, B716:1-29. DOI: [10.1016/j.physletb.2012.08.020](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020).
- [38] CHATRCHYAN S, et al. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC[J/OL]. Phys. Lett., 2012, B716:30-61. DOI: [10.1016/j.physletb.2012.08.021](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021).
- [39] KUHLEN M. Springer tracts in modern physics: QCD at HERA: the hadronic final state in deep inelastic scattering[M/OL]. Berlin: Springer, 1999. <https://cds.cern.ch/record/390284>.
- [40] ELLIS R K, STIRLING W J, WEBBER B R. Cambridge monographs on particle physics, nuclear physics and cosmology: Qcd and collider physics[M/OL]. Cambridge University Press, 1996. DOI: [10.1017/CBO9780511628788](https://doi.org/10.1017/CBO9780511628788).
- [41] COLLINS J C, SOPER D E, STERMAN G F. Factorization of Hard Processes in QCD[J/OL]. Adv. Ser. Direct. High Energy Phys., 1989, 5:1-91. DOI: [10.1142/9789814503266\\_0001](https://doi.org/10.1142/9789814503266_0001).
- [42] COLLABORATION T A. Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to  $80 \text{ fb}^{-1}$  of proton–proton collision data at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  collected with the ATLAS experiment[J]. 2018.
- [43] AABOUD M, et al. Observation of  $H \rightarrow b\bar{b}$  decays and  $VH$  production with the ATLAS detector[J/OL]. Phys. Lett., 2018, B786:59-86. DOI: [10.1016/j.physletb.2018.09.013](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.09.013).
- [44] SIRUNYAN A M, et al. Observation of Higgs boson decay to bottom quarks[J/OL]. Phys. Rev. Lett., 2018, 121(12):121801. DOI: [10.1103/PhysRevLett.121.121801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.121801).
- [45] LHC Higgs Cross Section Working Group. Sm higgs production cross sections at  $\sqrt{s} = 13, 14$  and  $27 \text{ tev}$ [EB/OL]. 2019. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CERNHLHE2019>.
- [46] CEPEDA M, et al. Higgs Physics at the HL-LHC and HE-LHC[J]. 2019.
- [47] LHC Higgs Cross Section Working Group. Sm higgs production cross sections

- at  $\sqrt{s} = 13$  tev[EB/OL]. 2016. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CERNYellowReportPageAt13TeV>.
- [48] DE FLORIAN D, et al. Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector[J/OL]. 2016. DOI: [10.23731/CYRM-2017-002](https://doi.org/10.23731/CYRM-2017-002).
- [49] GRAZZINI M, HEINRICH G, JONES S, et al. Higgs boson pair production at NNLO with top quark mass effects[J/OL]. JHEP, 2018, 05:059. DOI: [10.1007/JHEP05\(2018\)059](https://doi.org/10.1007/JHEP05(2018)059).
- [50] DE FLORIAN D, MAZZITELLI J. Higgs Boson Pair Production at Next-to-Next-to-Leading Order in QCD[J/OL]. Phys. Rev. Lett., 2013, 111:201801. DOI: [10.1103/PhysRevLett.111.201801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.201801).
- [51] GROBER R, MUHLLEITNER M. Composite Higgs Boson Pair Production at the LHC [J/OL]. JHEP, 2011, 06:020. DOI: [10.1007/JHEP06\(2011\)020](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2011)020).
- [52] CONTINO R, GHEZZI M, MORETTI M, et al. Anomalous Couplings in Double Higgs Production[J/OL]. JHEP, 2012, 08:154. DOI: [10.1007/JHEP08\(2012\)154](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2012)154).
- [53] KRIBS G D, MARTIN A. Enhanced di-Higgs Production through Light Colored Scalars [J/OL]. Phys. Rev., 2012, D86:095023. DOI: [10.1103/PhysRevD.86.095023](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.095023).
- [54] KRIBS G D, MAIER A, RZEHAK H, et al. Electroweak oblique parameters as a probe of the trilinear Higgs boson self-interaction[J/OL]. Phys. Rev., 2017, D95(9):093004. DOI: [10.1103/PhysRevD.95.093004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.093004).
- [55] BRANCO G C, FERREIRA P M, LAVOURA L, et al. Theory and phenomenology of two-Higgs-doublet models[J/OL]. Phys. Rept., 2012, 516:1-102. DOI: [10.1016/j.physrep.2012.02.002](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.02.002).
- [56] VON BUDDENBROCK S, CHAKRABARTY N, CORNELL A S, et al. Phenomenological signatures of additional scalar bosons at the LHC[J/OL]. Eur. Phys. J. C, 2016, 76(10):580. DOI: [10.1140/epjc/s10052-016-4435-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4435-8).
- [57] COLLABORATION T A, AAD G, ABAT E, et al. The ATLAS experiment at the CERN large hadron collider[J/OL]. Journal of Instrumentation, 2008, 3(08): S08003-S08003. <https://doi.org/10.1088%2F1748-0221%2F3%2F08%2Fs08003>. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/s08003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08003).
- [58] COLLABORATION T C, CHATRCHYAN S, HMAYAKYAN G, et al. The CMS experiment at the CERN LHC[J/OL]. Journal of Instrumentation, 2008, 3(08): S08004-S08004. <https://doi.org/10.1088%2F1748-0221%2F3%2F08%2Fs08004>. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/s08004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08004).
- [59] COLLABORATION T L, ALVES A A, FILHO L M A, et al. The LHCb detector at the LHC [J/OL]. Journal of Instrumentation, 2008, 3(08):S08005-S08005. <https://doi.org/10.1088%2F1748-0221%2F3%2F08%2Fs08005>. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/s08005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08005).
- [60] COLLABORATION T A, AAMODT K, QUINTANA A A, et al. The ALICE experiment at the CERN LHC[J/OL]. Journal of Instrumentation, 2008, 3(08):

