



TDL7  
李政道研究所



# ATLAS中国组进展总结



梁志均 (中国科学院高能物理研究所)  
代表ATLAS中国组

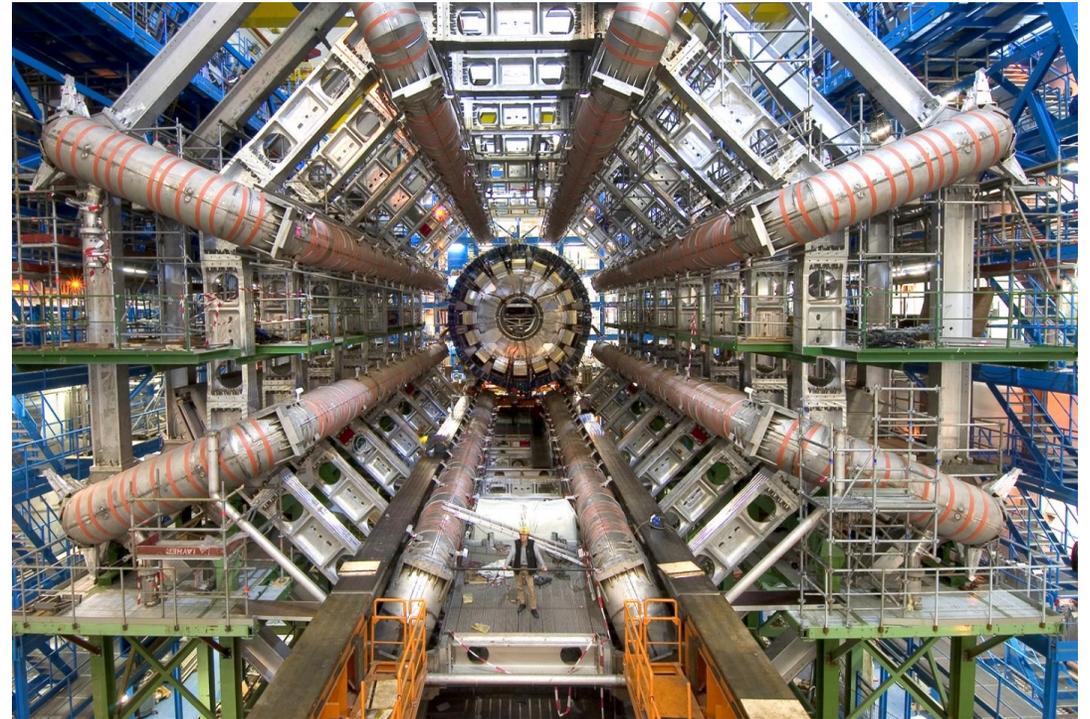


2024年11月14日

# 大型强子对撞机遇ATLAS实验



大型强子对撞机



ATLAS探测器

- 世界能量最高的加速器
- 质心系能14TeV ( $14 \times 10^{12} \text{eV}$ )
- 粒子物理研究的前沿
- 周长27km，总投资40亿美元

- ATLAS是LHC上两大通用实验之一
- 是最大的对撞机实验探测器。
- 大约3000人的一个实验组
- 6层楼高（25米）的大型探测器

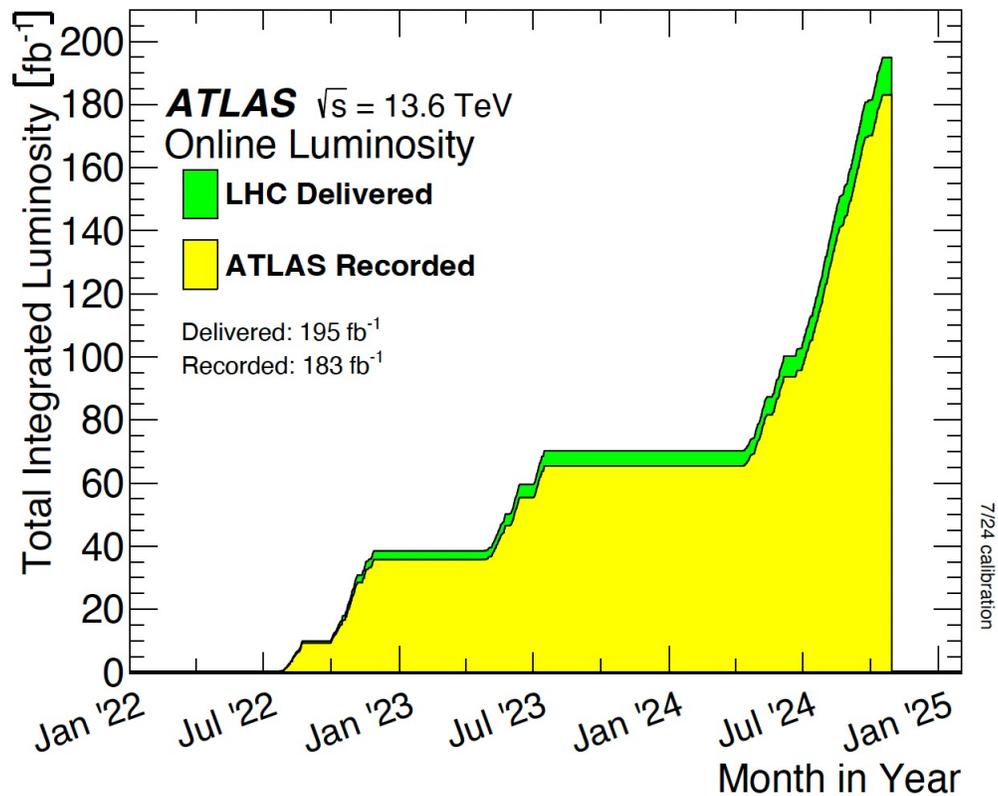
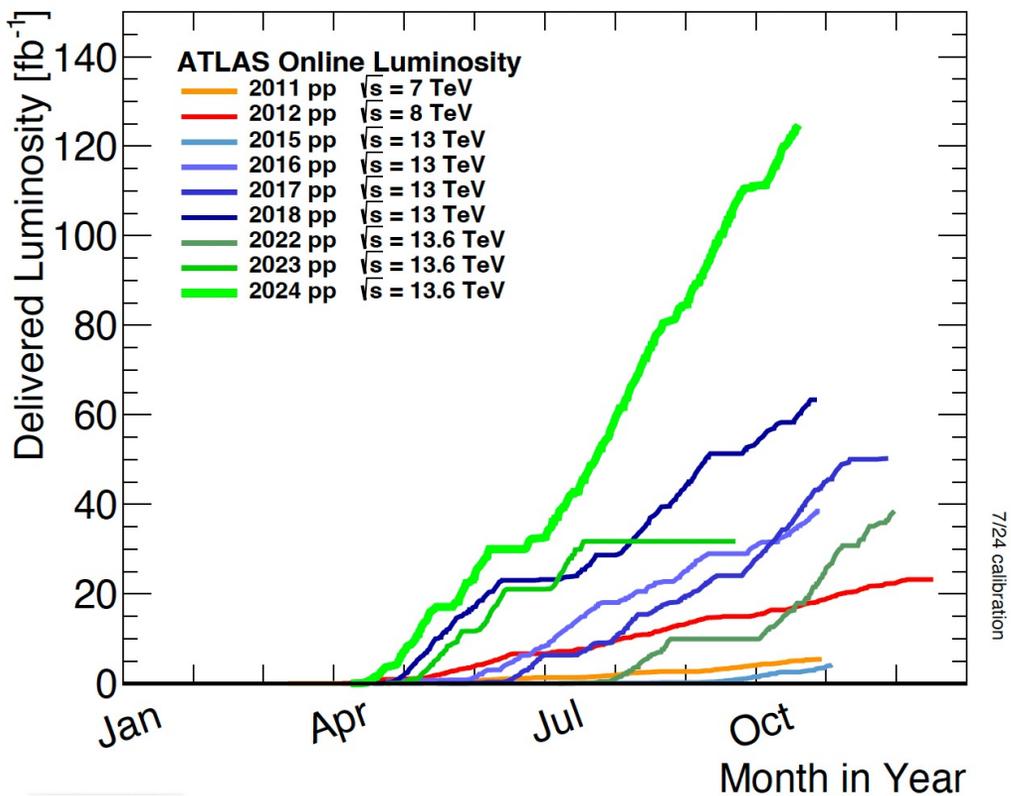
# ATLAS实验运行状态

