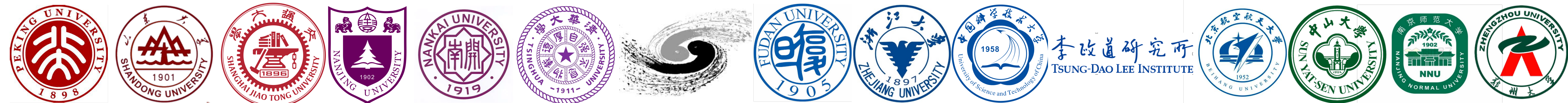


# TeV实验进展综述

## — LHC上的ATLAS/CMS实验进展

肖朦，浙江大学  
感谢各单位提供材料！

中国物理学会高能物理分会第十二届全国会员代表大会暨学术年会  
2026.7.17 华南师范大学 广州



|       | ATLAS                                                                                   | CMS                                                                                                 |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 单位    | 中国科学技术大学<br>高能物理研究所<br>山东大学<br>上海交通大学<br>李政道研究所<br>南京大学<br>中山大学<br>清华大学<br>郑州大学<br>南开大学 | 高能物理研究所<br>北京大学<br>北京航空航天大学<br>清华大学<br>中山大学<br>浙江大学<br>南京师范大学<br>复旦大学<br>中国科学技术大学<br>山东大学<br>华南师范大学 |
| 署名作者数 | 112                                                                                     | 58                                                                                                  |
| 合作组占比 | 3.8%                                                                                    | 2.3%                                                                                                |

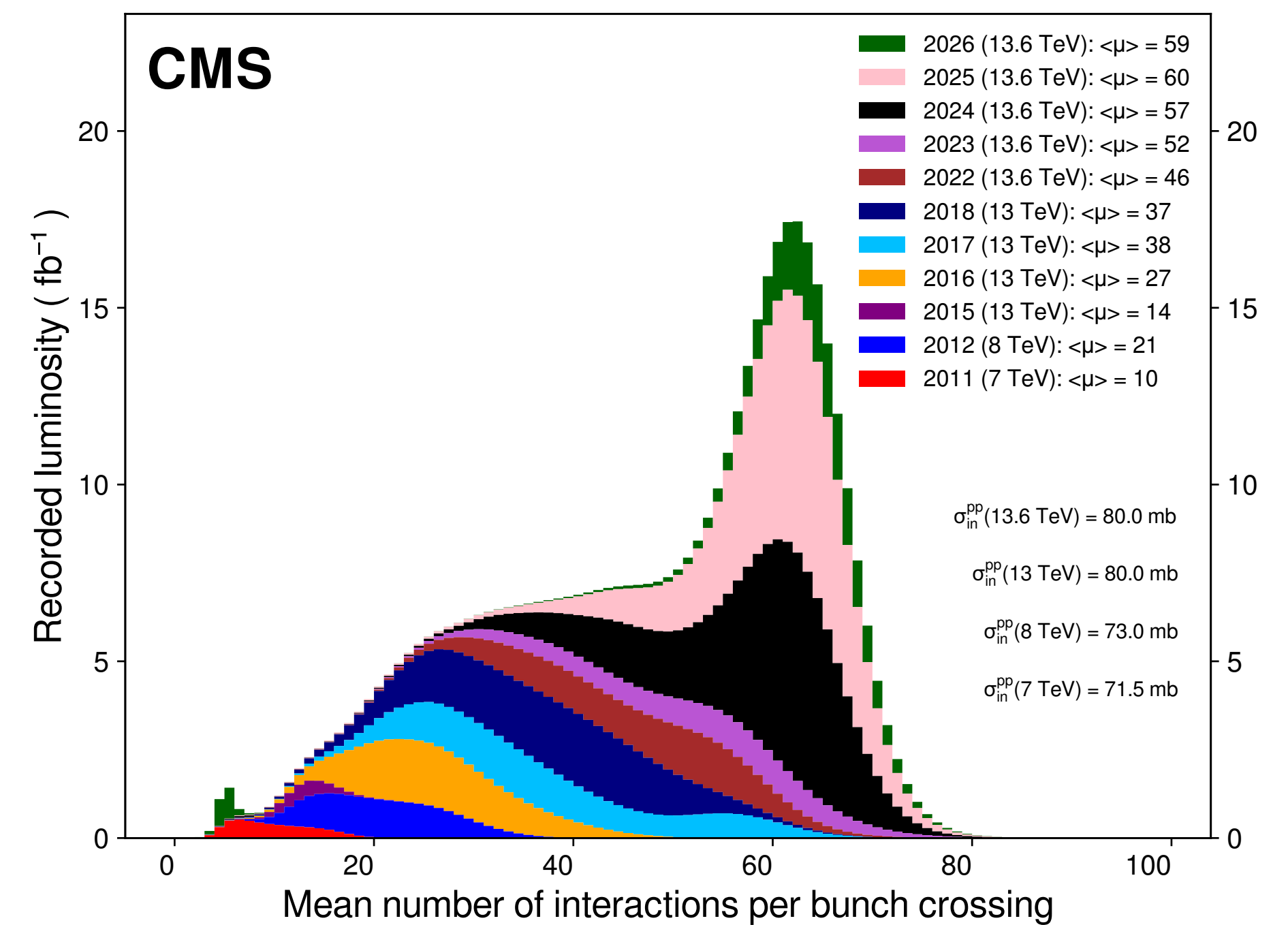
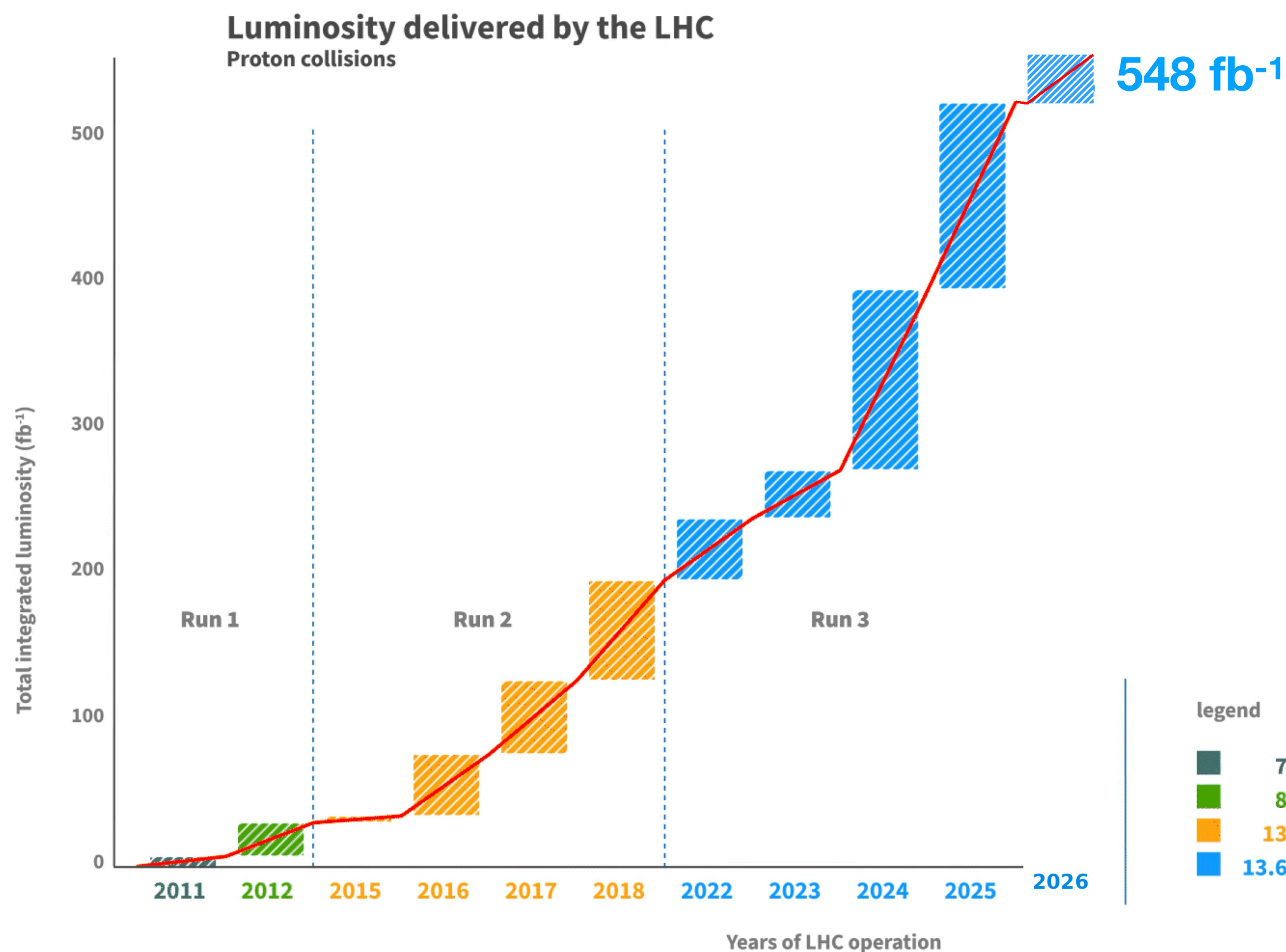
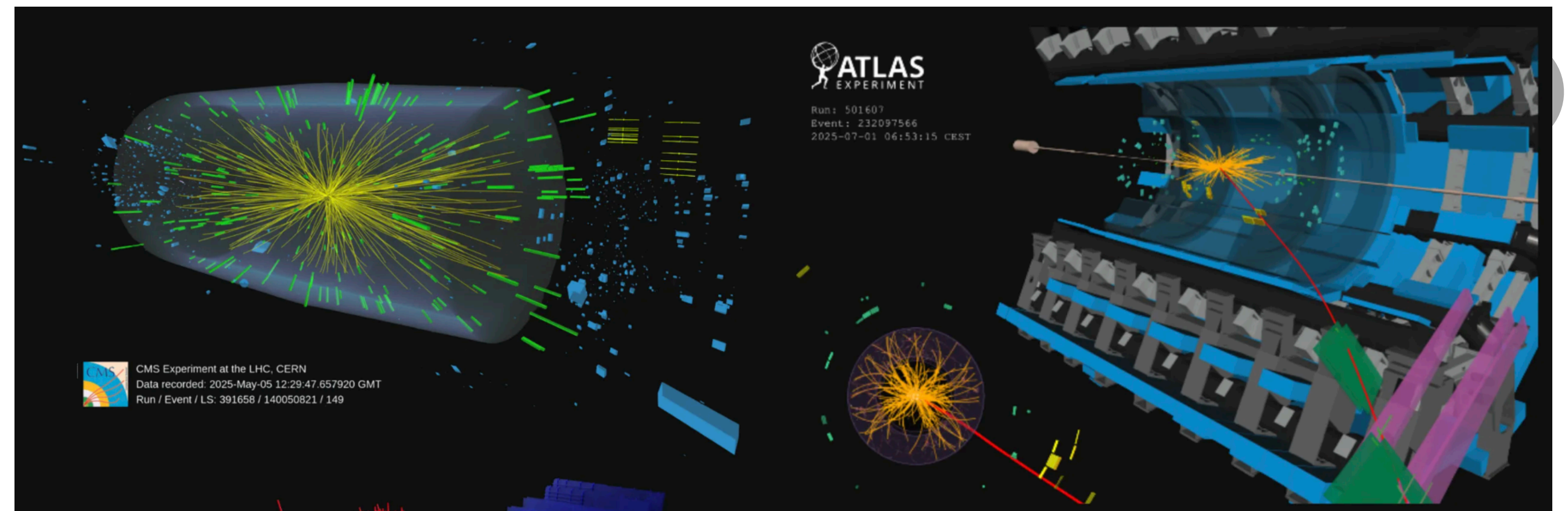


LHC于2026年6月结束了Run3取数

pp对撞能量13.6 TeV, 总积分亮度548 fb<sup>-1</sup>

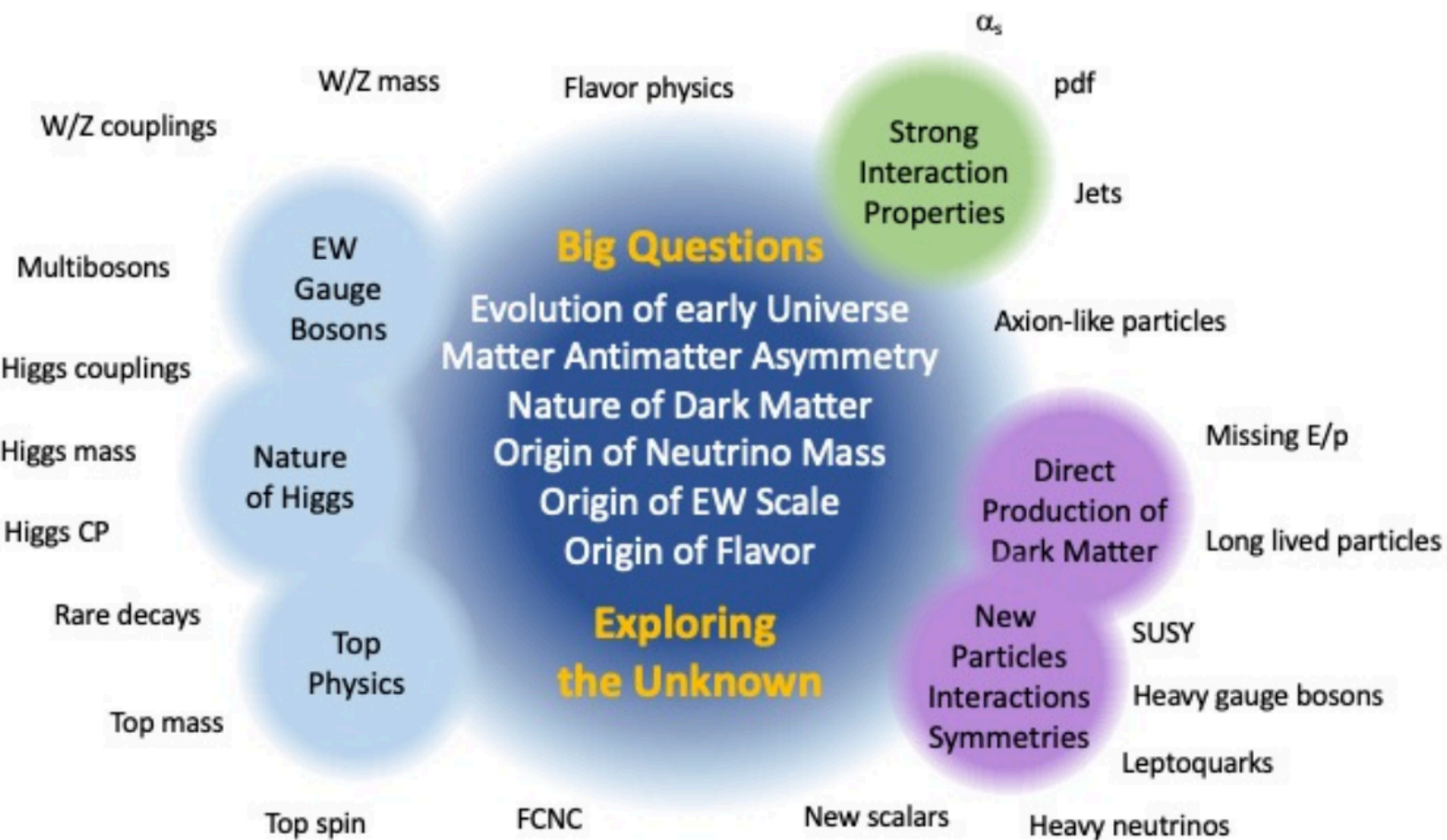
Run3平均堆积事件~60

计划2030年开始HL-LHC的运行

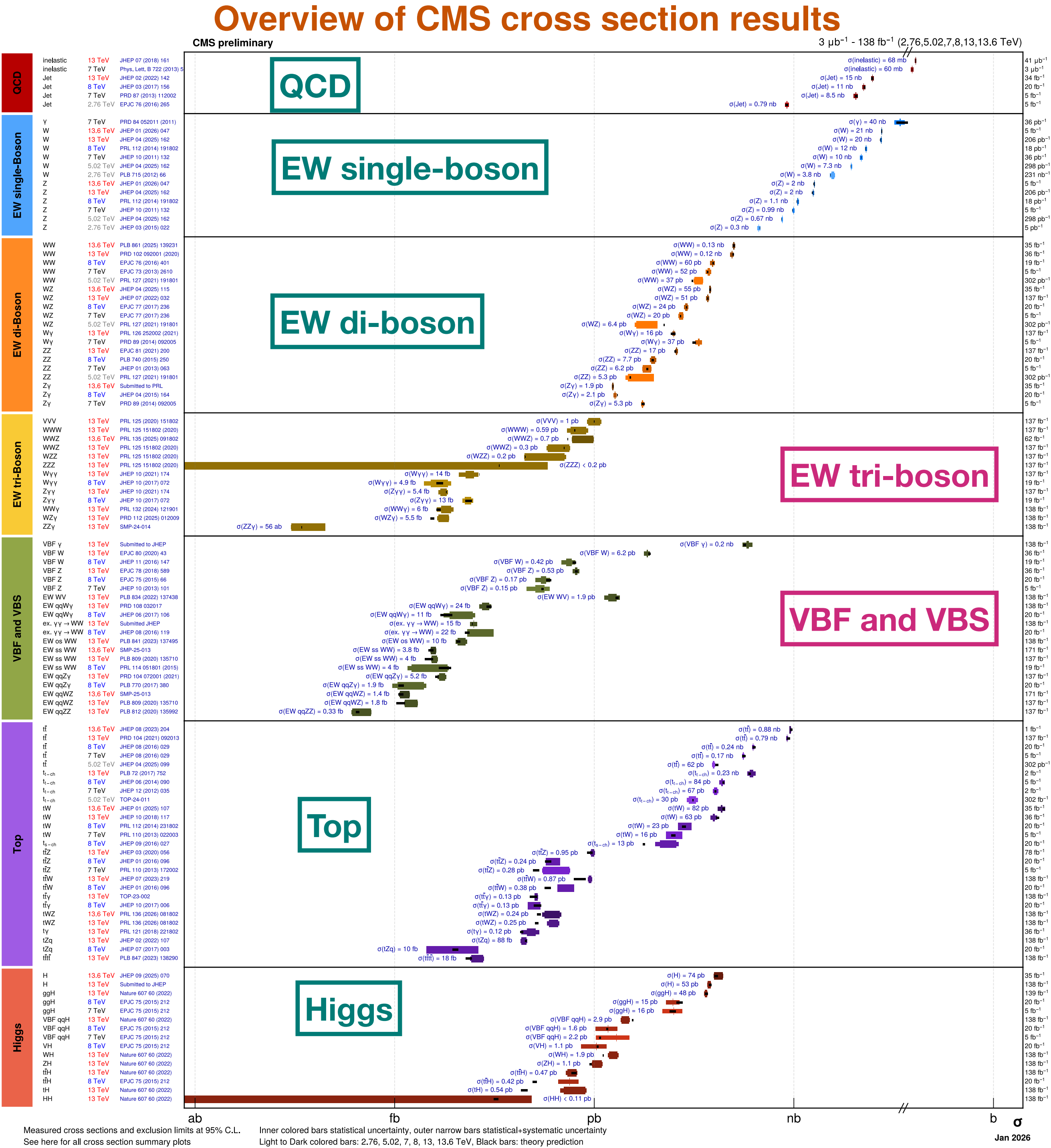




LHC的数据能做什么



A precision and discovery machine



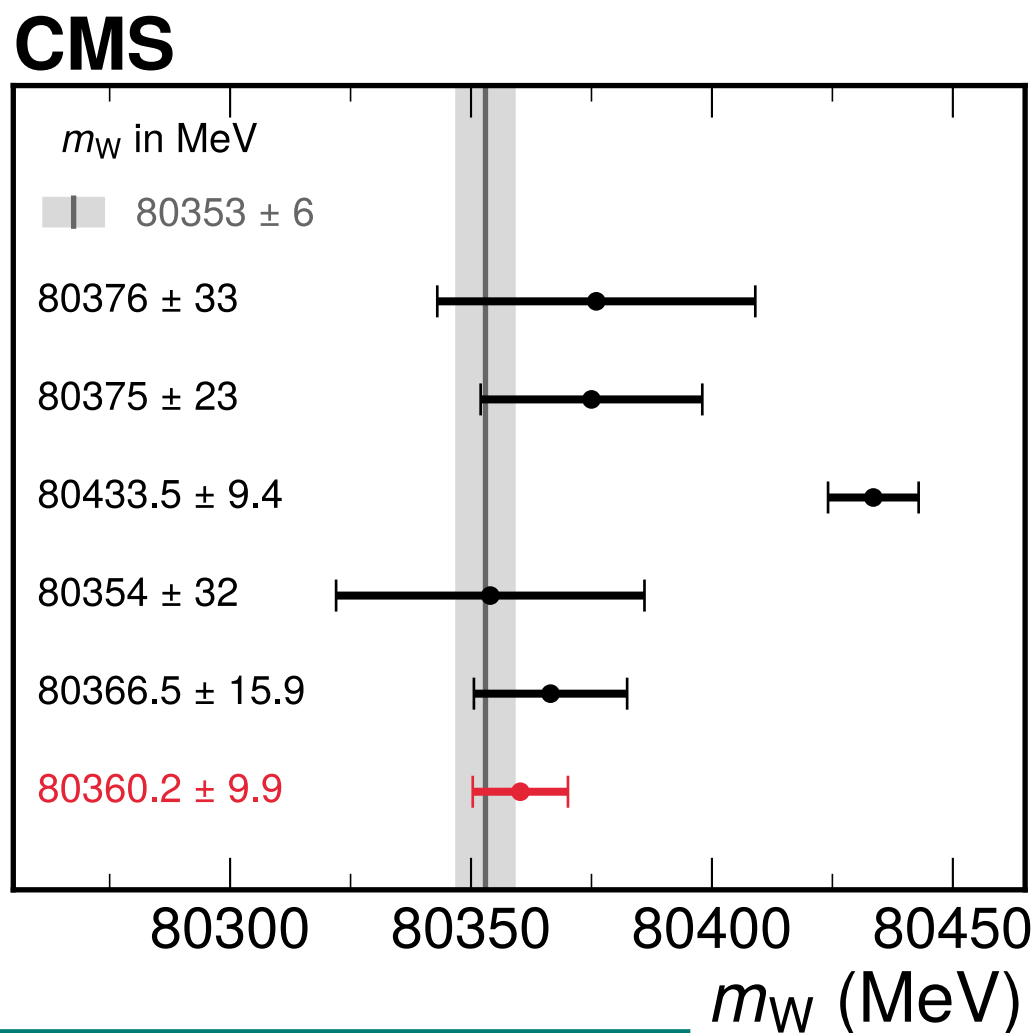


# LHC的数据能做什么

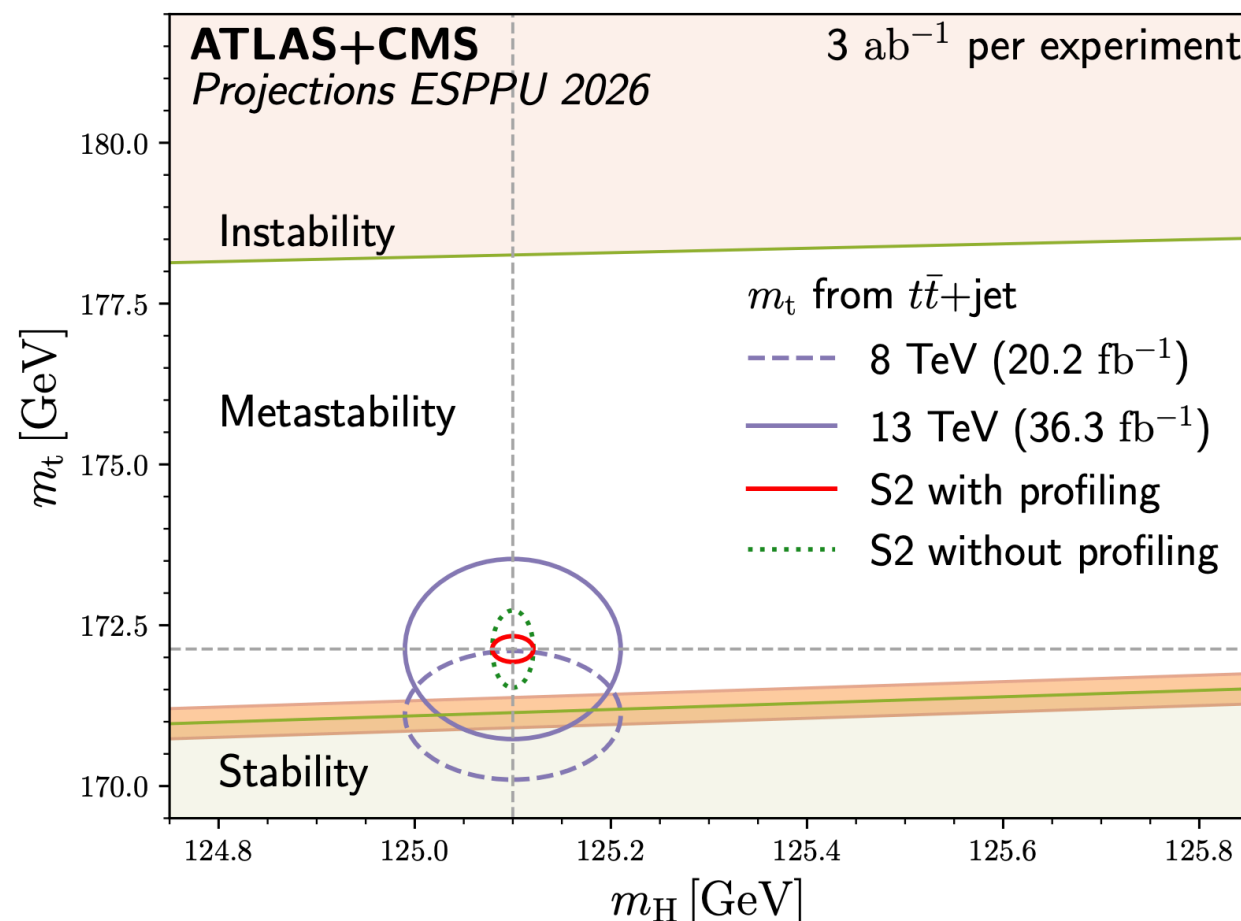
5

## 最精确的W质量测量

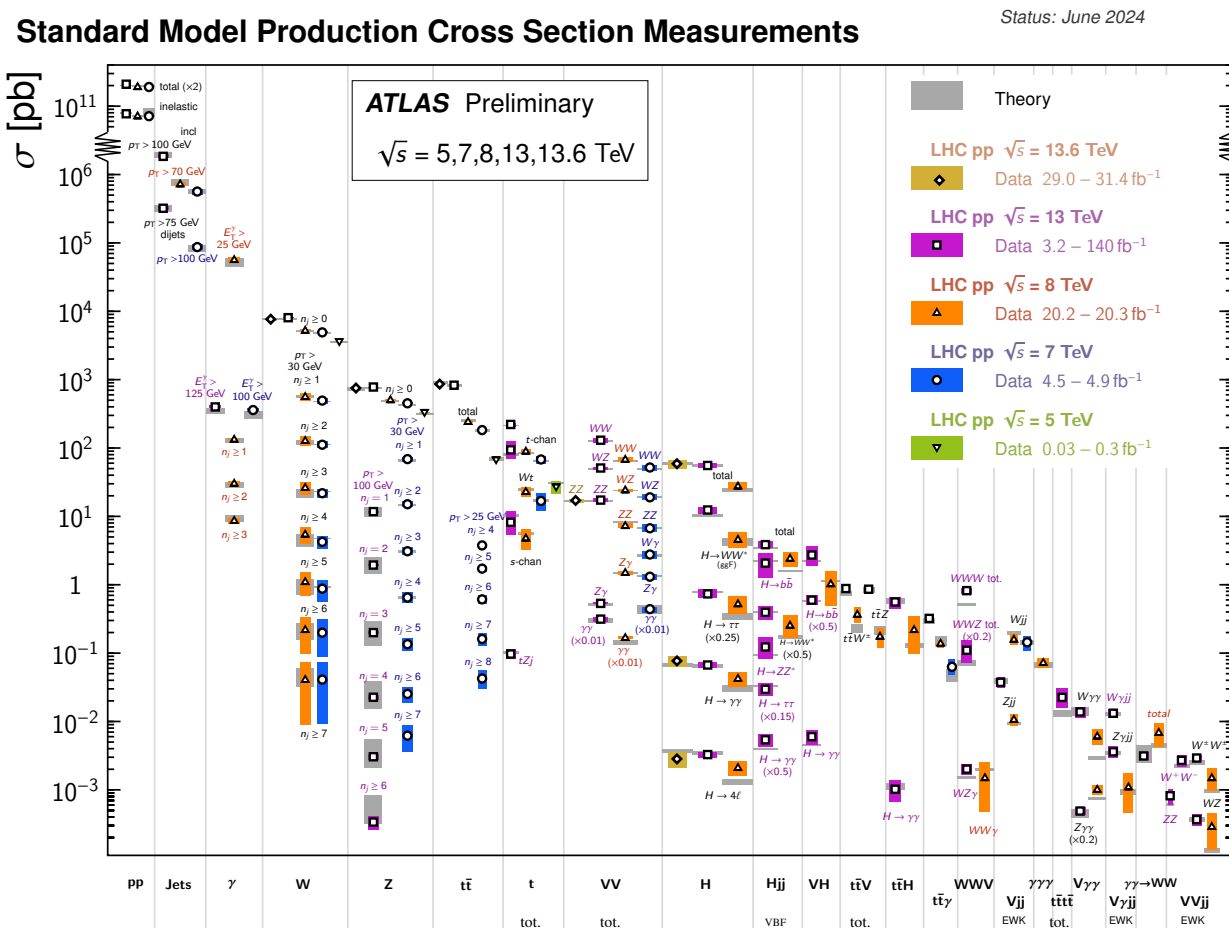
Electroweak fit  
PRD 110 (2024) 030001  
LEP combination  
Phys. Rep. 532 (2013) 119  
D0  
PRL 108 (2012) 151804  
CDF  
Science 376 (2022) 6589  
LHCb  
JHEP 01 (2022) 036  
ATLAS  
EPJC 84 (2024) 1309  
CMS  
This work



