

课题1：Higgs粒子性质研究 - 研究进展

课题负责人：李冰 山东大学

课题骨干：李海峰、马连良 山东大学

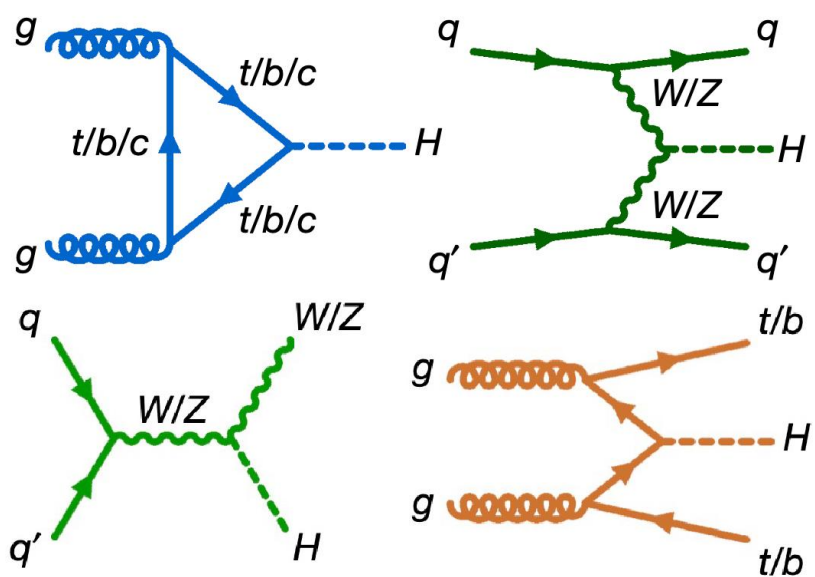
黄燕萍 高能所

杨海军 上海交大

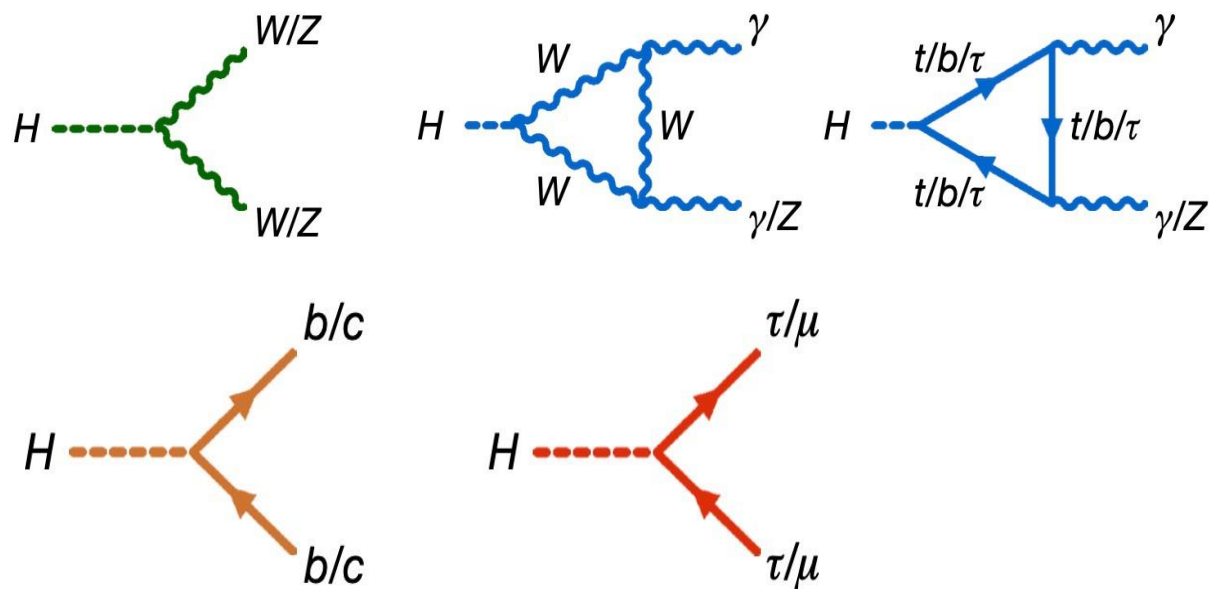
2026.8.20 高能所

Higgs粒子性质研究

- LHC运行之后很快发现了Higgs粒子
- 是否是标准模型Higgs? 基本粒子质量起源是否如标准模型Higgs机制所预言?
- 测量Higgs性质是LHC上最重要的物理目标之一



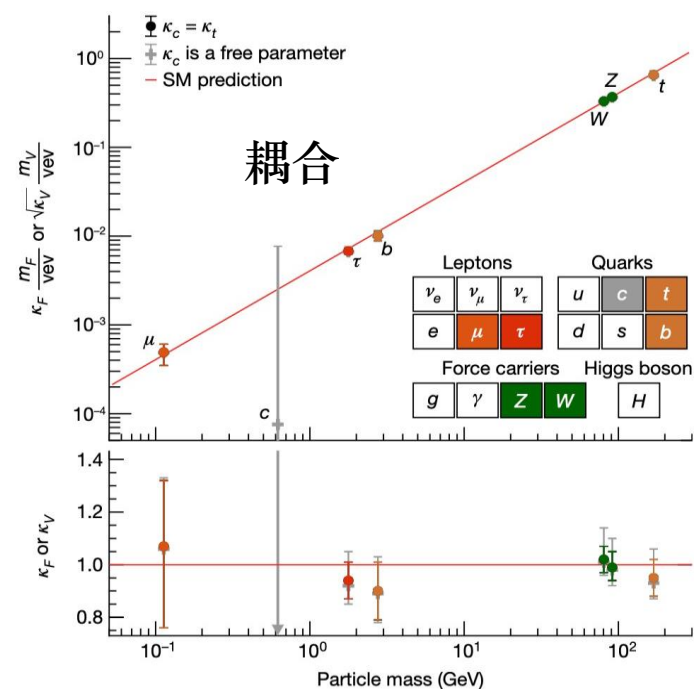
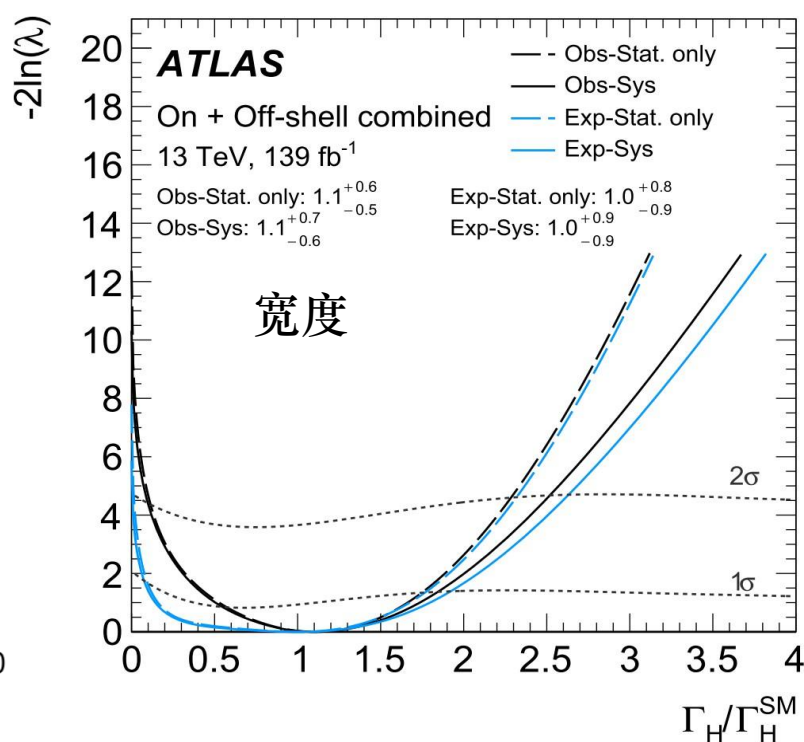
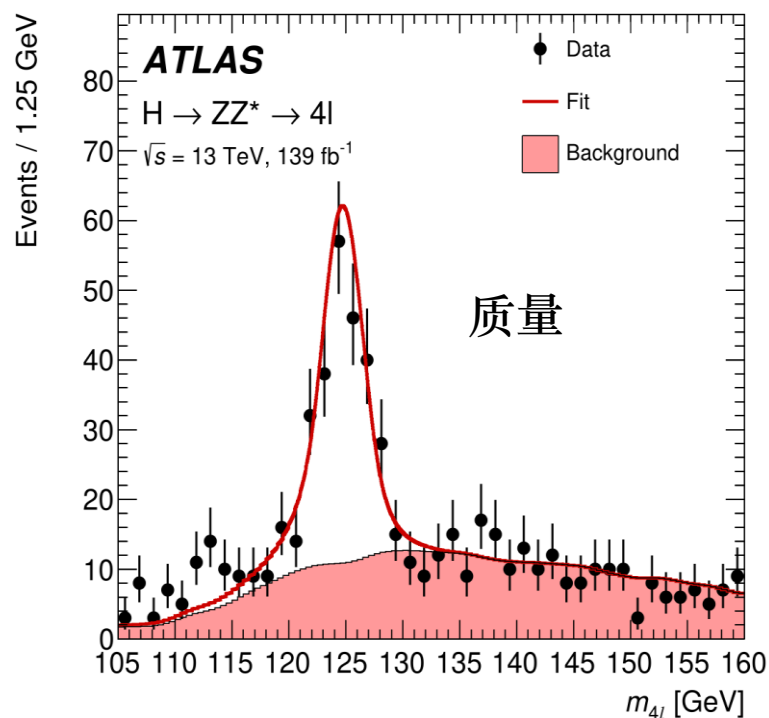
LHC上Higgs主要产生模式