- S08002-S08002. <https://doi.org/10.1088%2F1748-0221%2F3%2F08%2Fs08002>. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/s08002](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08002).
- [61] Rousseau D. The atlas liquid argon calorimeter : test beam, installation and commissioning [C/OL]//2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record: volume 1. 2007: 147-152. DOI: [10.1109/NSSMIC.2007.4436305](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2007.4436305).
- [62] DAVIDEK T, THE ATLAS TILECAL SYSTEM. ATLAS tile calorimeter performance for single particles in beam tests[J/OL]. Journal of Physics: Conference Series, 2009, 160:012057. <https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F160%2F1%2F012057>. DOI: [10.1088/1742-6596/160/1/012057](https://doi.org/10.1088/1742-6596/160/1/012057).
- [63] BAUER F, et al. Construction and Test of MDT Chambers for the ATLAS Muon Spectrometer [J/OL]. Nucl. Instrum. Meth., 2001, A461:17-20. DOI: [10.1016/S0168-9002\(00\)01156-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)01156-6).
- [64] ARGYROPOULOS T, et al. Cathode strip chambers in ATLAS: Installation, commissioning and in situ performance[J/OL]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2009, 56:1568-1574. DOI: [10.1109/TNS.2009.2020861](https://doi.org/10.1109/TNS.2009.2020861).
- [65] AIELLI G, et al. The RPC first level muon trigger in the barrel of the ATLAS experiment [J/OL]. Nucl. Phys. Proc. Suppl., 2006, 158:11-15. DOI: [10.1016/j.nuclphysbps.2006.07.031](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2006.07.031).
- [66] MAJEWSKI S, CHARPAK G, BRESKIN A, et al. A THIN MULTIWIRE CHAMBER OPERATING IN THE HIGH MULTIPLICATION MODE[J/OL]. Nucl. Instrum. Meth., 1983, 217:265-271. DOI: [10.1016/0167-5087\(83\)90146-1](https://doi.org/10.1016/0167-5087(83)90146-1).
- [67] SIMIONI E. The Topological Processor for the future ATLAS Level-1 Trigger: from design to commissioning[J]. 2014.
- [68] COLLABORATION A. Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector: CERN-LHCC-2017-021. ATLAS-TDR-030[R/OL]. Geneva: CERN, 2017. <http://cds.cern.ch/record/2285585>.
- [69] COLLABORATION A. Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS LAr Calorimeter: CERN-LHCC-2017-018. ATLAS-TDR-027[R/OL]. Geneva: CERN, 2017. <http://cds.cern.ch/record/2285582>.
- [70] COLLABORATION A. Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Tile Calorimeter: CERN-LHCC-2017-019. ATLAS-TDR-028[R/OL]. Geneva: CERN, 2017. <http://cds.cern.ch/record/2285583>.
- [71] COLLABORATION A. Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Muon Spectrometer: CERN-LHCC-2017-017. ATLAS-TDR-026[R/OL]. Geneva: CERN, 2017. <http://cds.cern.ch/record/2285580>.
- [72] COLLABORATION A. Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS TDAQ System: CERN-LHCC-2017-020. ATLAS-TDR-029[R/OL]. Geneva: CERN, 2017. <http://cds.cern.ch/record/2285584>.
- [73] COLLABORATION A. Technical Proposal: A High-Granularity Timing Detector for the