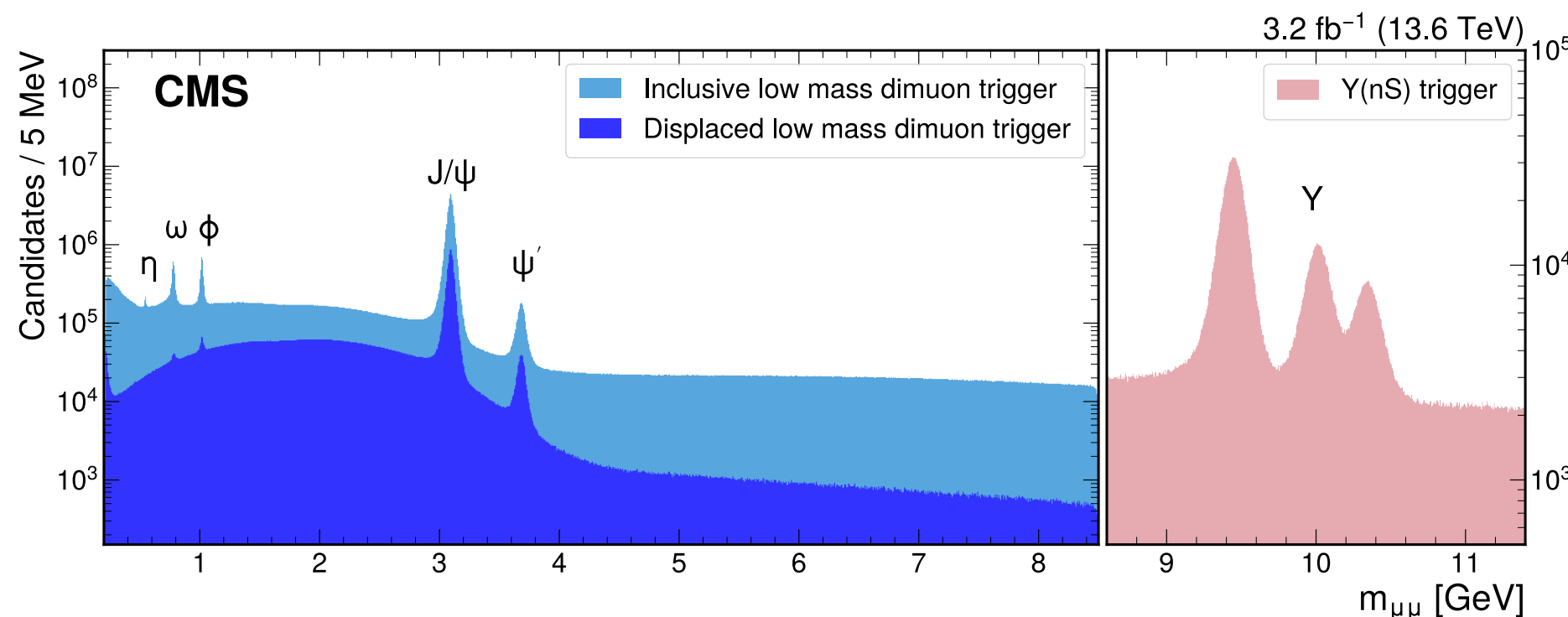
## 最精确的希格斯和顶夸克质量测量



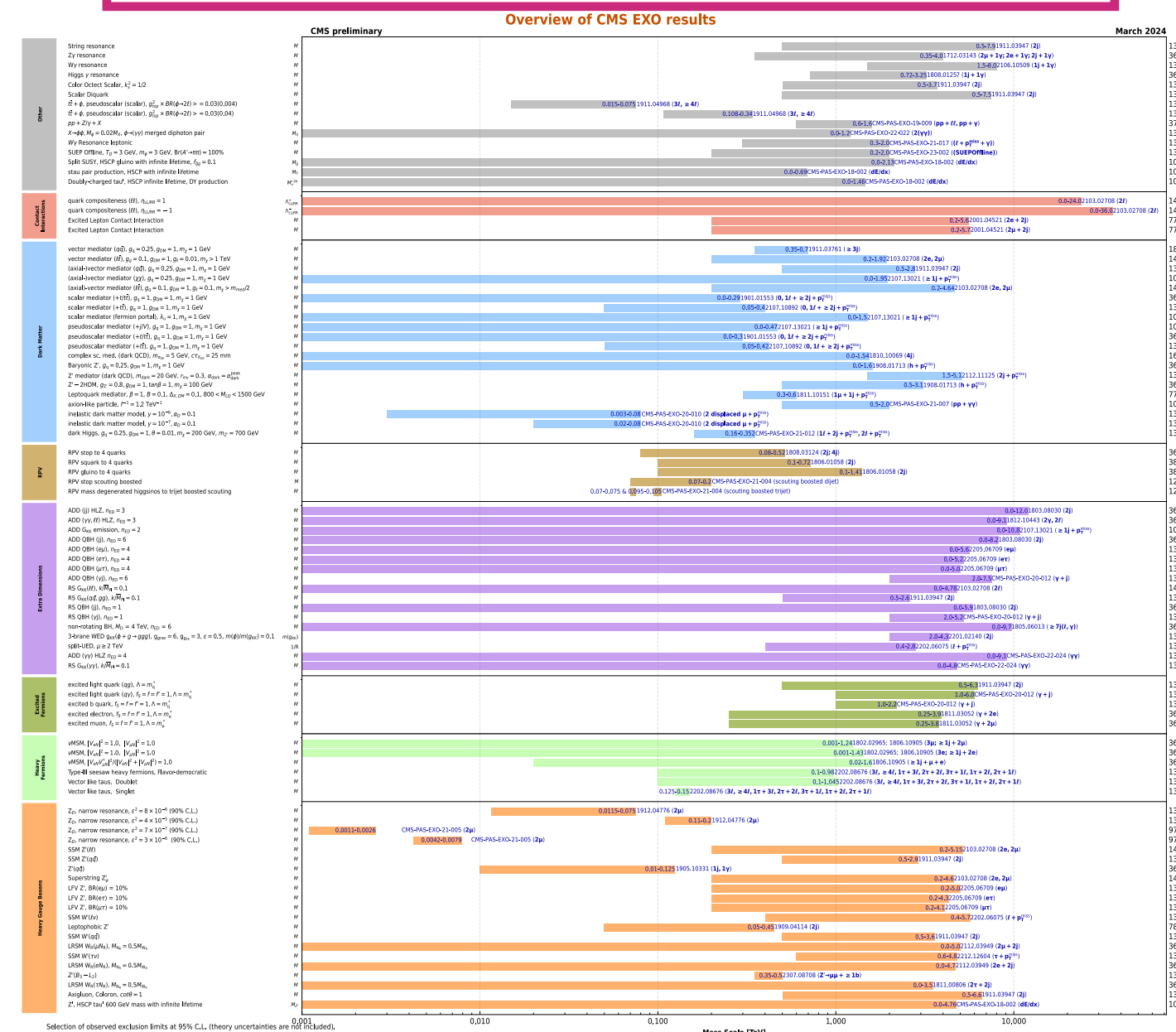
## 横跨15个数量级的标准模型截面测量



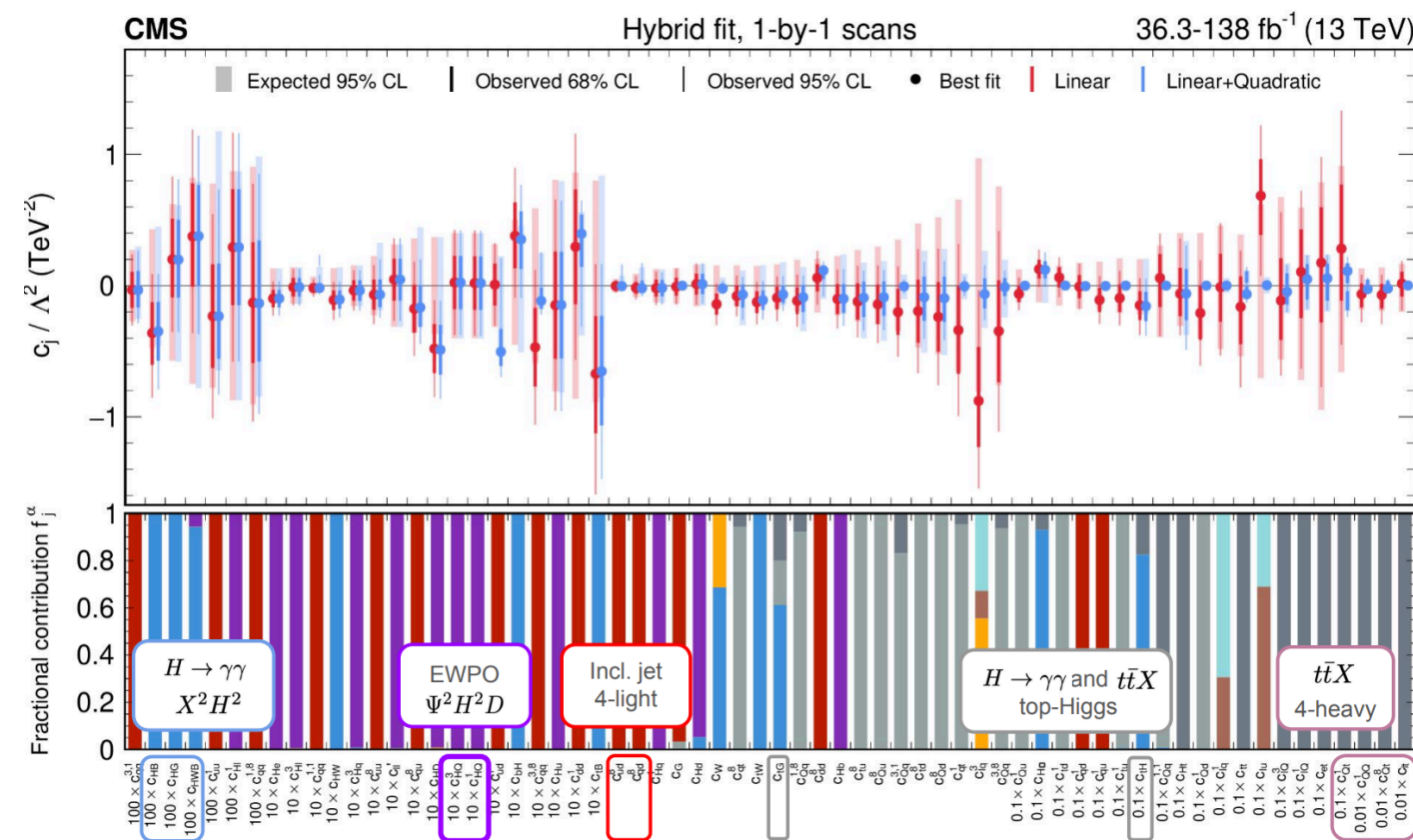
## GeV能标的味物理研究



## 从GeV到10TeV的新物理直接寻找



## 联合EW, TOP, Higgs的EFT新物理间接寻找



# 希格斯物理进展



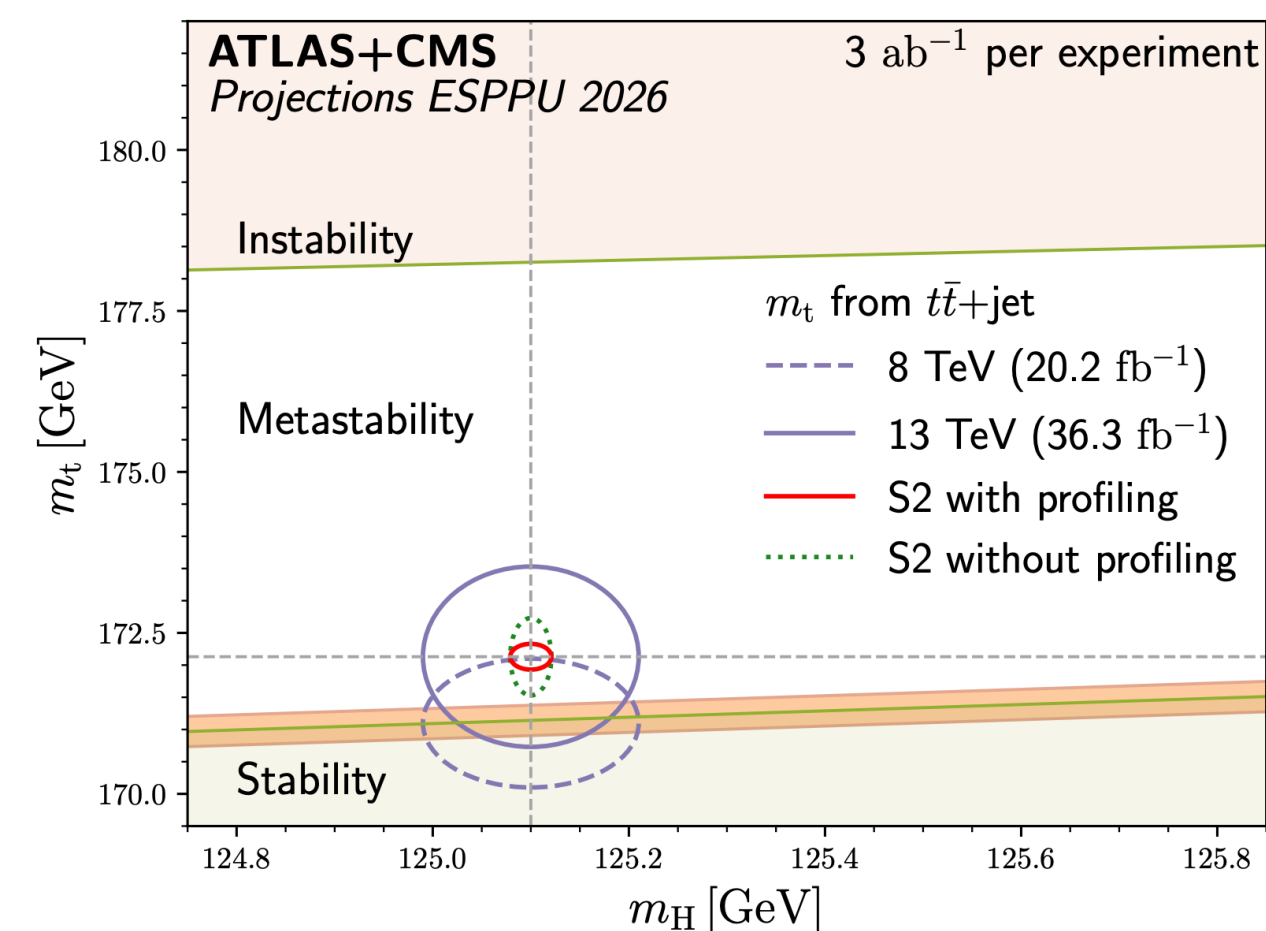
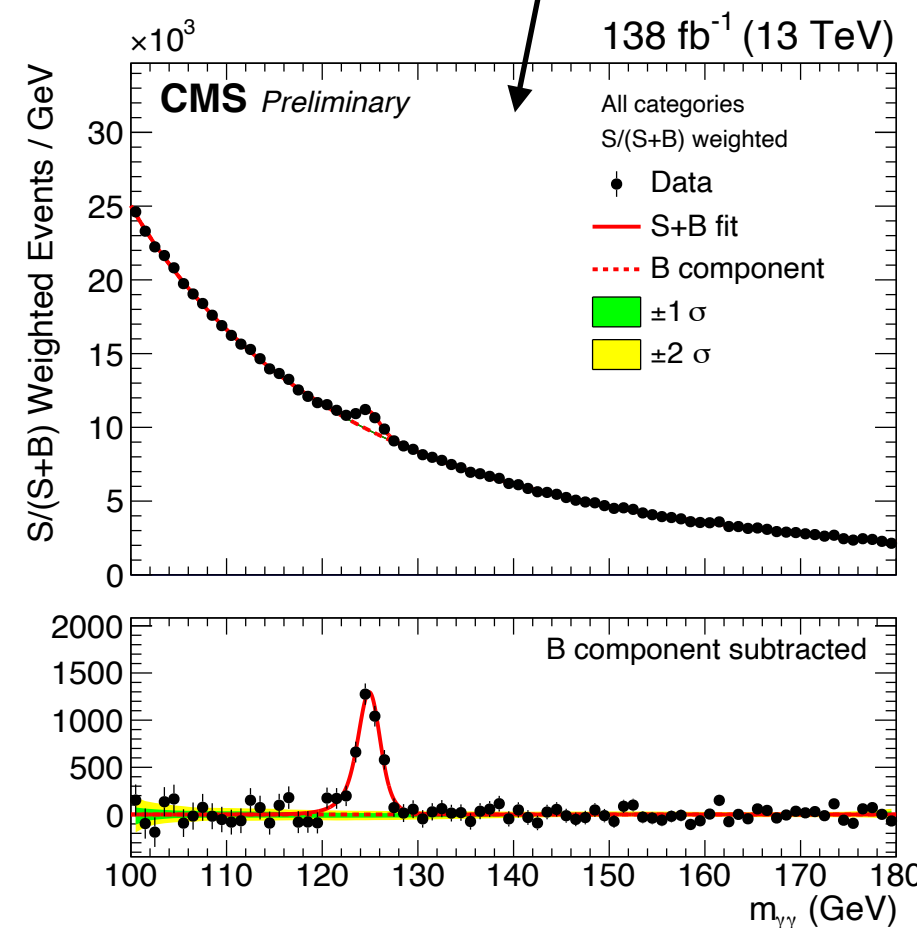
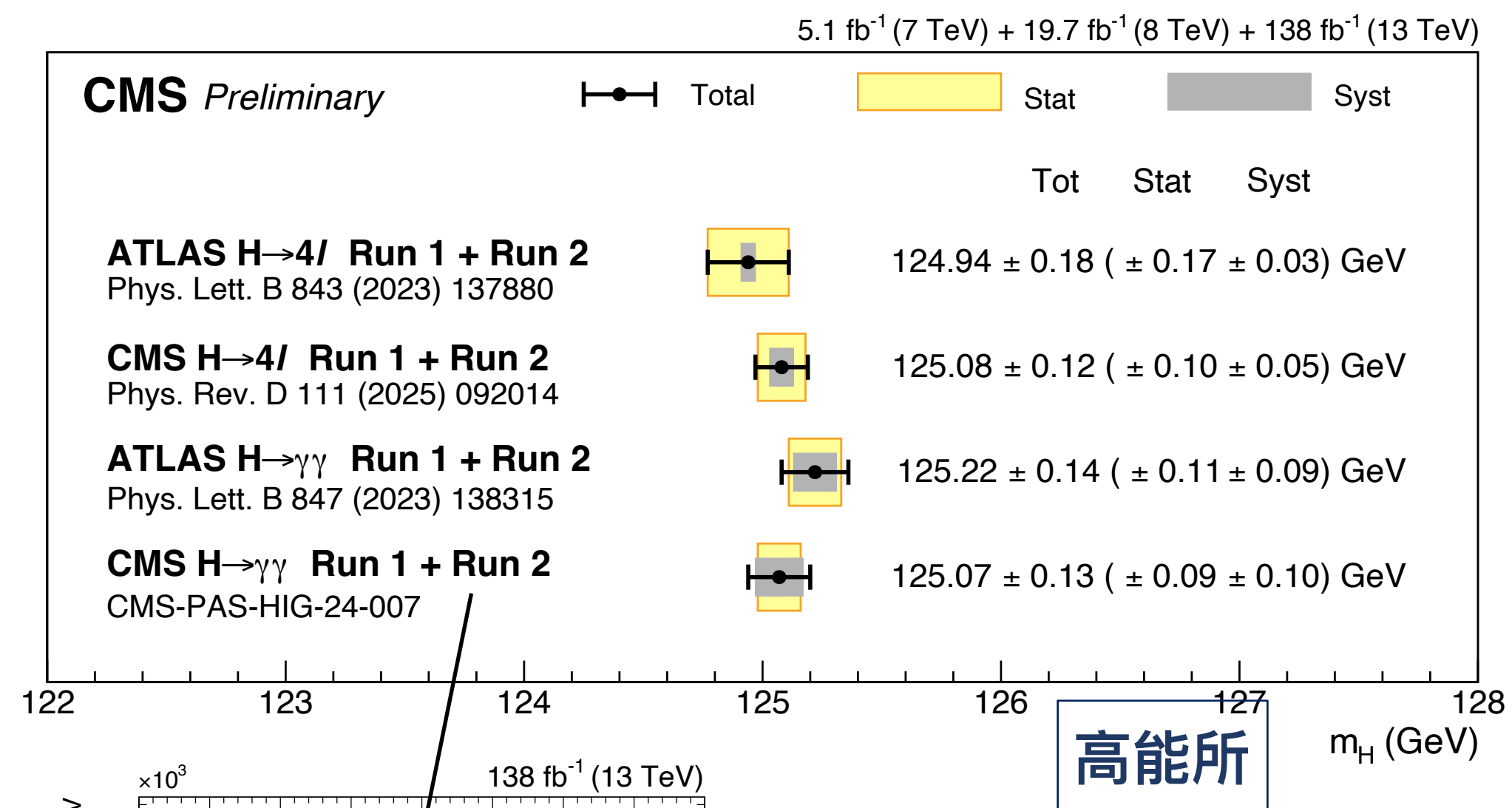
# 希格斯粒子质量

7

希格斯粒子质量测量，0.1% 精度

CMS-PAS-HIG-24-007

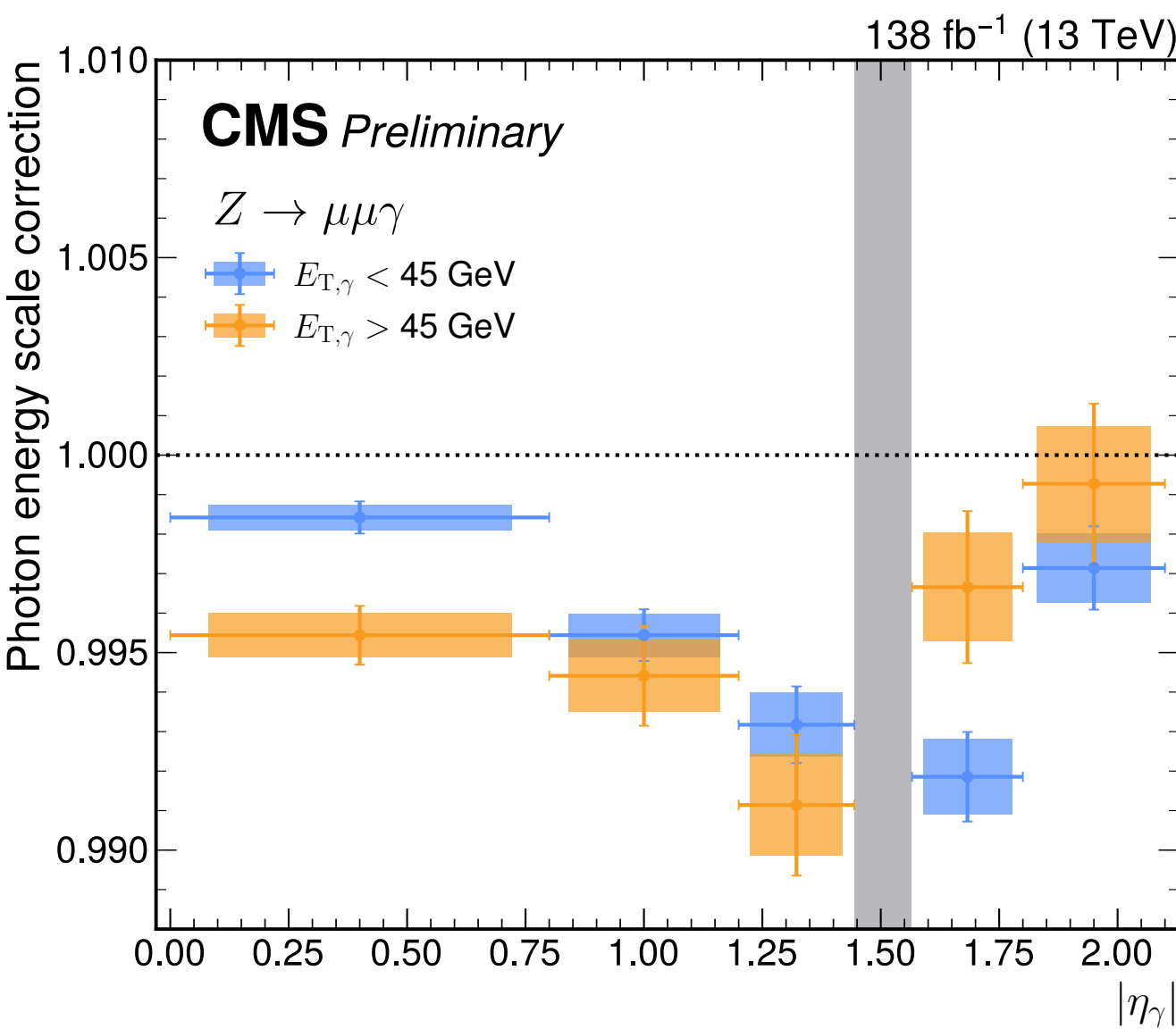
标准模型：希格斯粒子质量决定了其宽度和耦合强度  
决定了真空稳定性



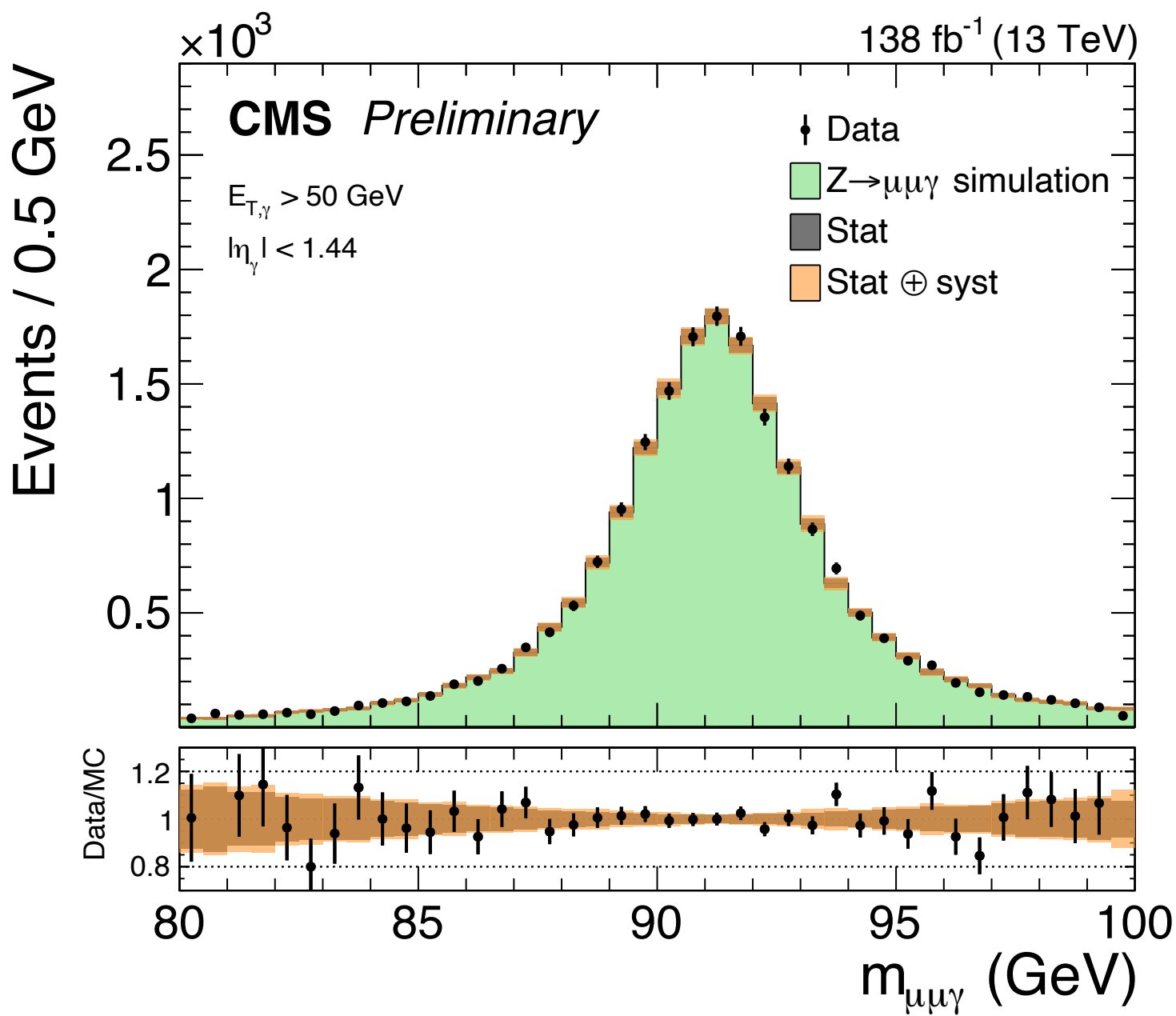
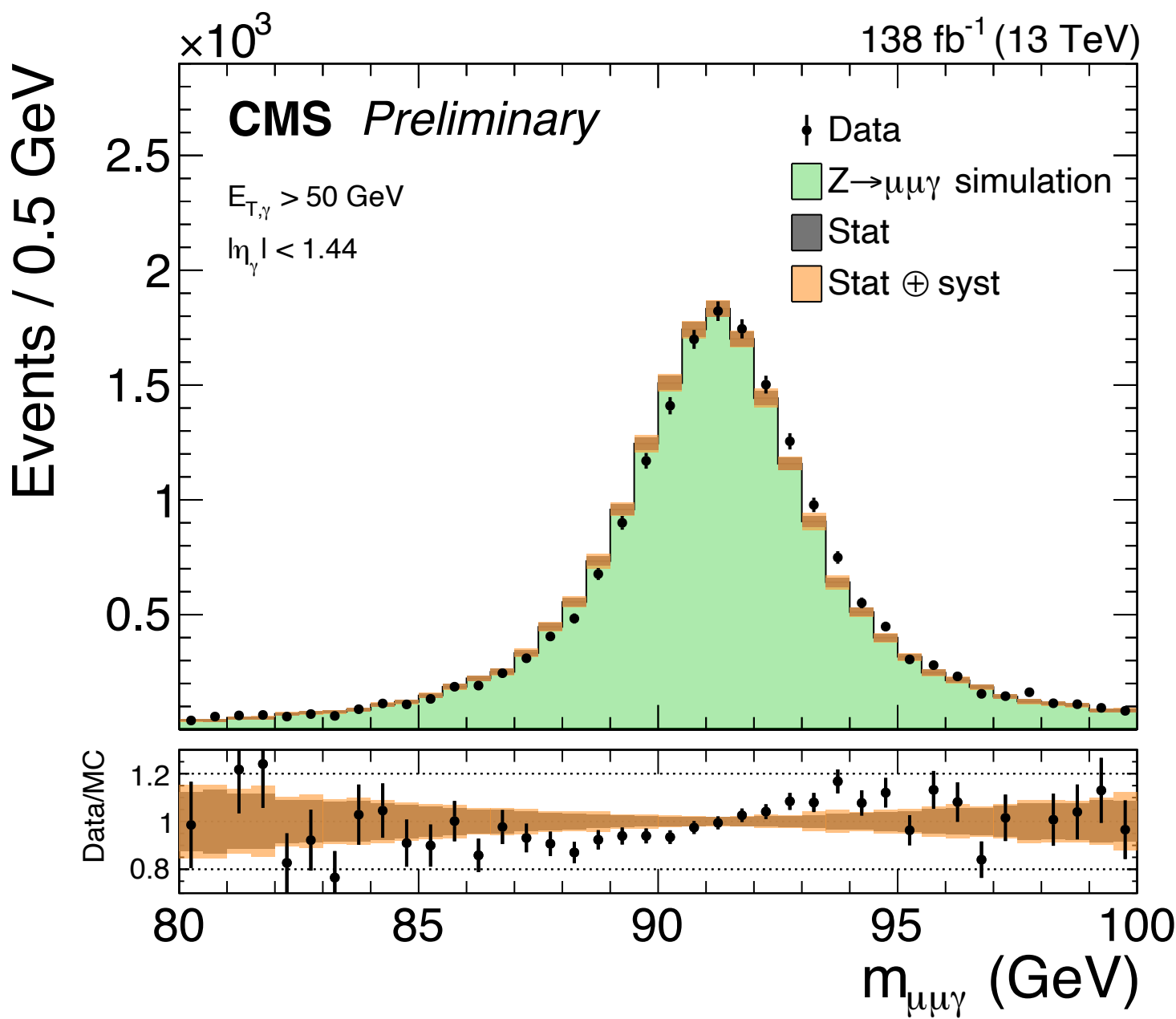
# 希格斯粒子质量