Higgs主要衰变道

研究内容

- Higgs **质量、宽度** – 聚焦于四轻子衰变、并结合其他衰变模式
- Higgs **稀有衰变模式** 寻找 – 聚焦于探索尚未实验发现的Higgs衰变模式
- Higgs **与其他基本粒子的耦合**



Phys. Lett. B 843 (2023) 137880

Phys. Lett. B 846 (2023) 138223

Nature 607, pages52–59 (2022)

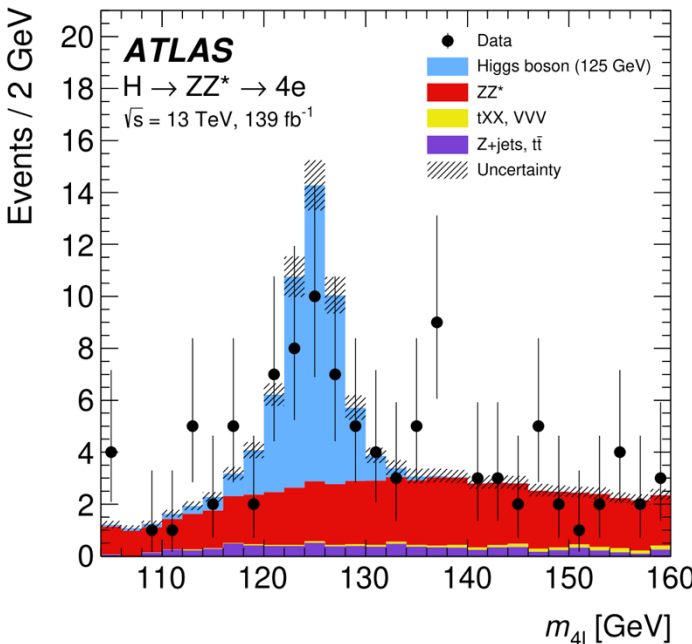
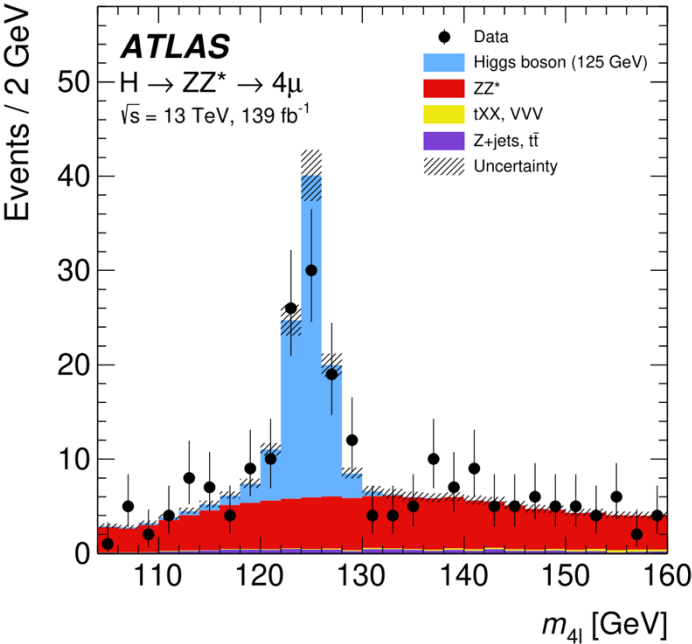
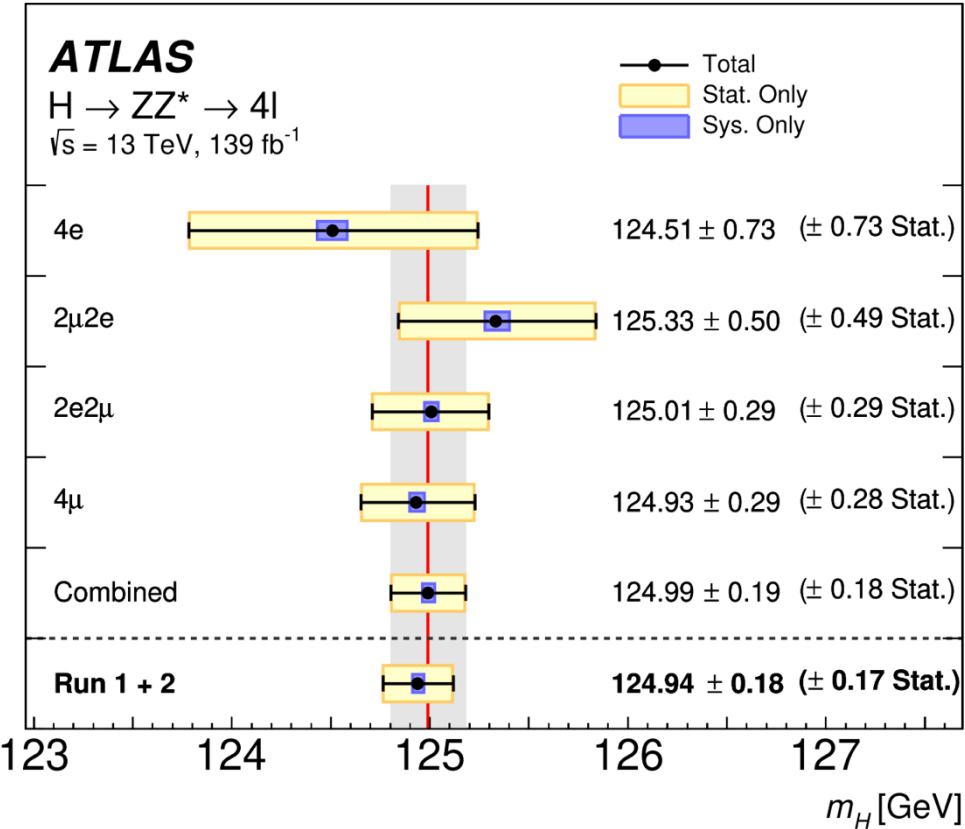
主要考核指标 (by 2028)