- ATLAS Phase-II Upgrade: CERN-LHCC-2018-023, LHCC-P-012[R/OL]. Geneva: CERN, 2018. <http://cds.cern.ch/record/2623663>.
- [74] CALAFIURA P, LAVRIJSEN W, LEGGETT C, et al. The Athena control framework in production, new developments and lessons learned[C]//Computing in high energy physics and nuclear physics. Proceedings, Conference, CHEP'04, Interlaken, Switzerland, September 27-October 1, 2004. 2005: 456-458.
- [75] CORNELISSEN T, ELSING M, FLEISCHMANN S, et al. Concepts, Design and Implementation of the ATLAS New Tracking (NEWT): ATL-SOFT-PUB-2007-007. ATL-COM-SOFT-2007-002[R/OL]. Geneva: CERN, 2007. <https://cds.cern.ch/record/1020106>.
- [76] CORNELISSEN T G, ELSING M, GAVRILENKO I, et al. The global  $\chi^2$  track fitter in ATLAS[J/OL]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 119(3):032013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/119/3/032013>. DOI: [10.1088/1742-6596/119/3/032013](https://doi.org/10.1088/1742-6596/119/3/032013).
- [77] PIACQUADIO G, PROKOFIEV K, WILDAUER A. Primary vertex reconstruction in the ATLAS experiment at LHC[J/OL]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 119(3):032033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/119/3/032033>. DOI: [10.1088/1742-6596/119/3/032033](https://doi.org/10.1088/1742-6596/119/3/032033).
- [78] BENEKOS N C, DEDES G, KASHIF L, et al. ATLAS muon spectrometer simulation and its validation algorithms[J/OL]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 119(3):032009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/119/3/032009>. DOI: [10.1088/1742-6596/119/3/032009](https://doi.org/10.1088/1742-6596/119/3/032009).
- [79] LAMPL W, LAPLACE S, LELAS D, et al. Calorimeter Clustering Algorithms: Description and Performance: ATL-LARG-PUB-2008-002. ATL-COM-LARG-2008-003[R/OL]. Geneva: CERN, 2008. <https://cds.cern.ch/record/1099735>.
- [80] Measurements of the photon identification efficiency with the ATLAS detector using 4.9 fb $^{-1}$  of pp collision data collected in 2011: ATLAS-CONF-2012-123[R/OL]. Geneva: CERN, 2012. <https://cds.cern.ch/record/1473426>.
- [81] Improved electron reconstruction in ATLAS using the Gaussian Sum Filter-based model for bremsstrahlung: ATLAS-CONF-2012-047[R/OL]. Geneva: CERN, 2012. <https://cds.cern.ch/record/1449796>.
- [82] The ATLAS Collaboration, AAD G, ABBOTT B, et al. Electron and photon energy calibration with the atlas detector using lhc run 1 data[J/OL]. The European Physical Journal C, 2014, 74(10):3071. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-014-3071-4>.
- [83] Atlas Collaboration, AAD G, ABBOTT B, et al. Muon reconstruction performance of the atlas detector in proton-proton collision data at  $\sqrt{s}=13$  tev[J/OL]. The European Physical Journal C, 2016, 76(5):292. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4120-y>.
- [84] AAD G, et al. Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC Run 1[J/OL]. Eur. Phys. J., 2017, C77:490. DOI: [10.1140/epjc/s10052-017-5004-5](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5004-5).

- [85] CACCIARI M, SALAM G P, SOYEZ G. The anti- $k_t$  jet clustering algorithm[J/OL]. JHEP, 2008, 04:063. DOI: [10.1088/1126-6708/2008/04/063](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2008/04/063).
- [86] COLLABORATION T A. Monte Carlo Calibration and Combination of In-situ Measurements of Jet Energy Scale, Jet Energy Resolution and Jet Mass in ATLAS[J]. 2015.
- [87] COLLABORATION T A. Pile-up subtraction and suppression for jets in ATLAS[J]. 2013.
- [88] COLLABORATION T A. Tagging and suppression of pileup jets[J]. 2014.
- [89] Expected performance of the ATLAS  $b$ -tagging algorithms in Run-2: ATL-PHYS-PUB-2015-022[R/OL]. Geneva: CERN, 2015. <https://cds.cern.ch/record/2037697>.
- [90] Optimisation of the ATLAS  $b$ -tagging performance for the 2016 LHC Run: ATL-PHYS-PUB-2016-012[R/OL]. Geneva: CERN, 2016. <https://cds.cern.ch/record/2160731>.
- [91] AAD G, et al. Performance of  $b$ -Jet Identification in the ATLAS Experiment[J/OL]. JINST, 2016, 11(04):P04008. DOI: [10.1088/1748-0221/11/04/P04008](https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/04/P04008).
- [92] Reconstruction, Energy Calibration, and Identification of Hadronically Decaying Tau Leptons in the ATLAS Experiment for Run-2 of the LHC: ATL-PHYS-PUB-2015-045[R/OL]. Geneva: CERN, 2015. <https://cds.cern.ch/record/2064383>.
- [93] AABOUD M, et al. Performance of missing transverse momentum reconstruction with the ATLAS detector using proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV[J/OL]. Eur. Phys. J., 2018, C78(11):903. DOI: [10.1140/epjc/s10052-018-6288-9](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6288-9).
- [94] BUCKLEY A, BUTTERWORTH J, GIESEKE S, et al. General-purpose event generators for lhc physics[J/OL]. Physics Reports, 2011, 504(5):145 - 233. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157311000846>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2011.03.005>.
- [95] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. Geant4—a simulation toolkit [J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 506(3):250 - 303. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).
- [96] The ATLAS Collaboration, AAD G, ABBOTT B, et al. The atlas simulation infrastructure [J/OL]. The European Physical Journal C, 2010, 70(3):823-874. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-010-1429-9>.
- [97] AAD G, et al. Search for the associated production of the Higgs boson with a top quark pair in multilepton final states with the ATLAS detector[J/OL]. Phys. Lett., 2015, B749:519-541. DOI: [10.1016/j.physletb.2015.07.079](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.07.079).
- [98] AAD G, et al. Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into  $b\bar{b}$  in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector[J/OL]. Eur. Phys. J., 2015, C75(7):349. DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3543-1](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3543-1).
- [99] AAD G, et al. Search for  $H \rightarrow \gamma\gamma$  produced in association with top quarks and constraints on the Yukawa coupling between the top quark and the Higgs boson using data taken at 7