## 探测器刻度和性能的理解

CMS-PAS-HIG-24-007



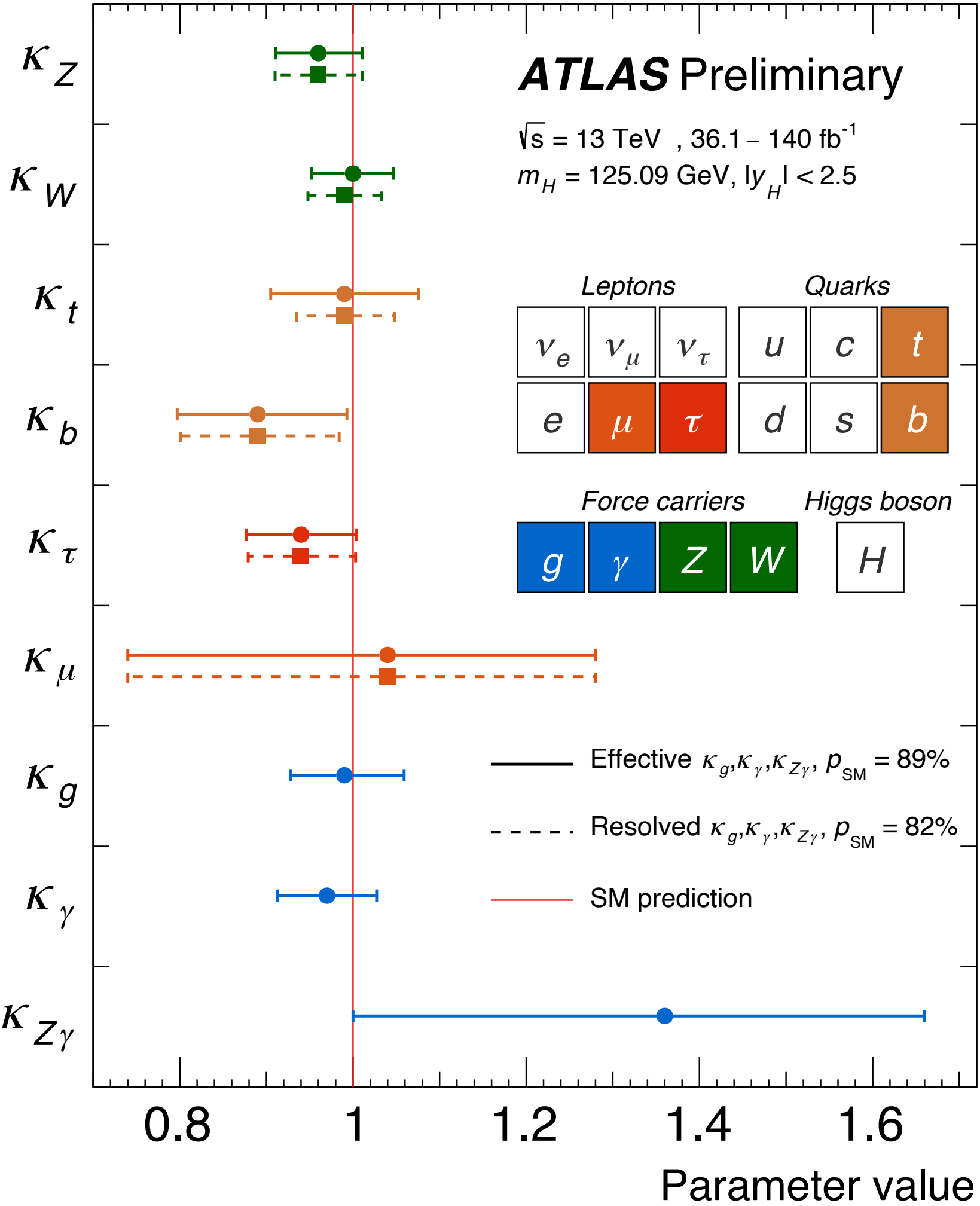
高能所





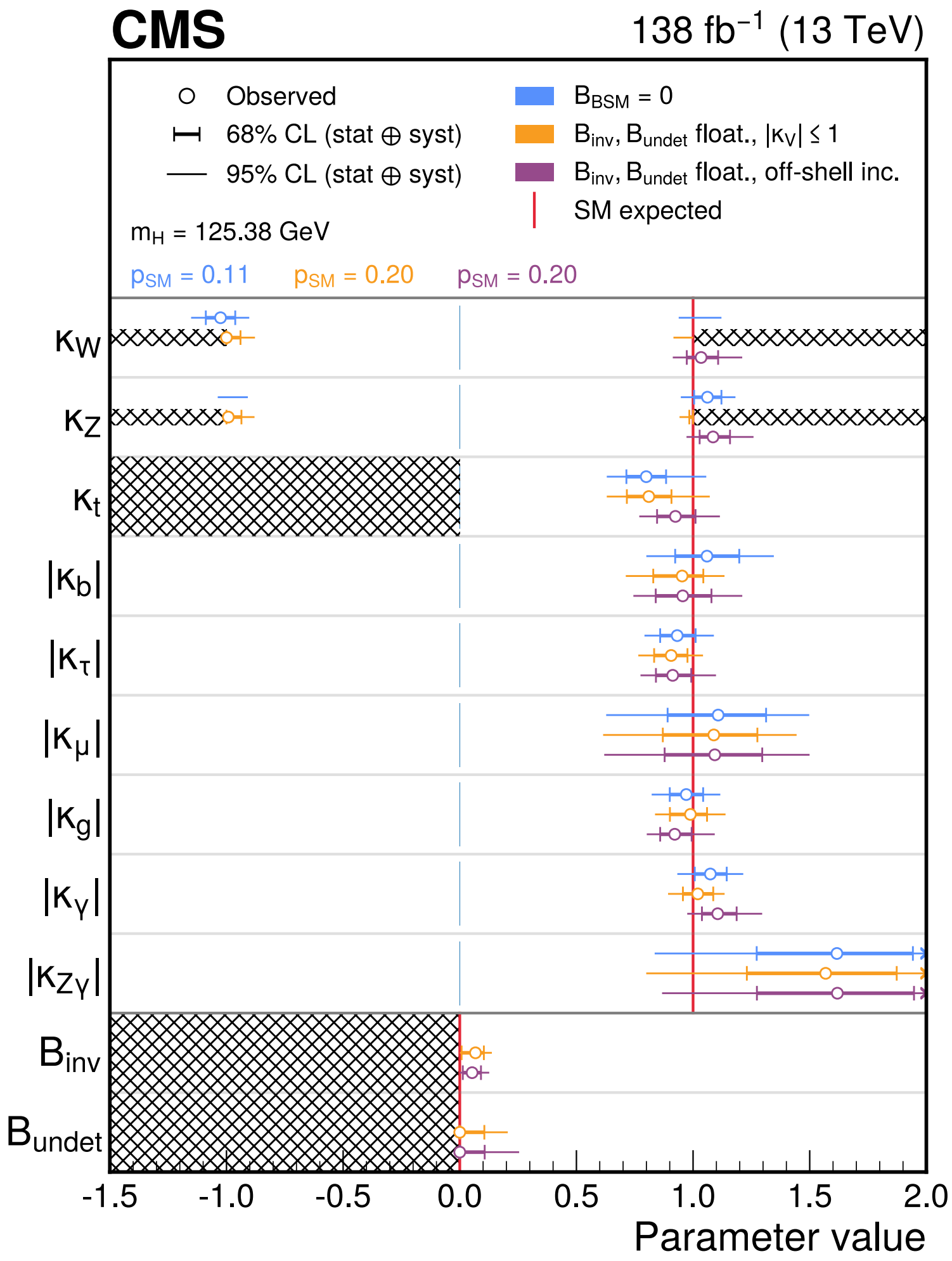
# 希格斯粒子与基本粒子耦合强度

ATLAS-CONF-2025-006



南大/科大/高能所/山大

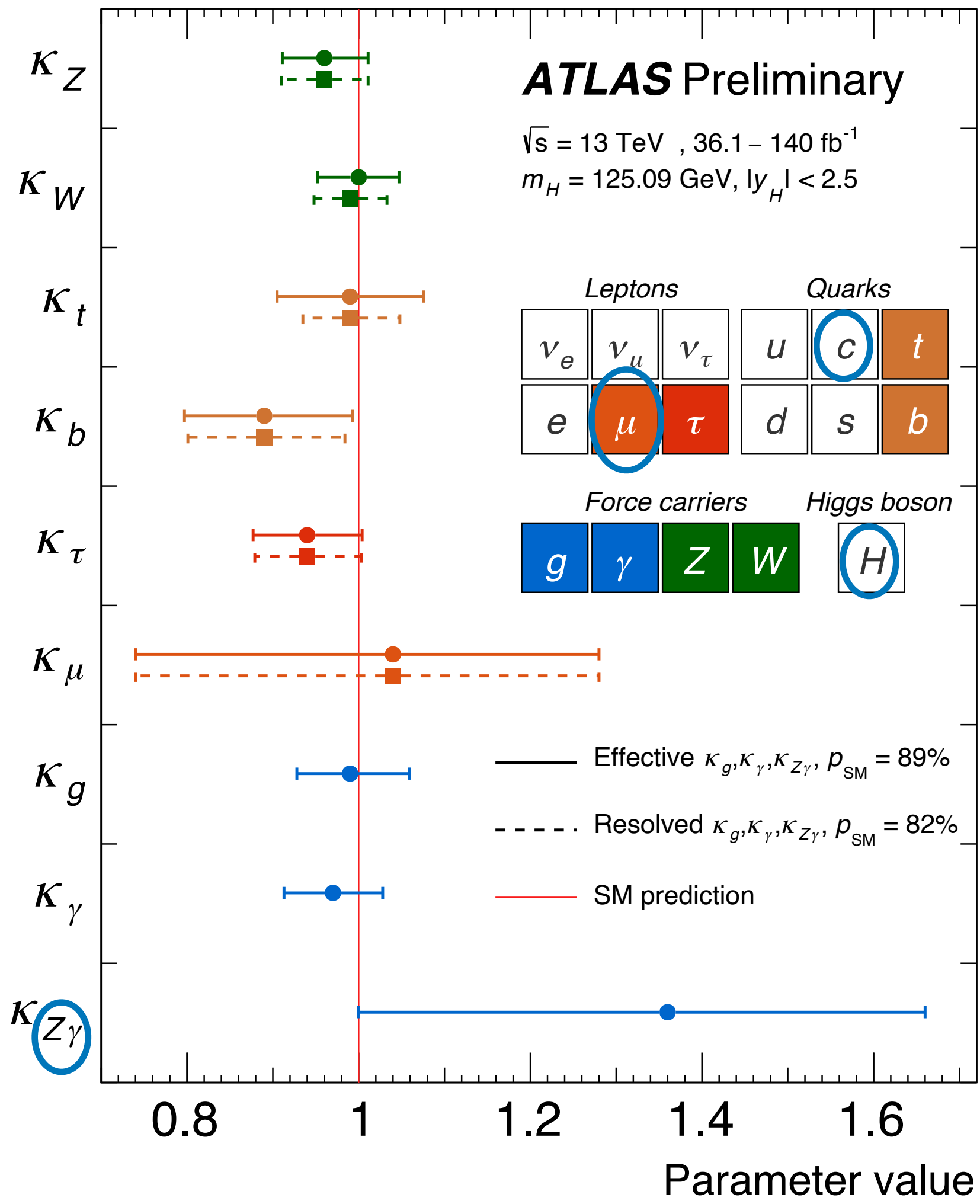
arXiv: :2602.18611 Accepted by ROPP



北大/科大/高能所/浙大

# 希格斯粒子与基本粒子耦合强度

ATLAS-CONF-2025-006



## 联合测量

大部分精度 5% - 10%

○ 仍未正式发现，未来HIG的重点

$H \rightarrow Z\gamma$ ,  $H \rightarrow \mu\mu$ :  $3\sigma$  from ATLAS+CMS

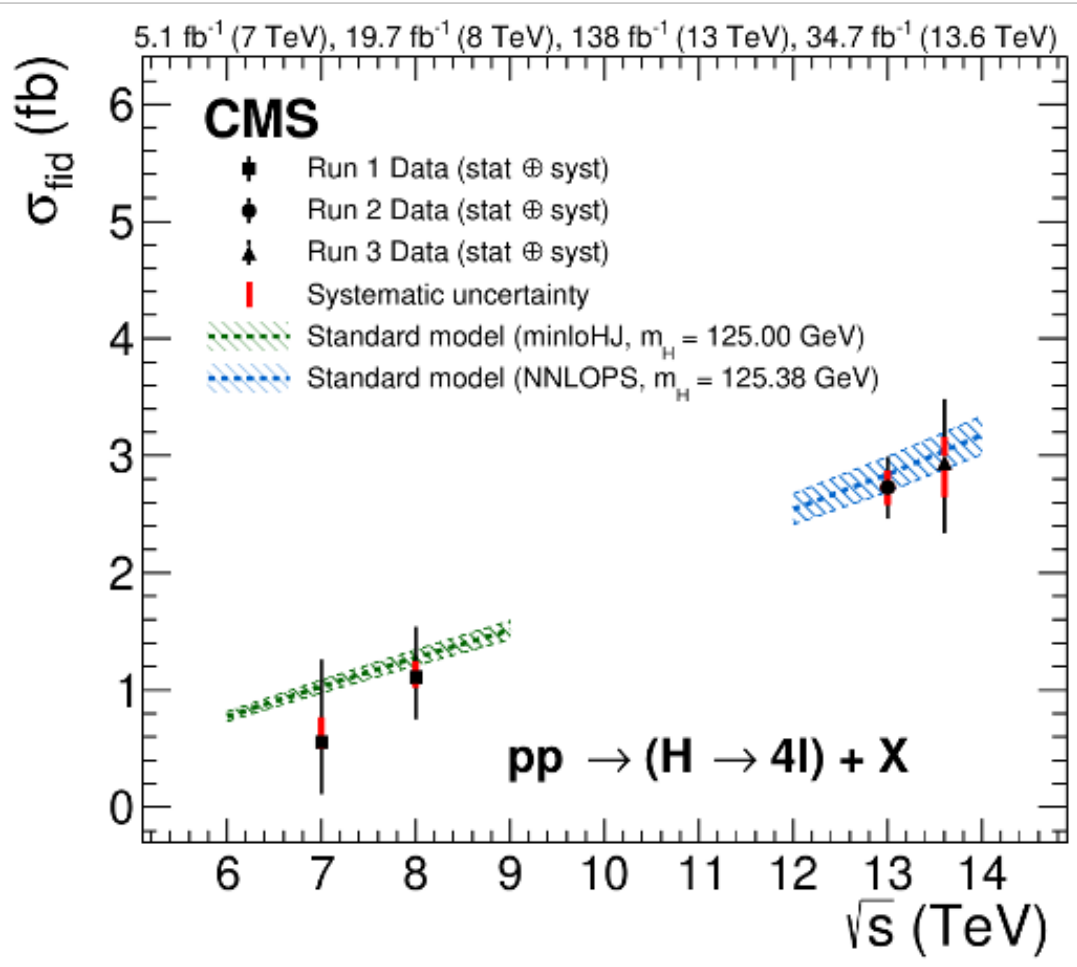
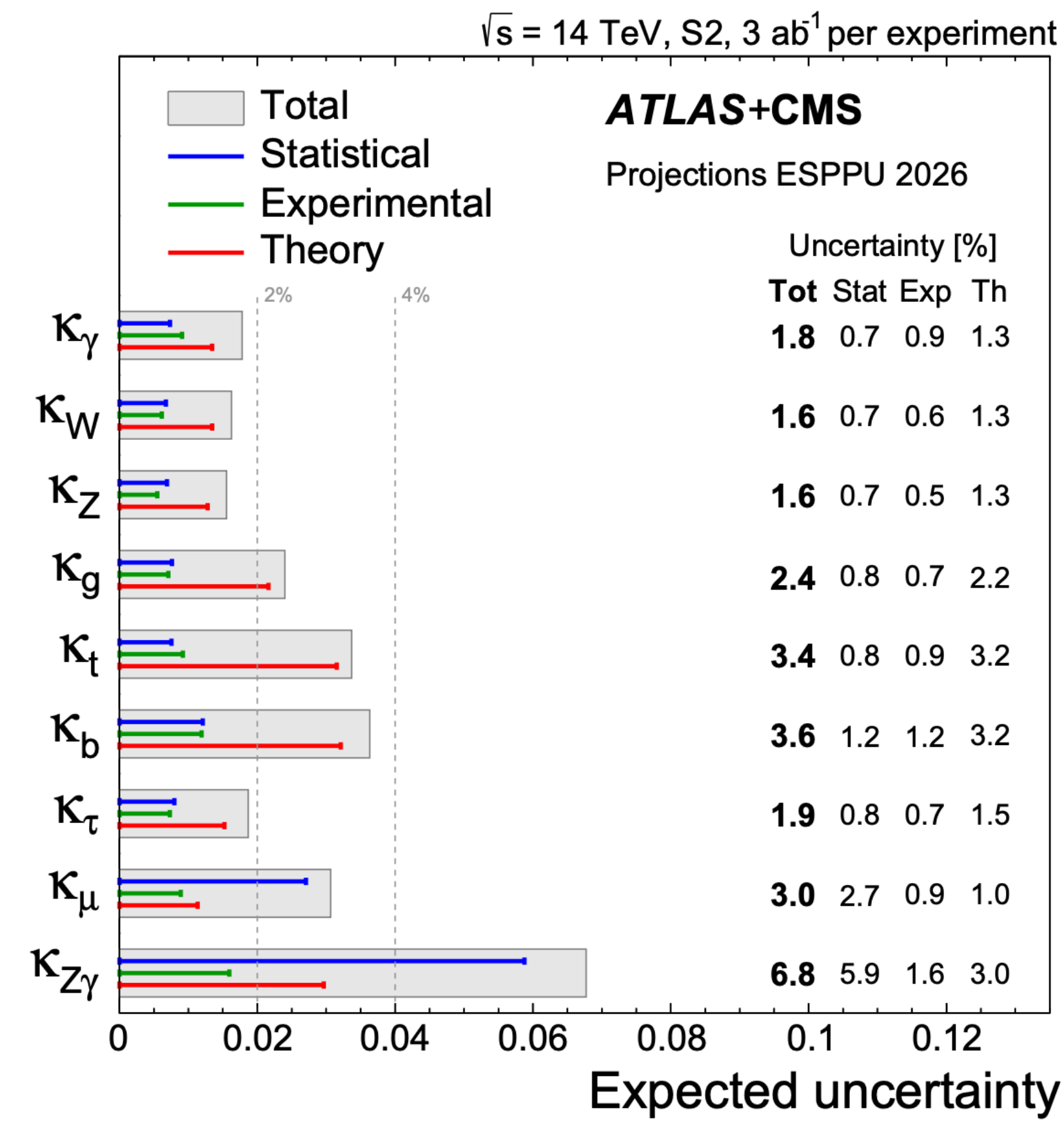
$H \rightarrow cc$ ,  $\kappa_c < 3$

$HH$ :  $\mu < 2.5$

# 希格斯粒子与基本粒子耦合强度

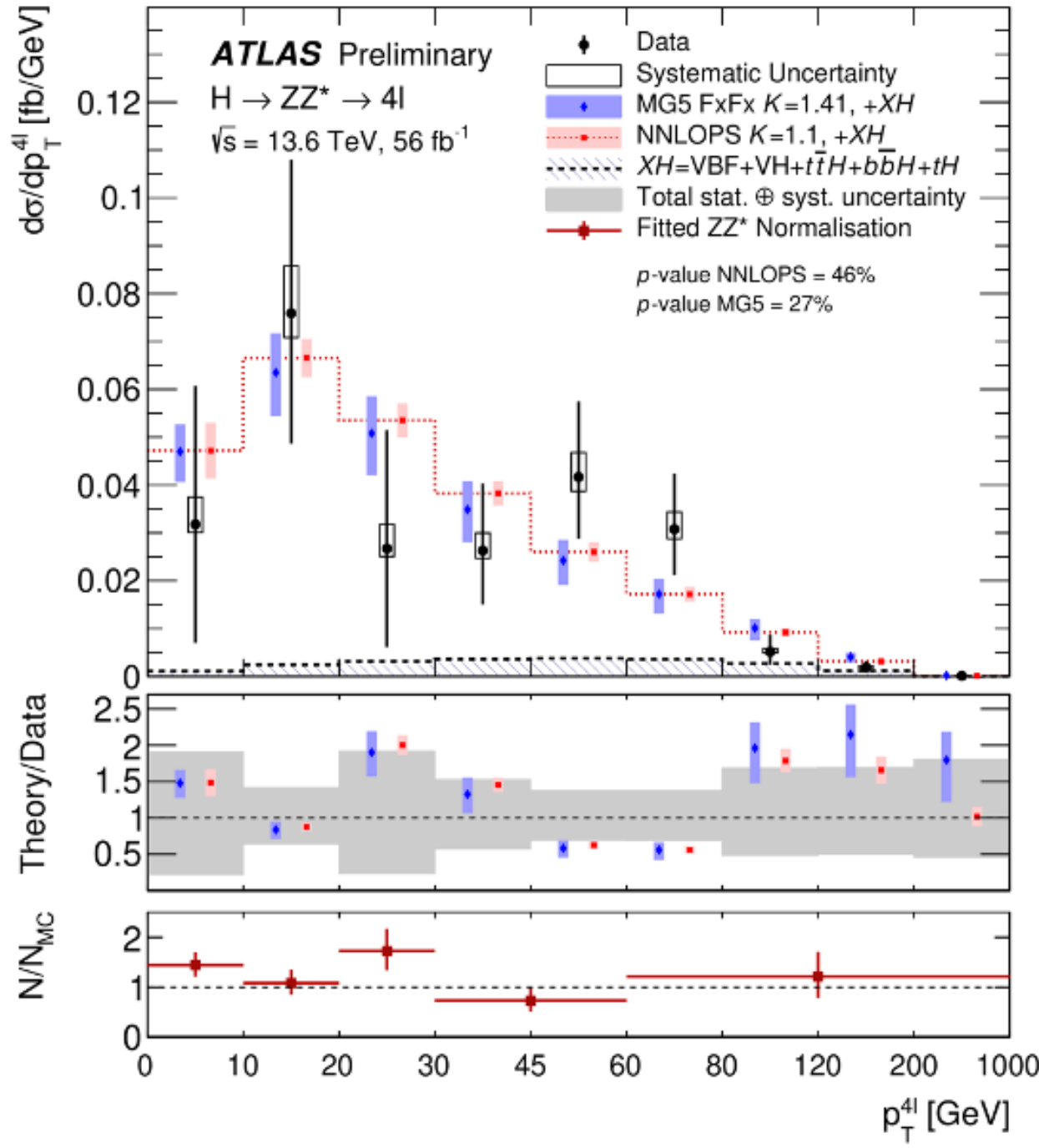
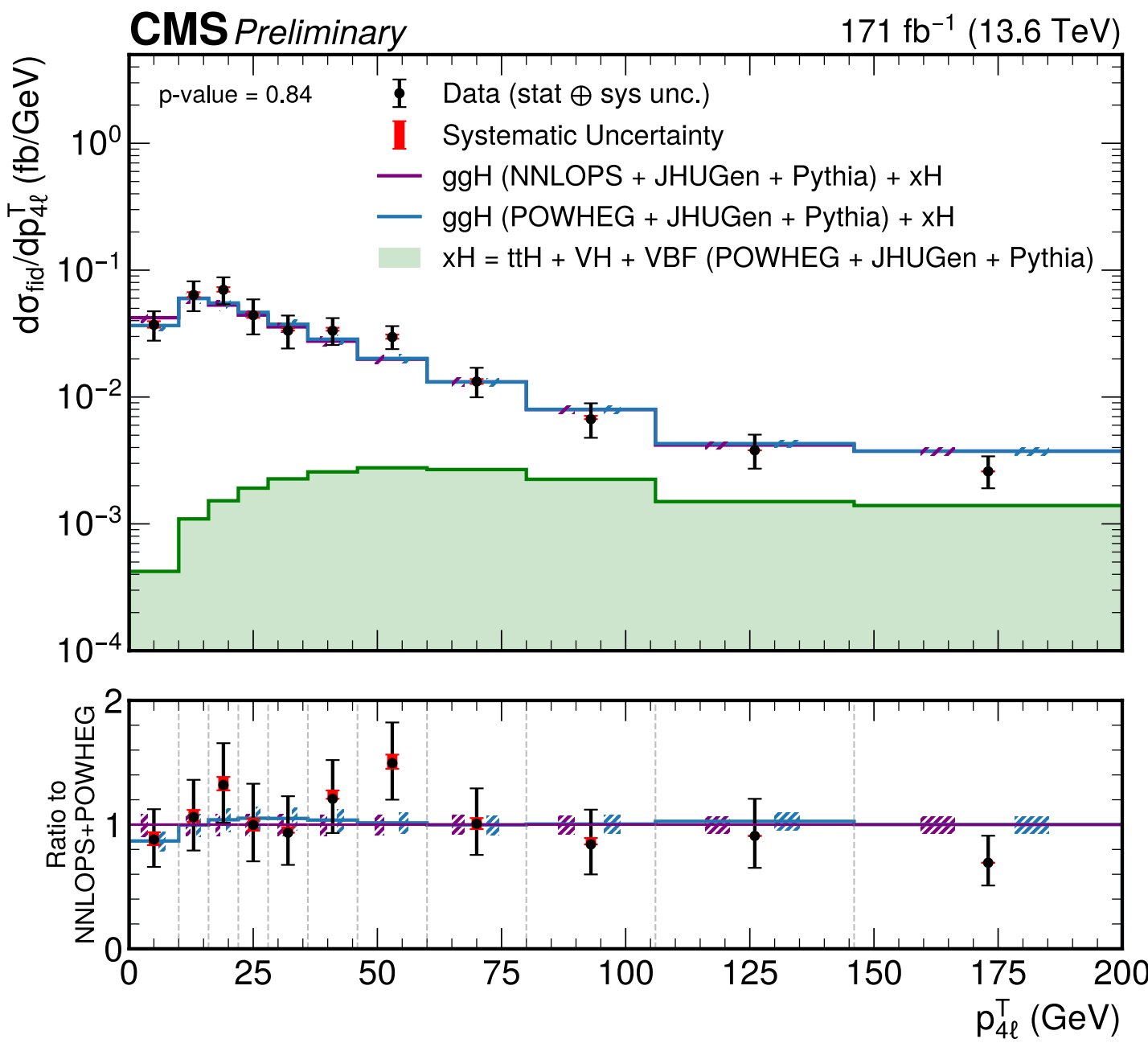
## Run3分析开始展开