## 数据积累 vs 年份:

Run I pp (7+8 TeV):  $\sim 20 \text{ fb}^{-1}$

Run II pp (13 TeV):  $\sim 140 \text{ fb}^{-1}$

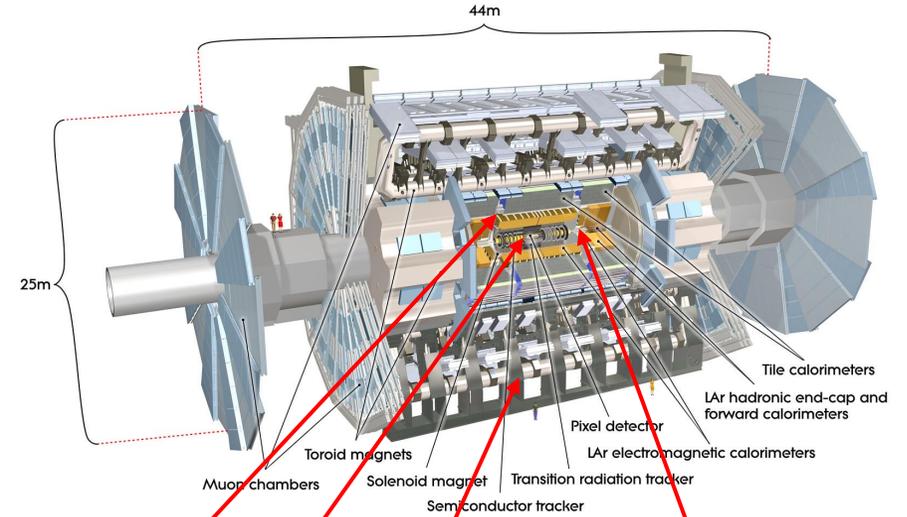
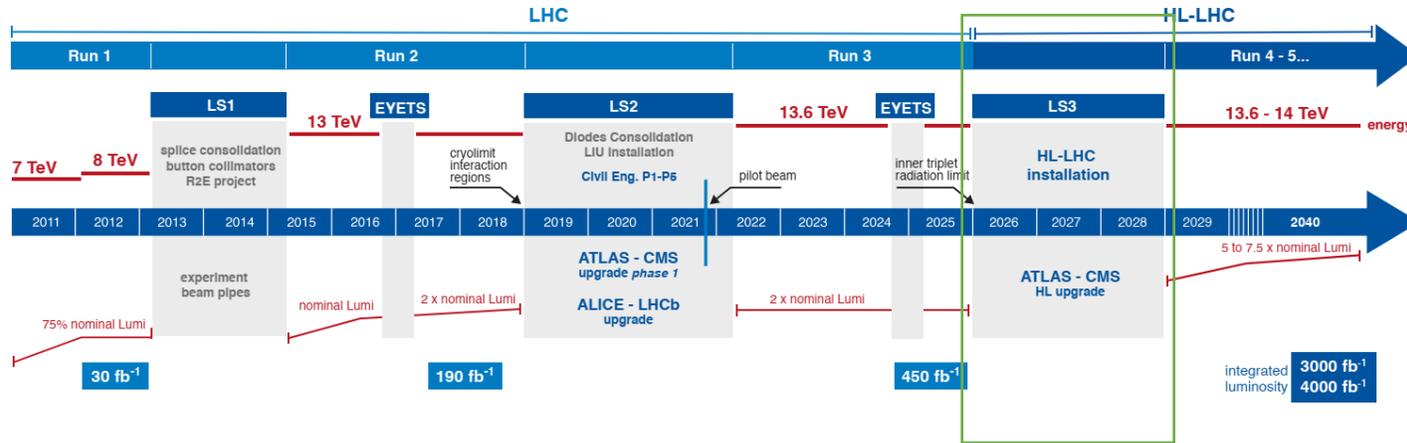
Run III pp (13.6 TeV): 目前已经取数 $183 \text{ fb}^{-1}$ ，预计将取数 $350 \text{ fb}^{-1}$



# 工作前瞻与ATLAS二期升级



## LHC / HL-LHC Plan



### 当下-2026

- 升级项目**研制、量产、联调**阶段
- 基于Run 2 + Run 3数据充分**挖掘物理潜力**（精确测量、新思路）

### 2026-2029

ATLAS探测器二期升级应对**高亮度LHC运行**的挑战与机遇

### 量能器电子学

全硅径迹探测器 ITK:  
像素探测器  
**硅微条探测器**

缪子探测器:  
**窄气隙RPC**、  
sMDT、电子学

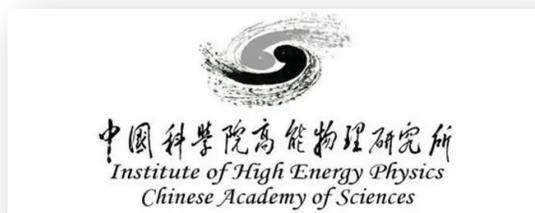
触发与数据获取系统  
TDAQ

**高粒度时间探测器  
HGTD**

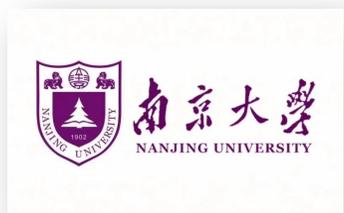
标红：中国组重点参与项目

# ATLAS中国组

- ATLAS中国组九家单位，在2024年调整了在ATLAS的注册方式，争取到更多的投票权
  - 三个以独立单位的形式在ATLAS注册：高能所、科大，清华；
  - 三个clusters的形式在ATLAS注册：南大-中大 cluster；交大-李所cluster，山大-郑大cluster
  - 共57名M&O人数，117名作者，占合作组的4%



17/27



6/15



1/4



3/5



15/35



5/11



4/9



5/10



1/1

- 单位徽标下数字：
- M&O人数/作者人数
- 中科院苏州纳米所作为 Technical Associate member

在科技部、基金委、中科院支持下的中国大陆科研团队：

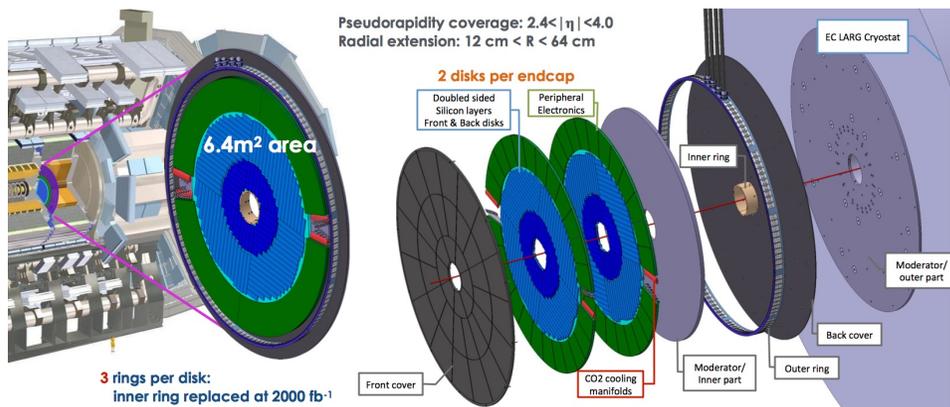
各类人才计划支持下的既能**独立开展仪器研制**又能**发挥特色引领物理研究**的科学家团队

# 硬件升级进展

# 二期升级：HGTD探测器研制

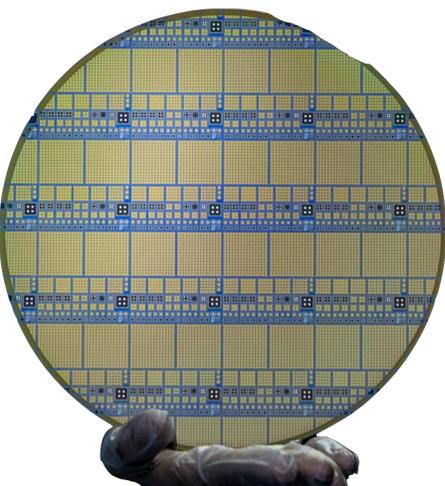
- \* 包括24%实物贡献，
- \* 66%依托微电子所的CERN采购

前向区域 ( $2 < |\eta| < 4$ ) 利用低增益雪崩放大硅探测器LGAD技术，抗辐照高精度ASIC前端电子学技术，实现**30-70 ps的时间测量**