研究内容	考核指标
Higgs质量测量	统计误差降低约 $\sim 30\%$, 降低到 $< 140 \text{ MeV}$, 并努力控制系统误差
Higgs宽度测量	对离壳 Higgs探测灵敏度达到 2.5σ
$\text{Higgs} \rightarrow \mu\mu$	确保 $>2.5\sigma$ 、争取实现 3σ
$\text{Higgs} \rightarrow Z\gamma$	达到 $2.3 * \sigma_{\text{SM}}(\text{pp} \rightarrow \text{H} \rightarrow Z\gamma)$ 标准模型预期截面上限
$\text{Higgs} \rightarrow c\bar{c}$	达到 $26 * \sigma_{\text{SM}}(\text{W/Z} + \text{H} \rightarrow c\bar{c})$ 标准模型预期截面上限
Higgs与其他基本粒子耦合	统计误差降低约 $\sim 30\%$, 并努力控制系统误差

Higgs质量测量 – Run 2 数据研究

➤精确测量研究，依赖于大统计量数据以及ATLAS探测器良好的粒子重建

统计误差主导、muon channel主导

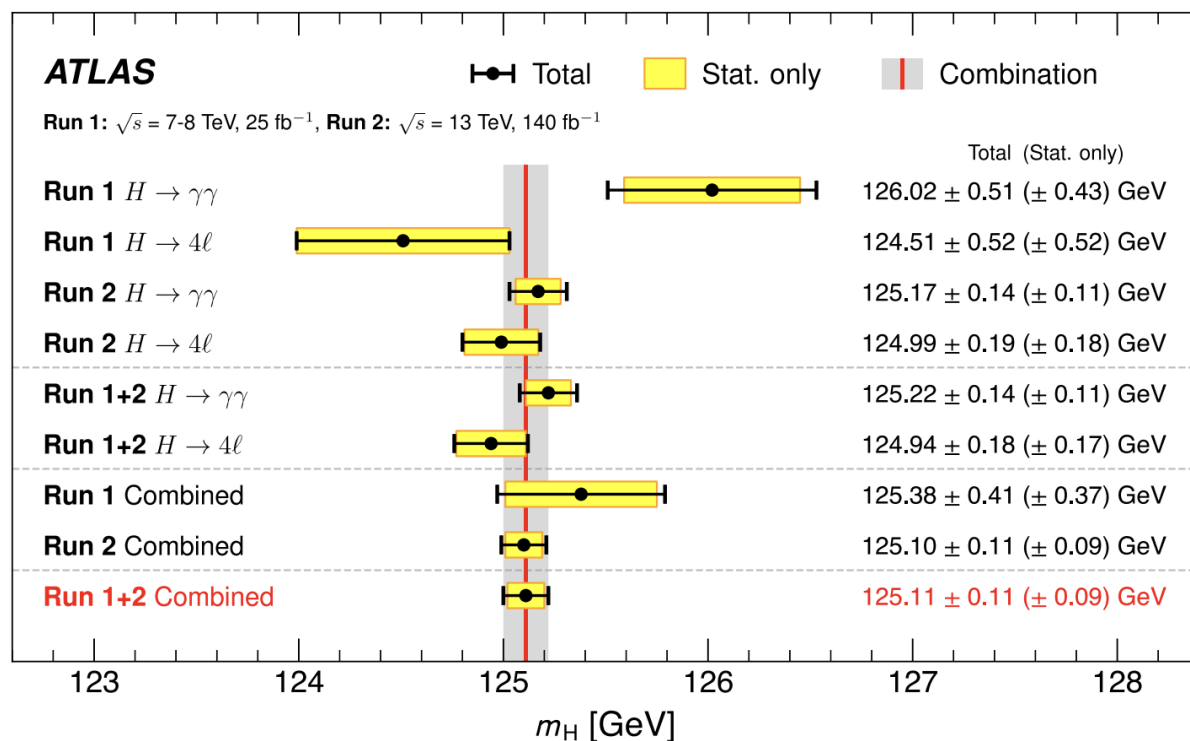


Largest contributions to the systematic uncertainty of m_H .

Systematic Uncertainty	Contribution [MeV]
Muon momentum scale	± 28
Electron energy scale	± 19
Signal-process theory	± 14

Higgs质量测量 – Run 1+2 combination

- 针对Run 2以及Run 1已经经过良好刻度修正的数据，通过多个衰变模式以及可能的与CMS实验联合测量，来最大化改进测量精度
- ATLAS实验Run 1、Run 2 四轻子与双光子末态质量联合测量



课题组成员目前在推动ATLAS与CMS实验四轻子、双光子末态的Higgs质量联合测量，以进一步提高测量精度

$$125.11 \pm 0.09(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst})$$

Phys. Rev. Lett. 131, 251802 (2023)

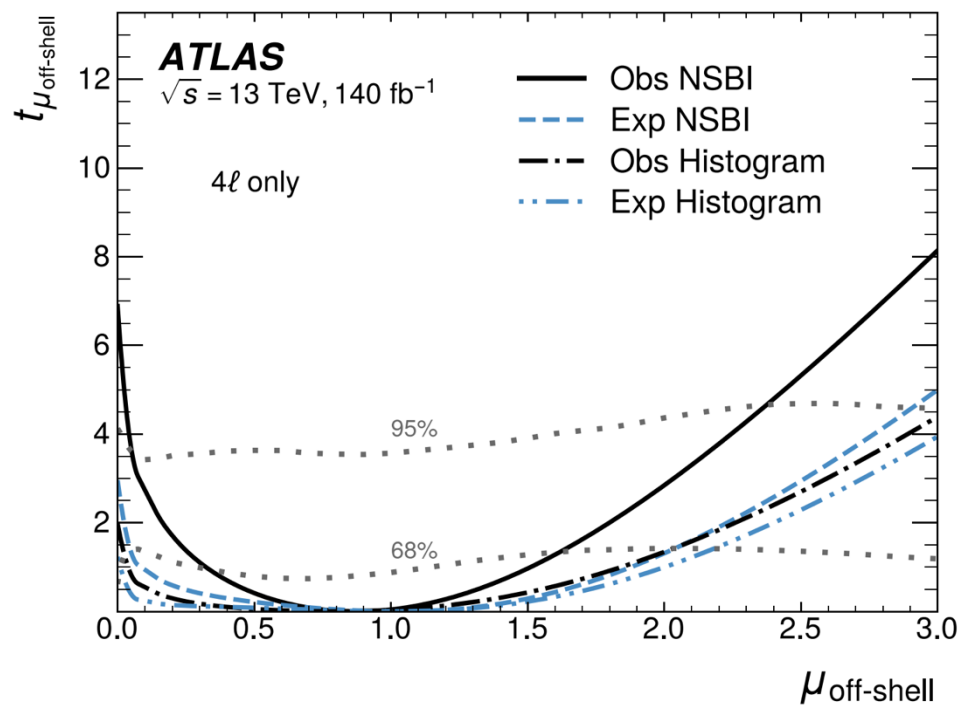
主要挑战 – CP recommendations

- We need to get public results in 2028
- The analysis is stat. dominant but we might still get pressure to use “Legacy” recommendation
- Have been in contact with Egamma conveners
 - They say they are aiming to have recommendation in 2027
 - They would like the analysis to use “Legacy” recommendation to make easier future combination with yy channel (NPs etc technical reason)
- Have started to work on relevant CP studies directly
 - One postdoc (Mourad Hidaoui) and one student (Hang An) from Shandong U.