HL-LHC预期精度: ~ 2%



高能所/北航/复旦

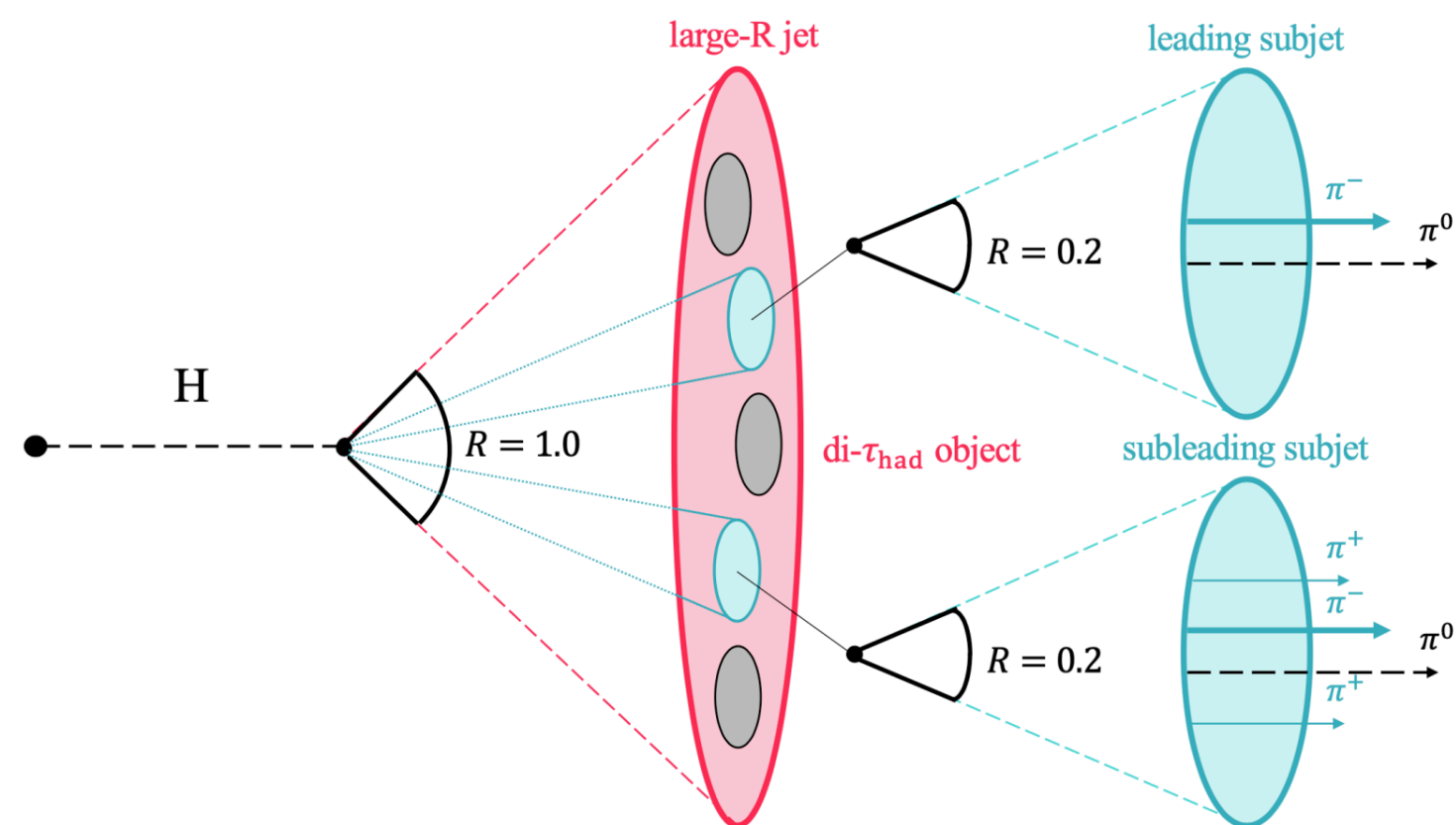
科大/山大



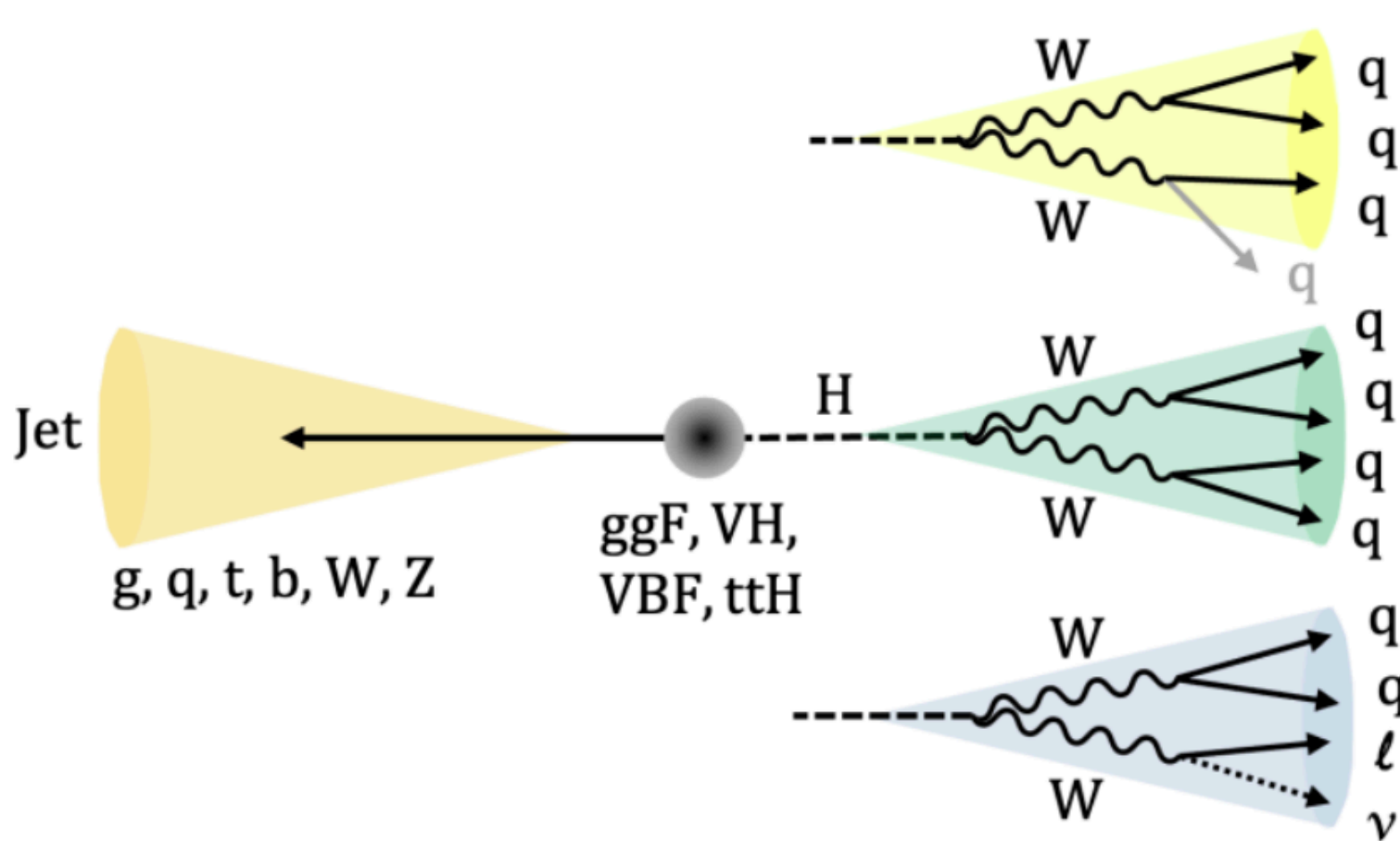


# 希格斯粒子与基本粒子耦合强度 拓展高 $p_T$ 相空间，对新物理更敏感

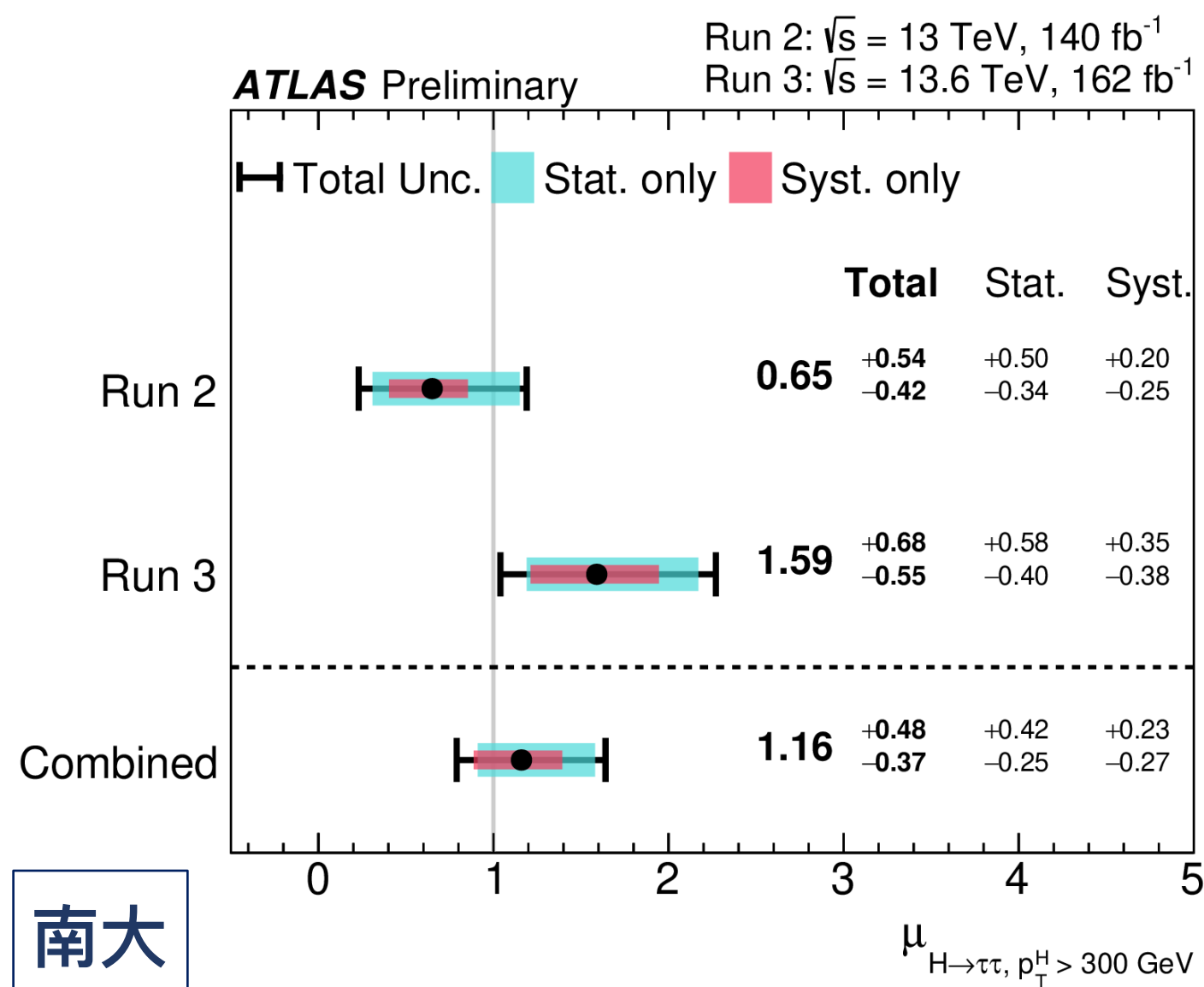
12



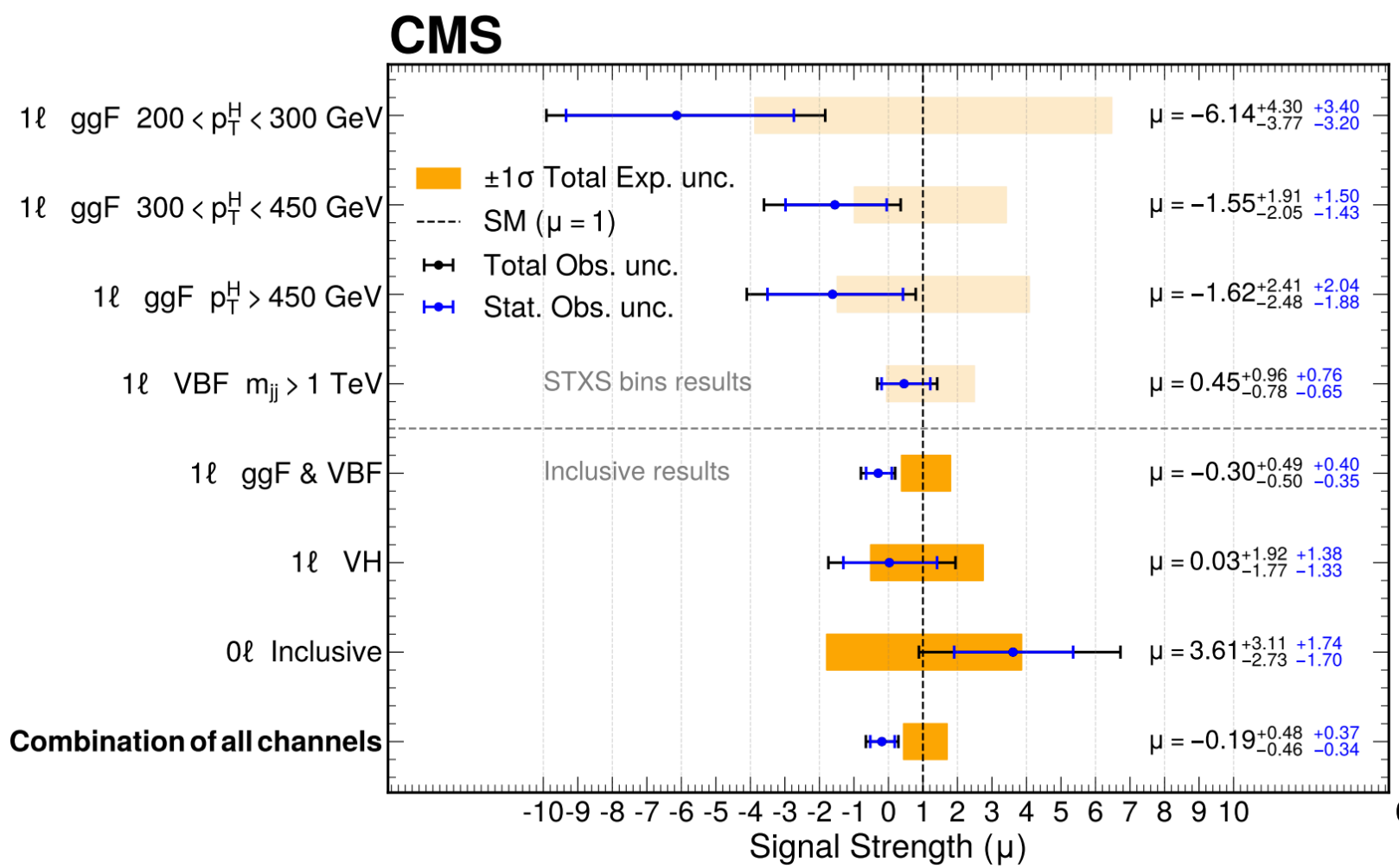
$p_T(H) > 300 \text{ GeV}$ , boosted  $H \rightarrow \tau\tau$  鉴别  
显著度  $3.8 \sigma$ , [ATLAS-CONF-2026-005](#)



boosted  $H \rightarrow WW$  鉴别  
[arXiv:2603.22233](#)



南大



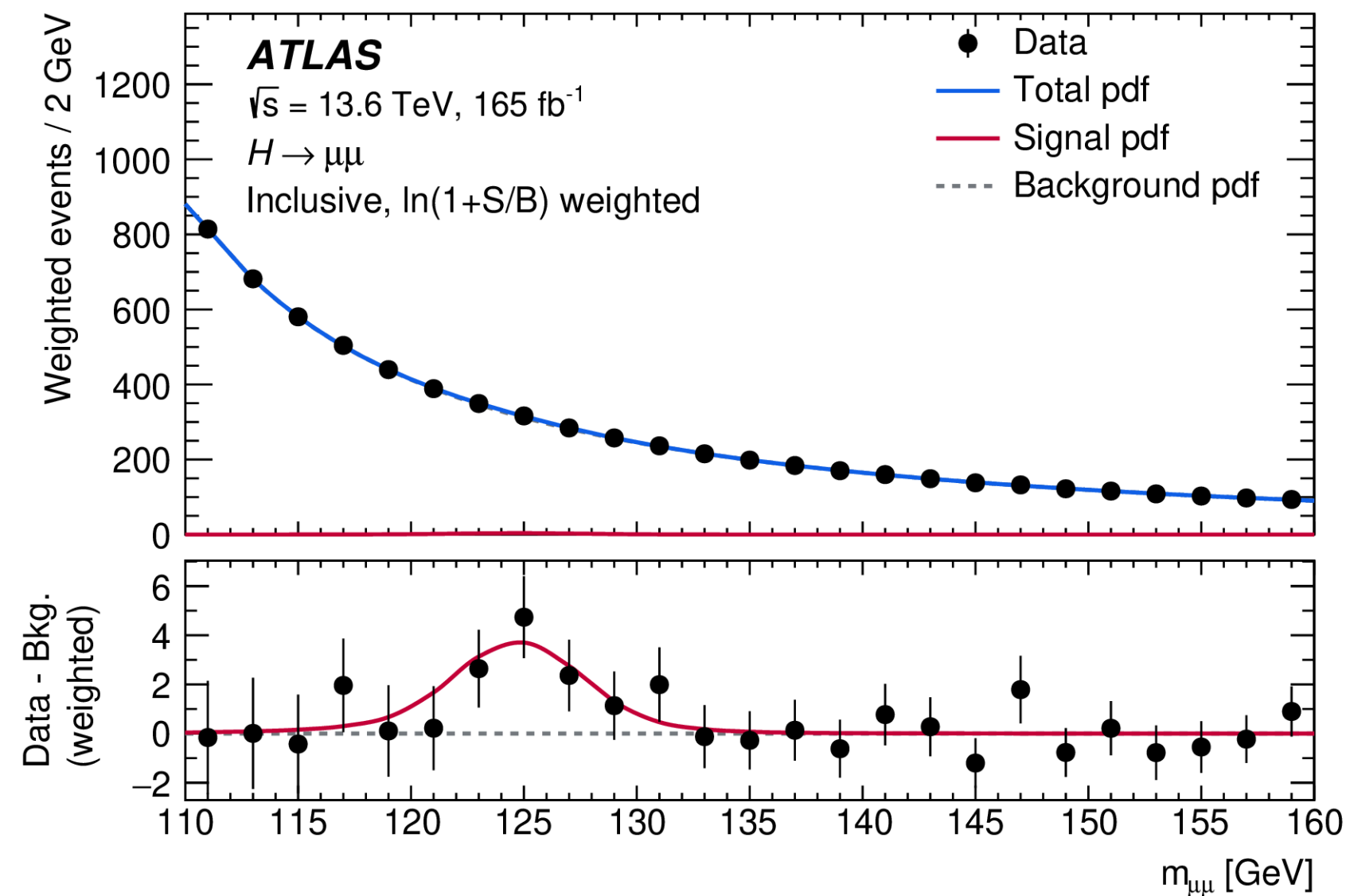
北大

# 稀有过程寻找

13

## $H\mu\mu$

ATLAS首次独立观察到实验证据



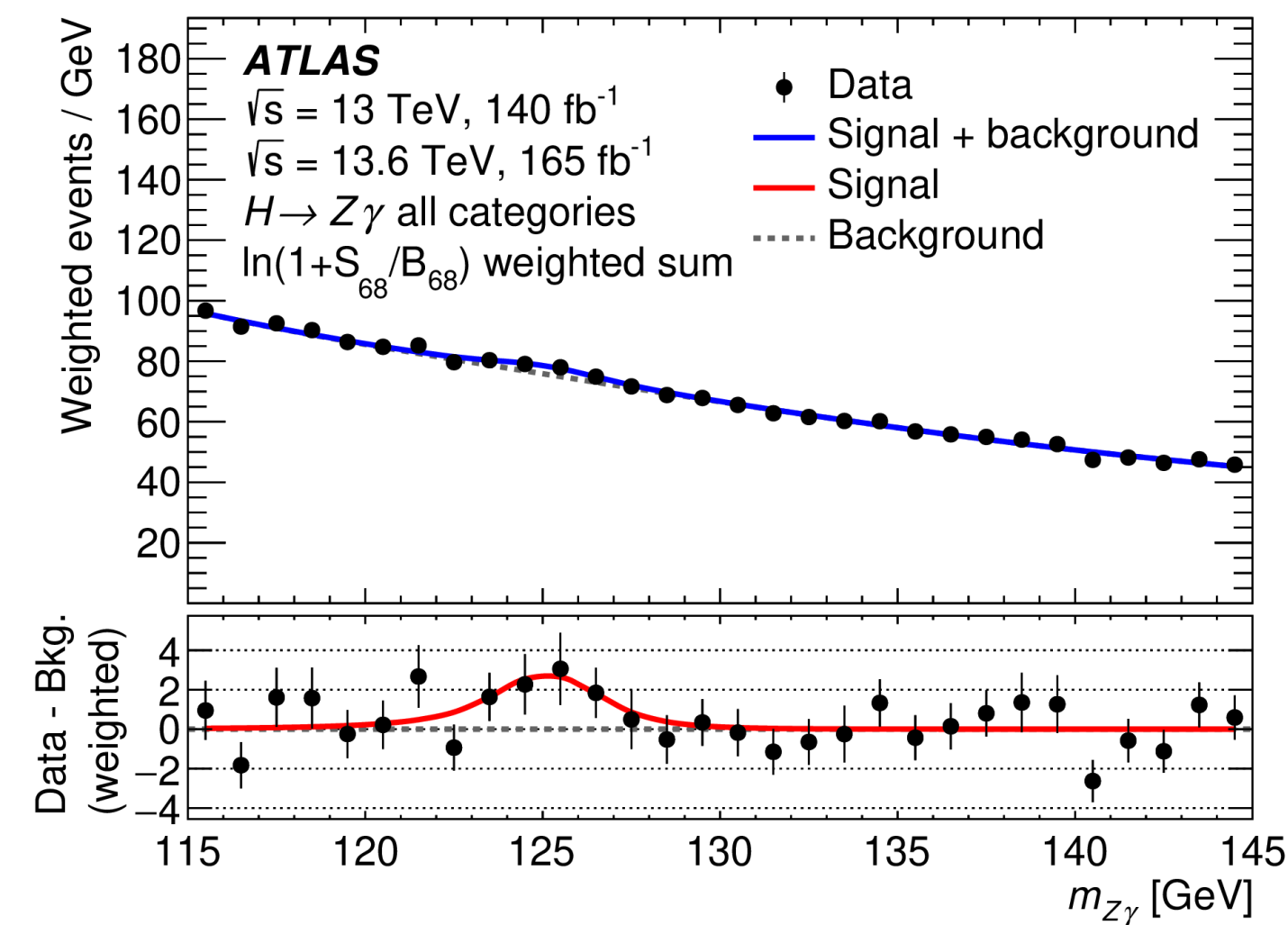
PRL 135 (2025) 231802, Editor's suggestion

科大/山大/高能所/南大

## $HZ\gamma$

ATLAS和CMS都开始了Run2+Run3的分析  
较Run2有了显著提高

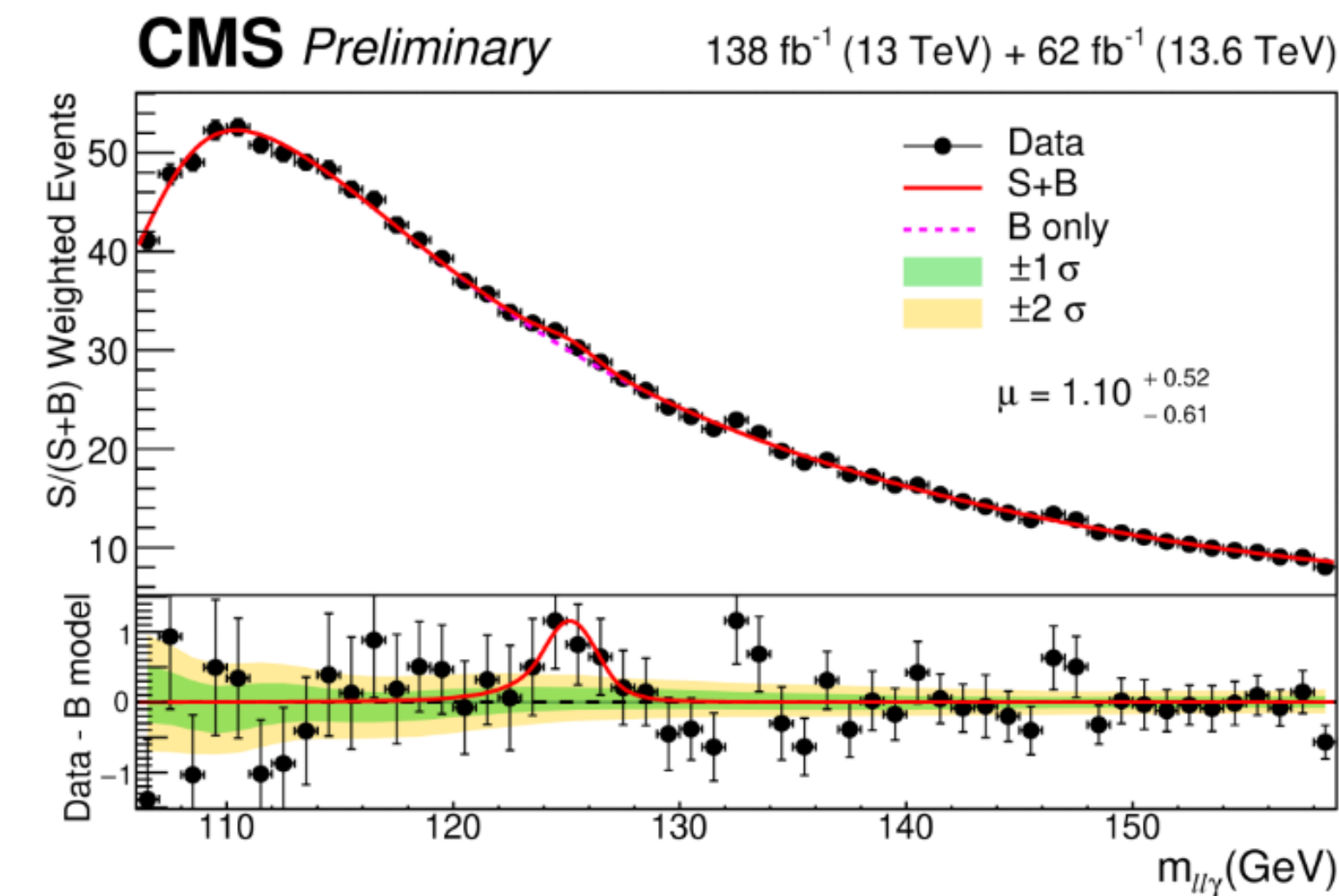
观测(预期)显著性:  $2.5\sigma$  ( $1.9\sigma$ )



PLB 876 (2026) 140313

高能所/交大(李所)/南大

$1.9\sigma$  ( $2.3\sigma$ )

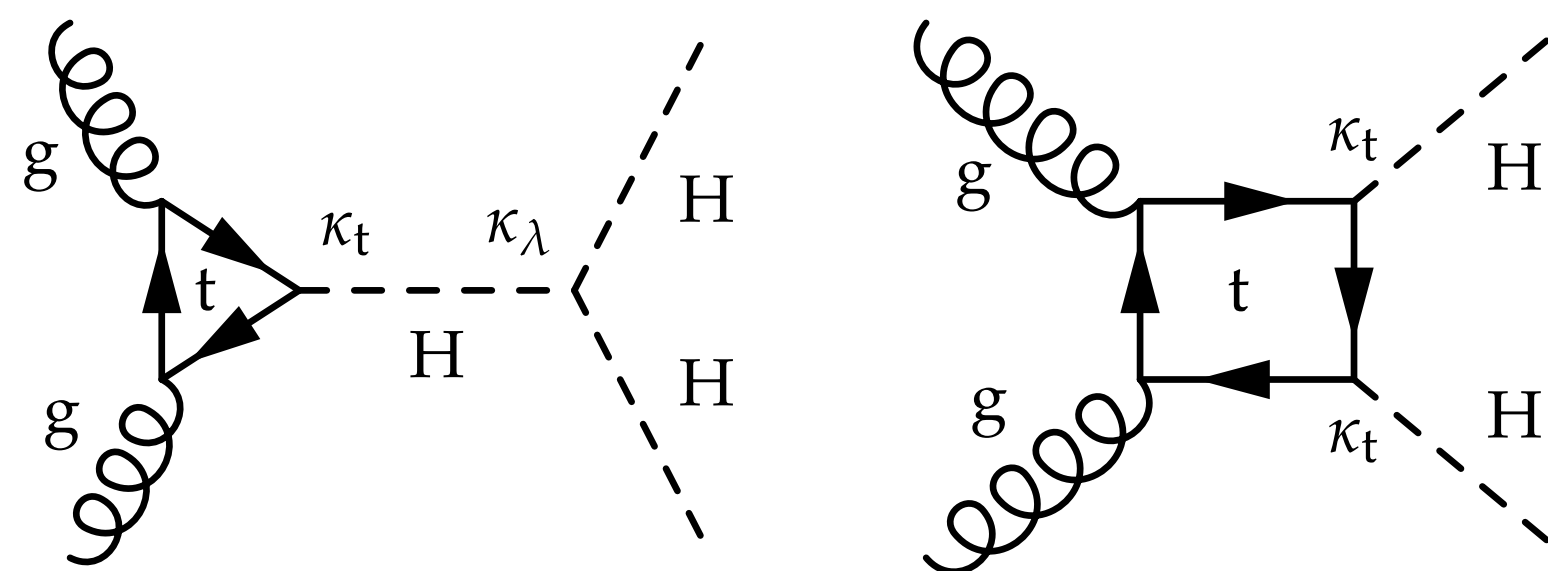
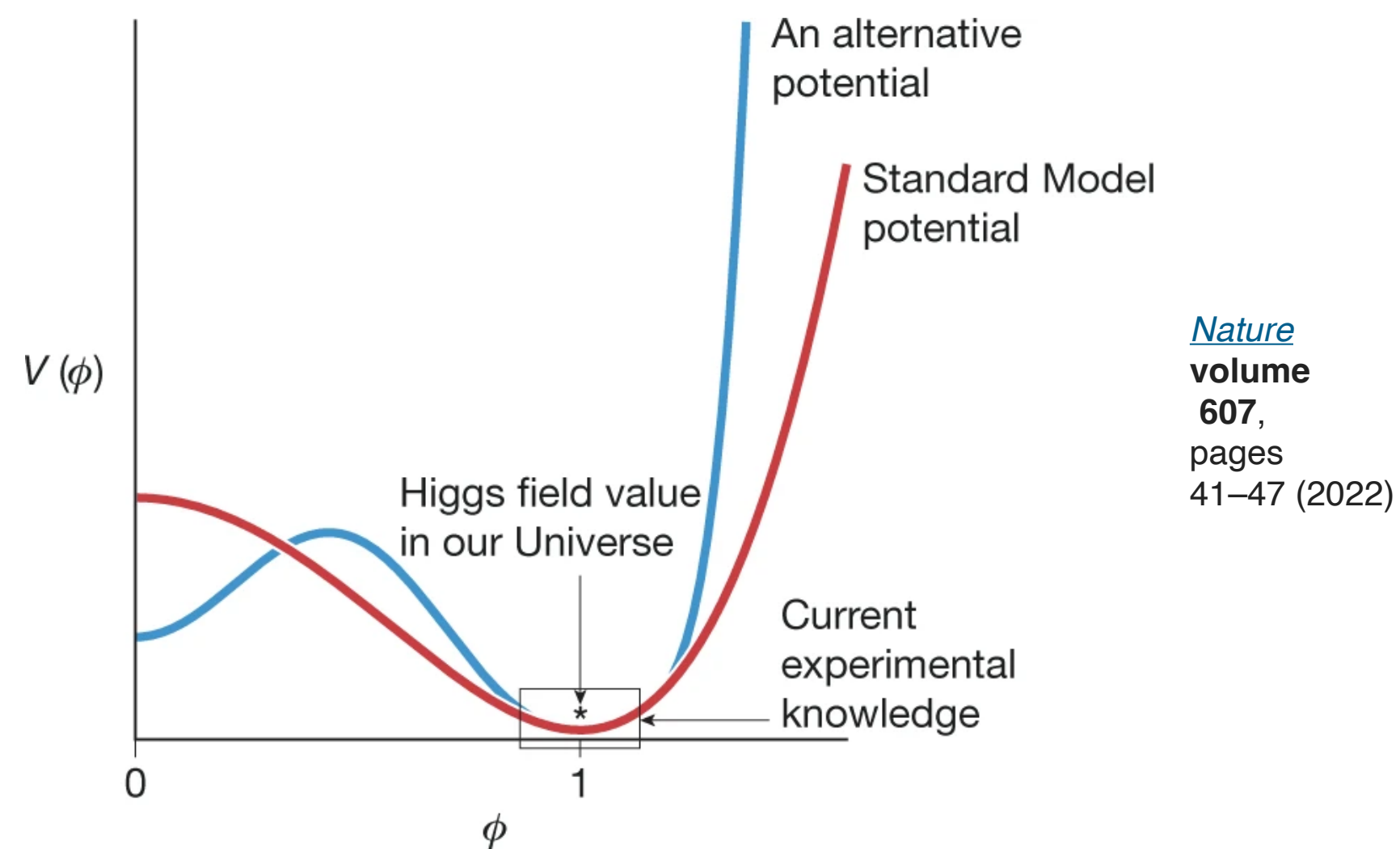