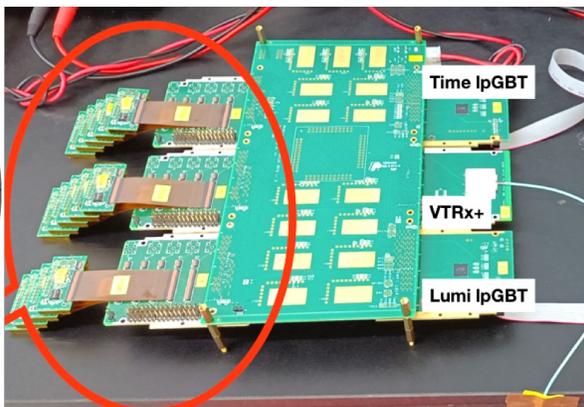


- **目标**：压制堆积本底、对次顶点/长寿命粒子的探测，亮度检测等
- 中国组承担其中数项核心工作（高能所Joao为ATLAS项目经理）
  - 100% LGAD传感器 (高能所 90%\*, 科大10%)
    - 高能所、科大各自独立成功研发高性能传感器
  - 44%探测器组装 (高能所、科大)；
  - 100% 外围电子学 (高能所，南大)；
  - 16%高压电子系统 (高能所，山大)； 33%柔性电缆 (山大)
  - 束流测试、软件开发等

LGAD硅传感器

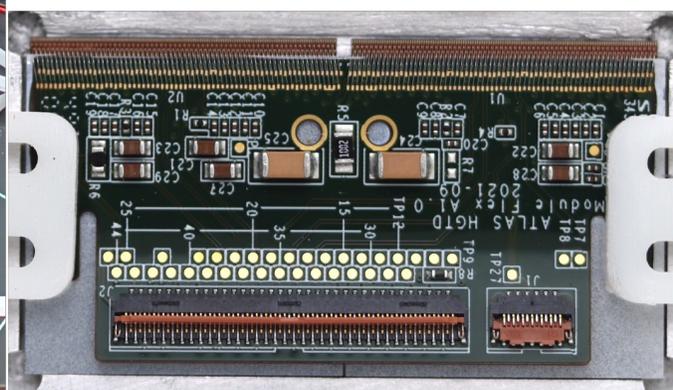


外围电子学

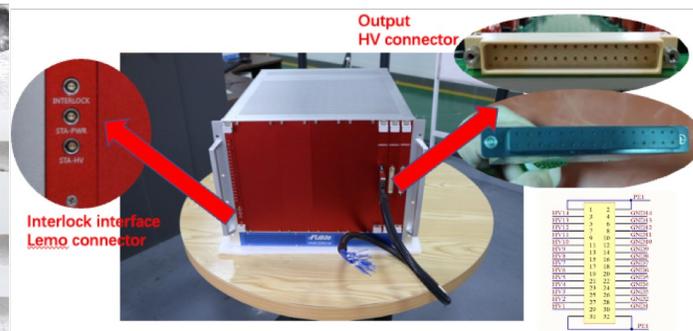


探测器模块

(LGAD+ASIC倒装焊)



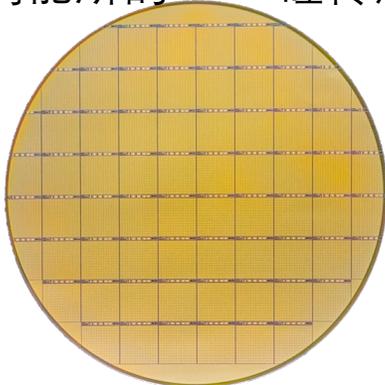
高压电源



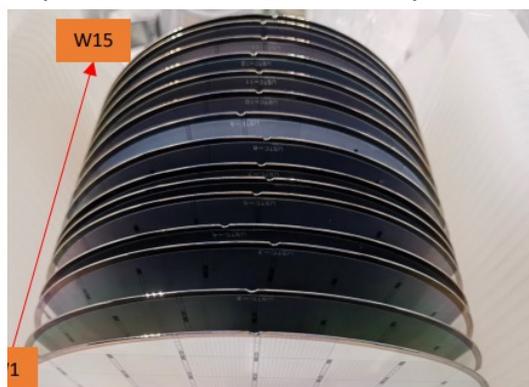
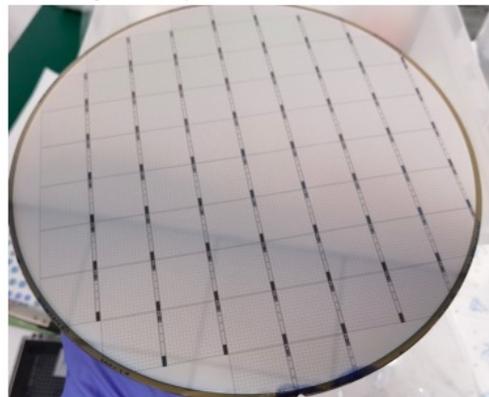
# 二期升级：HGTD探测器研制

- 高能所、科大完成LGAD传感器预生产
  - 研制超过1000颗全尺寸LGAD，占总额5%
  - 国产硅传感器首次在LHC实验应用。
- 通过国际评审，开始正式生产研制

高能所的LGAD硅传感器（完成~900颗LGAD）

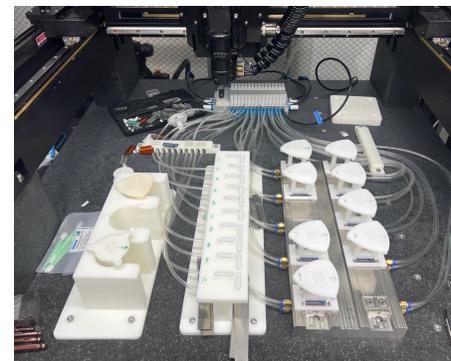
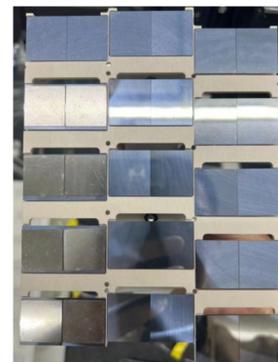
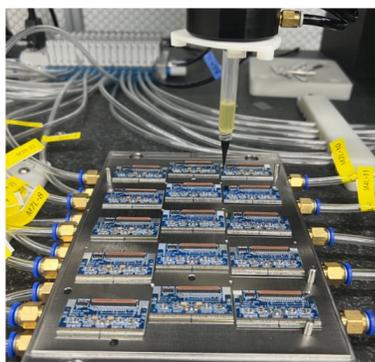


科大的LGAD硅传感器（完成~270颗LGAD）

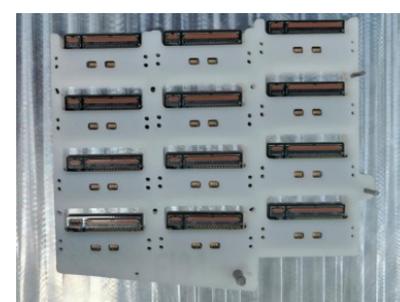
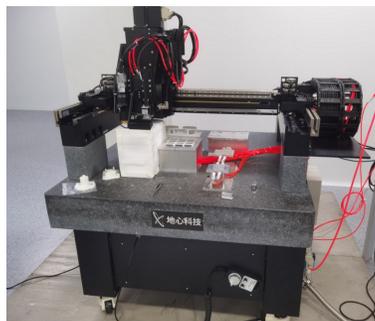


- 高能所主导倒装焊，模块PCB，模块与探测器单元的研制
  - 研制50多个全尺寸模块，组装两个大面积探测器单元
- 科大完成探测器模块组装流程与测试系统的搭建
  - 完成5个模块研制，一个dummy探测器单元组装