- TeV and 8 TeV with the ATLAS detector[J/OL]. Phys. Lett., 2015, B740:222-242. DOI: [10.1016/j.physletb.2014.11.049](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.11.049).
- [100] KHACHATRYAN V, et al. Search for the associated production of the Higgs boson with a top-quark pair[J/OL]. JHEP, 2014, 09:087. DOI: [10.1007/JHEP09\(2014\)087](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2014)087), [10.1007/JHEP10\(2014\)106](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2014)106).
- [101] KHACHATRYAN V, et al. Search for a Standard Model Higgs Boson Produced in Association with a Top-Quark Pair and Decaying to Bottom Quarks Using a Matrix Element Method [J/OL]. Eur. Phys. J., 2015, C75(6):251. DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3454-1](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3454-1).
- [102] HEINEMEYER S, et al. Handbook of lhc higgs cross sections: 3. higgs properties[J/OL]. 2013. DOI: [10.5170/CERN-2013-004](https://doi.org/10.5170/CERN-2013-004).
- [103] AABOUD M, et al. Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector[J/OL]. Phys. Lett., 2018, B784:173-191. DOI: [10.1016/j.physletb.2018.07.035](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.07.035).
- [104] SIRUNYAN A M, TUMASYAN A, ADAM W, et al. Observation of  $t\bar{t}h$  production [J/OL]. Phys. Rev. Lett., 2018, 120:231801. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.120.231801>.
- [105] BEENAKKER W, DITTMAIER S, KRAMER M, et al. Higgs radiation off top quarks at the Tevatron and the LHC[J/OL]. Phys. Rev. Lett., 2001, 87:201805. DOI: [10.1103/PhysRevLett.87.201805](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.201805).
- [106] BEENAKKER W, DITTMAIER S, KRAMER M, et al. NLO QCD corrections to t anti-t H production in hadron collisions[J/OL]. Nucl. Phys. B, 2003, 653:151. DOI: [10.1016/S0550-3213\(03\)00044-0](https://doi.org/10.1016/S0550-3213(03)00044-0).
- [107] DAWSON S, ORR L H, REINA L, et al. Associated top quark Higgs boson production at the LHC[J/OL]. Phys. Rev. D, 2003, 67:071503. DOI: [10.1103/PhysRevD.67.071503](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.67.071503).
- [108] DAWSON S, JACKSON C, ORR L H, et al. Associated Higgs production with top quarks at the large hadron collider: NLO QCD corrections[J/OL]. Phys. Rev. D, 2003, 68:034022. DOI: [10.1103/PhysRevD.68.034022](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.68.034022).
- [109] ZHANG Y, MA W G, ZHANG R Y, et al. QCD NLO and EW NLO corrections to  $t\bar{t}H$  production with top quark decays at hadron collider[J/OL]. Phys. Lett. B, 2014, 738:1. DOI: [10.1016/j.physletb.2014.09.022](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.09.022).
- [110] FRIXIONE S, HIRSCHI V, PAGANI D, et al. Weak corrections to Higgs hadroproduction in association with a top-quark pair[J/OL]. JHEP, 2014, 09:065. DOI: [10.1007/JHEP09\(2014\)065](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2014)065).
- [111] FRIXIONE S, HIRSCHI V, PAGANI D, et al. Electroweak and QCD corrections to top-pair hadroproduction in association with heavy bosons[J/OL]. JHEP, 2015, 06:184. DOI: [10.1007/JHEP06\(2015\)184](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2015)184).
- [112] FRIXIONE S, RIDOLFI G, NASON P. A positive-weight next-to-leading-order monte