CMS-PAS-HIG-25-010

高能所/北大

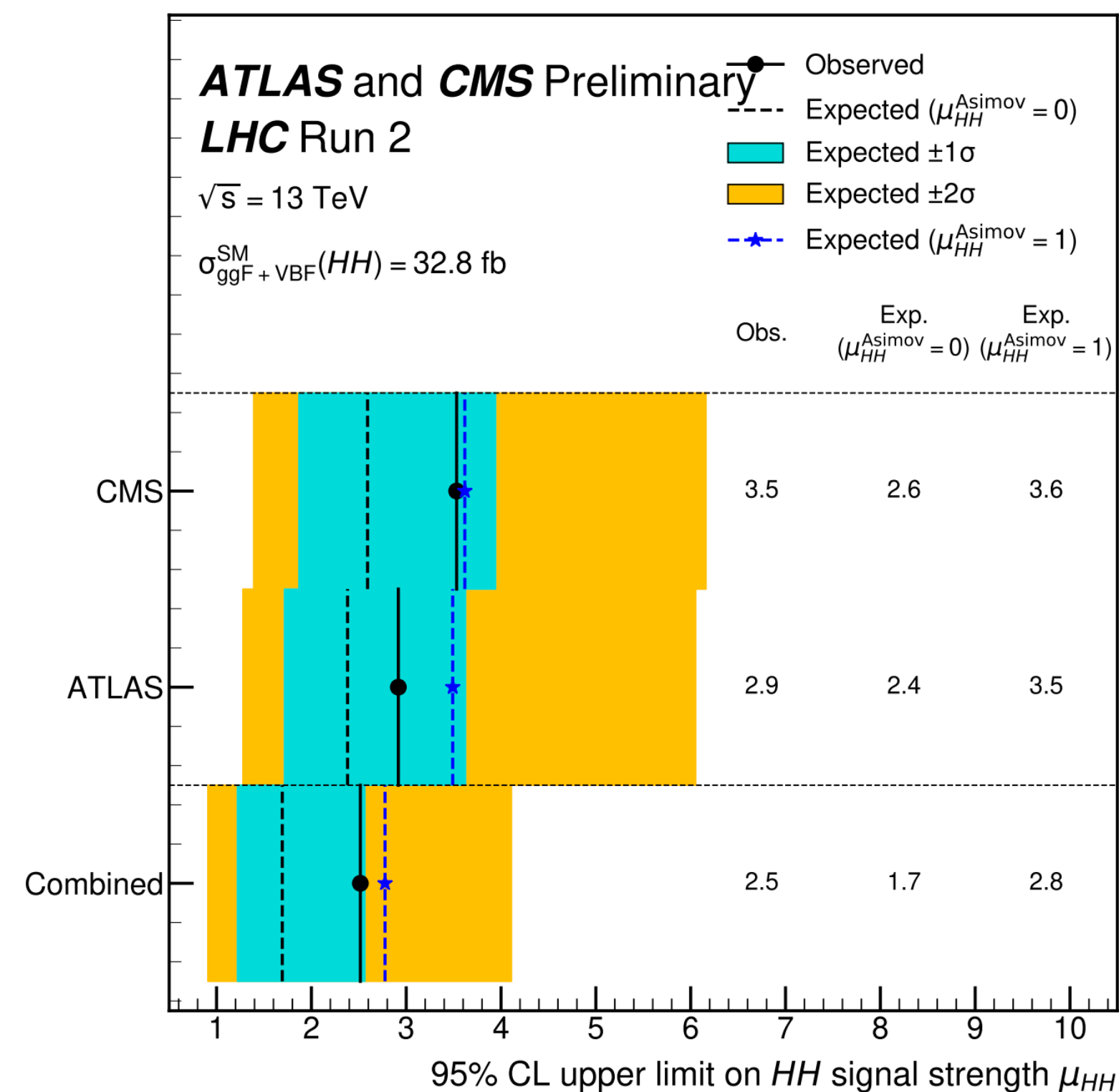
# 希格斯自耦合：希格斯对产生过程寻找

自耦合决定了希格斯场的势能形状  
理解电弱相变的性质、真空稳定性



HH为截面是H的1/1000

ATLAS+CMS Run2联合统计测量  
显著度 $\sim 1.1\sigma$



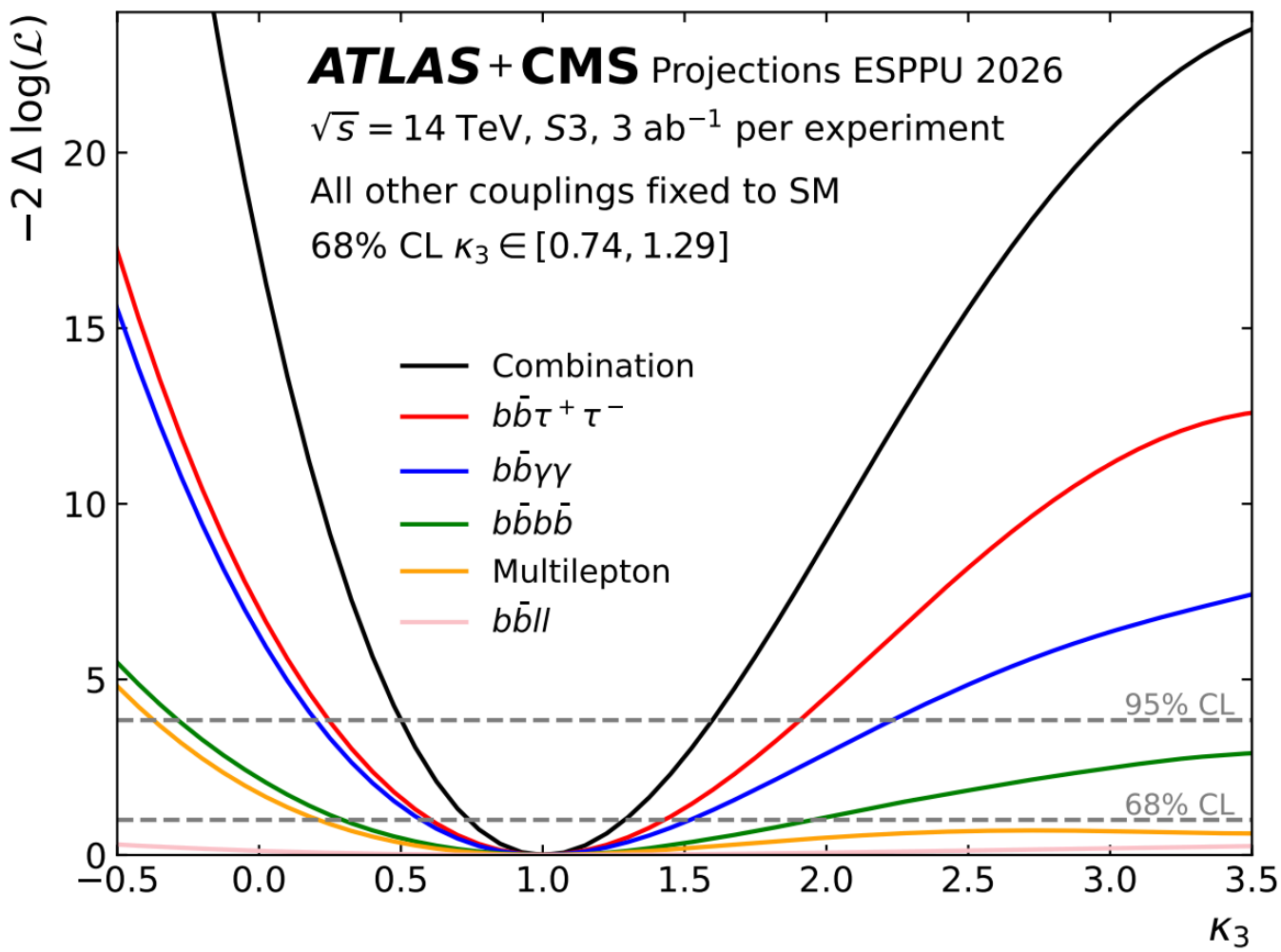
南大/交大(李所)/高能所/北大



# 希格斯自耦合：希格斯对产生过程寻找

HL-LHC预期，3ab<sup>-1</sup>发现

会更早实现！

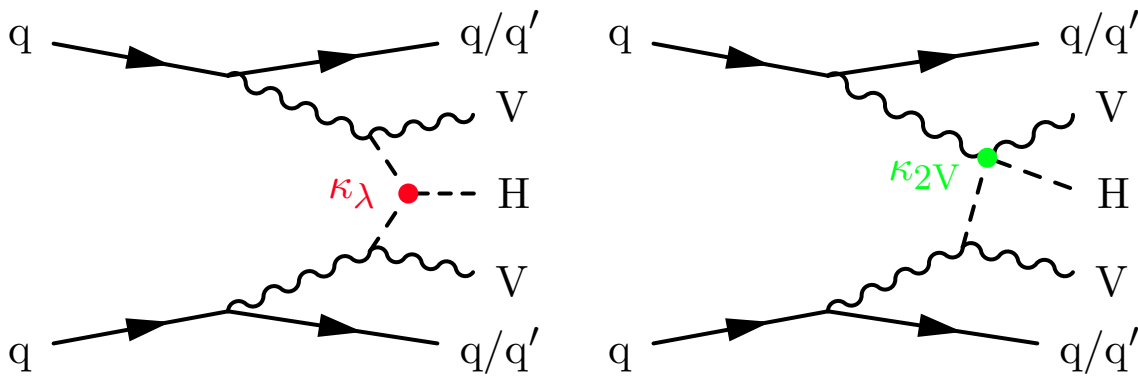
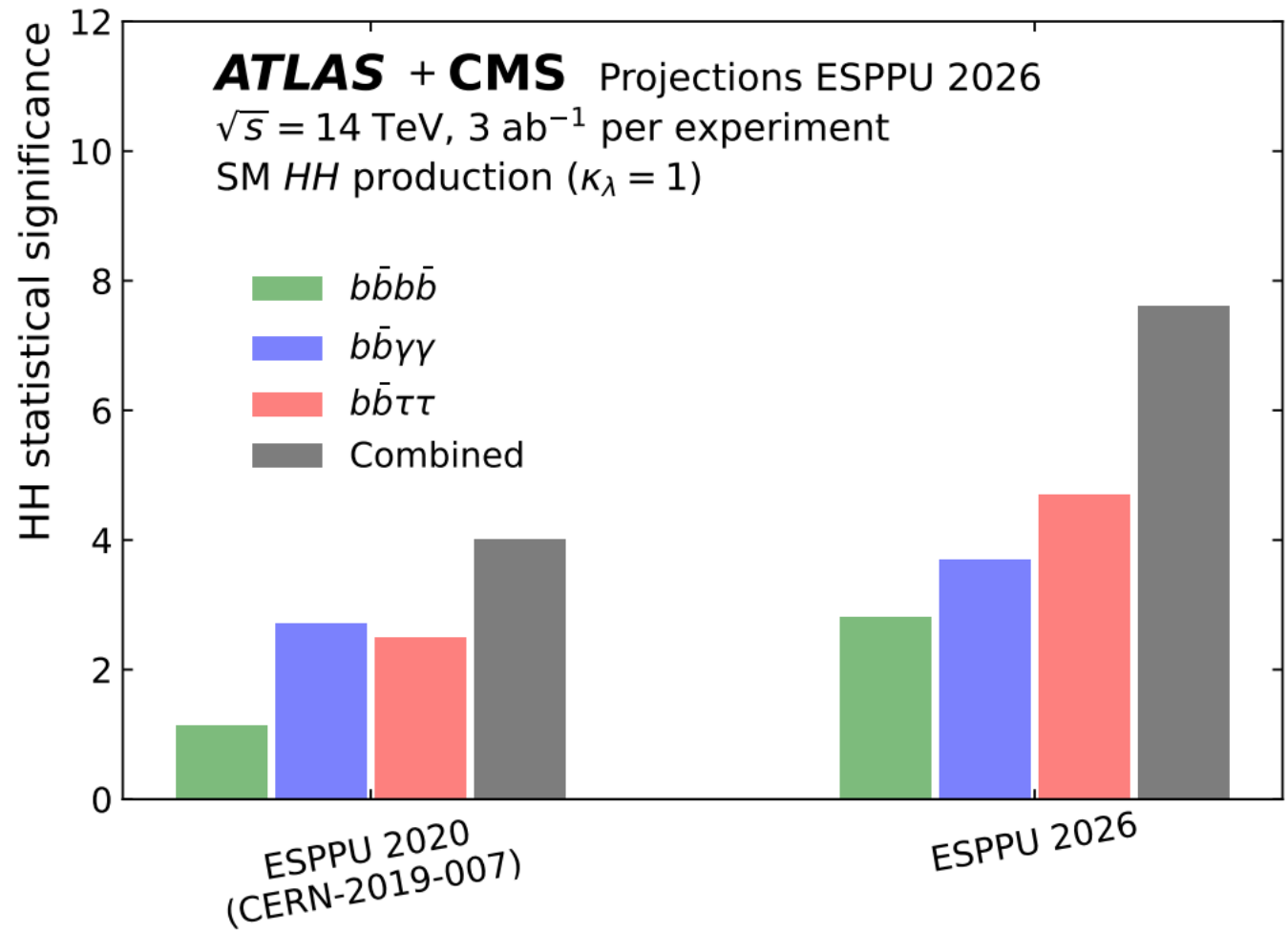
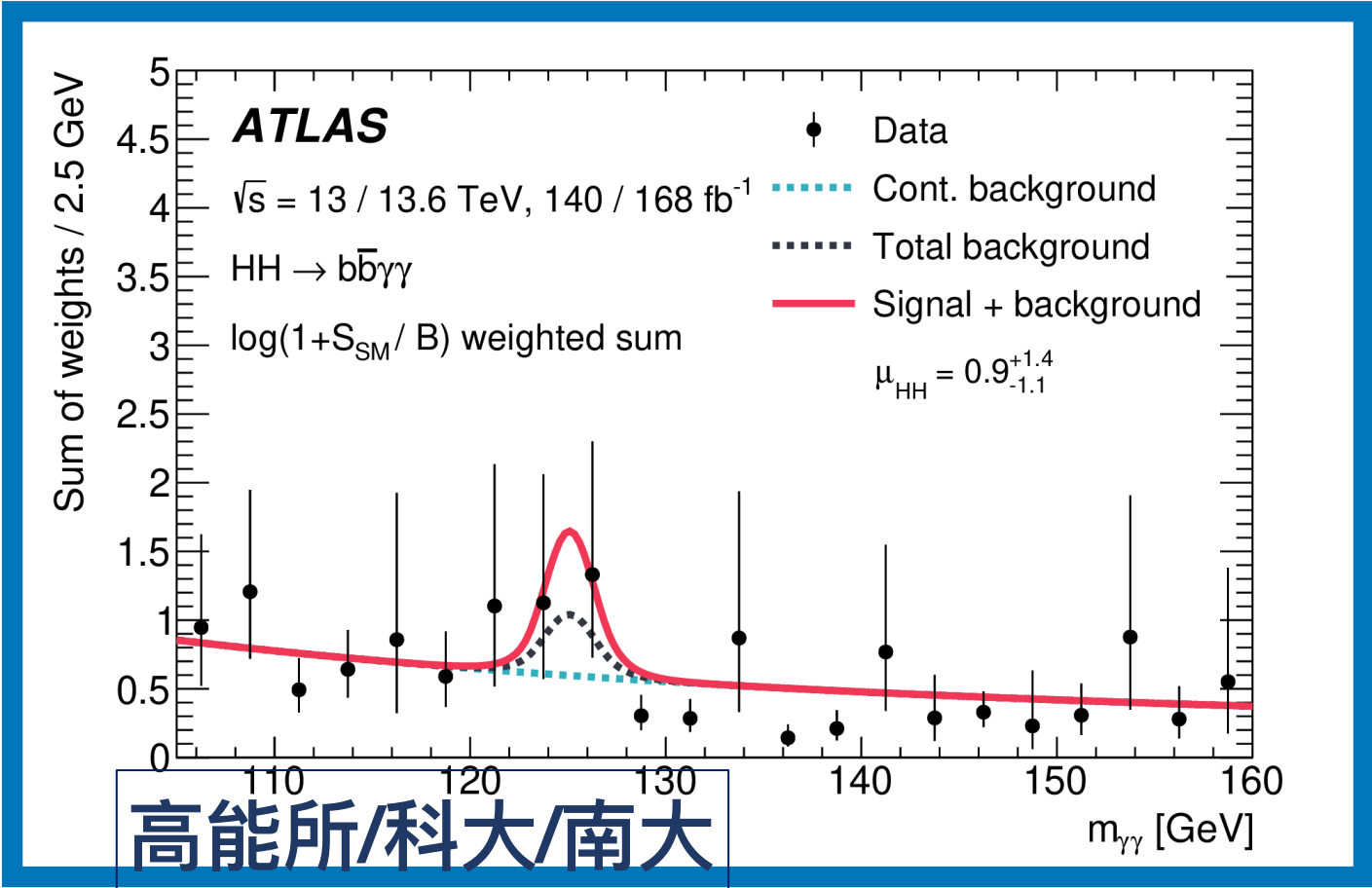
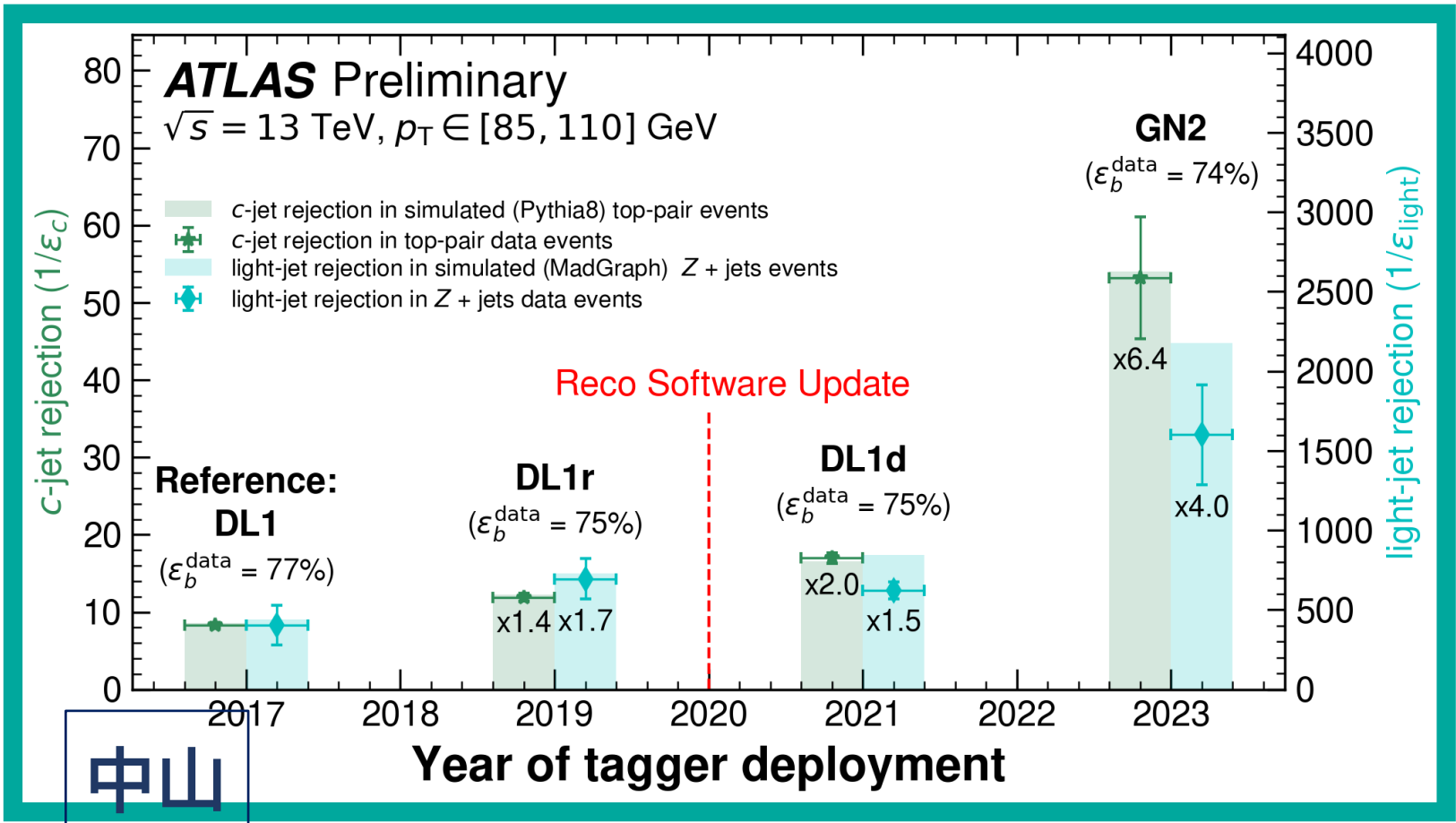


B喷注标记性能4-6倍提高

Nature Commun. 17 (2026) 541

HH → bbγγ 敏感度20% 提高

[Phys. Lett. B 876 (2026) 140280]