高能所探测器单元组装与模块组装



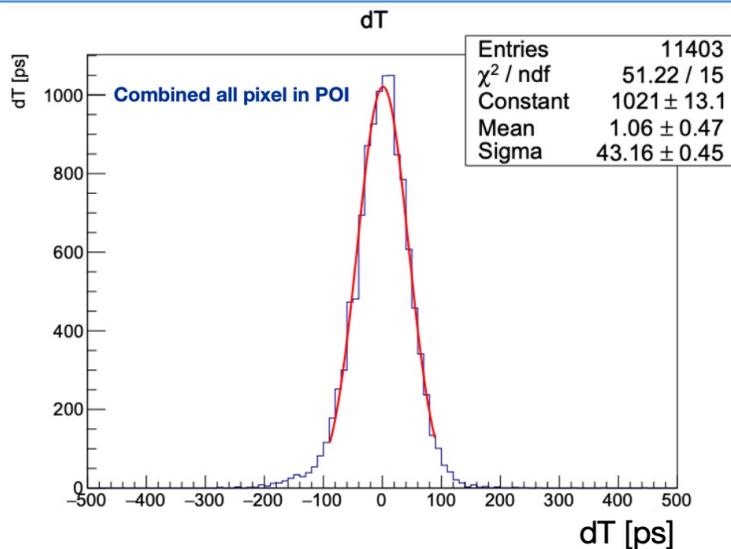
科大的模块与探测器单元组装



# 二期升级：HGTD探测器研制

辐照后探测器模块，时间分辨可以达到43皮秒

中子辐照剂量  
 $2.5E15 N_{eq}/cm^2$



山大已研制成第一版柔性电缆核心部件：  
通过评审，准备量产

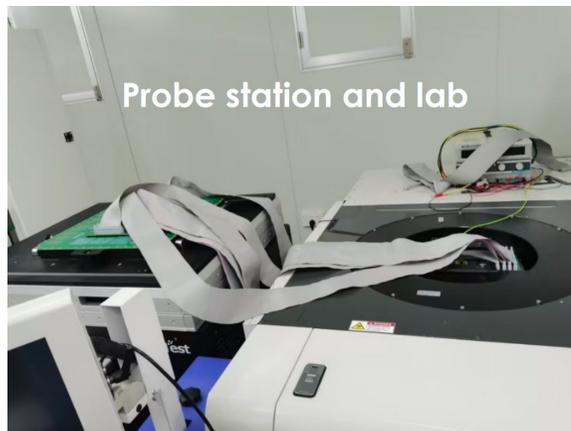


高能所与南大设计外围电路板，南大负责生产  
高能所与南大在HGTD多模块样机研制上发挥主导作用

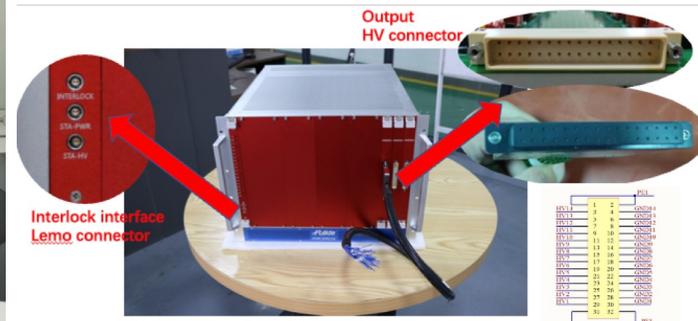
➤ 可以同时读出52个探测器模块



高能所对ASIC晶圆级测试



高能所、山大研制高精度高压电源  
通过评审，准备量产

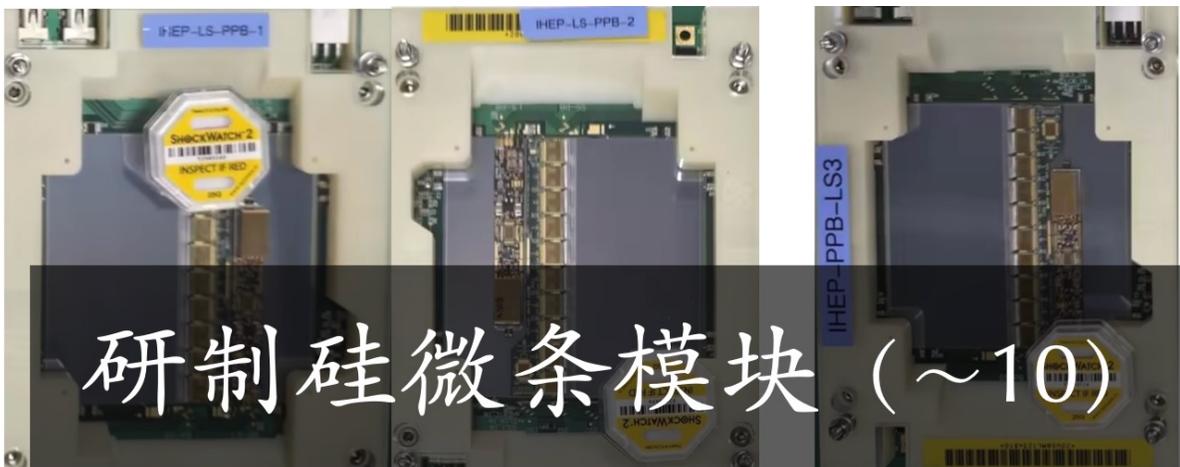


# 二期升级：ITK硅微条探测器研制

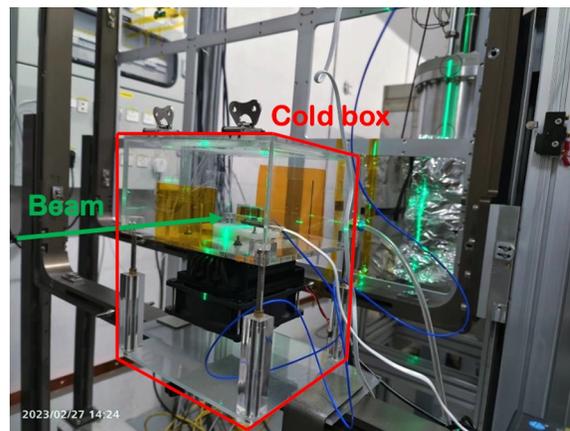
- 高能所、清华、中大团队负责研制桶部面积10%的硅微条探测器模块 (>1000个, 约10m<sup>2</sup>)
  - 研制 10 个预生产模块并送到 CERN, 国产厂家研制高精度组装工具
  - 高能所史欣作为中国-英国集群负责人, 协调桶部径迹探测器50%的研制任务
- 开展读出电子学芯片和传感器的抗辐照性能研究
  - 推动散列中子源伴生质子束作为合作组认证的硅传感器和芯片抗辐照研究站点
  - 发表两篇Nucl. Instrum. Meth. A 文章
- 开展硅内径迹探测器系统安装及联调测试
  - 外派博士后与学生常驻英国卢瑟福实验室, 在探测器低温碎裂研究中发挥重要作用



电子学芯片辐照



传感器辐照



# 二期升级的窄气隙RPC研制和工程建造

➤在桶部内层增加三层高计数率窄气隙RPC

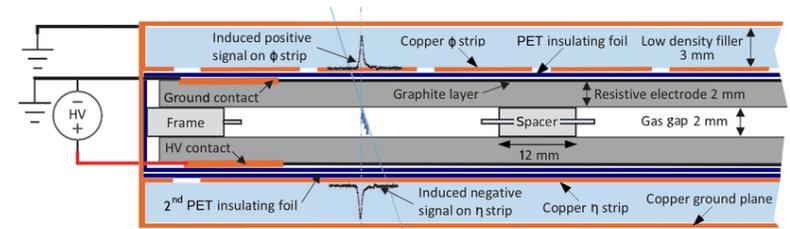
➔提高几何接收度、确保缪子触发效率

➤中国组承担工作：（中科大-交大-山大）

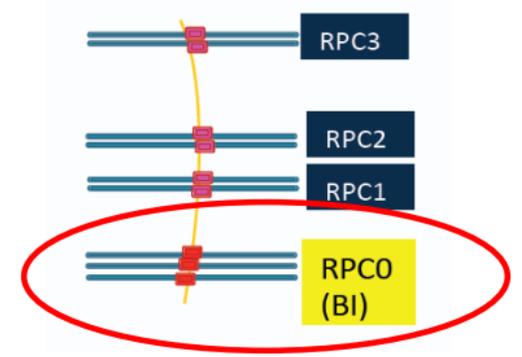
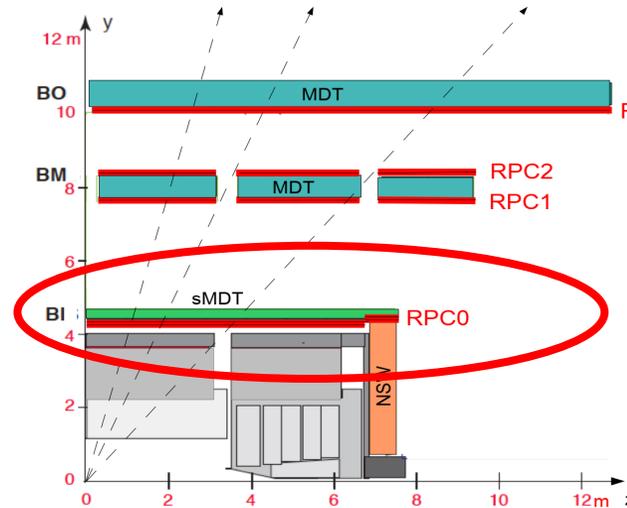
- 探测器研发
- 大面积蜂窝读出板设计和量产（912张）
- 窄气隙RPC气室制作（72个）
- RPC singlet装配（360个）
- 前端电子学制作和测试（~5000个）
- 探测器系统安装和调试