Higgs衰变宽度测量

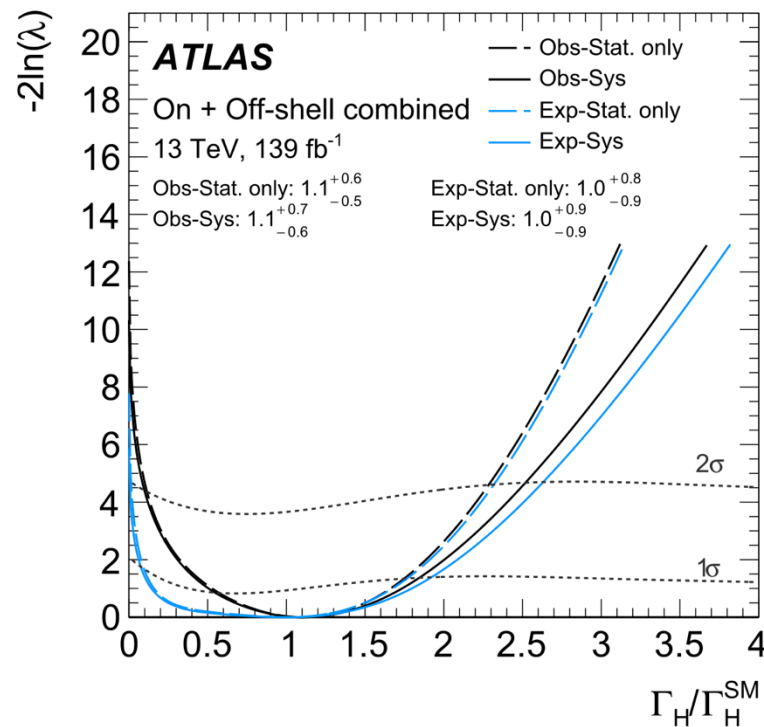
➤ 利用高质量区间的事例，通过测量Higgs off-shell产生过程，来间接测量Higgs宽度

Run 2数据基于neural simulation-based inference方法结果



2025 Rep. Prog. Phys. **88** 057803

Run 2数据基于Histogram-based方法结果



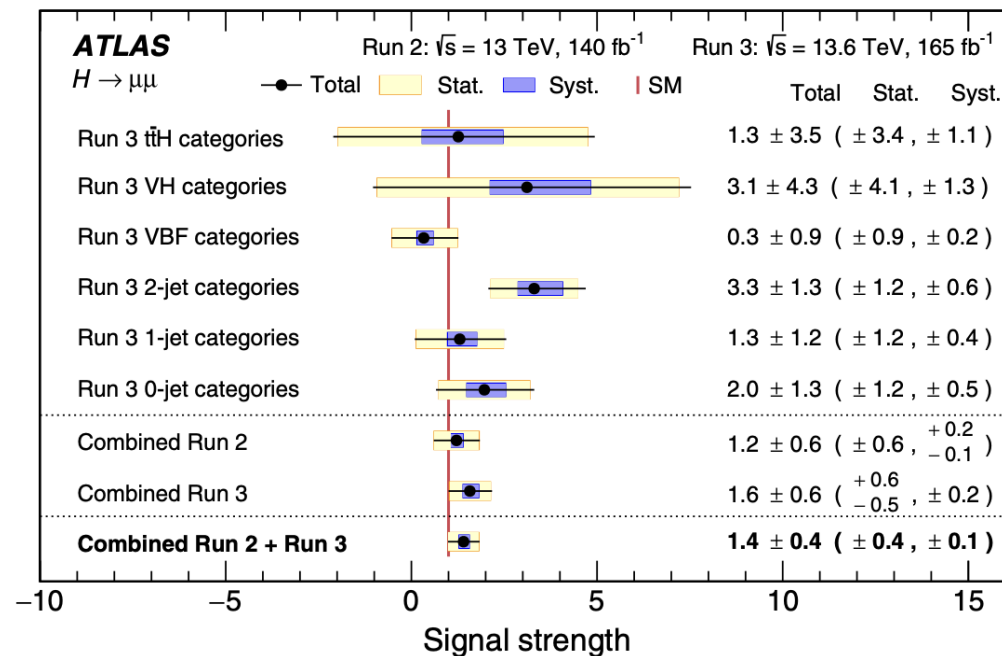
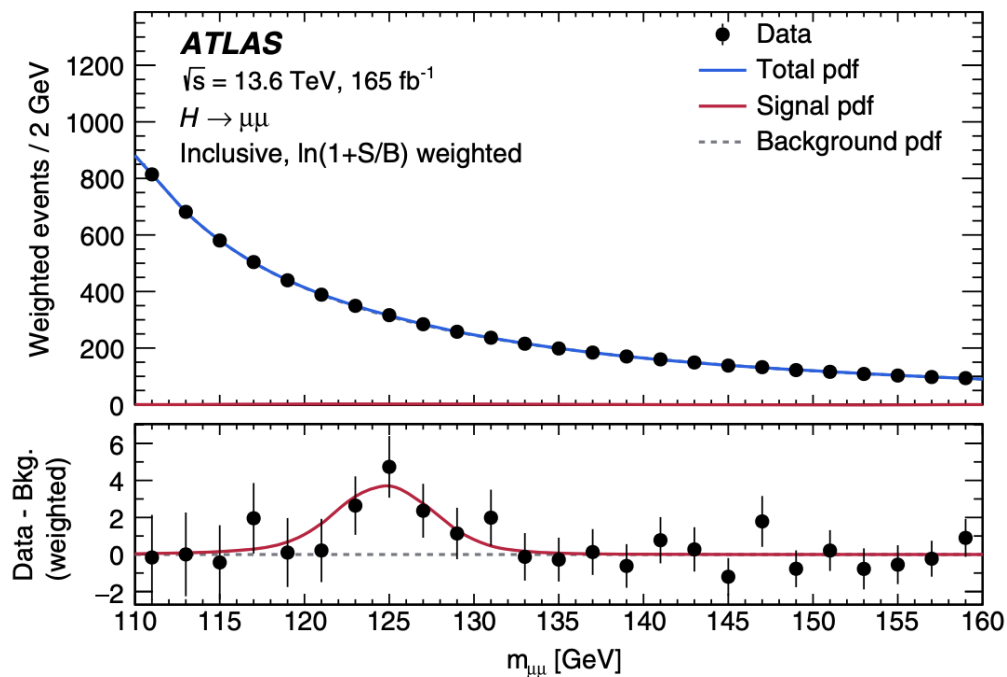
Physics Letters B **846** (2023) 138223

主要挑战 – 新方法

- ATLAS内部多个团队基于不同分析方法开展研究，主要有Histogram-based以及Neural Simulation-Based Inference (NSBI)方法
- Histogram-based：方法成熟，基于ATLAS分析框架，进展较为可控
- NSBI：近年发展的新方法，针对每个事例通过神经网络方法推断likelihood ratio。预期灵敏度较好，但计算需求巨大（国外团队基于google等提供计算资源），时间进展较难控制
- 中国组工作计划：目前中国组成员在合作组内全力推进基于Histogram-based的分析研究以确保项目计划，同时亦在跟进新方法的研究进展情况并做出贡献
- Have been in contact with RML conveners
 - If move fast, they are not against (at least now) to publish hist-based analysis
- Major personpower
 - One postdoc (Shanjia Liu), one new PhD student (joining in Sept.) from Shandong U.
 - One summer student (Lailin's) from USTC

寻找Higgs $\rightarrow\mu\mu$ 稀有衰变过程

- 联合Run 2与部分Run 3数据，观测（预期）信号显著度: 3.4σ (2.5σ)，达到考核指标
- 在ATLAS实验上首次观测到希格斯粒子和第二代费米子耦合的迹象
- 后续研究进行中