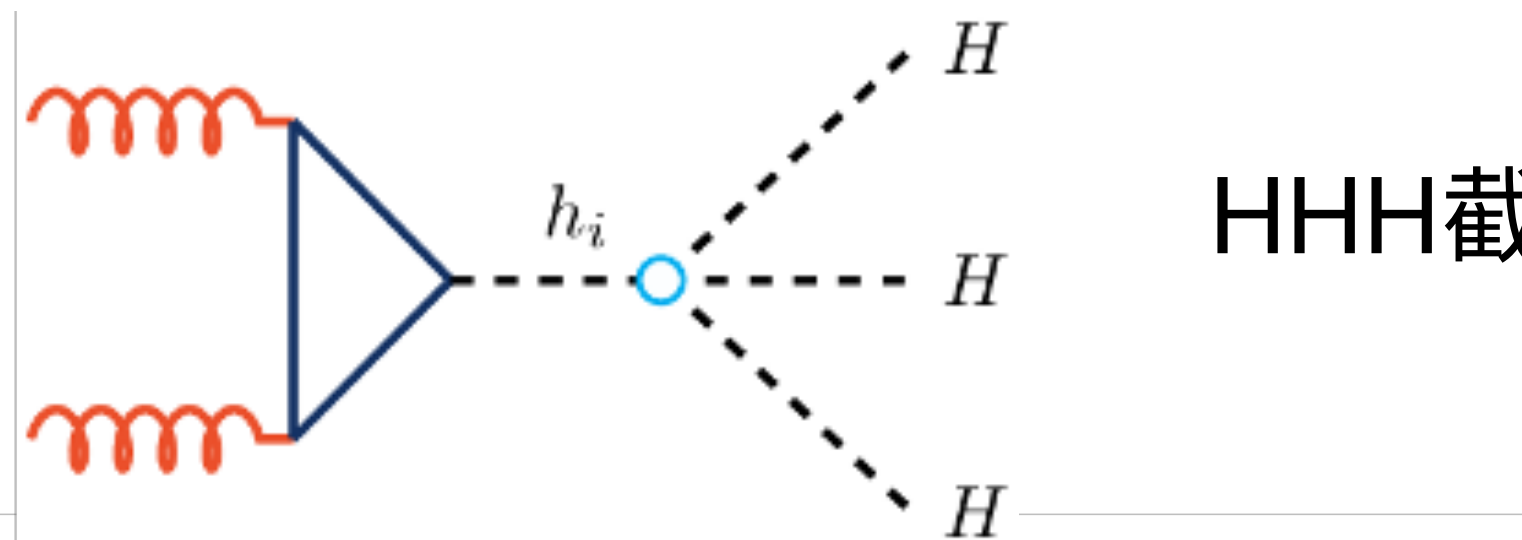


新的物理过程VBS HVV

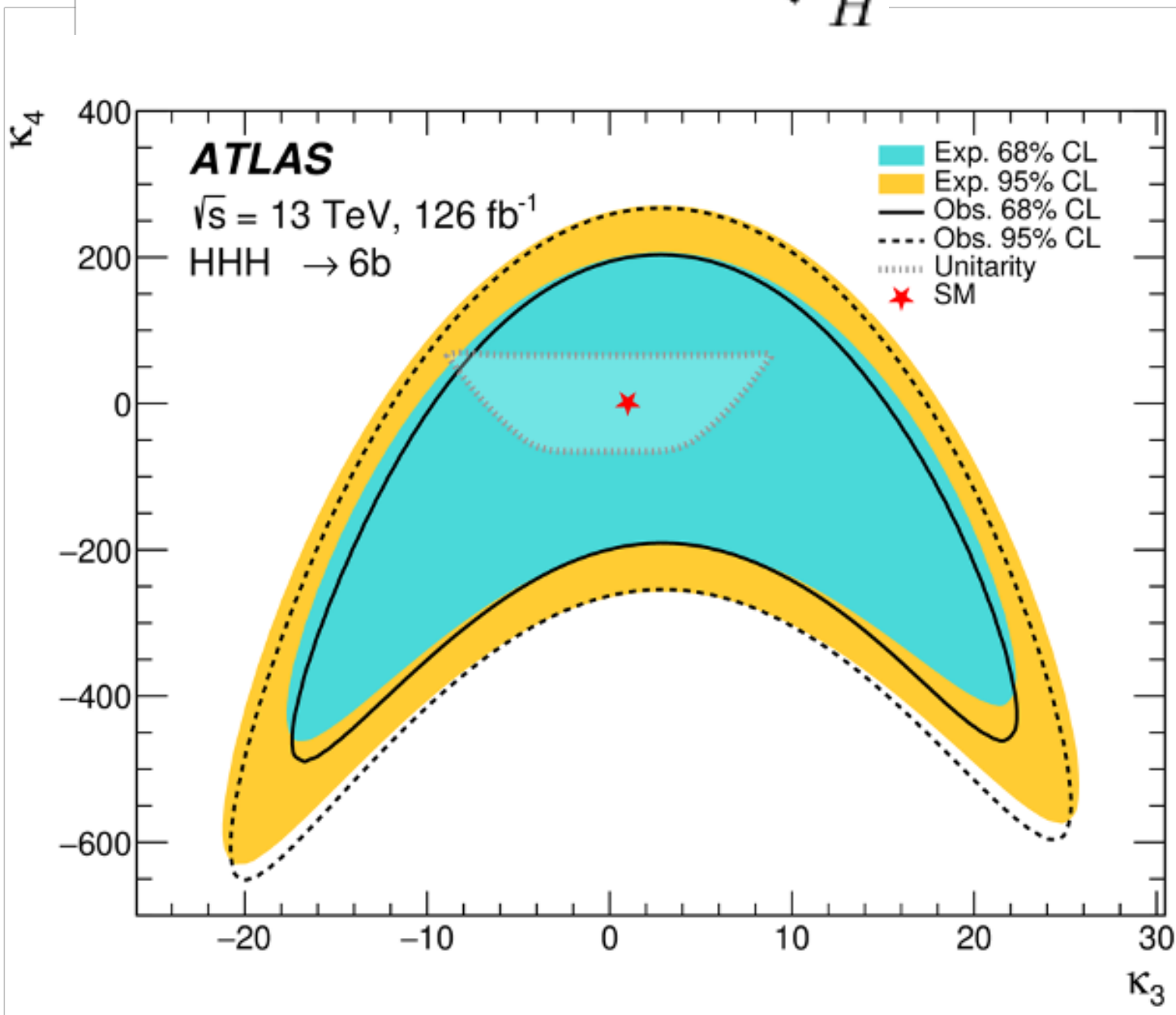
arXiv:2604.24531, PRL接收

北大

# 希格斯自耦合：三希格斯产生过程寻找

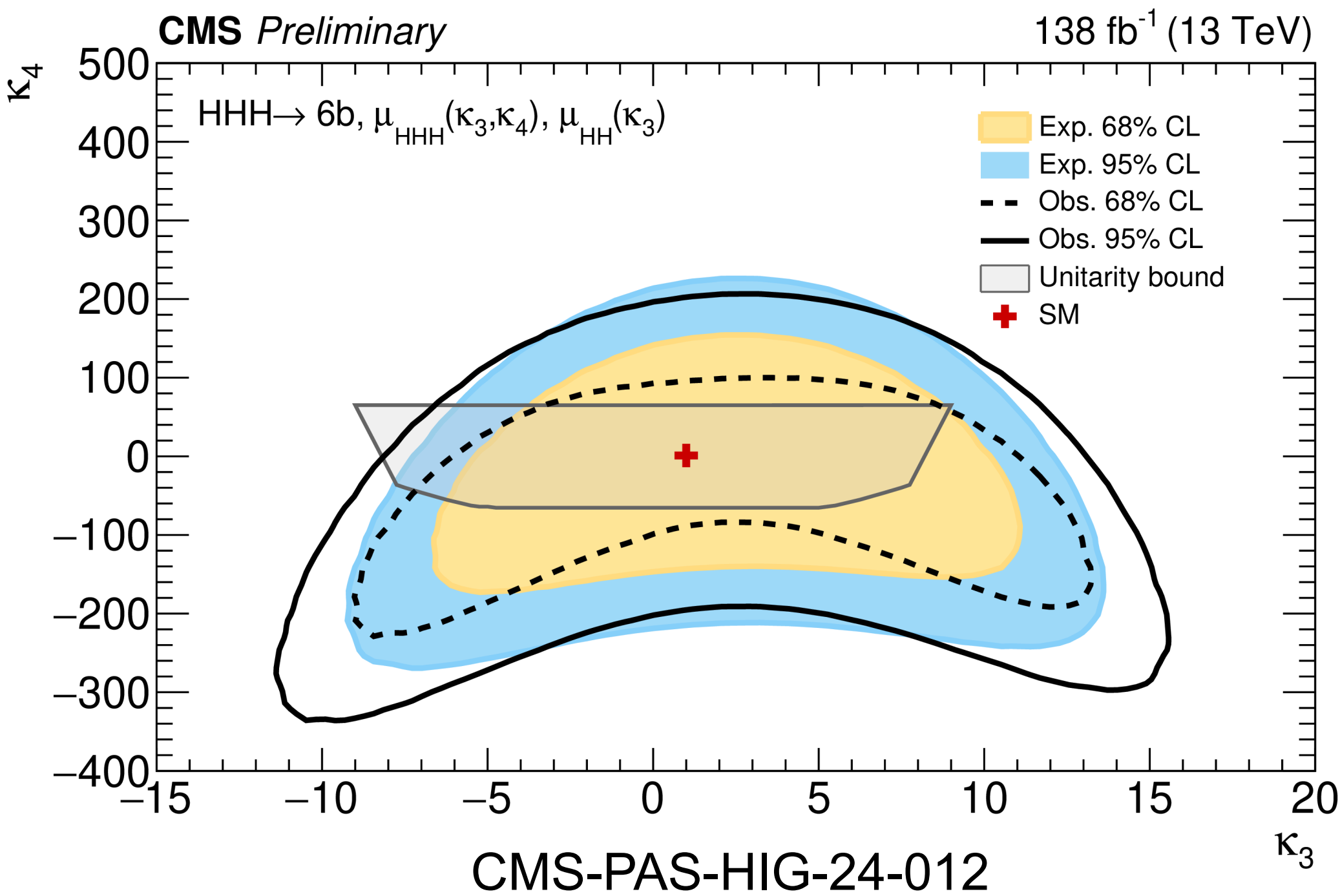


HHH截面是HH的1/1000，对四希格斯顶点自耦合敏感



Phys. Rev. D 111 (2025) 032006

交大/李所



CMS-PAS-HIG-24-012

北大

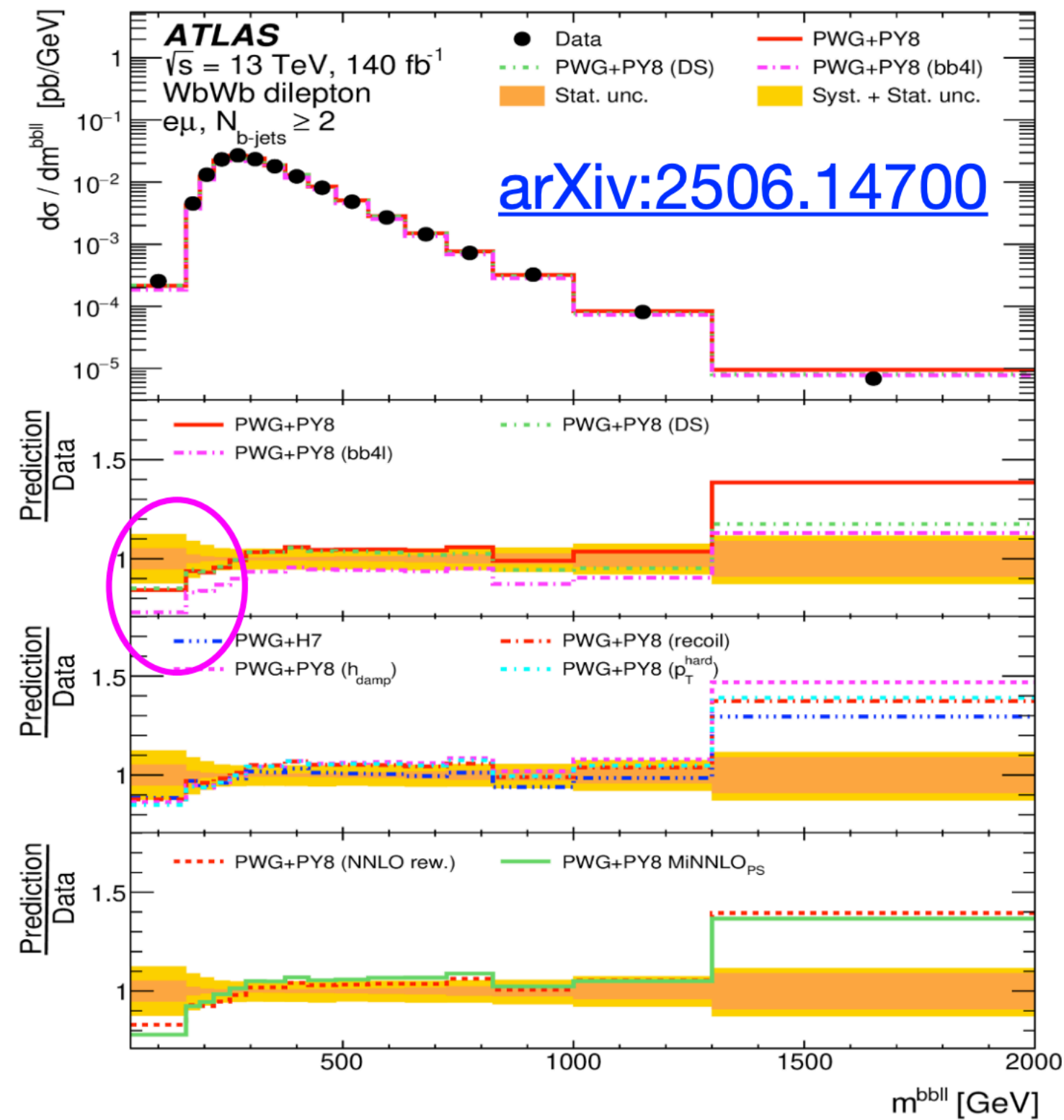
# 标准模型测量



# 顶夸克偶素Toponium的观测

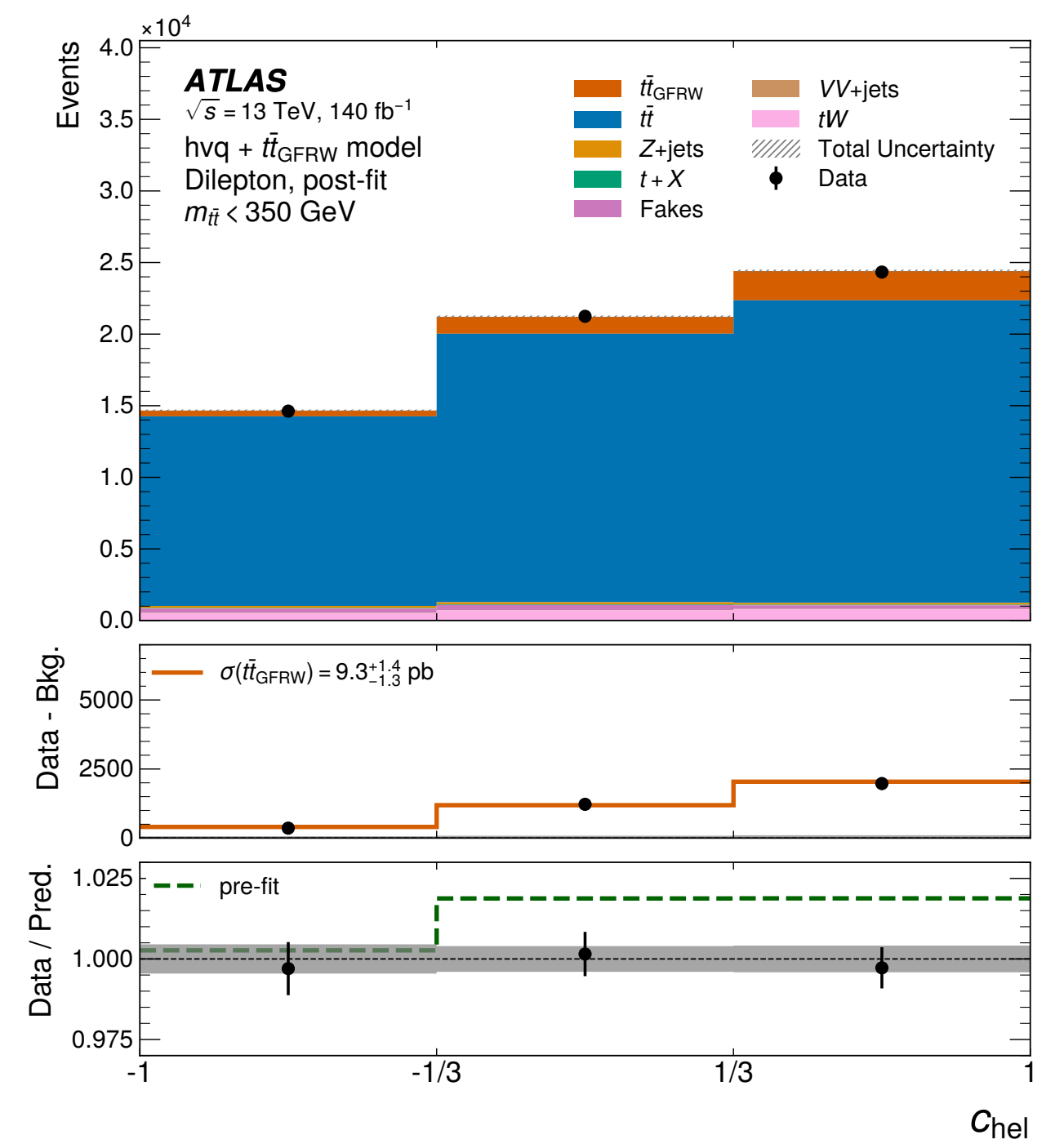
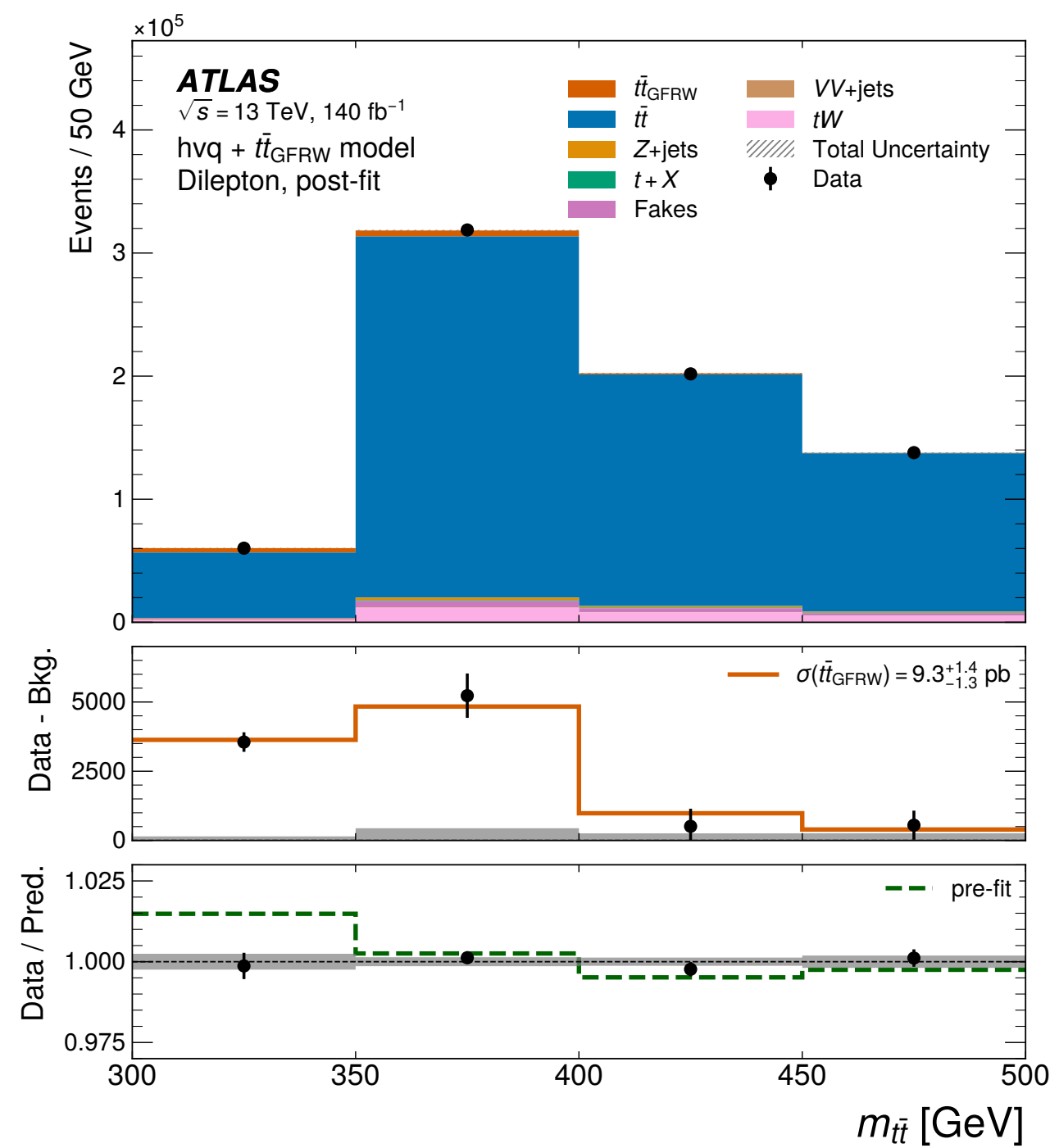
18

## 精确测量看到的偏离迹象



## Ttbar threshold处的信号观测（预期）强度：7.7 $\sigma$ (5.7 $\sigma$ )

Rep. Prog. Phys. 89 (2026) 057801



V.S. Fadin and V.A. Khoze, JETP Lett. 46 (1987) 525

Y. Sumino et al., Phys. Rev. D 47 (1993) 56

W.-L. Ju et al., JHEP 06 (2020) 158 （浙大杨李林教授团队）

|       |               |                        |
|-------|---------------|------------------------|
| CMS   | Dileptonic    | $8.8^{+1.2}_{-1.4}$ pb |
| ATLAS | Dileptonic    | $9.3^{+1.4}_{-1.3}$ pb |
| CMS   | Semi-leptonic | $5.1^{+0.9}_{-0.9}$ pb |

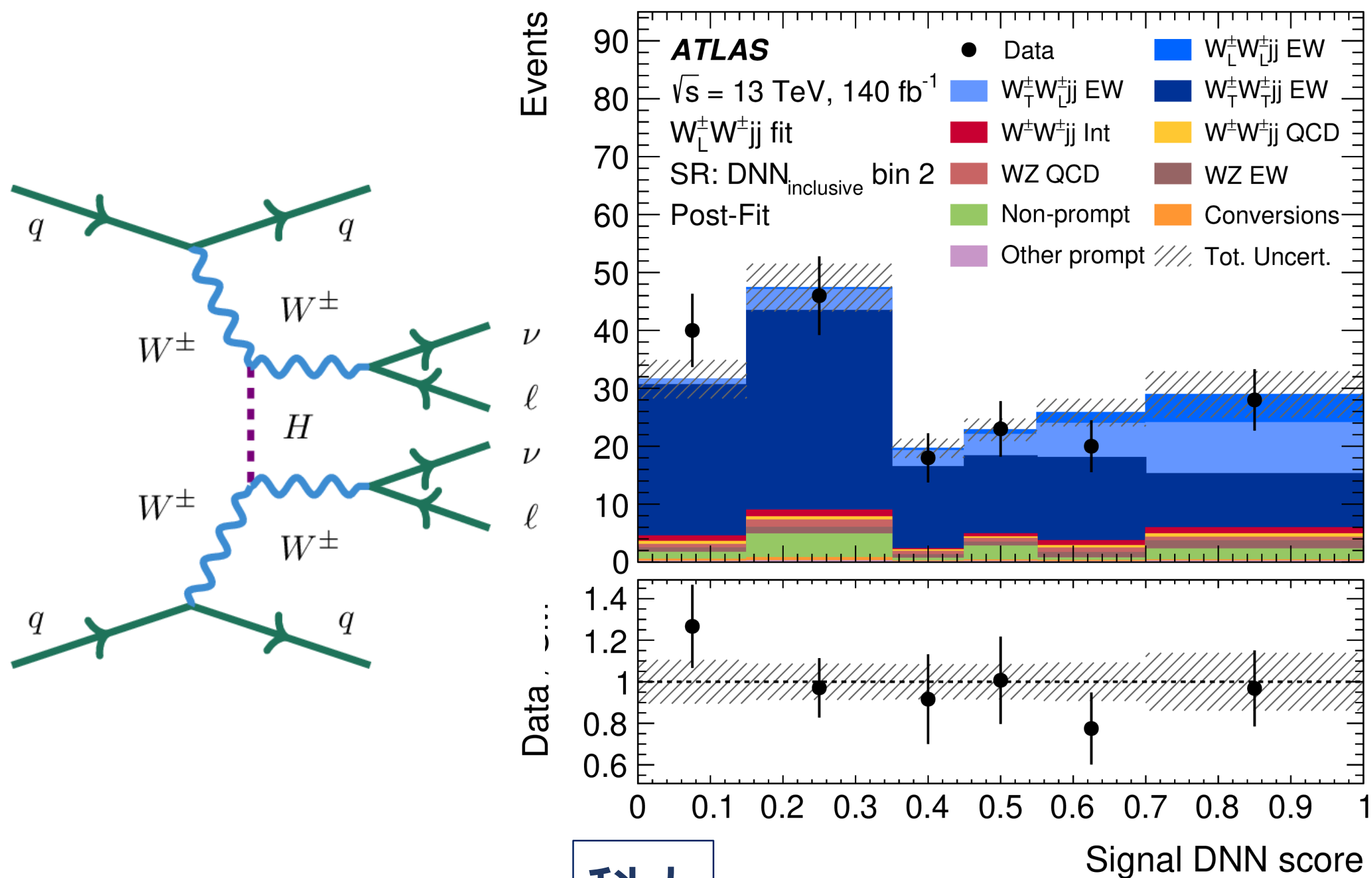
山大

# 多玻色子过程测量

VBS过程的幺正性来源于希格斯与玻色子的耦合

## 首次观察到有纵向极化W玻色子的VBS实验证据

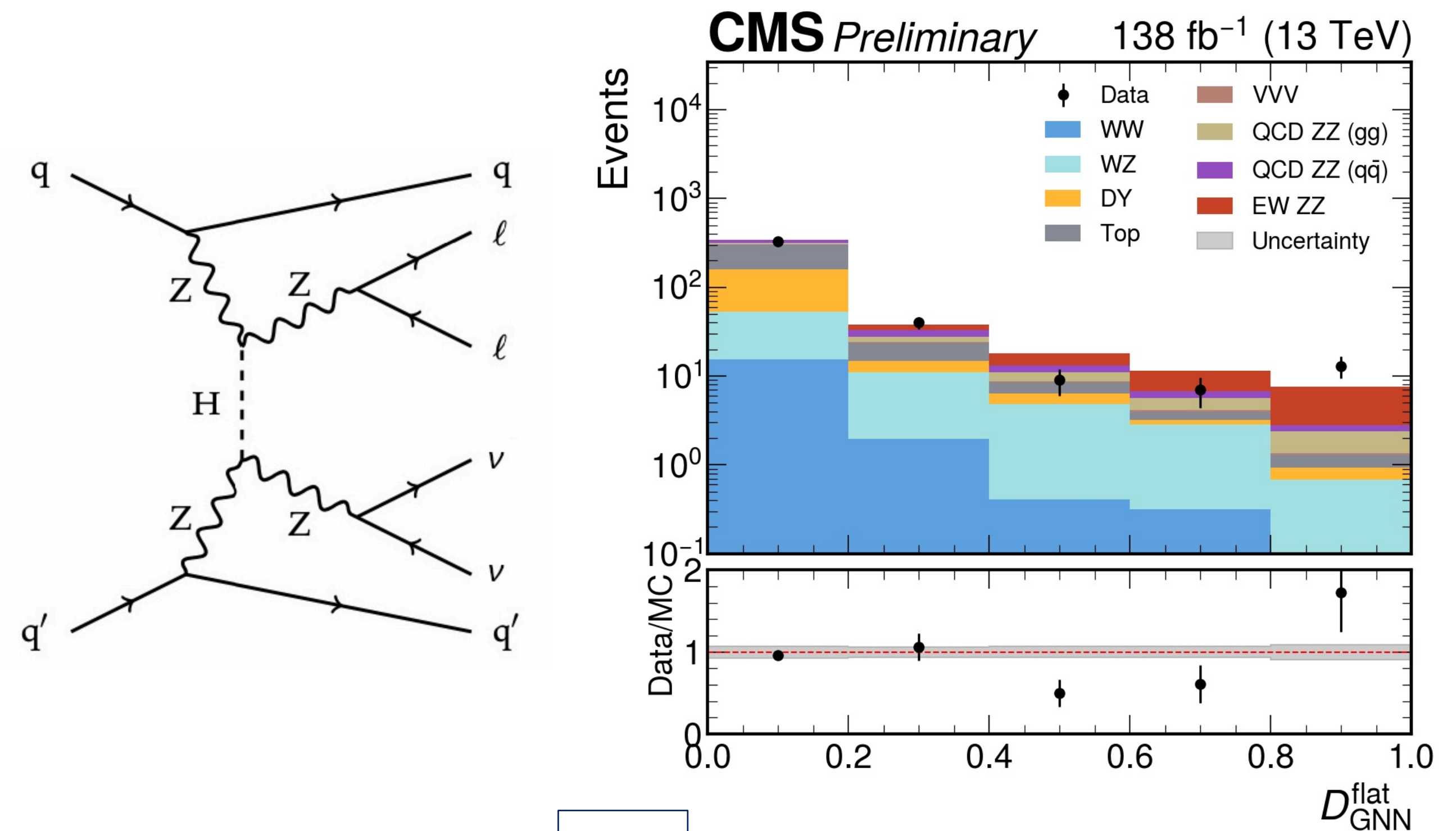
[Phy. Rev. Lett. 135 \(2025\) 111802](#)  
(Editor's Suggestion)



科大

## CMS首次观测到VBS ZZ

[CMS-PAS-SMP-23-001](#)  
[Submitted to PRL](#)



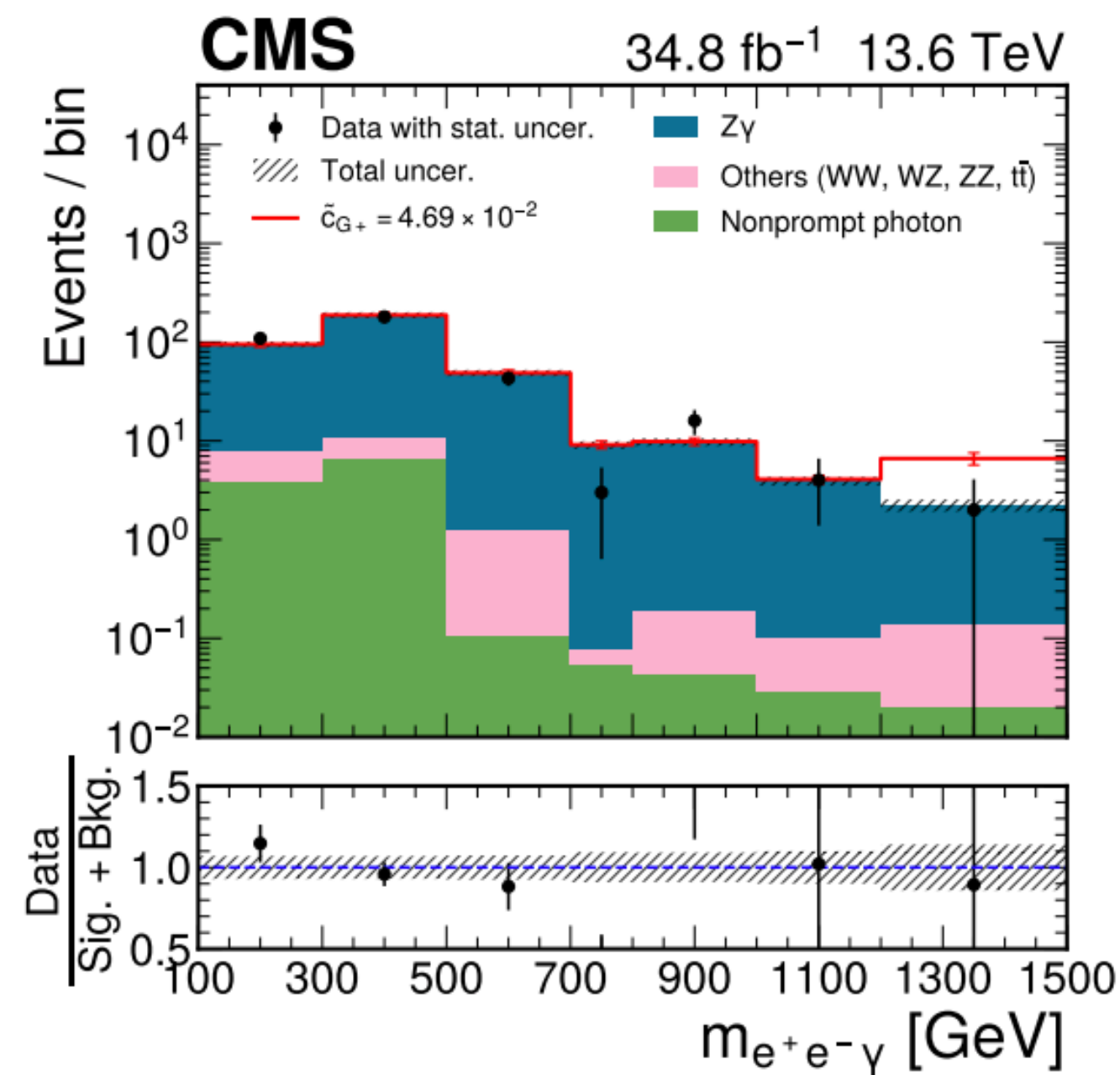
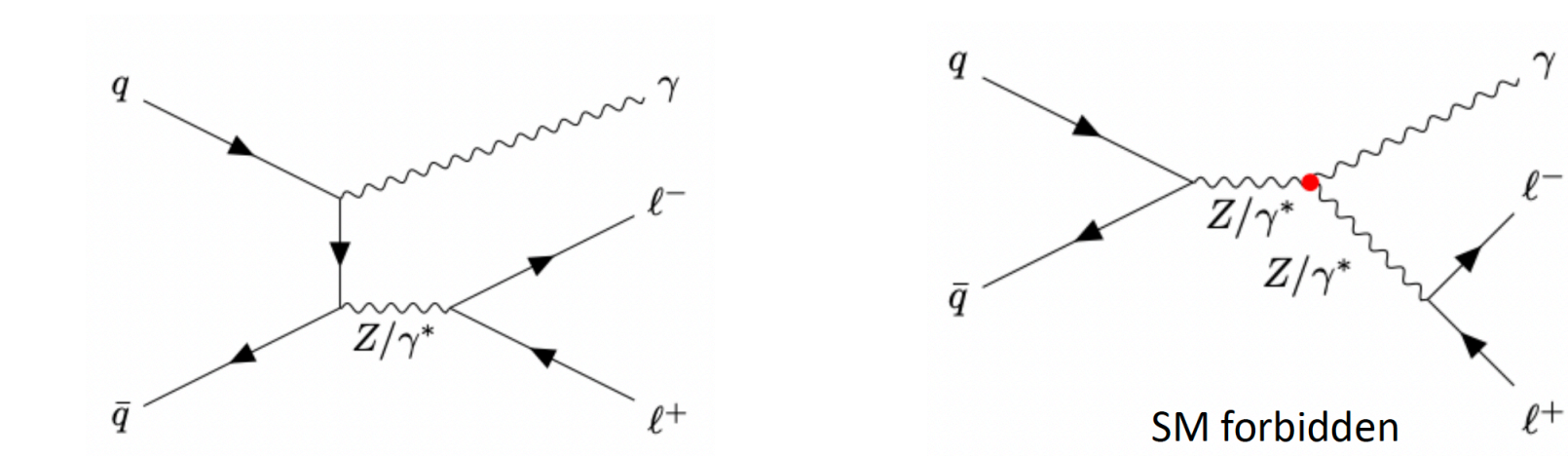
北航



# 多玻色子过程测量

**Z $\gamma$ 微分截面测量，nTGC算符限制**

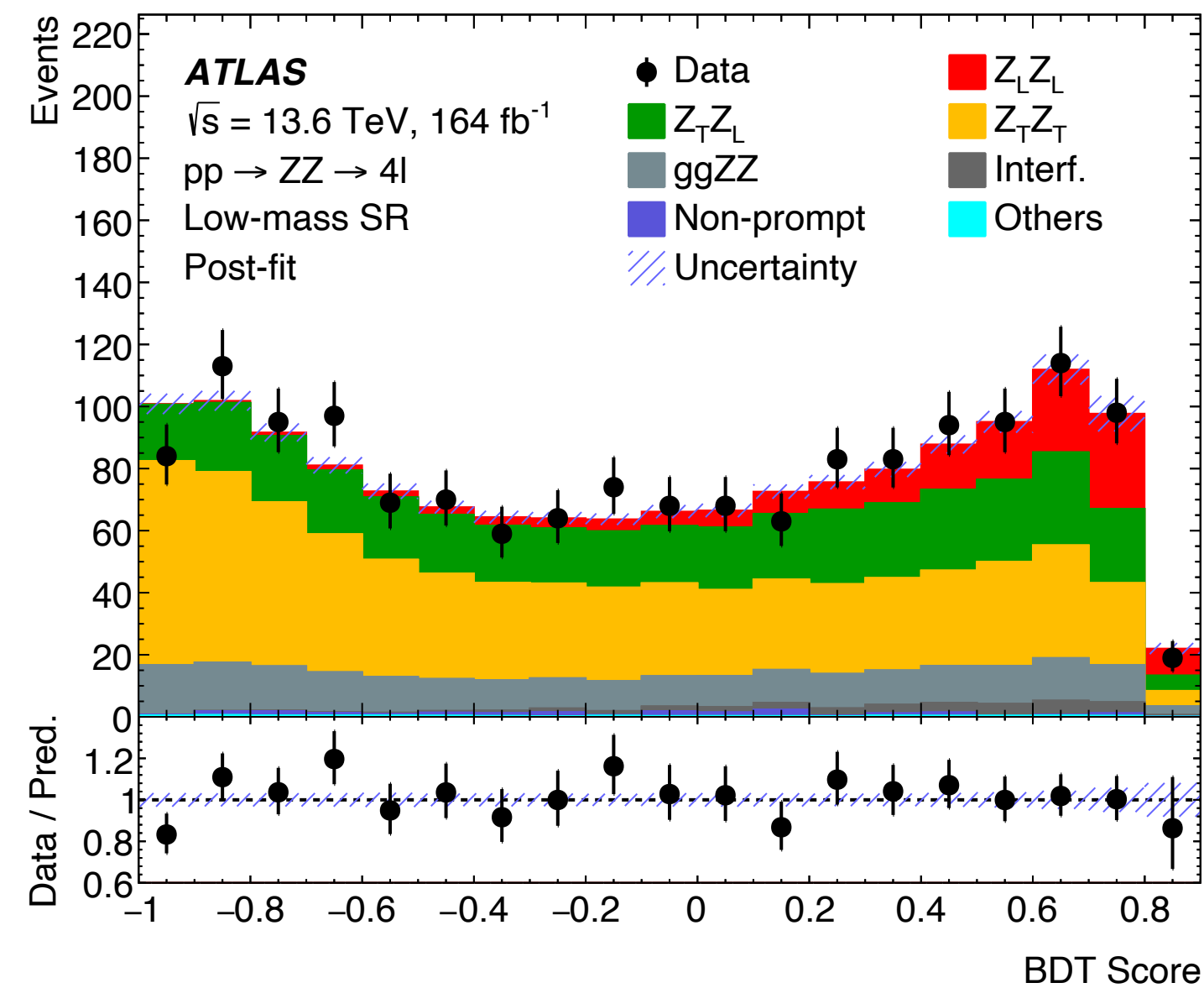
[arXiv:2512.08582](https://arxiv.org/abs/2512.08582), submitted to PRL



北大

**ZZ纵向极化测量，对反常TGC敏感  
首次观测到纵向极化**

[arXiv:2607.12879](https://arxiv.org/abs/2607.12879), submitted to PRL



科大/山大



## 中国组在多玻色子末态多篇工作

$\gamma\gamma \rightarrow WW$ , JHEP 06(2026) 187, PKU

$\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$ , Rep. Prog. Phys. 87 (2024) 107801, PKU