➤本年度量产已启动

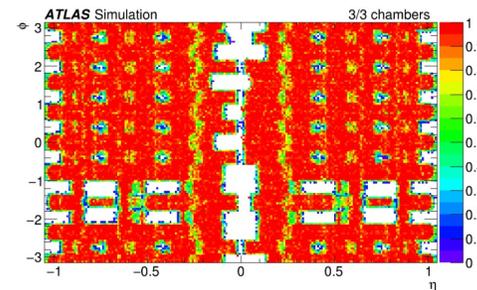
- ~300张蜂窝读出板制作和测试
- 5个窄气隙RPC气室原型制作和测试
- BIS RPC singlet装配联合调试
- 基于FPGA的DAQ系统研发



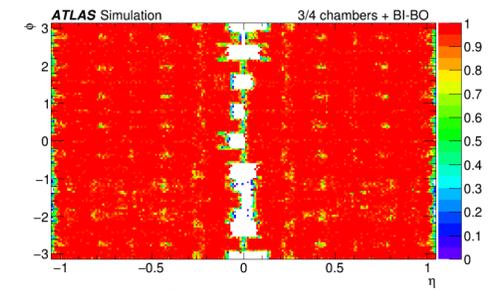
RPC探测器原理示意



• 9 layers instead of 6

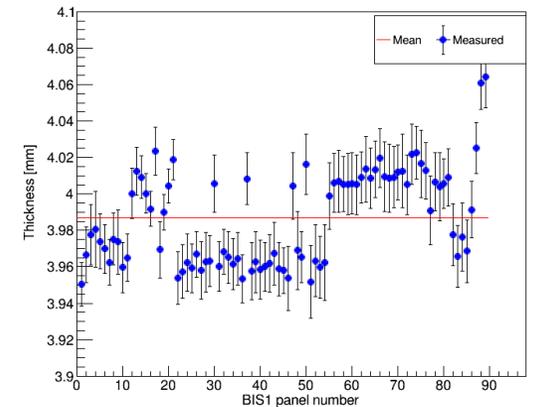
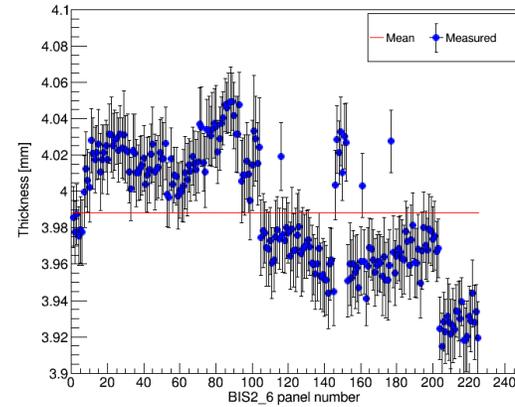
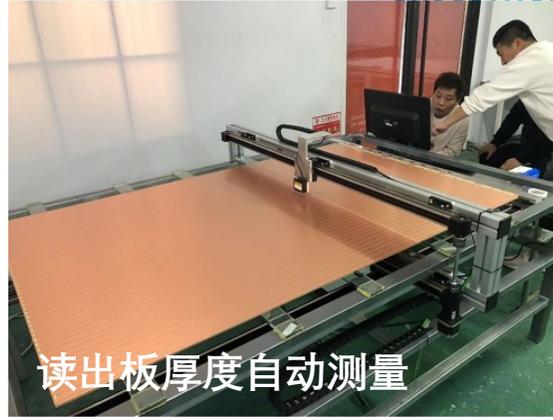
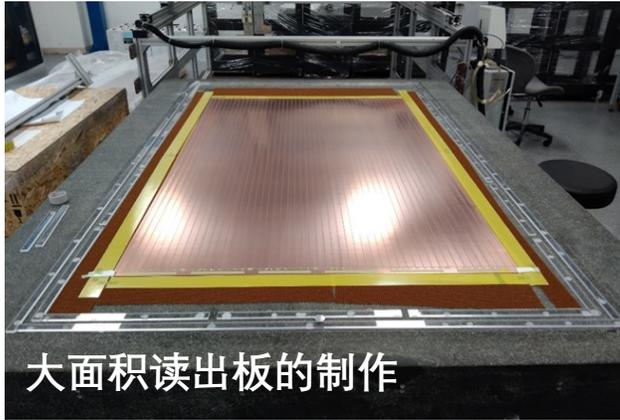


Run2

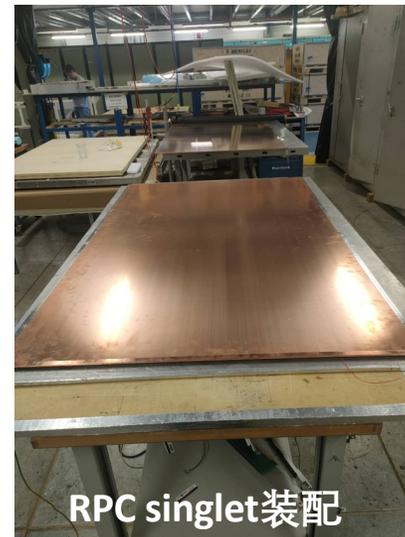
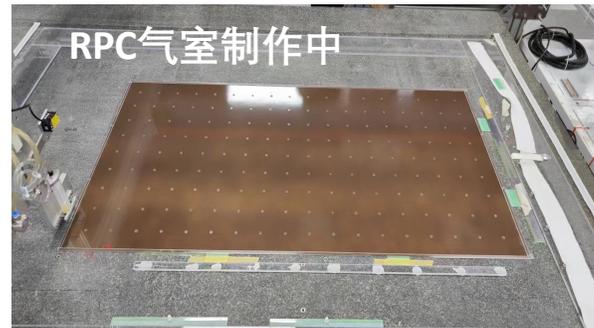
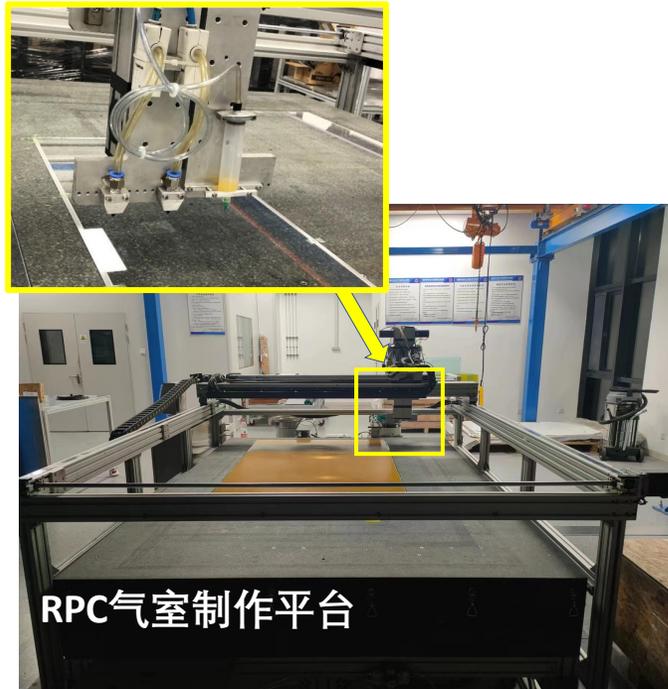