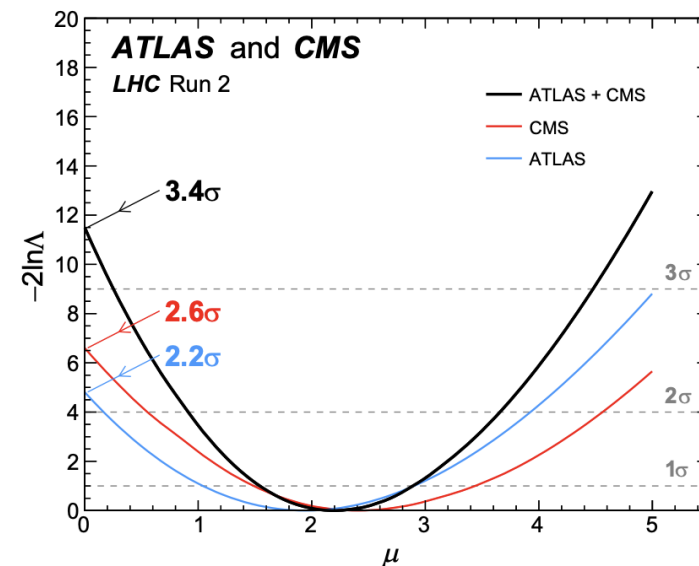
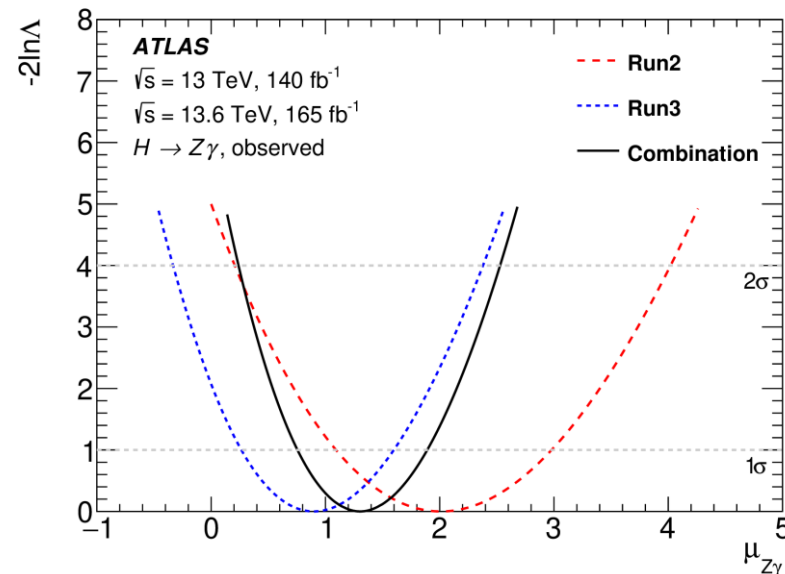
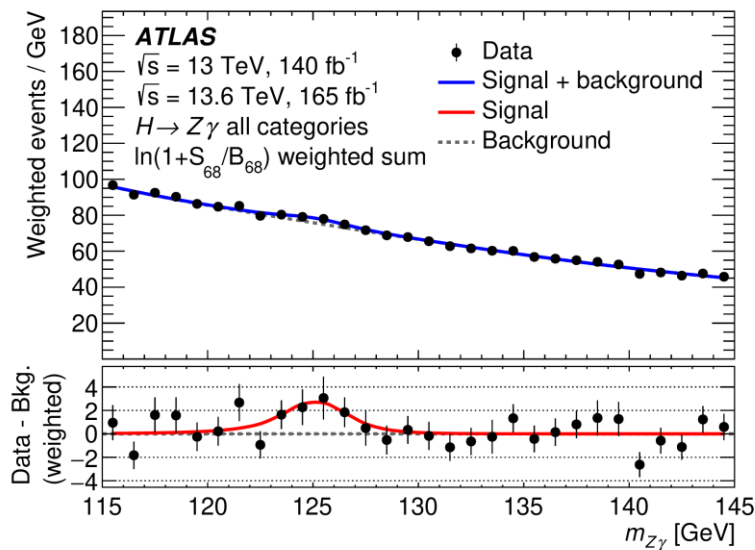


Phys. Rev. Lett. 135, 231802 (2025), **Editors' Suggestion, Featured in Physics**

贡献：在ATLAS合作组发起、推动该项研究并担任分析负责人、内部编辑，合作组审核报告

寻找Higgs $\rightarrow Z\gamma$ 稀有衰变过程

- 联合Run 2与部分Run 3数据，观测（预期）信号显著度: 2.5σ (1.9σ), 达到考核指标
- 与CMS 合作组基于Run 2数据开展联合分析，观测（预期）信号显著度: 3.4σ (1.6σ), 达到考核指标



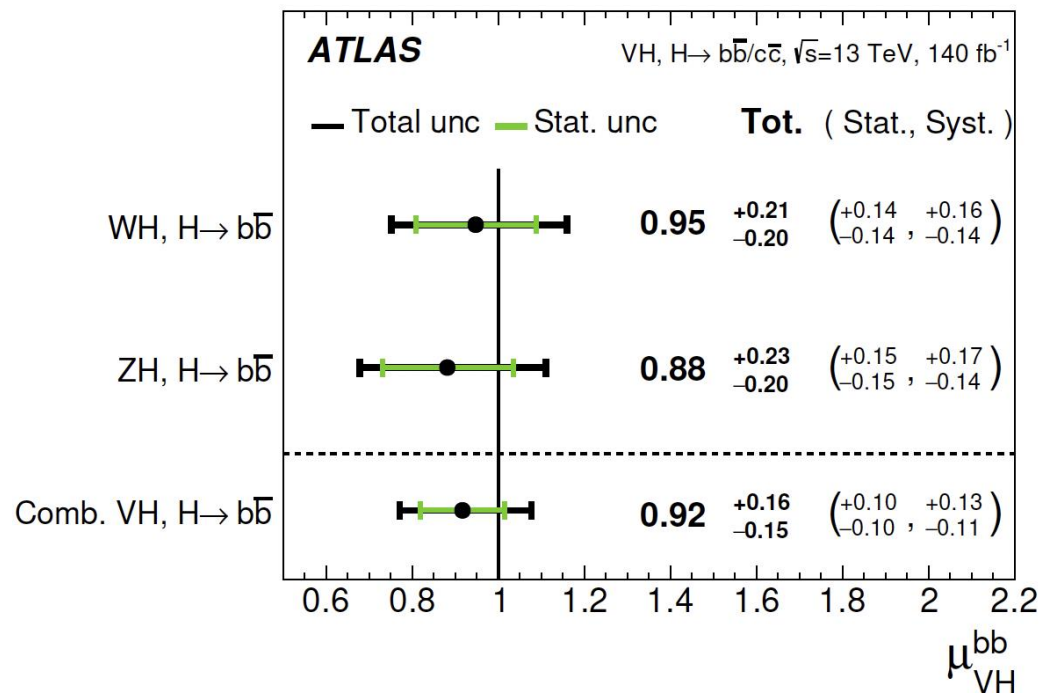
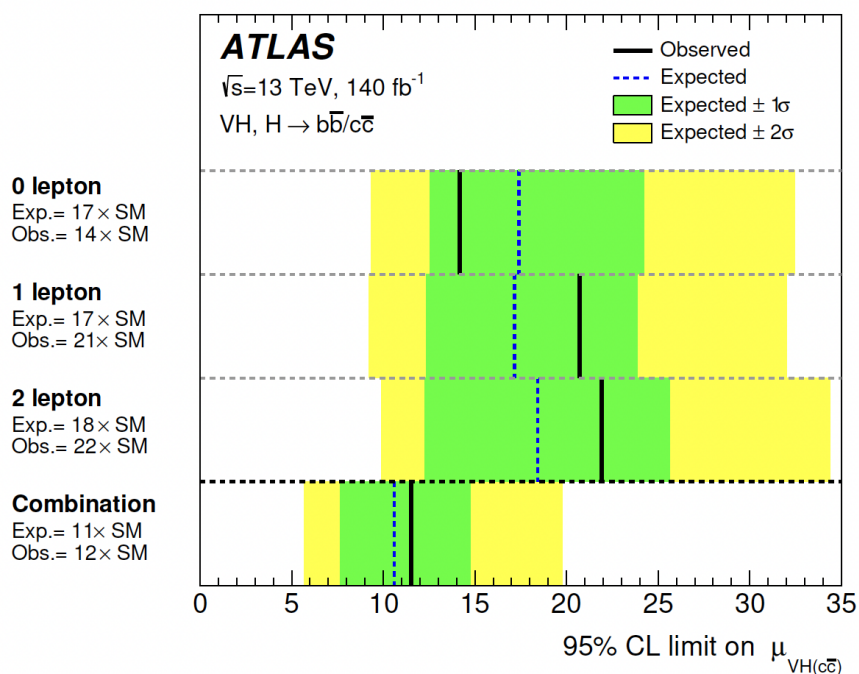
[arXiv:2507.12598](https://arxiv.org/abs/2507.12598)