$ttW$ : JHEP05(2024)131, SDU,SJTU/TDLI,USTC

$WW\gamma$ , PRL132(2024)121901, PKU

$WZ\gamma$ , ATLAS, PRL132(2024)021802, ZZU

$WZ\gamma$ , CMS, PRD 112 (2025) 012009, PKU

VBS  $ZZ$ : Nature Physics 19(2023) 237, SDU,SJTU/TDLI,USTC

VBS  $Z\gamma$ : PLB846(2023)138222, IHEP,TDLI

VBS  $W\gamma$  arXiv:2403.02809, SJTU/TDLI

$Z_L Z_L$ : JHEP 12 (2023) 107, SDU,SJTU/TDLI,USTC

# QCD物理测量

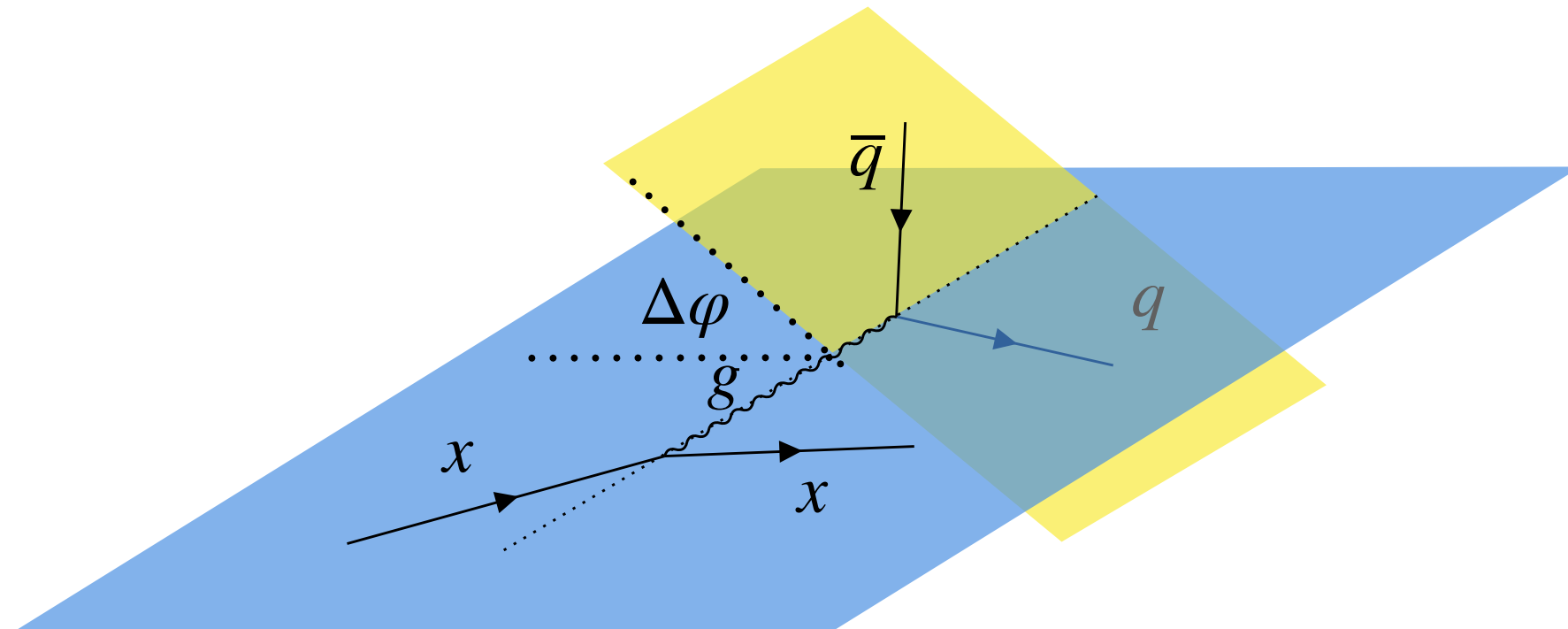
22

胶子夸克在簇射过程的自旋关联，多数parton shower模型没有准确描述

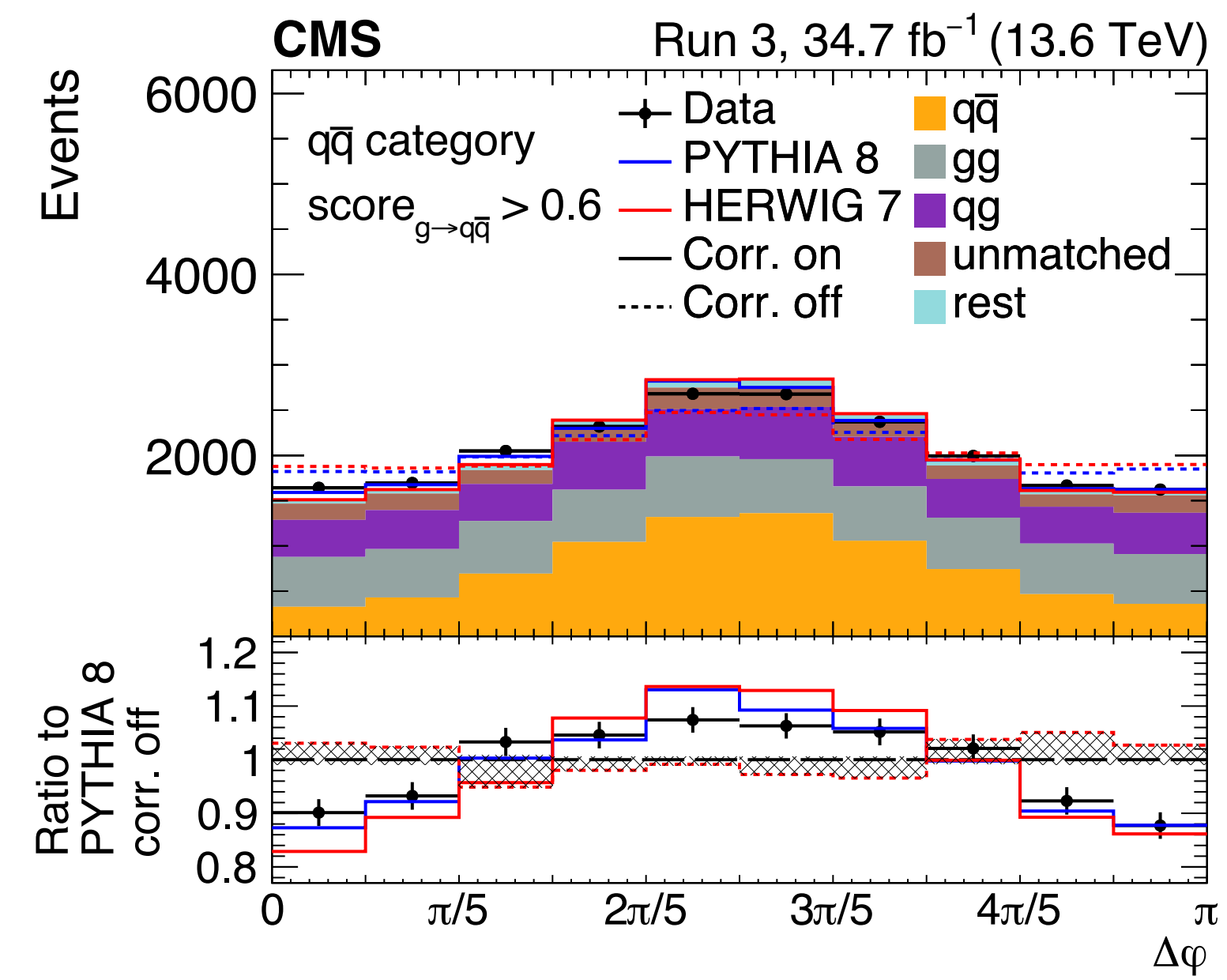
- 是机器学习的输入，也是下一代NLL的模型必须考虑的效应

首次在喷注内部观测到胶子自旋导致的量子干涉效应，显著度 $6.8\sigma$

[arXiv: 2603.03689](https://arxiv.org/abs/2603.03689), Submitted to PRL



浙大



利用Lund Plane+subjettivity定义+机器学习  
强子化后仍然存在

# 全粲四夸克态

23

$J^{CP}: 2^{++}$

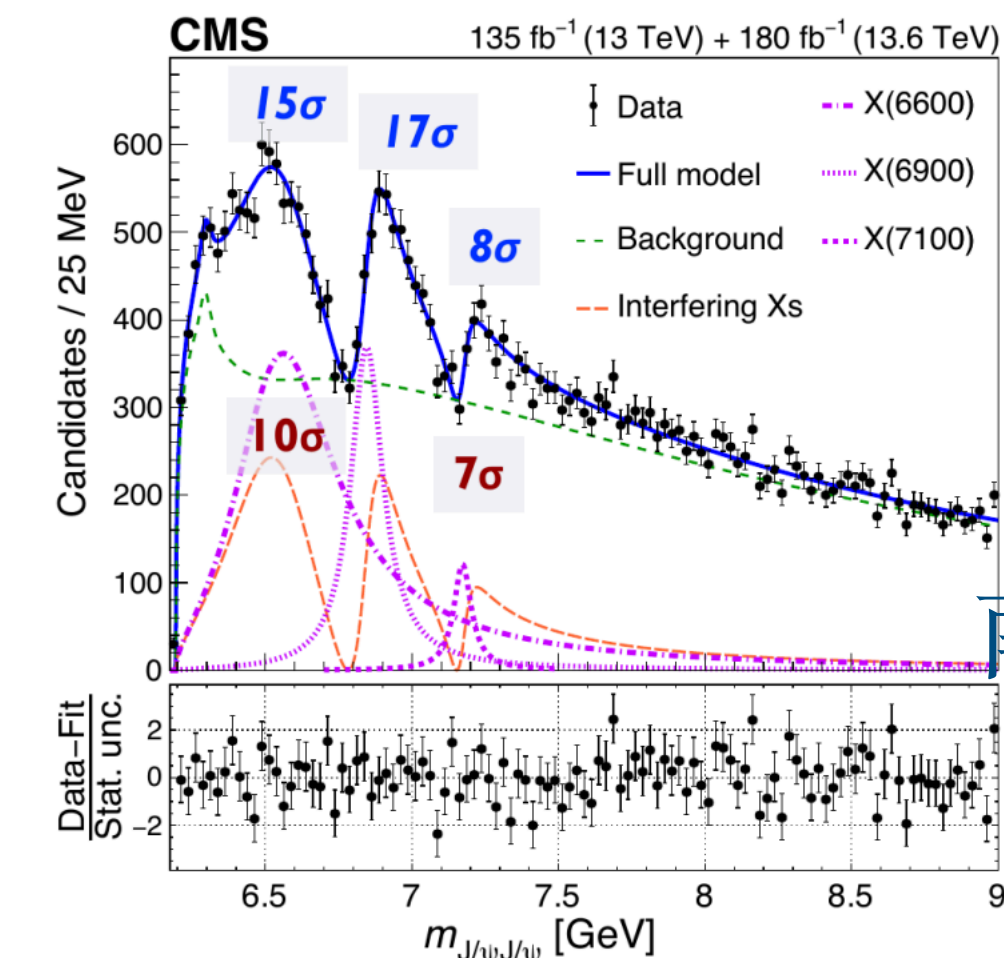
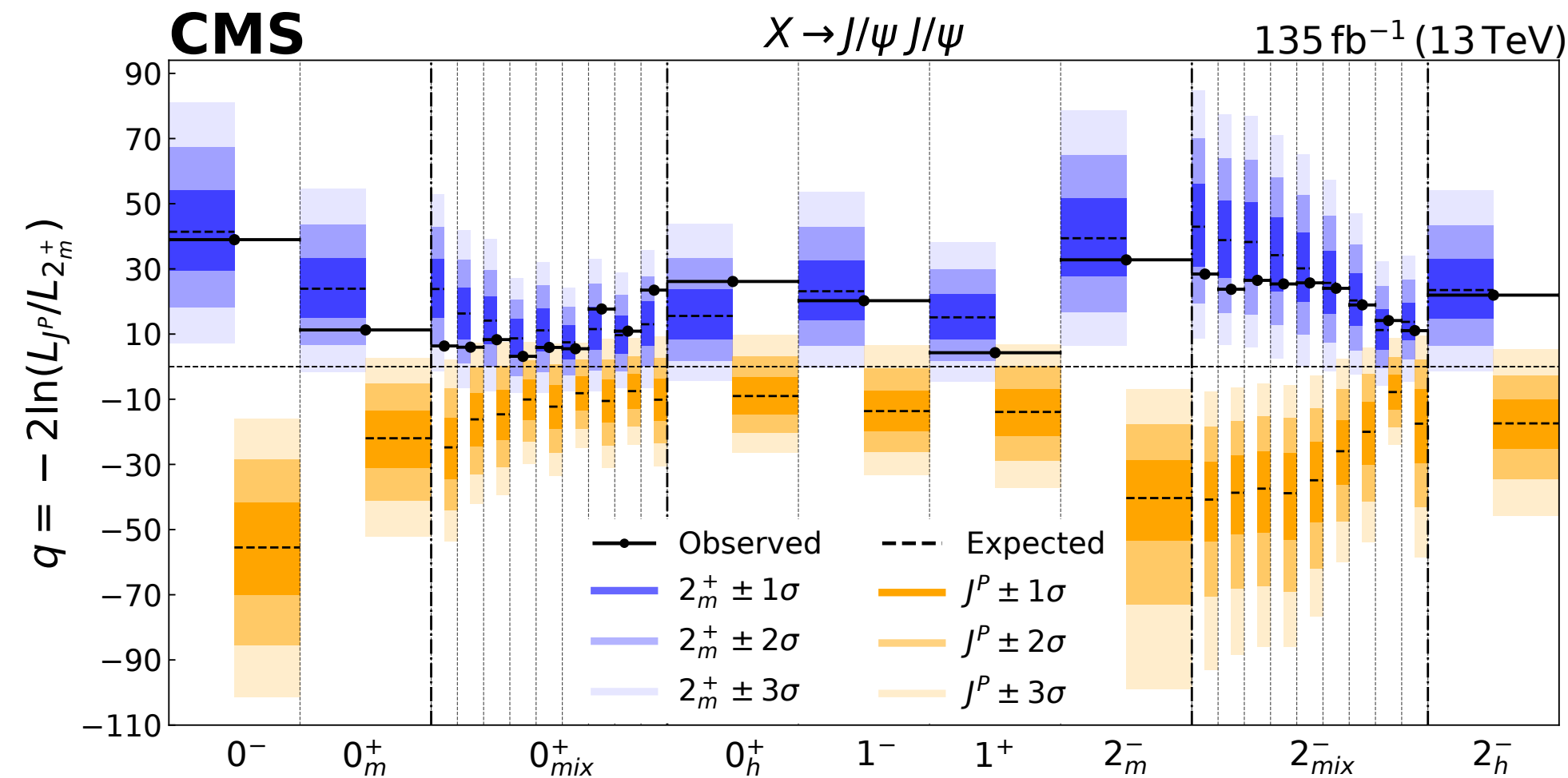
[Nature 648 \(2025\) 58](#)

[arXiv: 2602.02252](#)

submitted to Science Advances

$J/\psi J/\psi \rightarrow 4\mu$

$X(6600), X(6900), X(7100)$



$J/\psi \psi(2S) \rightarrow 4\mu$

$8\sigma$  @  $X(6900)$

$4\sigma$  @  $X(7100)$

南师、清华、复旦

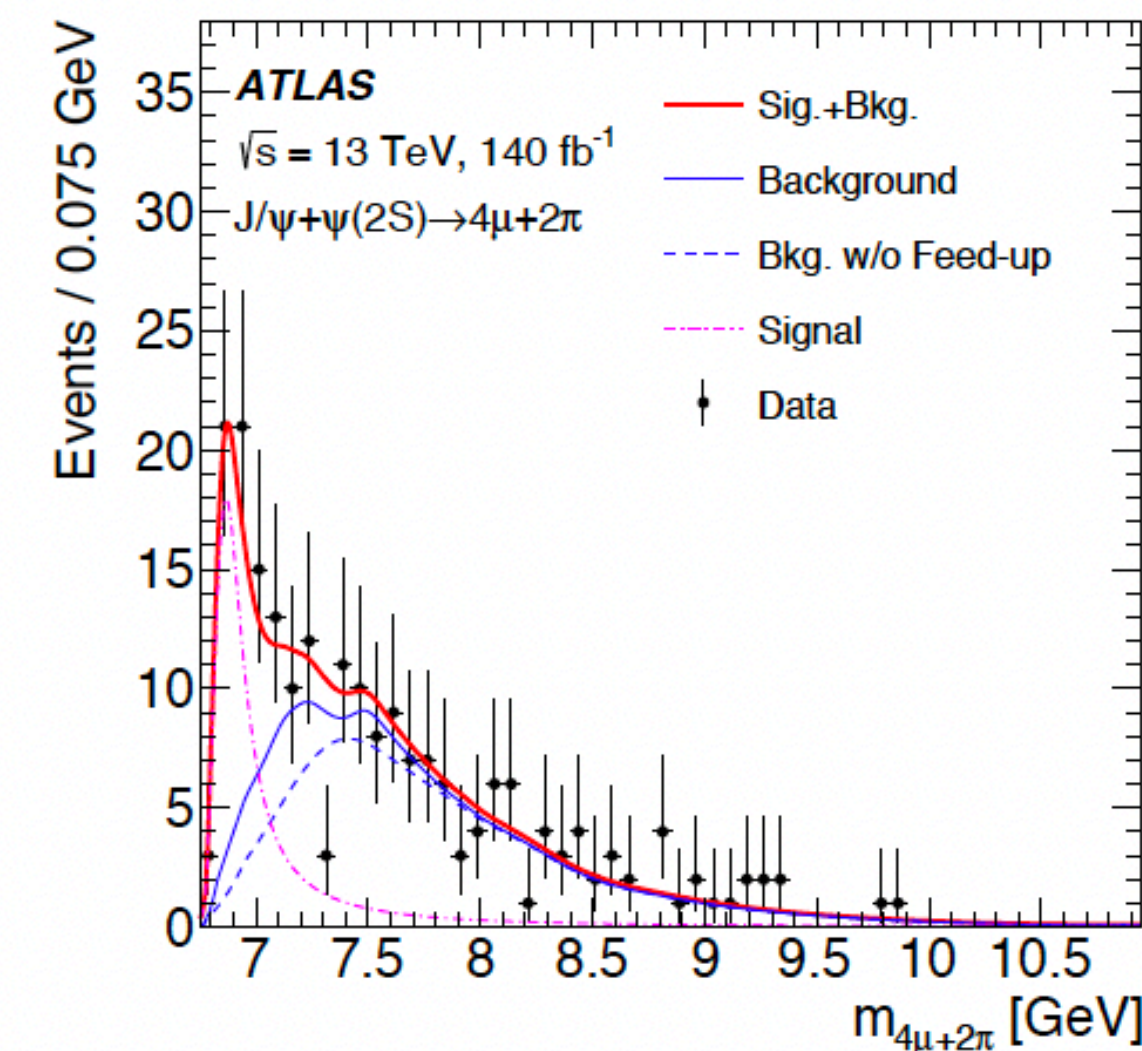
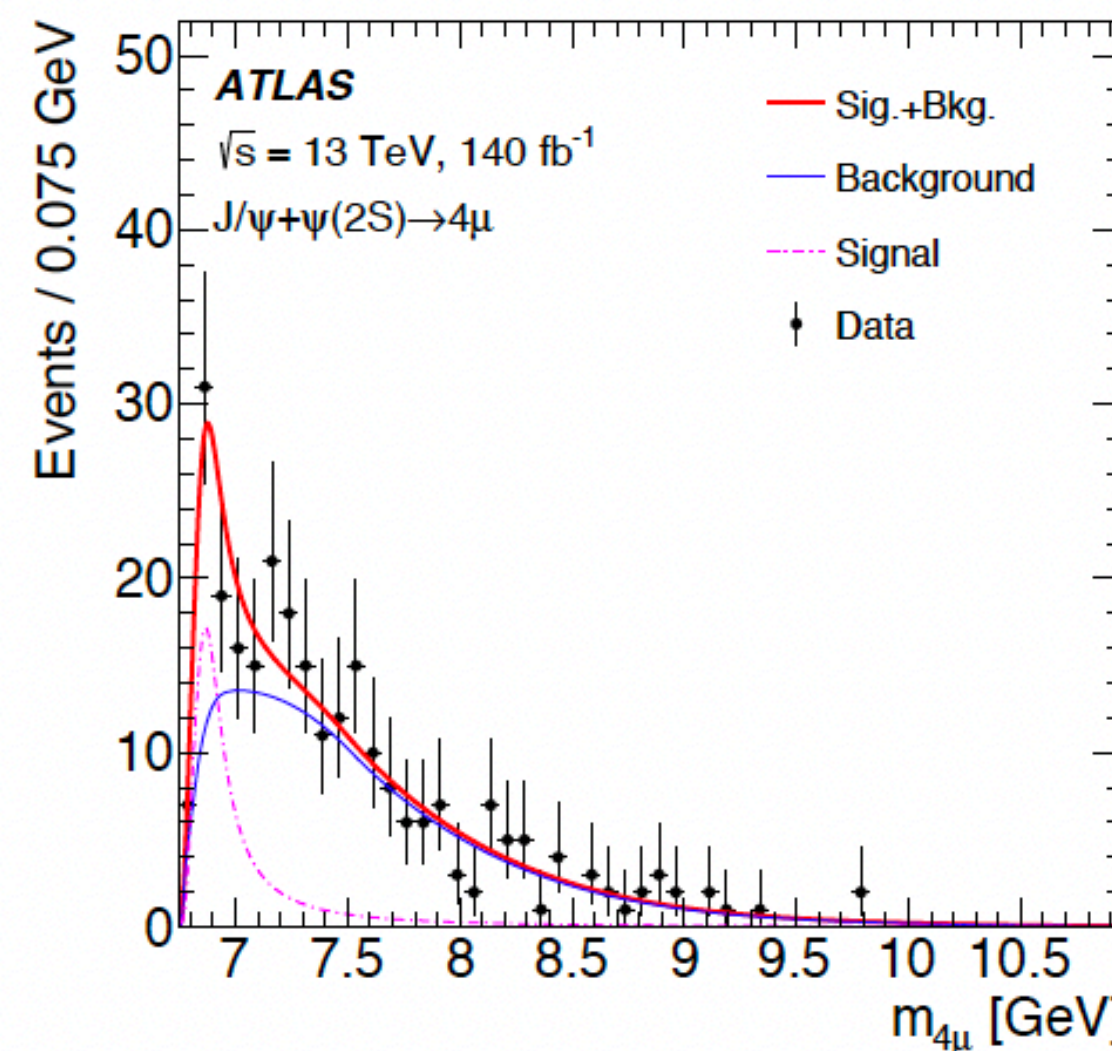
$J/\psi + \psi(2S) \rightarrow 4\mu$  and  $4\mu + 2\pi$

信号强度:  $8.9\sigma$  @  $X(6900)$

[Phys. Rev. D 113 \(2026\) 112015](#)

南师、清华

清华





# 新物理寻找

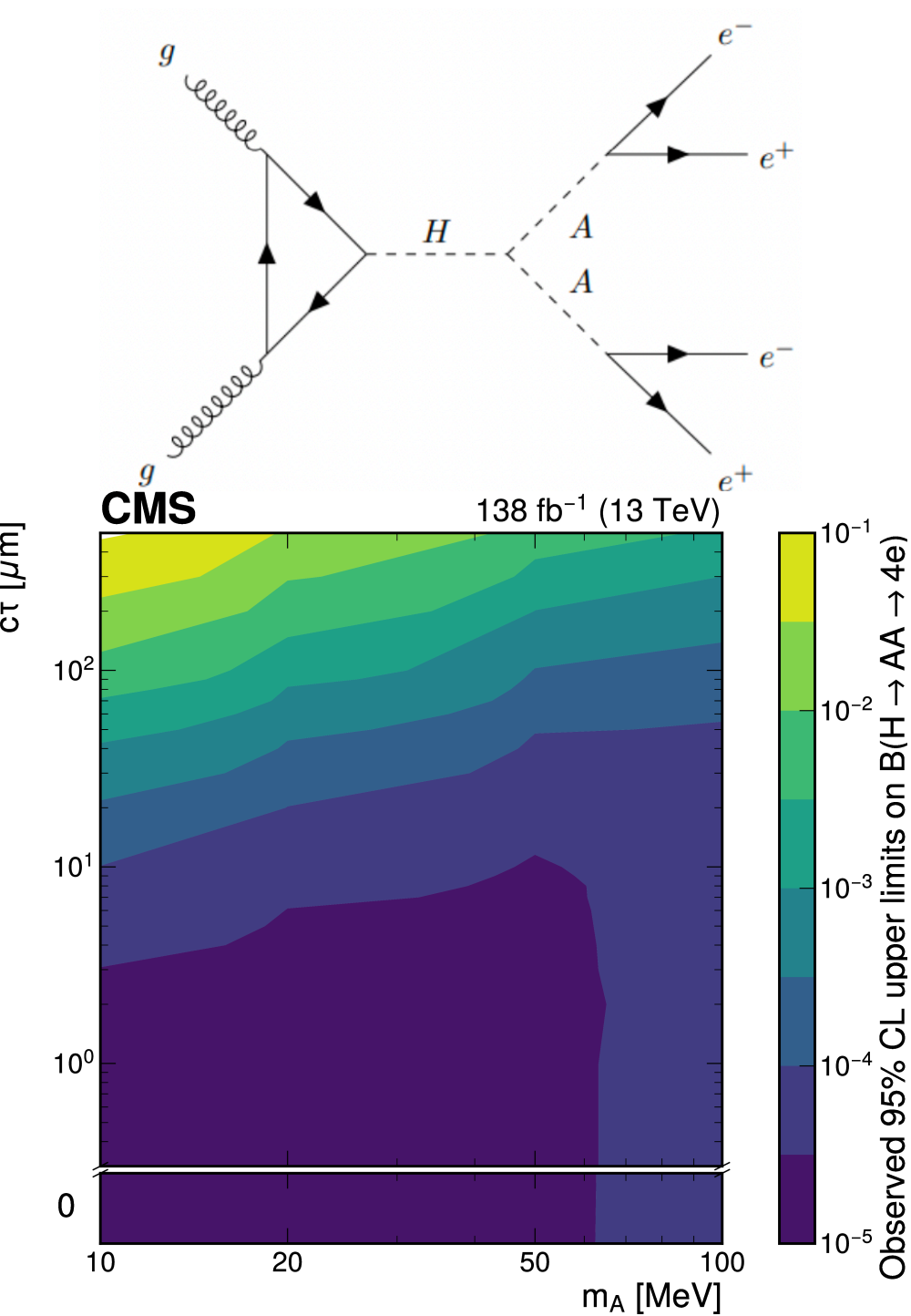
# 暗物质寻找

类轴子: 冷暗物质, MeV

与国内理论家合作 (刘佳)

首个 $H \rightarrow 4e$ 的ALP寻找

arxiv:2511.19563, accepted by PRL

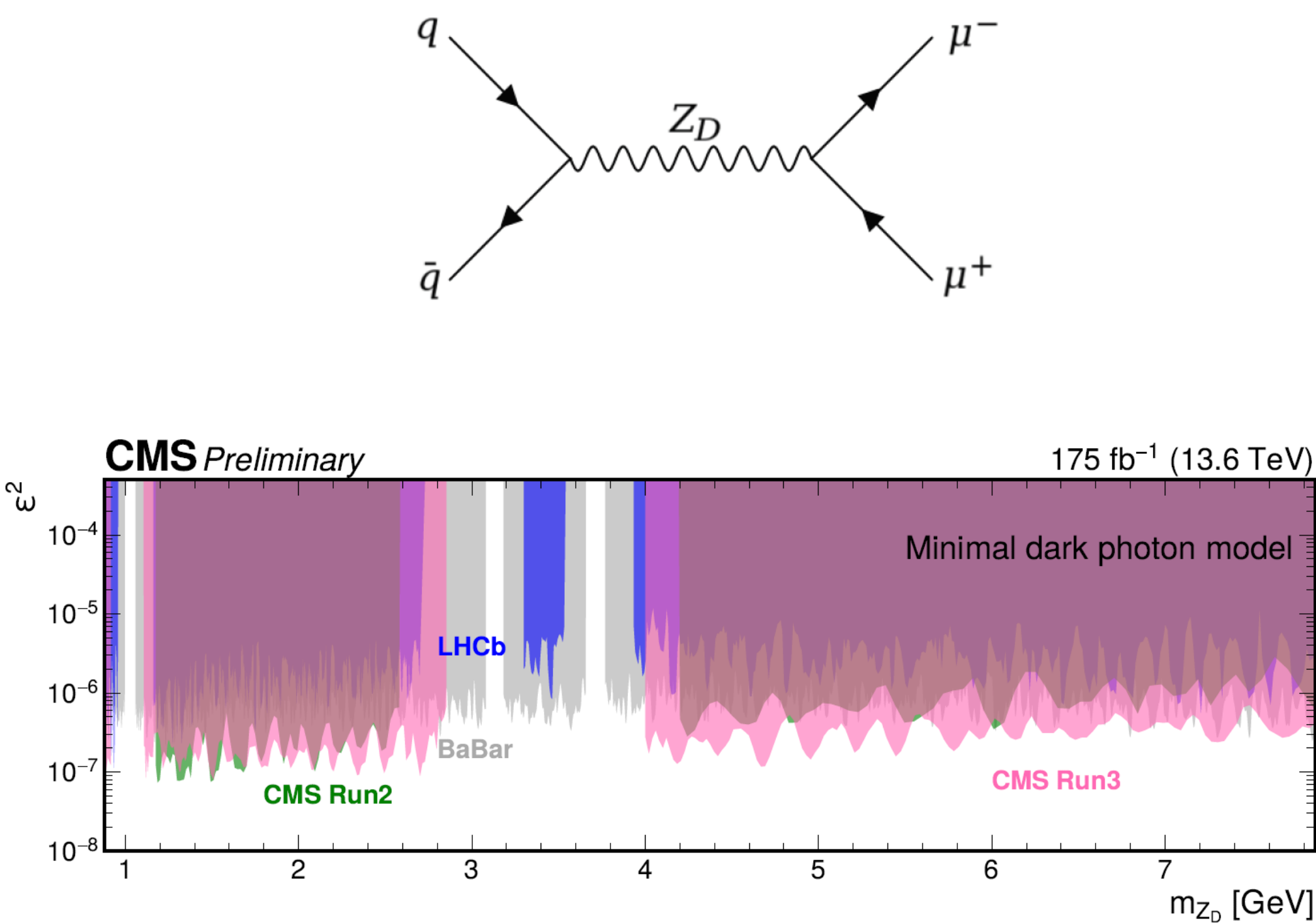


北大

暗光子, GeV

1-8 GeV 低质量区间最强限制

CMS-PAS-EXO-25-019

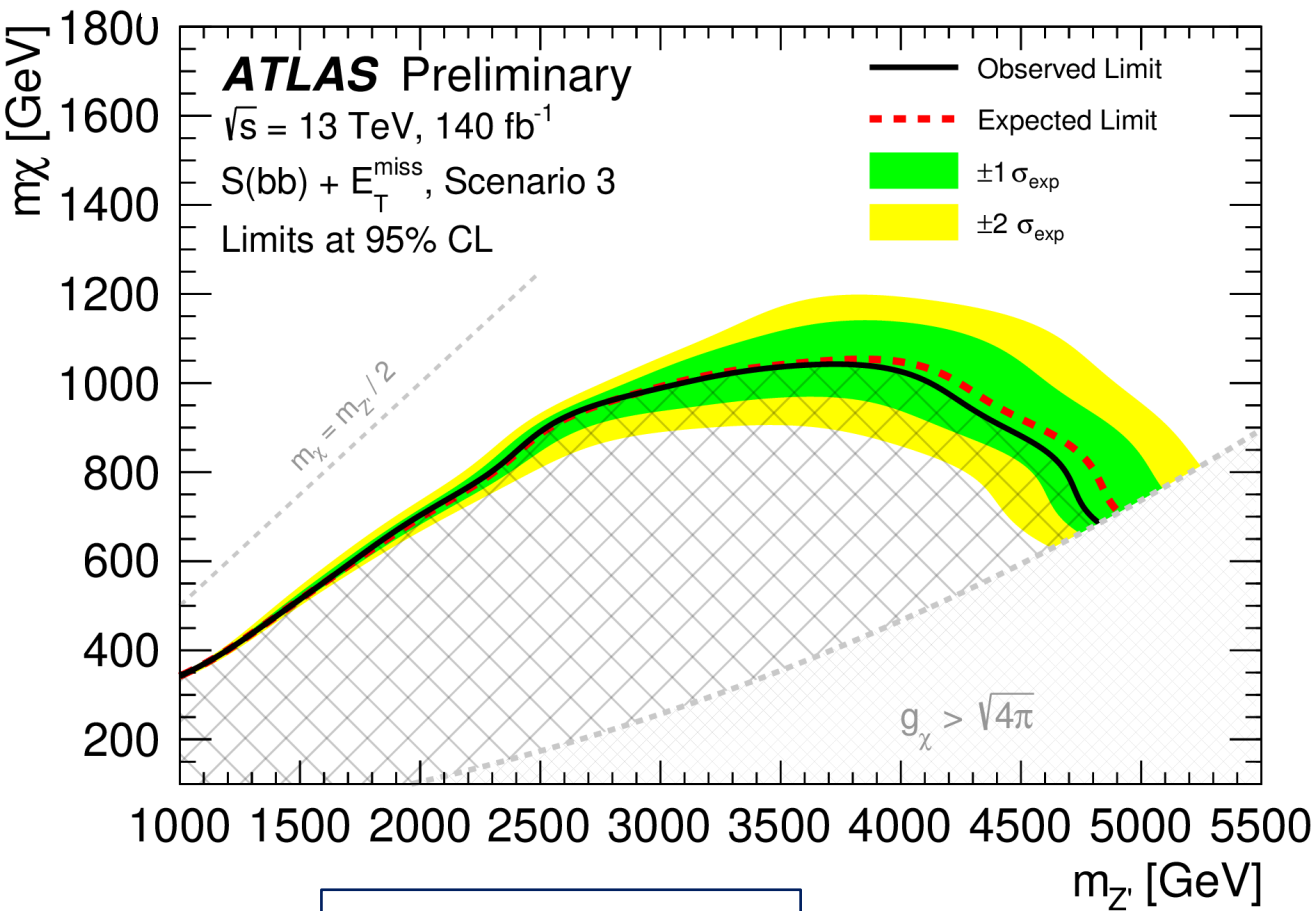
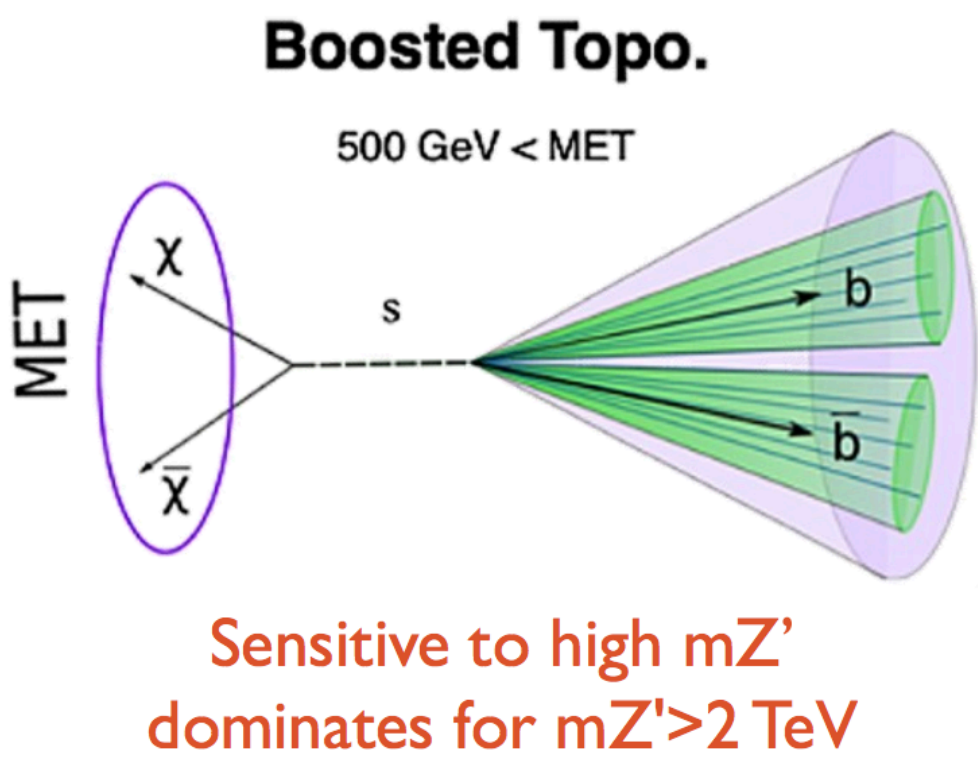


浙大

暗希格斯, TeV

低质量区最强限制

PRL 134 (2025) 121801



交大(李所)

# SUSY寻找

## SUSY联合测量

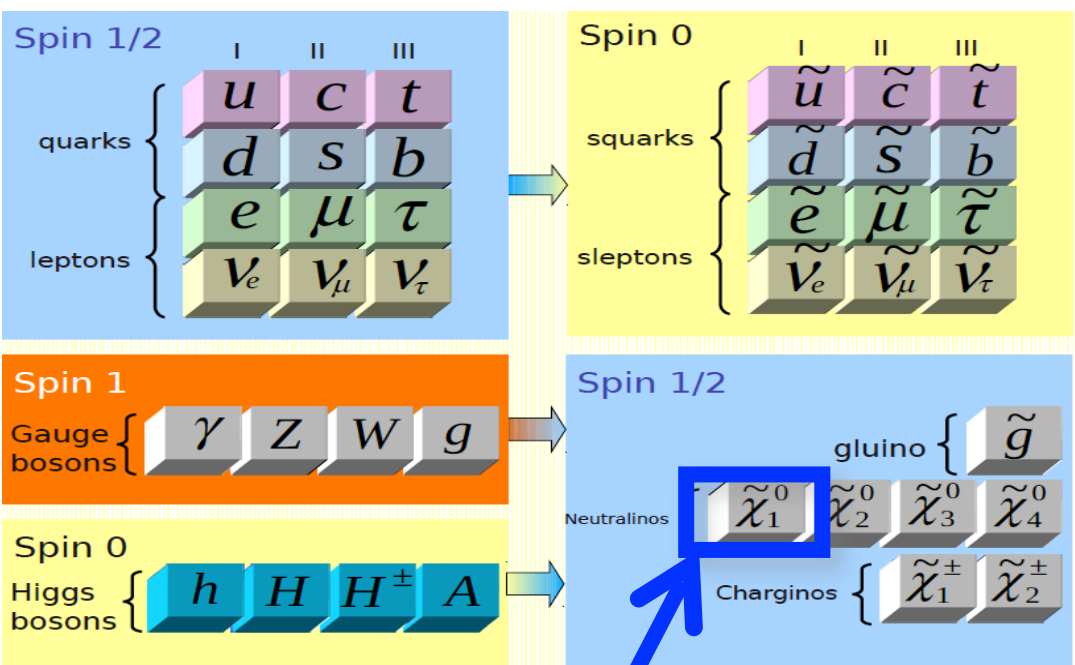
[Phys. Rep. 1116 \(2025\) 261-300](#)