增加BI RPC后

# 二期升级的窄气隙RPC研制和工程建造



读出板厚度测量结果



# 管理性工作 & 服务性工作

	L1	L2	L3	ATLAS Committees	ATLAS awards
ATLAS	1	10	34	26 (3 chairs)	3

在本年度，中国组有2个新的L2管理职位的任命（标准模型物理大组，Tau CP组等），7个L3管理职位新任命

Appointment	Member	Affiliation
L1, 执委会 执委会 HGTD System Project Leader	JOAO, Barreiro Guimaraes Da Costa	Beijing IHEP(China)
L2 Convener Heavy Ions WG	YUSHENG, Wu	Hefei(China)
L2 Convener Standard Model WG	QIPENG, Hu	Hefei(China)
L2 Convener Tau CP	YuSheng, Wu	Hefei(China)
L2 Convener Tau CP	ANTONIO, De Maria	Nanjing(China)
L2 Convener Tau CP	Yang, Liu	SYSU (China)
L2 HGTD Modules, Detector Assembly, and Detector Units Coordinator	ZHIJUN, Liang	Beijing IHEP(China)
L2 HGTD Sensors Coordinator	MEI, Zhao	Beijing IHEP(China)
L2 HGTD Electronics Coordinator	JIE, Zhang	Beijing IHEP(China)
L2 HGTD Schedule and Risk Manager	ZHAORU, Zhang	Beijing IHEP(China)
L2 HGTD Simulation, Performance, and Physics Coordinator	YUSHENG, Wu	Hefei(China)
L2 Resource Coordinator Muon Upgrade	TONI, Baroncelli	Hefei(China)
Convener of subgroup: Electroweak Physics	BING, Li	Shandong(China)
Convener of subgroup: HGamma (HSG1)	HONGTAO, Yang	Hefei(China)
Convener of subgroup: Jet and Photon Processes	HAIFENG, Li	Shandong(China)
Convener of subgroup: Photon Identification and Efficiencies	KUN, Liu	TDLI (China)
Convener of subgroup: Spectroscopy and Production	XIN, Chen	Beijing Tsinghua(China)
Convener of subgroup: DBL	ANTONIO, Giannini	Hefei(China)
Convener LHC Heavy Flavour WG	XIN, Chen	Beijing Tsinghua(China)
Speakers Committee member	YANPING, Huang	Beijing IHEP(China)
Publication Committee member	LAILIN, Xu	Hefei(China)
DP - Reprocessing Coordinator	Da, Xu	Beijing IHEP(China)
Trigger b-jet Signature Coordinator	Bo, Liu	Beijing IHEP(China)
Convener of subgroup: Clustering and Tracking in Dense Environments (CTIDE)	XIAOCONG, Ai	ZZU(China)
Convener of subgroup: JMX	BINGXUAN, Liu	SYSU(China)
Convener of subgroup: Jet and Photon Processes	HAIFENG, Li	Shandong(China)
Convener of subgroup: FT Software	LIGANG, Xia	Nanjing(China)
HGTD HV System Coordinator	LEI, Fan	Beijing IHEP(China)
HGTD Module Flex Coordinator	JIE, Zhang	Beijing IHEP(China)
HGTD Peripheral Electronics Coordinator	JIE, Zhang	Beijing IHEP(China)
MC Production Coordinator	YANLIN, Liu	Shandong(China)
Muon Speakers Committee Member	TATSUO, Kawamoto	Hefei(China)

+ LHC EW multiboson subgroup convener, Shu Li, SJTU/TDLI

本年度内的任职情况  
(来自glance系统)  
蓝色字体为今年新的任命

# 物理成果展示

# 一些数据和说明

---

通过官方数据库索引: <https://atlas-glance.cern.ch/atlas/>

CLHCP2023以来, ATLAS中国组成员以主要作者身份 (Primary Author)

**发表 36 篇期刊文章 (包括已投稿)**

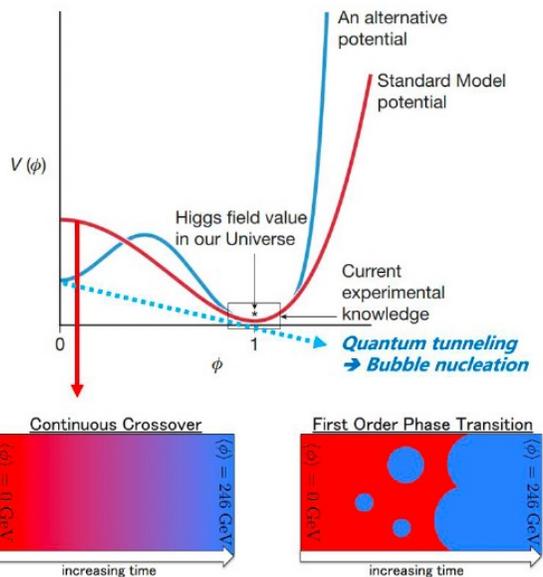
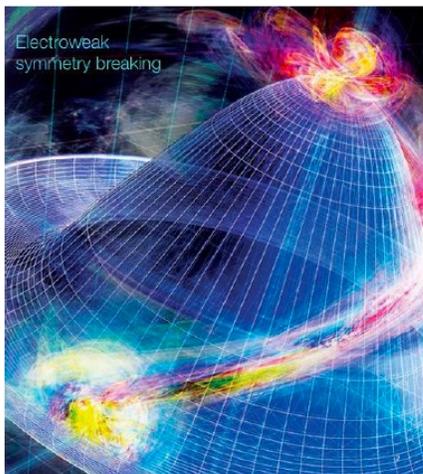
**总的国际会议报告数 45 个 (不包含poster)**

后面仅高亮部分物理成果作展示

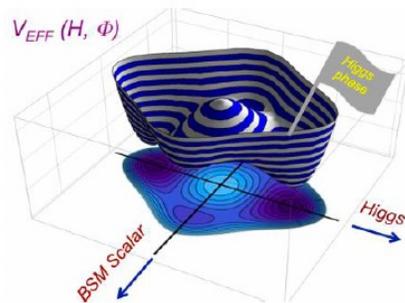
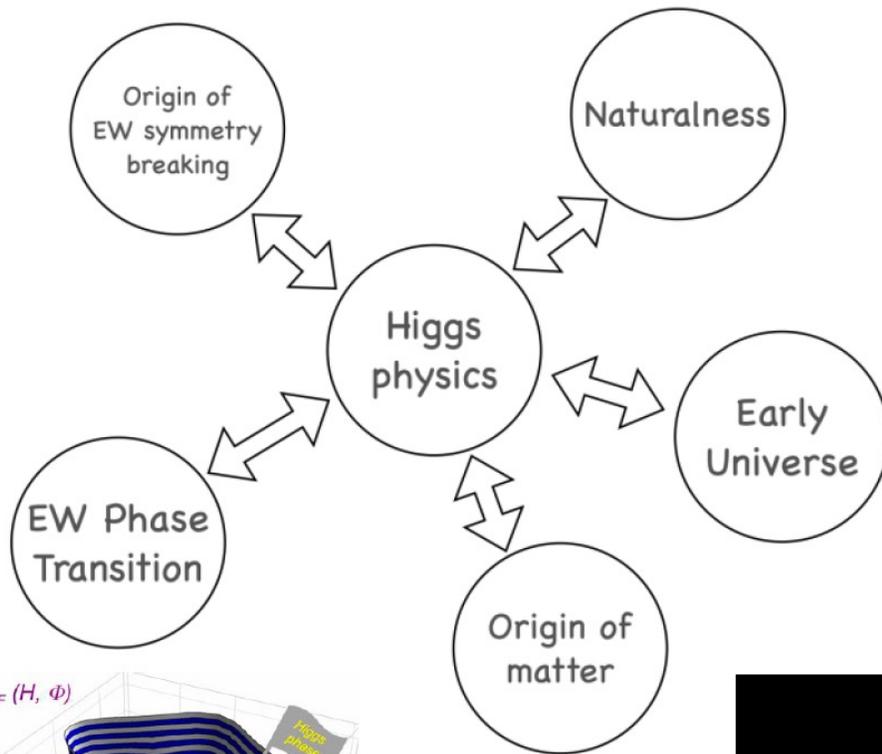
- \* 选择的结果中, 中国组均起主导 (分析组负责人、文章通讯作者等)  
或主要作用 (主要完成人、各类审核报告等)
- \* 数家单位协作时, 按拼音顺序排列

# 希格斯玻色子：新物理的探针

## → 电弱对称性破缺

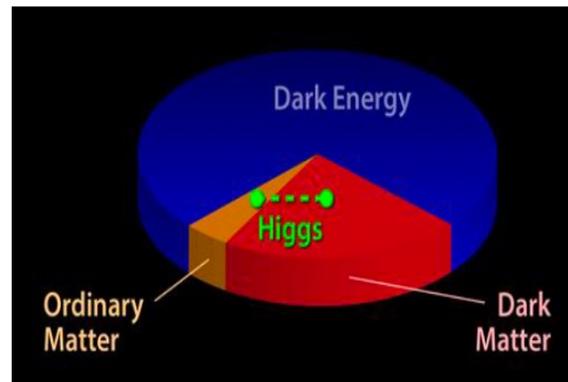
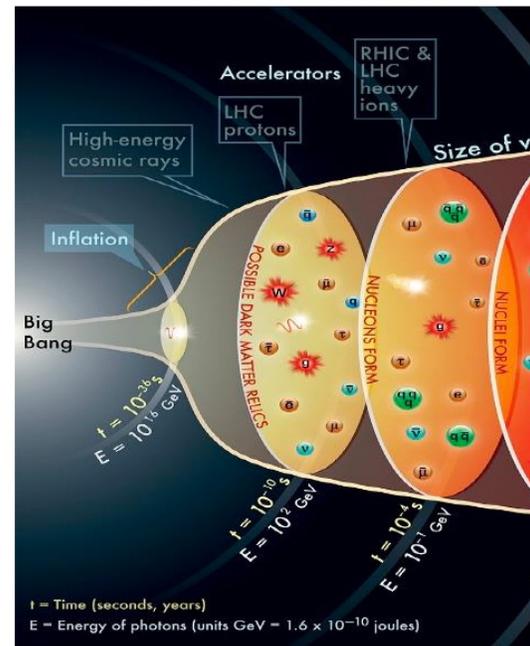