- carlo for heavy flavour hadroproduction[J/OL]. JHEP, 2007, 09:126. DOI: [10.1088/1126-6708/2007/09/126](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2007/09/126).
- [113] BALL R D, et al. Parton distributions for the LHC Run II[J/OL]. JHEP, 2015, 04:040. DOI: [10.1007/JHEP04\(2015\)040](https://doi.org/10.1007/JHEP04(2015)040).
- [114] BALL R D, et al. Parton distributions with LHC data[J/OL]. Nucl. Phys. B, 2013, 867:244. DOI: [10.1016/j.nuclphysb.2012.10.003](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2012.10.003).
- [115] LAI H L, et al. New parton distributions for collider physics[J/OL]. Phys. Rev. D, 2010, 82: 074024. DOI: [10.1103/PhysRevD.82.074024](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.074024).
- [116] SEYMOUR M H, SIODMOK A. Constraining MPI models using  $\sigma_{eff}$  and recent Tevatron and LHC Underlying Event data[J/OL]. JHEP, 2013, 10:113. DOI: [10.1007/JHEP10\(2013\)113](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2013)113).
- [117] PUMPLIN J, STUMP D R, HUSTON J, et al. New generation of parton distributions with uncertainties from global qcd analysis[J/OL]. JHEP, 2002, 07:012. DOI: [10.1088/1126-6708/2002/07/012](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2002/07/012).
- [118] NADOLSKY P M, et al. Implications of cteq global analysis for collider observables[J/OL]. Phys. Rev. D, 2008, 78:013004. DOI: [10.1103/PhysRevD.78.013004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.78.013004).
- [119] GLEISBERG T, HOECHE S, KRAUSS F, et al. Event generation with SHERPA 1.1[J/OL]. JHEP, 2009, 02:007. DOI: [10.1088/1126-6708/2009/02/007](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2009/02/007).
- [120] SKANDS P. Tuning monte carlo generators: The perugia tunes[J/OL]. Phys. Rev. D, 2010, 82:074018. DOI: [10.1103/PhysRevD.82.074018](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.074018).
- [121] RE E. Single-top wt-channel production matched with parton showers using the powheg method[J/OL]. Eur. Phys. J. C, 2011, 71:1547. DOI: [10.1140/epjc/s10052-011-1547-z](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1547-z).
- [122] ALIOLI S, NASON P, OLEARI C, et al. Nlo single-top production matched with shower in powheg:  $s$ - and  $t$ -channel contributions[J/OL]. JHEP, 2009, 09:111. DOI: [10.1088/1126-6708/2009/09/111](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2009/09/111).
- [123] ADAMS D, ANASTOPOULOS C, ANDREAZZA A, et al. Recommendations of the Physics Objects and Analysis Harmonisation Study Groups 2014: ATL-PHYS-INT-2014-018[R/OL]. Geneva: CERN, 2014. <https://cds.cern.ch/record/1743654>.
- [124] HOECKER A, SPECKMAYER P, STELZER J, et al. TMVA: Toolkit for Multivariate Data Analysis[J]. PoS, 2007, ACAT:040.
- [125] M. Pinamonti, L. Valery and others. The trexfitter package for statistical analysis[EB/OL]. 2019. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/AtlasProtected/TtHFitter>.
- [126] CRANMER K, LEWIS G, MONETA L, et al. HistFactory: A tool for creating statistical models for use with RooFit and RooStats: CERN-OPEN-2012-016[R/OL]. New York: New York U., 2012. <https://cds.cern.ch/record/1456844>.
- [127] COWAN G, CRANMER K, GROSS E, et al. Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics[J/OL]. Eur. Phys. J. C, 2011, 71:1554. DOI: [10.1140/epjc/s10052-011-1554-0](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1554-0).