“Turn every stone”搜寻

Gluino, top squark上限几个TeV

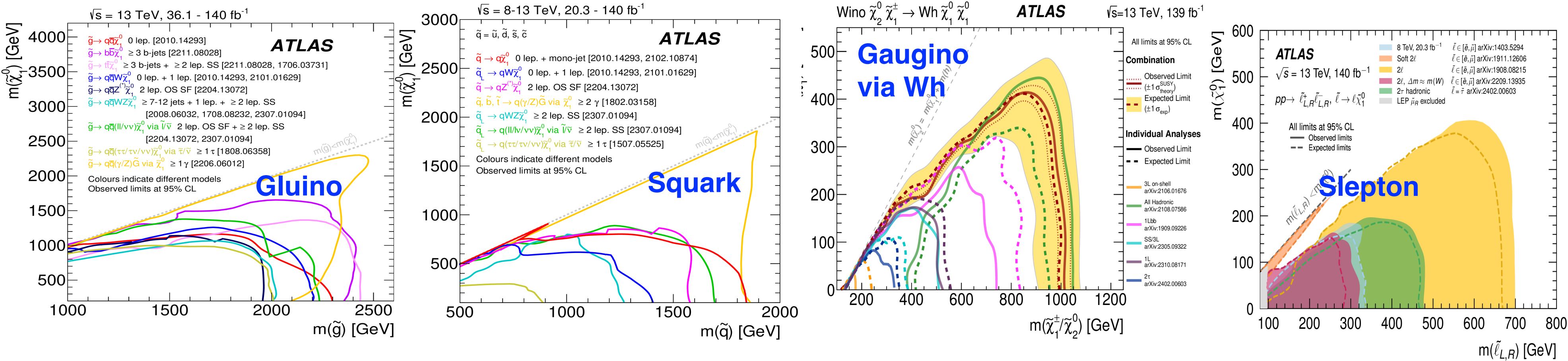
强子对撞机上超过了LEP对higgsino的质量限制

很多暗物质候选者被极大排除



Dark Matter candidate

SM+SUSY partners



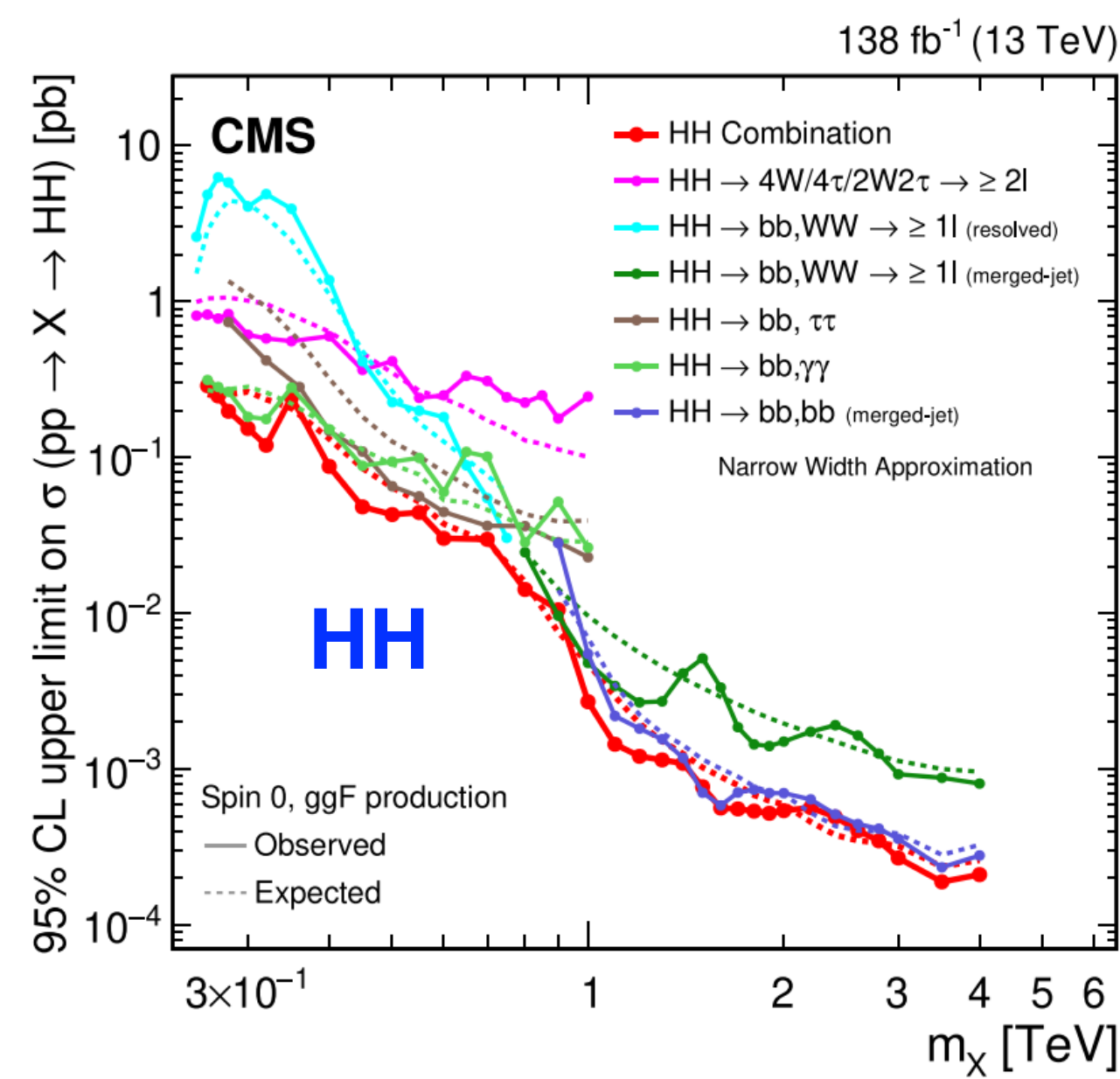


# 共振态寻找

HH

[Phys. Rept. 1115 \(2025\) 368-447](#)

联合6个衰变道的联合测量，最广泛区间的上限

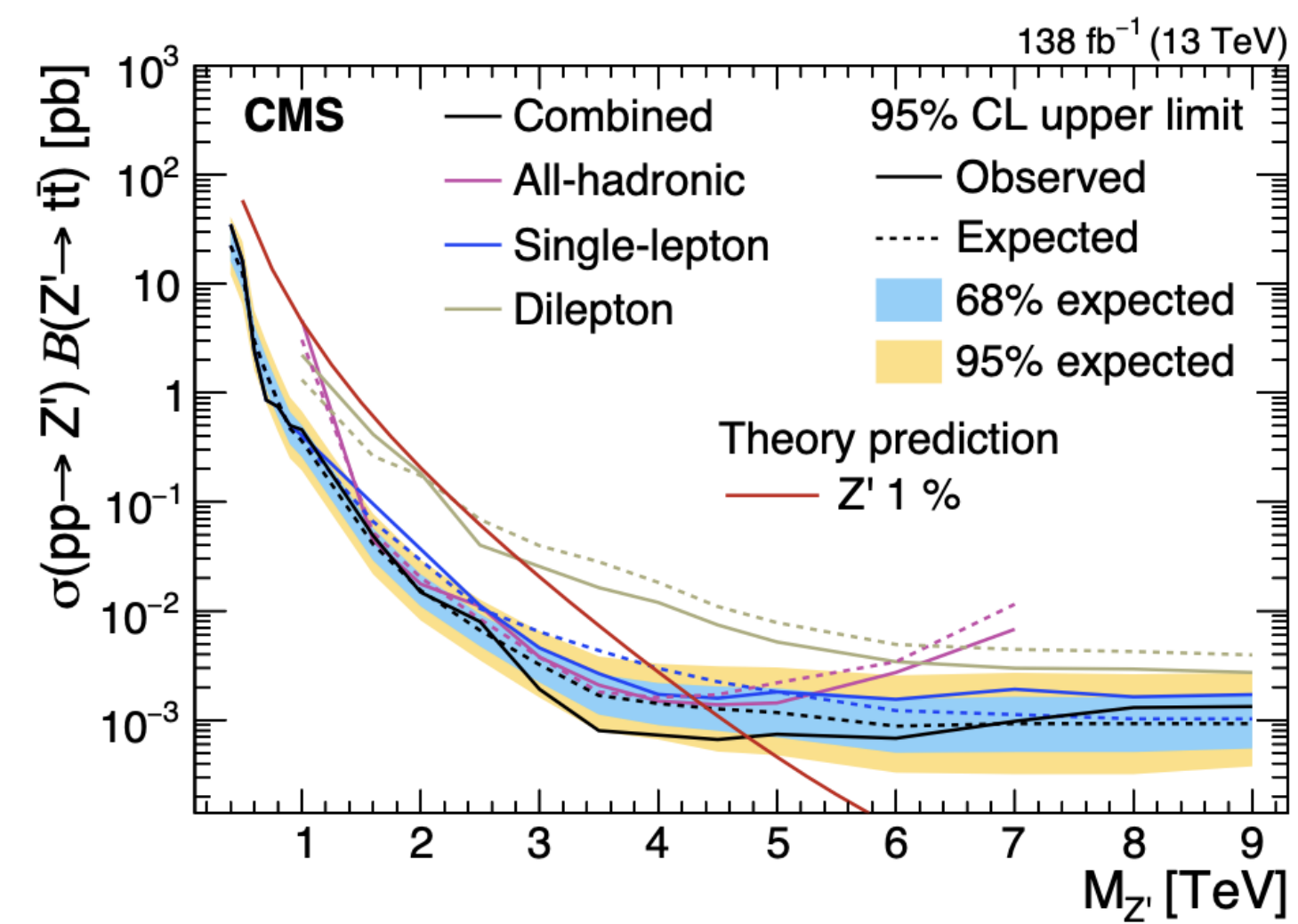


北大、科大、高能所

tt

[arXiv: 2603.23454](#)

至10 TeV的寻找，该末态最强上限

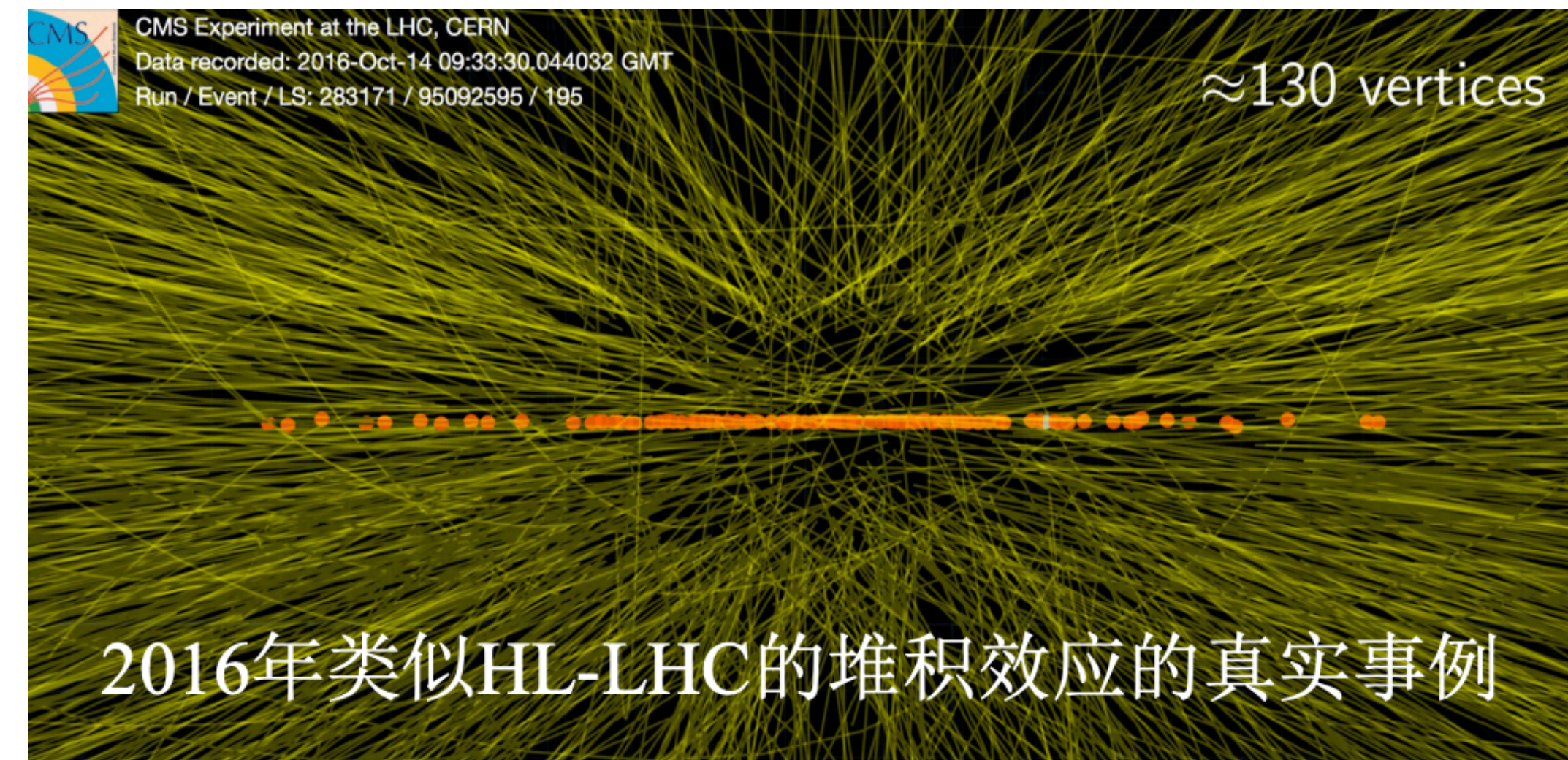


高能所



# 探测器升级

- HL-LHC将于2030年开始取数，每次对撞产生~200个质子质子反应
- 中国组承担或主导有显示度的整块任务
  - 大面积、抗辐照、高空间时间分辨的**硅探测器**
  - 新型大面积、高计数率、高效率的**气体探测器**
  - 高颗粒度、高能量分辨、高时间分辨**量能器**
  - 先进的**电子学读出和触发系统**



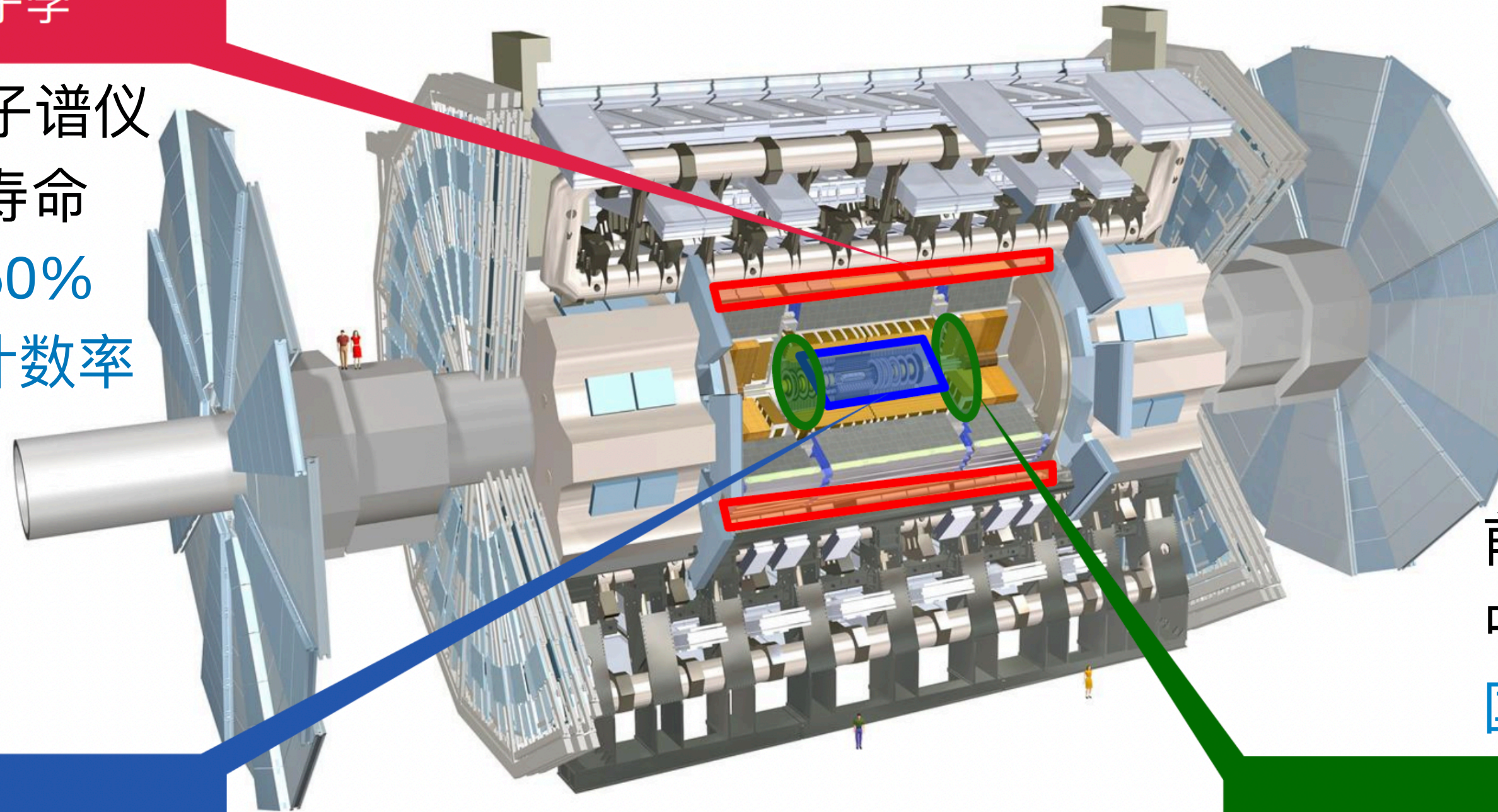


# ATLAS升级-中国

29

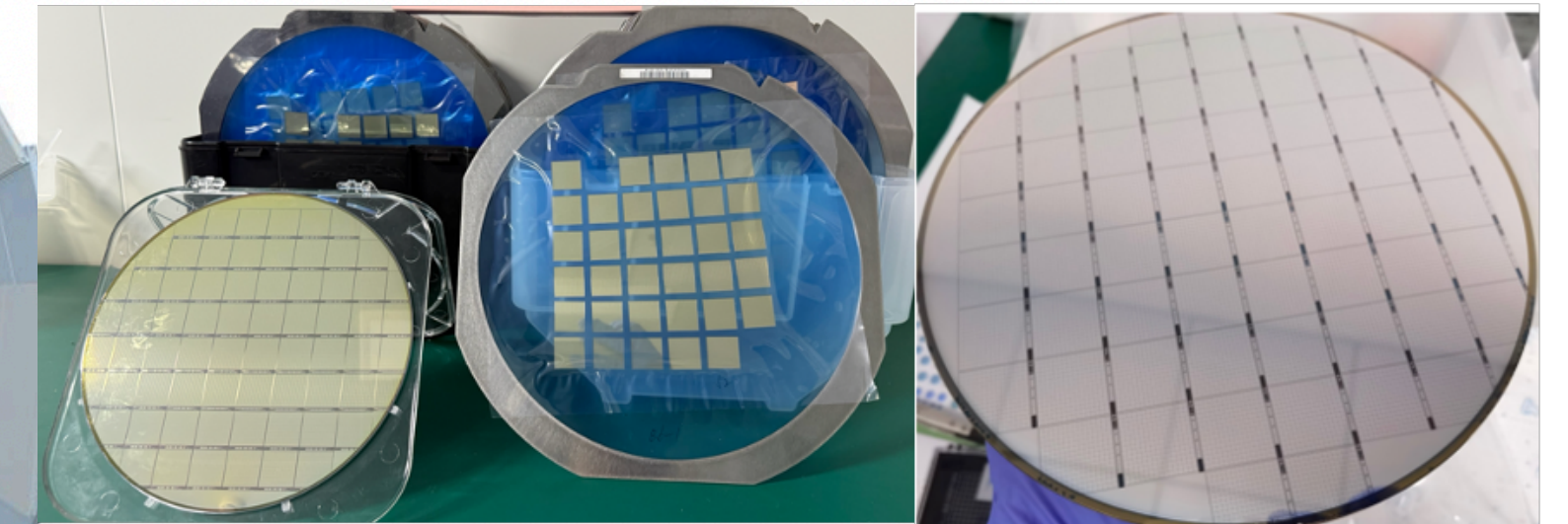
Phase 2: BI RPC (1mm gap)  
USTC、SJTU、SDU:  
气隙、读出板、电子学

窄气隙RPC提升缪子谱仪  
的整体触发能力和寿命  
中国组: 桶部内层50%  
(~300块)大面积高计数率  
窄气隙RPC探测器  
读出板量产已完成



高能所-微电子所LGAD

科大-微电子所的LGAD



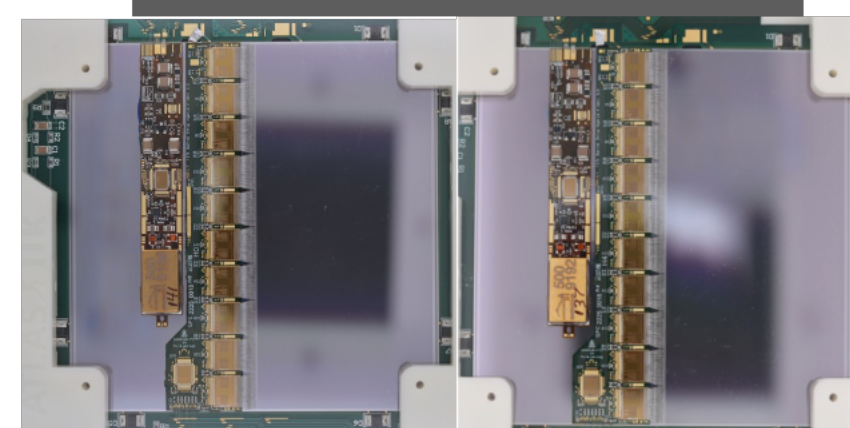
前向区域 ( $2 < |\eta| < 4$ ) 30-70ps的时间测量  
中国组: 100% LGAD传感器,  
国产硅传感器首次在LHC实验应用

Phase 2: 内部径迹探测器  
IHEP、THU、SJTU: 桶部硅微条建造

Phase 2: HGTD  
IHEP、USTC、NJU、SDU、SJTU:  
LGAD、模块组装、外围电子学、高压系统

内部径迹系统全部用硅探测器替换,  $\eta$  覆盖从2.5 增大到 4  
抗辐照环境: 内部像素NIEL高达  $1 \times 10^{16}$  neq/cm<sup>2</sup>  
中国组: 组装10% 硅微条模块(~200个)

研制硅微条模块 (x15)





# CMS升级-中国

30

测量带电粒子时间达到 40~60 ps

中国组:

- BTL:桶部, 25%模块生产

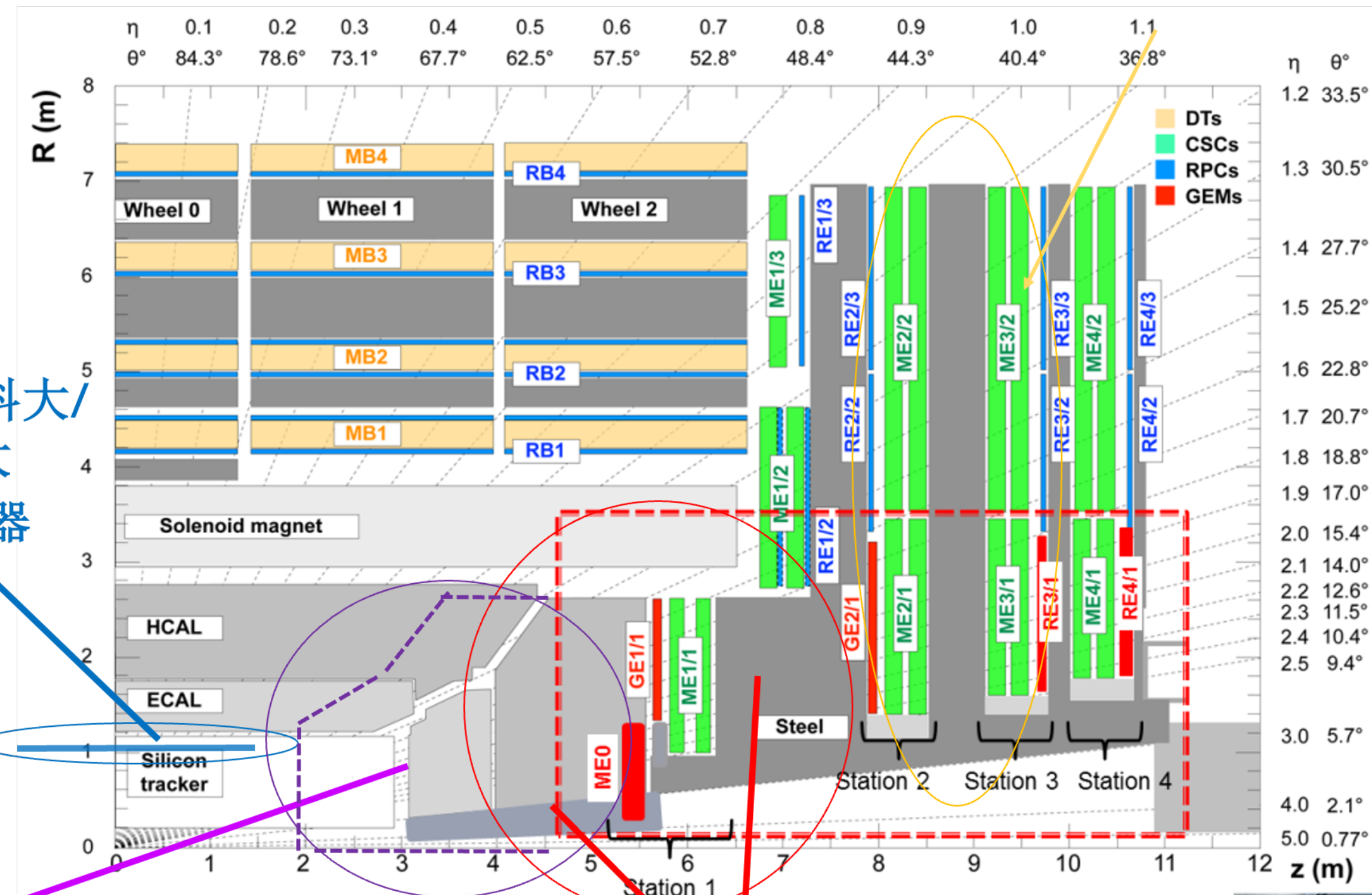
- ETL:端部, 设计电路板用于2000片LGAD性能测试

BTL已未完成全部任务, 是第一个交付完成全部18个tray整机的中心

ETL已测试1200片



北大/北航/清华/科大/  
山大/华南师大  
MTD时间探测器



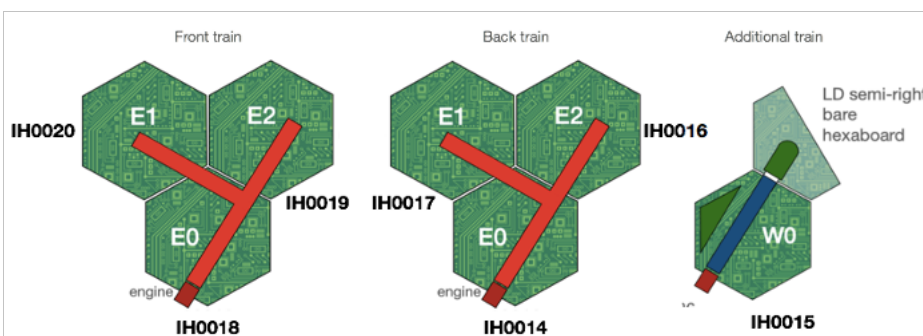
高能所

RPC/iRPC 缪子探测器及一级触发



高能所/清华/浙大/复旦  
HGCal量能器

北大/中山/北航/清华  
GEM端盖缪子探测器



高粒度量能器, 提供时间信息

中国组: 组装1/5模块组装 (5000)

已完成 75块模块

已圆满完成GEM研制计划

完成了全部共12种型号、千余块GEM探测器前端电子板的批量生产



# 总结

31

- 近两年ATLAS/CMS中国组持续壮大，在物理分析和硬件升级方面都做处了很重要的工作，方向也越来越多元
- LHC数据已累计 $500\text{fb}^{-1}$ 
  - 将希格斯物理、标准模型测量推向了更高精度
  - 非常稀有的过程的发现变得现实，允许更多的手段去推进对粒子物理的理解
  - 新物理寻找更加广域
- 中国组在为HL-LHC开展的探测器升级方面逐步掌握了关键技术，建立了多个平台



# Higgs potential 2026

- “Higgs Potential 2026”将聚焦希格斯物理及相关前沿问题的最新进展，围绕实验、现象学与理论研究展开深入交流。
- 时间：2026年12月19日至12月22日
- 地点：北京，中国科学院高能物理研究所
- 网址：<https://indico.ihep.ac.cn/event/29309/>
- 会议内容：希格斯粒子性质；双希格斯产生与希格斯自耦合；电弱对称性破缺及扩展希格斯扇区；与希格斯相关的超越标准模型新物理；希格斯物理与早期宇宙相变、重子生成、引力波之间的联系；希格斯门户暗物质及相关实验和理论研究；未来对撞机上希格斯物理的研究前景。

## Higgs Potential 2026

December 19-22, 2026, IHEP Campus, Beijing, China

<https://indico.ihep.ac.cn/event/29309/>

$V(\varphi) = -\mu^2 \varphi^\dagger \varphi + \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2 + \dots$

BSM

EWSB

EWPT?

Higgs *our vacuum*

Local committee:

Mingshui Chen, Shuo Han,  
Yanping Huang, Jin Wang,  
Xiaoping Wang, Bin Yan,  
Li Yuan, Hao Zhang

Academic committee:

Haipeng An, Ligong Bian, Qinghong Cao, Xuan Chen, Xiaogang He,  
Zhen Hu, Yun Jiang, Haifeng Li, Ke Li, Qiang Li, Shu Li,  
Bingxuan Liu, Jia Liu, Yanlin Liu, Yang Liu, Nan Lu,  
Hideki Okawa, Huilin Qu, Michael Ramsey-Musolf,  
Junquan Tao, Jian Wang, Zhiwei Wang, Zirui Wang, Lei Wu,  
Meng Xiao, Kepan Xie, Lailin Xu, Hongtao Yang, Kai Yi,  
Jianghao Yu, Lei Zhang, Rui Zhang, Xuai Zhuang, Chen Zhou

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

北京航空航天大学  
BEIHANG UNIVERSITY

中国高等科学技术中心  
China Center of Advanced  
Science and Technology

北京大学  
高能物理研究中心  
PEKING UNIVERSITY  
HIGH ENERGY PHYSICS CENTER



# TeV物理前沿专题研讨会

- 第二届TeV物理前沿专题研讨会暨第33届LHC Mini-Workshop
- 时间：2026年9月18-20日
- 地点：北京，春晖园
- 网址：<https://indico.ihep.ac.cn/event/29954/>
- 会议内容：搭建理论物理与实验物理的交流平台，推动TeV物理前沿研究的创新发展。希格斯物理,极化与量子纠缠、喷注子结构与强子化过程、QCD精确计算与检验、有效场论与检验、AI在高能物理中的应用

## 第二届TeV物理前沿专题研讨会 暨第33届LHC Mini-Workshop

2026年9月18日-20日 · 北京

### 会议简介：

为促进国内TeV物理前沿研究领域的学术交流与合作，北京大学高能物理研究中心拟于2026年9月18-20日（9月18日报到）在北京春晖园温泉度假酒店举办“第二届TeV物理前沿专题研讨会暨第33届LHC Mini-Workshop”。本次会议旨在搭建理论物理与实验物理的交流平台，推动TeV物理前沿研究的创新发展。

### 会议主题：

- 1、希格斯物理
- 2、极化与量子纠缠
- 3、喷注子结构与强子化过程
- 4、QCD精确计算与检验
- 5、有效场论与检验
- 6、AI在高能物理中的应用

### 主办单位：

北京大学高能物理研究中心

### 组委会：

曹庆宏（北京大学）  
陈明水（中国科学院高能物理研究所）  
李海峰（山东大学，co-chair）  
李海涛（山东大学）  
李 强（北京大学）  
吴雨生（中国科学技术大学，co-chair）  
朱华星（北京大学）  
周 辰（北京大学）

### 本地组委会：

曹庆宏  
李 强  
朱华星  
周 辰（Chair）



会议网址：  
<https://indico.ihep.ac.cn/event/29954/>