## → 自然性问题



→ 宇宙早期电弱相变  
→ 正反物质不对称之谜

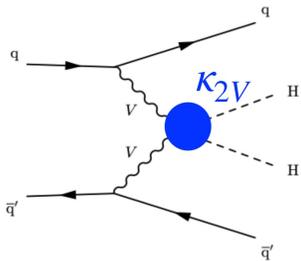
## → 宇宙早期的演化



→ 连接暗物质的桥梁

# 希格斯自耦合作用的研究

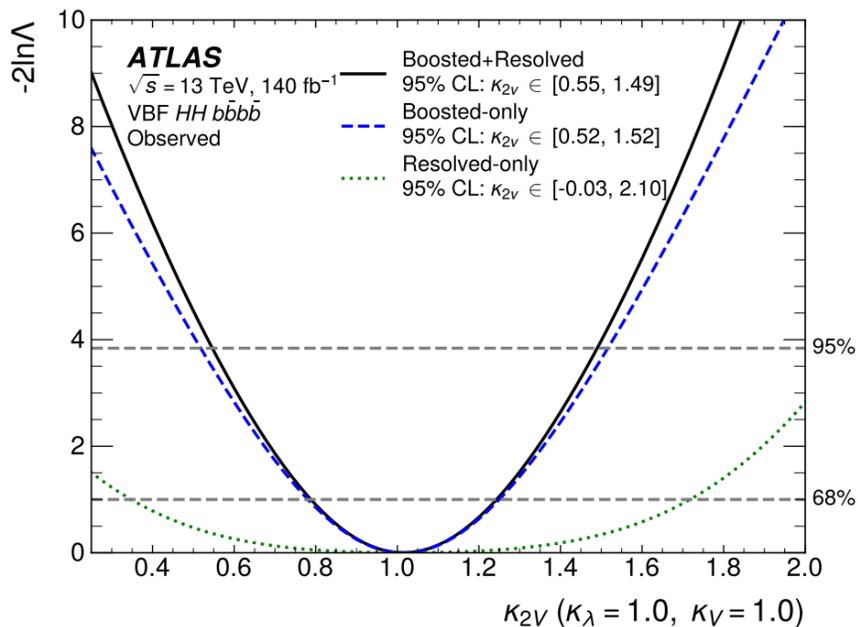
## Boosted VBF $HH \rightarrow bbbb$



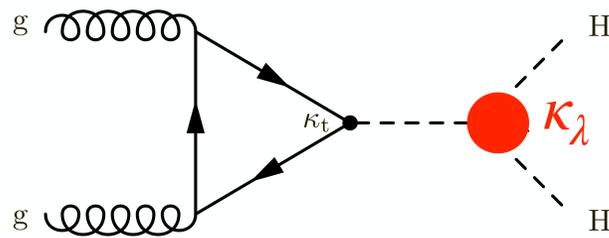
高能所、交大、  
李所、南大

对VVHH的耦合最灵敏

Phys. Lett. B 858 (2024) 139007



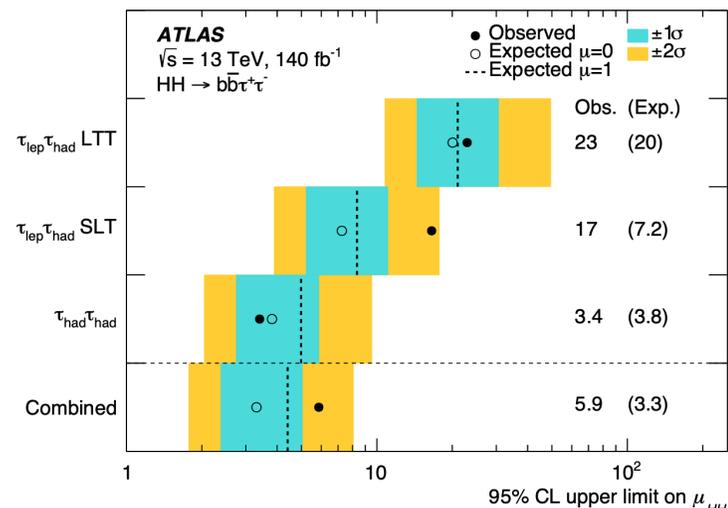
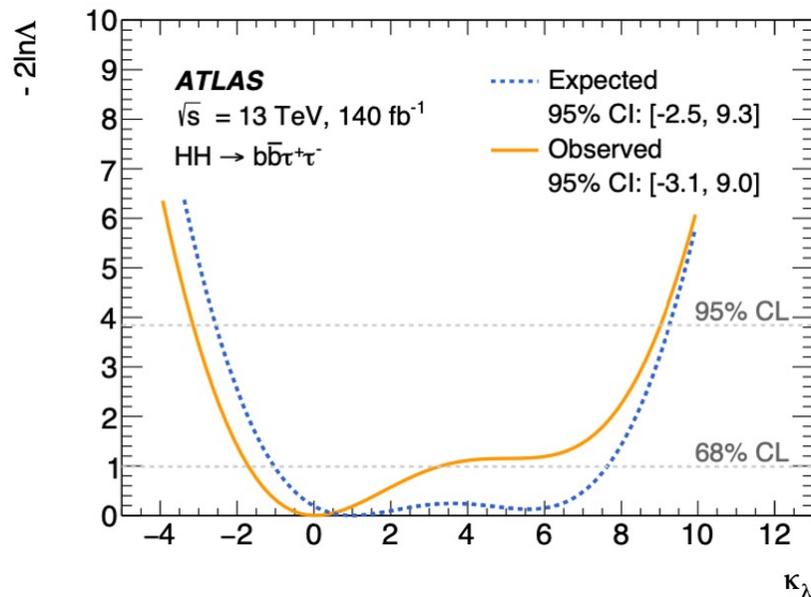
## Legacy Run-2 $HH \rightarrow bb\tau\tau$



交大、李所、南大，山大

[Phys. Rev. D 110 \(2024\) 032012](#)

ATLAS双希格斯寻找中预期信号最敏感的反应道!



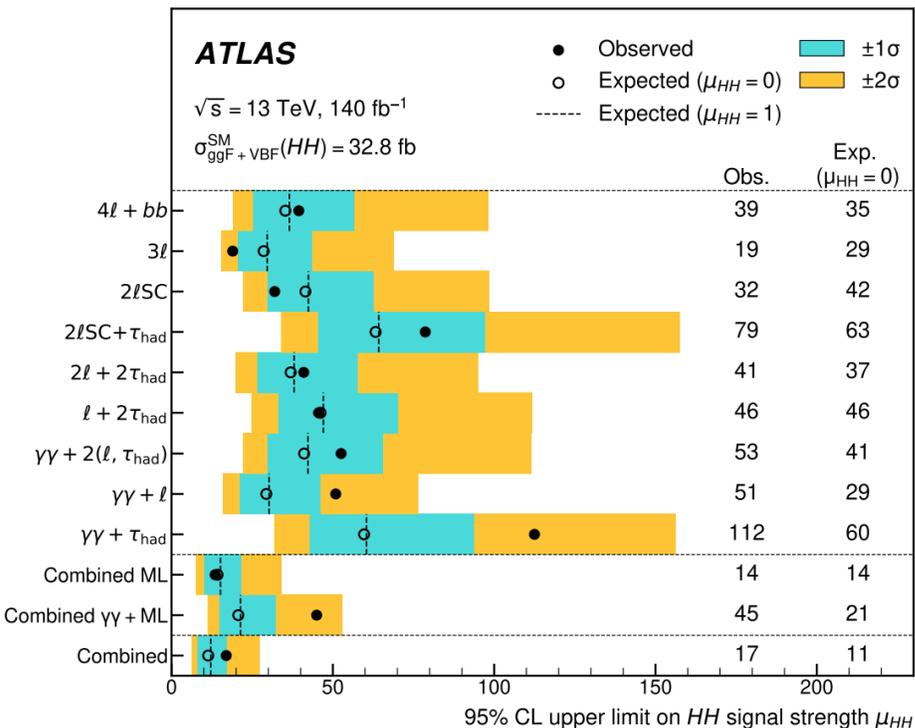
# 希格斯自耦合作用的研究

## 双希格斯粒子最复杂末态： HH → Multi-leptons

高能所、交大、李所、  
南大、山大、中科大

在ATLAS实验首次完成多轻子末态的分析

JHEP. 2024, 164 (2024)