Phys. Rev. Lett. 132, 021803 (2024)
Editors' Suggestion. Featured in Physics
2024PRL年度精选

贡献：分析负责人, 内部编辑, 合作组审核报告, 信号和背景模拟, 统计方法验证, 系统误差研究

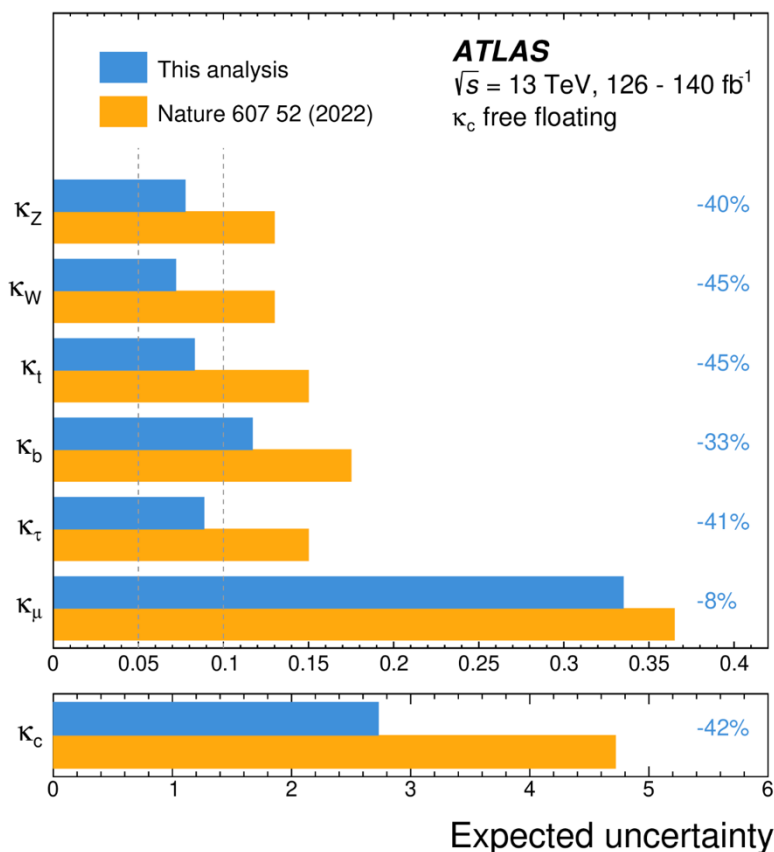
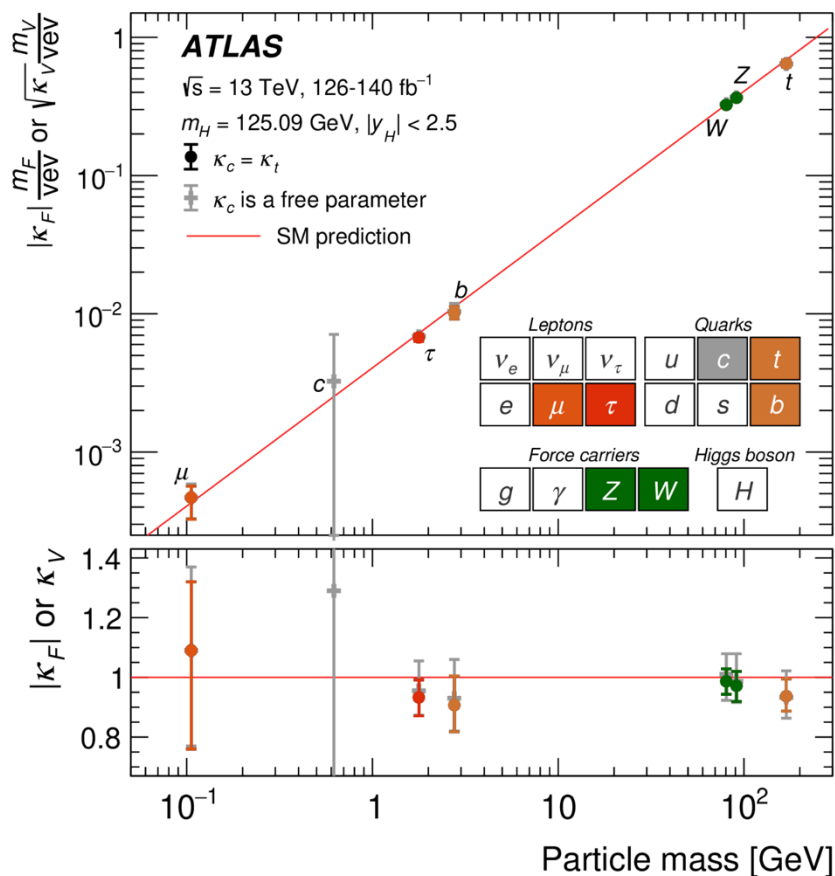
寻找Higgs $\rightarrow$ cc衰变过程

- 利用VH (Higgs与W、Z伴随产生) 过程来压低本底
- $H\rightarrow b\bar{b}$ 测量误差改善 $\sim 15\%$, $H\rightarrow c\bar{c}$ 精度提升3倍
- 测量 (预期) 截面上限: 11.5 (10.6) 倍标准模型截面期望值, 达到考核指标