- [128] AAD G, et al. Search for Higgs boson pair production in the  $b\bar{b}b\bar{b}$  final state from pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector[J/OL]. *Eur. Phys. J.*, 2015, C75(9):412. DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3628-x](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3628-x).
- [129] AAD G, et al. Search For Higgs Boson Pair Production in the  $\gamma\gamma b\bar{b}$  Final State using  $pp$  Collision Data at  $\sqrt{s} = 8$  TeV from the ATLAS Detector[J/OL]. *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 114(8):081802. DOI: [10.1103/PhysRevLett.114.081802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.081802).
- [130] AABOUD M, et al. Search for pair production of Higgs bosons in the  $b\bar{b}b\bar{b}$  final state using proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector[J/OL]. *JHEP*, 2019, 01: 030. DOI: [10.1007/JHEP01\(2019\)030](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2019)030).
- [131] SIRUNYAN A M, et al. Search for resonant pair production of Higgs bosons decaying to bottom quark-antiquark pairs in proton-proton collisions at 13 TeV[J/OL]. *JHEP*, 2018, 08: 152. DOI: [10.1007/JHEP08\(2018\)152](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2018)152).
- [132] AABOUD M, et al. Search for Higgs boson pair production in the  $b\bar{b}WW^*$  decay mode at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector[J/OL]. *JHEP*, 2019, 04:092. DOI: [10.1007/JHEP04\(2019\)092](https://doi.org/10.1007/JHEP04(2019)092).
- [133] SIRUNYAN A M, et al. Search for resonant and nonresonant Higgs boson pair production in the  $b\bar{b}\ell\nu\ell\nu$  final state in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV[J/OL]. *JHEP*, 2018, 01: 054. DOI: [10.1007/JHEP01\(2018\)054](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2018)054).
- [134] AABOUD M, et al. Search for Higgs boson pair production in the  $\gamma\gamma b\bar{b}$  final state with 13 TeV  $pp$  collision data collected by the ATLAS experiment[J/OL]. *JHEP*, 2018, 11:040. DOI: [10.1007/JHEP11\(2018\)040](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2018)040).
- [135] SIRUNYAN A M, et al. Search for Higgs boson pair production in the  $\gamma\gamma b\bar{b}$  final state in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV[J/OL]. *Phys. Lett.*, 2019, B788:7-36. DOI: [10.1016/j.physletb.2018.10.056](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.10.056).
- [136] AABOUD M, et al. Search for resonant and non-resonant Higgs boson pair production in the  $b\bar{b}\tau^+\tau^-$  decay channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector [J/OL]. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 121(19):191801. DOI: [10.1103/PhysRevLett.122.089901](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.089901), [10.1103/PhysRevLett.121.191801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.191801).
- [137] SIRUNYAN A M, et al. Search for Higgs boson pair production in events with two bottom quarks and two tau leptons in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV[J/OL]. *Phys. Lett.*, 2018, B778:101-127. DOI: [10.1016/j.physletb.2018.01.001](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.01.001).
- [138] AABOUD M, et al. Search for Higgs boson pair production in the  $\gamma\gamma WW^*$  channel using  $pp$  collision data recorded at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector[J/OL]. *Eur. Phys. J.*, 2018, C78(12):1007. DOI: [10.1140/epjc/s10052-018-6457-x](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6457-x).
- [139] REN J, XIAO R Q, ZHOU M, et al. LHC search of new Higgs boson via resonant di-Higgs production with decays into 4W[J/OL]. *JHEP*, 2018, 06:090. DOI: [10.1007/JHEP06\(2018\)090](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2018)090).

- [140] ALWALL J, FREDERIX R, FRIXIONE S, et al. The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations[J/OL]. *JHEP*, 2014, 07:079. DOI: [10.1007/JHEP07\(2014\)079](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2014)079).
- [141] KALOGEROPOULOS A, ALWALL J. The SysCalc code: A tool to derive theoretical systematic uncertainties[J]. 2018.
- [142] MALTONI F. Higgs pair production[EB/OL]. <https://cp3.irmp.ucl.ac.be/projects/madgraph/wiki/HiggsPairProduction>.
- [143] BELLM J, et al. Herwig++ 2.7 Release Note[J]. 2013.
- [144] DENNER A, HEINEMEYER S, PULJAK I, et al. Standard Model Higgs-boson branching ratios with uncertainties[J/OL]. *Eur. Phys. J.*, 2011, C71:1753. DOI: [10.1140/epjc/s10052-011-1753-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1753-8).
- [145] ALIOLI S, NASON P, OLEARI C, et al. A general framework for implementing NLO calculations in shower Monte Carlo programs: the POWHEG BOX[J/OL]. *JHEP*, 2010, 06:043. DOI: [10.1007/JHEP06\(2010\)043](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2010)043).
- [146] BALL R D, et al. Parton distributions for the LHC Run II[J/OL]. *JHEP*, 2015, 04:040. DOI: [10.1007/JHEP04\(2015\)040](https://doi.org/10.1007/JHEP04(2015)040).
- [147] ATLAS Collaboration. Simulation of top-quark production for the ATLAS experiment at  $\sqrt{s} = 13$  TeV[M/OL]. 2016. <https://cds.cern.ch/record/2120417>.
- [148] ATLAS Collaboration. Modelling of the  $t\bar{t}H$  and  $t\bar{t}V(V = W, Z)$  processes for  $\sqrt{s} = 13$  TeV ATLAS analyses[M/OL]. 2016. <https://cds.cern.ch/record/2120826>.
- [149] ATLAS Collaboration. Multi-boson simulation for 13 TeV ATLAS analyses[M/OL]. 2016. <https://cds.cern.ch/record/2119986>.
- [150] The ATLAS Collaboration. Search for heavy neutrino,  $W_R$  and  $Z_R$  gauge bosons in events with two high- $P_T$  leptons and jets with the ATLAS detector in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV [J]. ATL-COM-PHYS-2013-810, 2013.
- [151] A. Alonso and B. Meirose. New data-driven methods for lepton charge mis-identification[J]. ATL-COM-PHYS-2012-164, 2012.
- [152] ALISON J. The fake factor method[M/OL]. Cham: Springer International Publishing, 2015: 151-209. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10344-0\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10344-0_9).
- [153] ATLAS Collaboration. Luminosity determination in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector at the LHC[J]. 2016.
- [154] ATLAS Collaboration. Analytical parametrization and shape classification of anomalous hh production in eft approach[J]. LHCHXSWG-INT-2016-001, 2016.
- [155] BUCKLEY A, FERRANDO J, LLOYD S, et al. LHAPDF6: parton density access in the LHC precision era[J/OL]. *Eur. Phys. J.*, 2015, C75:132. DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3318-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3318-8).
- [156] ATLAS Collaboration. Measurement of the  $W^\pm Z$  boson pair-production cross-section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector[J]. *Phys. Lett.*, 2016, B762:1-22.