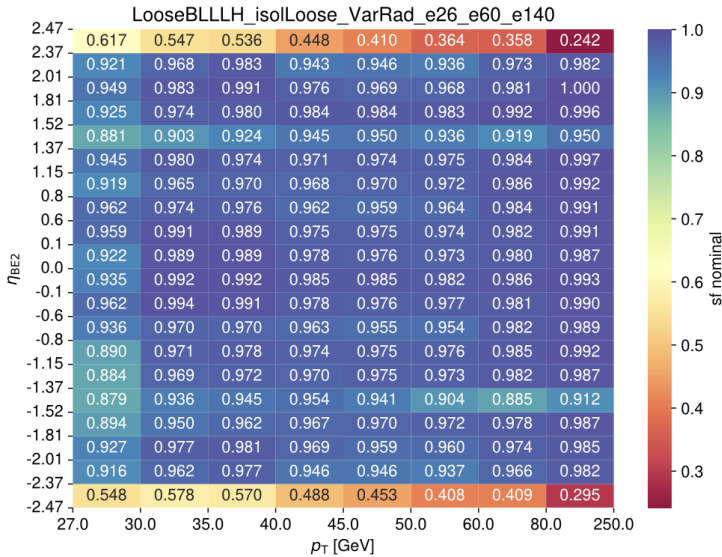
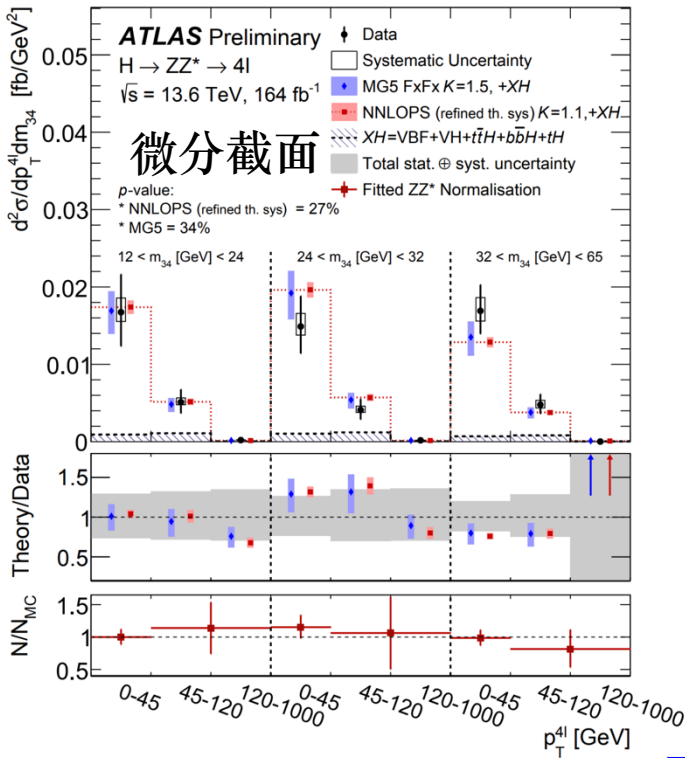
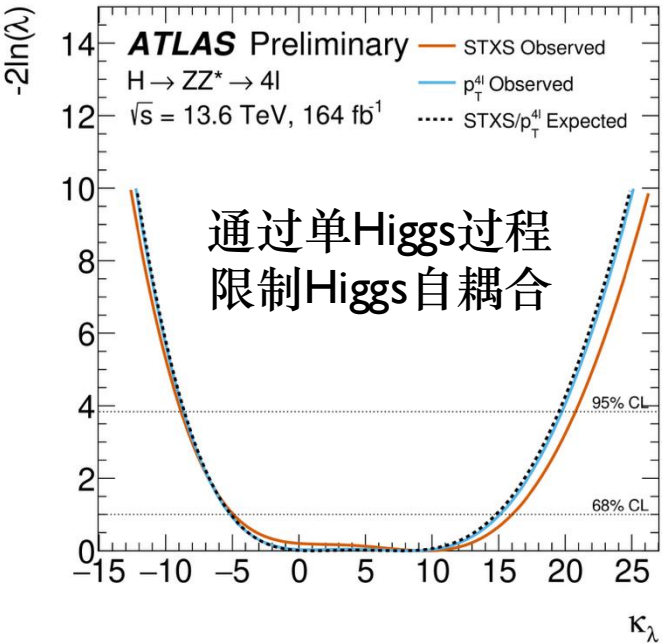
Higgs与其他基本粒子耦合 – Run 2数据研究

- 针对Run 2已经经过良好刻度修正的数据，通过多个衰变模式的联合测量，来最大化改进测量精度
- Higgs与基本粒子耦合精度改进10-20%，Hcc耦合精度改进50%



Higgs衰变宽度测量 – Run 3数据研究 (ZZ)

- 完成四轻子衰变道截面测量研究
- 课题组成员亦贡献于缪子鉴别、电子触发效率等ATLAS探测器轻子刻度相关研究。是进一步进行质量、宽度等精确测量所需要的前期工作



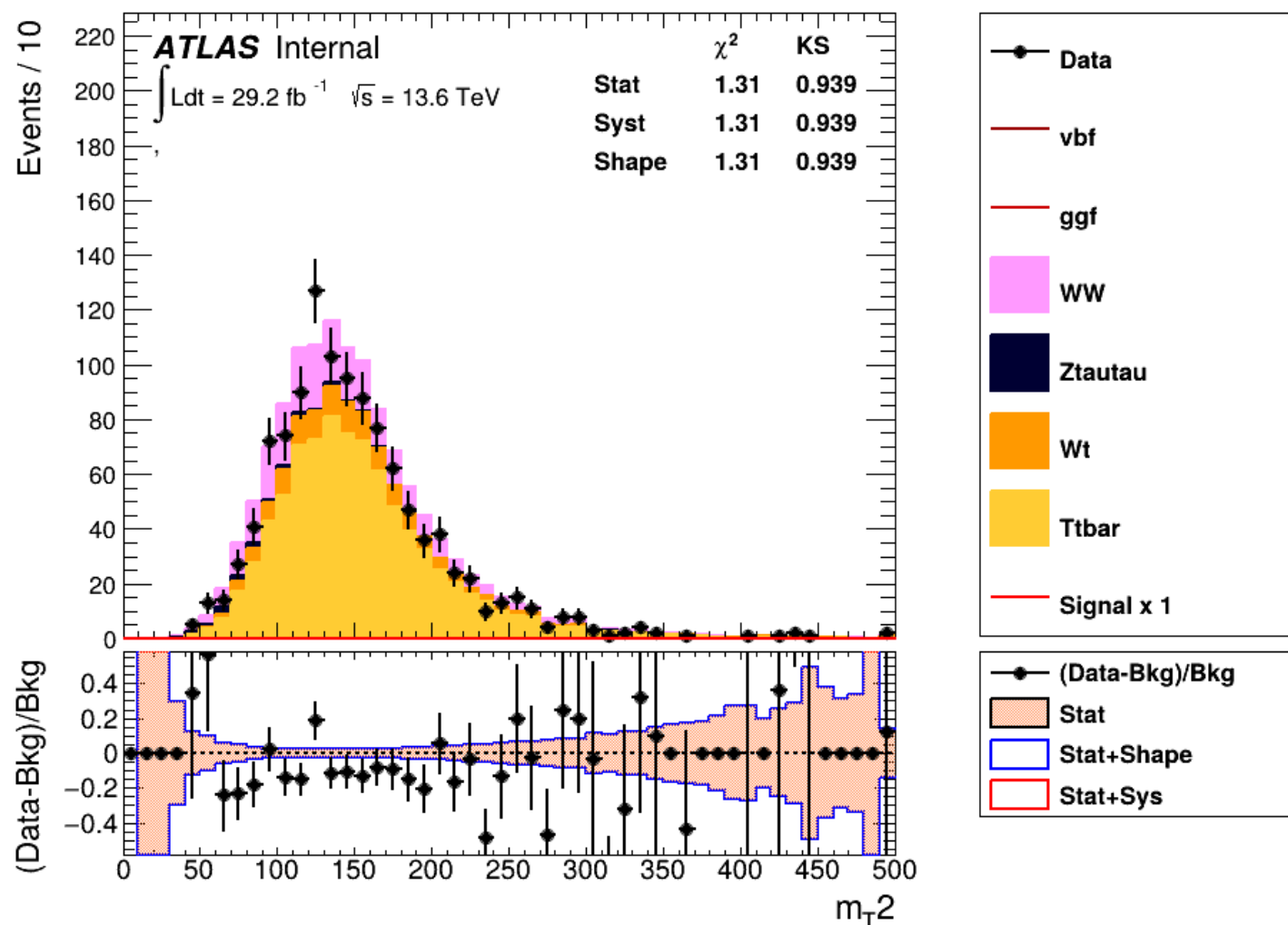
电子触发效率修正研究

ATLAS-CONF-2025-002、ATLAS-CONF-2026-003

贡献: qqZZ过程研究, Higgs自耦合研究,
电子触发效率研究

Higgs与其他基本粒子耦合 – Run 3数据研究 (WW)

➤ Run 3研究目前集中于各个独立衰变道的截面测量



ATLAS内部研究
担任分析负责人

主要挑战

- Most challenging one
- Due to LHC data-taking schedule it's very difficult to have the Run 3 combination analysis ready
- Run 2 legacy + Run 3 individual channel? Still very challenging and need to put more person power

总结与下一步计划

➤课题1涵盖Higgs性质精确测量、寻找Higgs稀有衰变模式，以及Higgs耦合联合测量

➤Higgs稀有衰变

- 完成 $H \rightarrow Z\gamma/\mu\mu$ 稀有衰变、以及 $H \rightarrow cc$ 第二代重味夸克衰变测量，探测灵敏度及截面测量上限等物理结果，超出预设考核指标

➤Higg性质精确测量及联合测量

- 正在开展大统计数据分析，并尝试推进与CMS的联合分析
- 尝试发展新方法提高探测灵敏度
- 全力在合作组内推进相关研究

backup

文章发表情况

- Combined Measurement of the Higgs Boson Mass from the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ Decay Channels with the ATLAS Detector Using $\sqrt{s}=7, 8$, and 13 TeV pp Collision Data”, ATLAS Collaboration, [Phys. Rev. Lett. 131 \(2023\), 251802](#)
- Measurement of the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ cross-sections in pp collisions at 13.6 TeV with the ATLAS detector”, ATLAS Collaboration, [Eur. Phys. J. C 84 \(2024\) 78](#)
- Evidence for the Higgs Boson Decay to a Z Boson and a Photon at the LHC”, ATLAS and CMS Collaboration, [Phys. Rev. Letts. 132 \(2024\) 021803](#)
- Evidence for the dimuon decay of the Higgs boson in pp collisions with the ATLAS detector”, ATLAS Collaboration, [Phys. Rev. Lett. 135 \(2025\) 231802](#)
- Search for the Higgs boson decay to a Z boson and a photon in pp collisions at 13TeV and 13.6TeV with the ATLAS detector”, ATLAS Collaboration, [arXiv:2507.12598](#)
- Measurements of WH and ZH production with Higgs boson decays into bottom quarks and direct constraints on the charm Yukawa coupling in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector”, ATLAS Collaboration, [JHEP 04 \(2025\) 075](#)
- Measurements of the Higgs boson production, fiducial and differential cross-sections in the four lepton decay channel using 164 fb⁻¹ of data collected at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV with the ATLAS detector”, ATLAS Collaboration, <https://arxiv.org/abs/2605.19016>
- Measurements and interpretation of the Higgs boson differential and production mode cross sections in the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ channel at 13 TeV with the ATLAS detector”, ATLAS Collaboration, [ATLAS-CONF-2025-002](#)
- Combined measurements of Higgs boson production and decay at 13 TeV using up to 140 fb⁻¹ of data collected by the ATLAS Experiment”, ATLAS Collaboration, [ATLAS-CONF-2025-006](#)

考核指标

预期成果		考核指标 ²				考核方式 (方法) 及 评价手段 ⁴	
预期成果名称		预期成果类型	指标 名称	立项时已有指 标值/状态	中期指标 值/状态 ³	完成时指标 值/状态	
1	Higgs 粒子质量与 衰变宽度测量	☒ 论 文 ☒ 其 他 ATLAS-CONF-NOTE 国 际会议文集	指标 1.1 Higgs 粒子 质量 M_H	$M_H = 124.99 \pm 0.18 \text{ (stat.)} \pm 0.04 \text{ (syst.) GeV}$ 。参考文献: Phys. Lett. B 843 (2023) 137880	得 到 初 步 分析结果, 统 计 灵 敏 度 基 本 达 到 指 标 要 求,系统误 差有待改 进。	统 计 误 差 改 进 约 $\sim 30\%$, 降低到 $< 140 \text{ MeV}$, 并努力 控制系统误差。	依据期刊文 章和国际会 议文集集中 的数据检查 考核指标(所有 物理成果都 需 要 在 ATLAS 合作 组内部多级 审核通过才 能正式发表)
			指标 1.2 Higgs 粒子 衰变宽度 Γ_H	离壳 Higgs 探 测灵敏度 2.2σ 置信度。参考 文 : arXiv:2304.015 32, PLB 已接 收	得 到 初 步 分析结果, 统 计 灵 敏 度 基 本 达 到 指 标 要 求,系统误 差有待改 进。	对离壳 Higgs 探测灵敏度 达到 2.5σ 置 信度, 完成 ATLAS 最精 确 Γ_H 自然宽 度测量。	依据期刊文 章和国际会 议文集集中 的数据检查 考核指标

考核指标

2	寻找 $H \rightarrow \mu\mu$ 稀有衰变	☒ 论文 ☒ 其他	指标 2. $H \rightarrow \mu\mu$ 相对 SM 预言的信号强度, 在 95% 的置信度上限的灵敏度	$2.0 \times \sigma_{SM} (pp \rightarrow H \rightarrow \mu\mu)$ 截面测量上限期望值。参考文献: Phys. Lett. B 812 (2021) 135980	得到初步分析结果, 改进统计灵敏度与系统误差。	确保 $>2.5\sigma$ 、争取实现以 3σ 灵敏度探测到 $H \rightarrow \mu\mu$ 信号迹象。	依据期刊文章和国际会议文集集中的数据检查考核指标
3	寻找 $H \rightarrow Z\gamma$ 稀有衰变	☒ 论文 ☒ 其他	指标 3. $H \rightarrow Z\gamma$ 相对 SM 预言的信号强度, 在 95% 的置信度上限的灵敏度	$2.6 \times \sigma_{SM} (pp \rightarrow H \rightarrow Z\gamma)$ 截面测量上限期望值。参考文献: Phys. Lett. B 809 (2020) 135754	得到初步分析结果, 统计灵敏度基本达到指标要求, 系统误差有待改进。	达到 $2.3 \times \sigma_{SM} (pp \rightarrow H \rightarrow Z\gamma)$ 截面测量上限期望值	依据期刊文章和国际会议文集集中的数据检查考核指标
4	寻找 $H \rightarrow cc$ 稀有衰变	☒ 论文 ☒ 其他__	指标 4. $H \rightarrow cc$ 相对 SM 预言的信号强度, 在 95% 的置信度上限的灵敏度	$31 \times \sigma_{SM} (W/Z + H \rightarrow cc)$ 截面测量上限期望值。参考文献: Eur. Phys. J. C 82 (2022) 717	得到初步分析结果, 统计灵敏度基本达到指标要求, 系统误差有待改进。	预期截面测量上限相比于已有结果改进 20%, 达到 $26 \times \sigma_{SM} (W/Z + H \rightarrow cc)$ 截面测量上限期望值	依据期刊文章和国际会议文集集中的数据检查考核指标

考核指标

5	Higgs 与各基本粒子耦合测量	☒ 论文 ☒ 其他	指标 5. 测量 Higgs 与各粒子间的耦合强度	$\mu_{[H\gamma\gamma]} = 1.09 \pm 0.06 \pm 0.07$; $\mu_{[HZZ]} = 1.04 \pm 0.08 \pm 0.06$; $\mu_{[HWW]} = 1.20 \pm 0.05 \pm 0.11$; 各分支道联合 $\mu = 1.05 \pm 0.06$; 参考文献: Nature 607 (2022) 52-59	该分析为各个产生衰变道的联合分析, 项目中期预计主要集中在各个衰变道的工作	统计误差降低 30%, 并努力控制系统误差, 给出 ATLAS 实验最精确结果	依据期刊文章和国际会议文集中的数据检查考核指标
---	------------------	---	---------------------------	--	---------------------------------------	---	-------------------------