- [157] ATLAS Collaboration. Measurement of the  $t\bar{t}Z$  and  $t\bar{t}W$  production cross sections in multi-lepton final states using  $3.2 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector [J]. Eur. Phys. J., 2017, C77:40.
- [158] READ A L. Presentation of search results: The  $CL(s)$  technique[J/OL]. J.Phys., 2002, G28: 2693-2704. DOI: [10.1088/0954-3899/28/10/313](https://doi.org/10.1088/0954-3899/28/10/313).
- [159] AAD G, et al. Combined search for the Standard Model Higgs boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector[J/OL]. Phys. Rev., 2012, D86:032003. DOI: [10.1103/PhysRevD.86.032003](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.032003).
- [160] Procedure for the LHC Higgs boson search combination in summer 2011[J]. 2011.
- [161] COWAN G, et al. Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics[J/OL]. Eur. Phys. J., 2011, C71:1554. DOI: [10.1140/epjc/s10052-011-1554-0](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1554-0).
- [162] READ A L. Presentation of search results: the  $CL_s$  technique[J/OL]. J. Phys. G, 2002, 28: 2693. DOI: [10.1088/0954-3899/28/10/313](https://doi.org/10.1088/0954-3899/28/10/313).
- [163] MALTONI F, PAGANI D, SHIVAJI A, et al. Trilinear Higgs coupling determination via single-Higgs differential measurements at the LHC[J/OL]. Eur. Phys. J., 2017, C77(12):887. DOI: [10.1140/epjc/s10052-017-5410-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5410-8).

## 攻读学位期间发表的学术论文与会议报告

### 作者简历

2010年9月—2014年6月，在四川大学物理科学与技术学院获得学士学位。

2014年9月—2019年6月，在中国科学院高能物理研究所攻读博士学位。

### 已发表(或正式接受)的学术论文:

[1] 主要作者 (paper contact): Search for Higgs boson pair production in the  $WW^*WW^*$  decay channel using ATLAS data recorded at  $\sqrt{s}=13$  TeV (CERN-EP-2018-227).

[2] 主要作者: LHC search of new Higgs boson via resonant di-Higgs production with decays into 4W (J. High Energ. Phys. (2018) 2018: 90).

[3] 参与者: Search for Higgs boson pair production in the final state of  $\gamma\gamma WW^*(\rightarrow \ell\nu jj)$  using  $13.3 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collision data recorded at 13 TeV with the ATLAS detector (ATLAS-CONF-2016-071).

[4] 参与者: Search for Higgs boson pair production in the  $\gamma\gamma WW^*$  channel using  $pp$  collision data recorded at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector (Eur. Phys. J. C (2018) 78: 1007).

[5] 参与者: Expected Performance of the ATLAS Inner Tracker at the High-Luminosity LHC (ATL-PHYS-PUB-2016-025).

### 国际会议海报与报告

[1] 报告: "Search for di-Higgs decaying to  $WW^*WW^*$  with the final state of the same sign leptons plus 4 jets at LHC" at «International Symposium on Higgs Boson and Beyond Standard Model Physics», 2016.

[2] 海报: "The production of additional bosons and the impact on Higgs boson physics" at «The fifth Annual Large Hadron Collider Physics conference», 2017.

[3] 海报: "Search for di-Higgs production with the ATLAS detector" at «21st Particles and Nuclei International Conference», 2017.

[4] 报告: "Search for Higgs boson pair production in the  $\gamma\gamma WW^*$  channel using

$pp$  collision data recorded at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector” at «Higgs Hunting 2018», 2018.

[5] 报告: ”The analysis of  $HH \rightarrow WW^*\gamma\gamma$  with the ATLAS detector” at «Double Higgs Production at Colliders Workshop», 2018.

## 致 谢

首先感谢方亚泉老师的悉心指导与支持，为我提供了良好的学术渠道，也给予了我极大的学术自由。感谢小组师兄及同事：杜春，孙小虎，张慧君，李奇，章宇及张凯栗。杜春师兄指导了我的本科毕业论文，是他为我打开了 LHC 唯象物理研究的大门；孙小虎师兄给予了我统计学和 MC 产生方面的指导，尤其是步入 ATLAS 前期，我从他那里得到了许多技术方面的帮助；张慧君师兄为  $WW^*\gamma\gamma$  分析打下了坚实的第一步，高兴于他讲述的各种有趣八卦；感谢李奇师兄给予的关于统计工具和各种高能所行政流程的帮助；章宇思维清晰，与他讨论，总是受益匪浅；张凯栗不辞麻烦，当我在美国期间，帮我处理了许多行政手续，并向他请教了许多关于 CEPC 的问题。

感谢 ATLAS Upgrade Tracking 分析组的会议召集人和同事，他们给予了作为新手的我极大的宽容与帮助，也感激他们推荐我作关于 Upgrade tracking performance 的国际会议报告；特别是 Heather 作为我 Qualification task 的 supervisor，前期给予了我许多关于 tracking 的指导，她的 sharp 也给我留下了深刻印象；还想特别感谢 Tim 和 Shih-Chieh 对我工作的支持与理解。

感谢 4W 分析相关的老师、会议召集人及同事。感谢 Biagio 提供的 diHiggs NLO 的 LHE 文件；感谢 Arnaud 给 4W 提出的许多建设性意见；感谢李亮老师，李兴国，Jason，Yesenia，没有他们，4W 分析不能圆满完成，尤其是李兴国和 Jason 极大的推进了论文写作及提交。感谢 4W 分析的 Editorial board：Magda, James, Emmanuel，特别是 Magda 多次阅读我的 supporting note，并给出了许多有用意见。在随后参与的  $t\bar{t}h$  分析中，感谢 Tamara, Richard 及 Ximo 对工作的合理组织及安排，感谢 Ntuple 组的辛勤工作。

有幸在伯克利实验室交流一年半，收获颇丰。首先要感谢姚为民老师，他可算我的第二导师，从 Qualification 到  $t\bar{t}h$  分析，均从他那里得到了有益的指导与建议，尤其是在伯克利期间，他还给予了我无微不至的照顾与指导，在此特别感谢。还要感谢我的硬件导师 Sandra，她引领我进入了 Strips 模块的组装与测试工作；感谢 Charilou，是她领我熟悉了整个工作流程，并告知我许多关于 Strips 的有用信息；感谢 Luise，她的到来，极大地推进了整个工作，也感谢她对我的指导与帮助，她的 sharp 和组织能力也给我留下了深刻印象；感谢 Timon 与 Karol 提供 Power board 和电子学方面的帮助；感谢 Rhonda 和 Phat 的 wire-bonding, Tom

和 Willy 的 tooling 及 gluing, Ken 的设备保障支持, Earl 的尺度测量支持, 没有他们的帮助与支持, 我们不能制造一个模块。美国内部 Strips 工作交流紧密, 在此特别指出, Santa Cruz 的 Vitaliy 与 Matthew 前期对我们的模块组装及测试工作助力极大, 布鲁克海文的 Stefania 成功帮助我解决第一块模块测试时的 debug 工作。另外, 感谢 ATLAS 组领导 Ian, 感谢 Quanita 每月为我提交补助表格, 感谢 Maurice 提供的办公室座位 (虽未在 Pixel 组工作)。在伯克利实验室的工作是非常愉快的, 感谢 ATLAS 组的所有成员, 我从他们身上真正看到了务实、严谨及不骄不躁的精神, 在硬件工作中锻炼了我的交流与组织能力; 我也重新审视到底什么是研究以及正确的研究态度, 研究可大可小, 但不应有高低。

当然, 还要感谢我的培养单位, 高能所, 它为我提供了从事高能物理实验的平台; 感谢高能所的 ATLAS 组, 尤其感谢庄胥爱老师每周兢兢业业的会议组织工作; 感谢 Joao 对大家工作的评论, 往往能够发现我从未注意到的漏洞; 感谢我在高能所认识的同学及朋友们, 与他们交流工作, 与他们一起玩耍, 总是非常愉快的。

感谢我的家人, 感恩他们二十多年来对我的养育, 他们的期望, 一直是我的前进动力之一。感谢我的女朋友对我的信任、肯定与包容, 尤其是论文写作期间, 忍让我对她的忽视, 感激不尽。我想, 我还有许许多多人应当感谢, 可是并不能一一列出, 所以最后在此一并感谢所有对我的成长有过帮助的人!