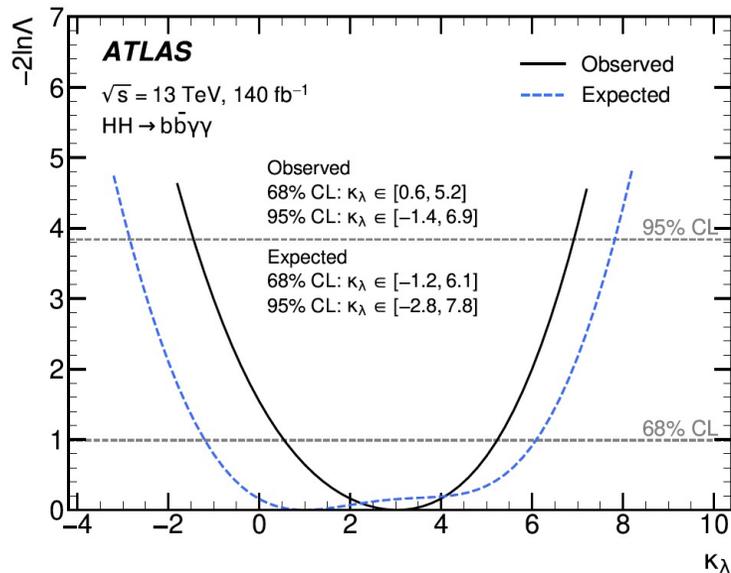


## Legacy $HH \rightarrow bb\bar{\gamma}\gamma$

高能所、交大、  
李所、南大

给出当时最严格的Higgs  
自耦合参数 $\kappa_\lambda$ 束缚

JHEP 01 (2024) 066

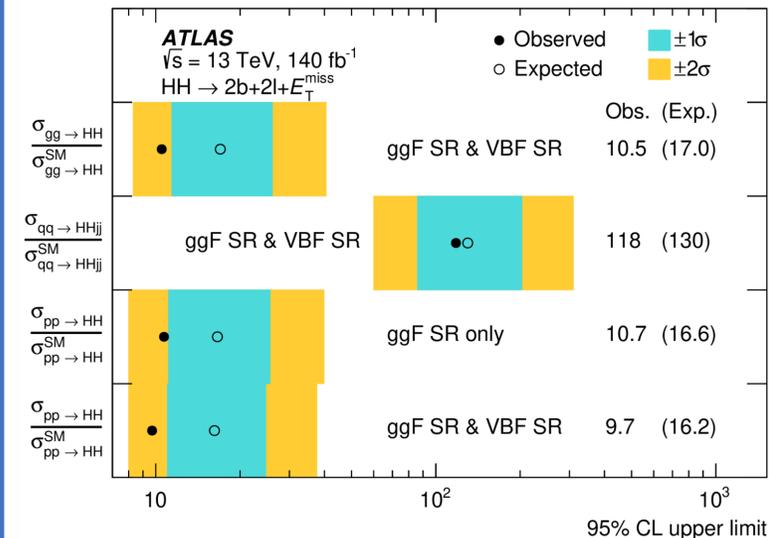


## $HH \rightarrow bbl\ell + MET$

高能所、南大、  
山大、中科大

基于双底夸克+双轻子  
多末态对的灵敏寻找

JHEP 02 (2024) 037



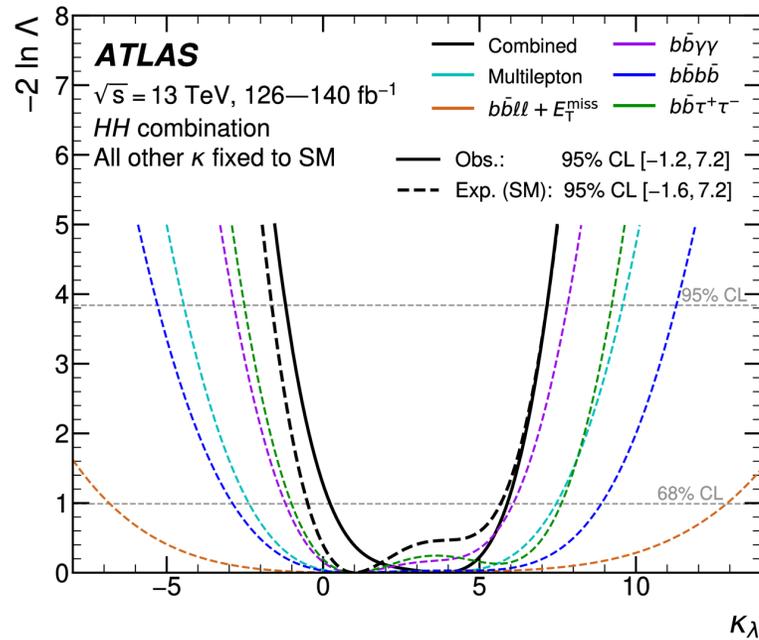
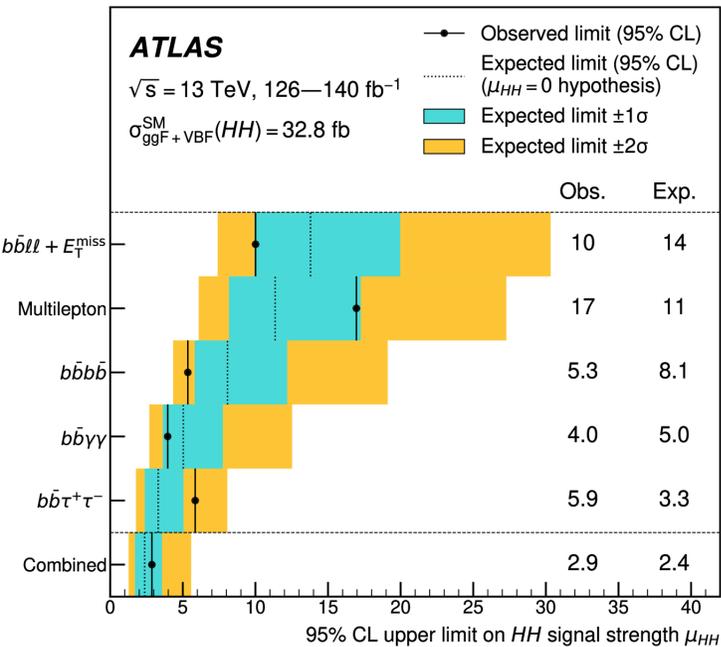
# 希格斯自耦合作用的研究：Combination

## HH non-resonant combination

高能所、南大

**ATLAS实验目前对希格斯自耦合最强限制**

Phys. Rev. Lett. 133 (2024) 101801

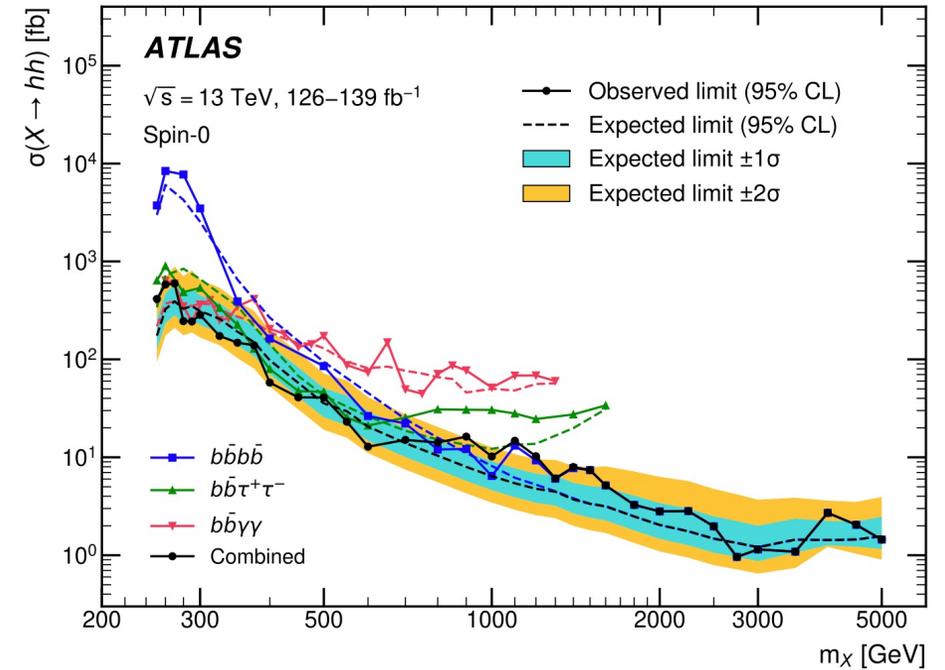


## HH resonant combination

南大、山大

暂无新共振态的迹象

Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 231801

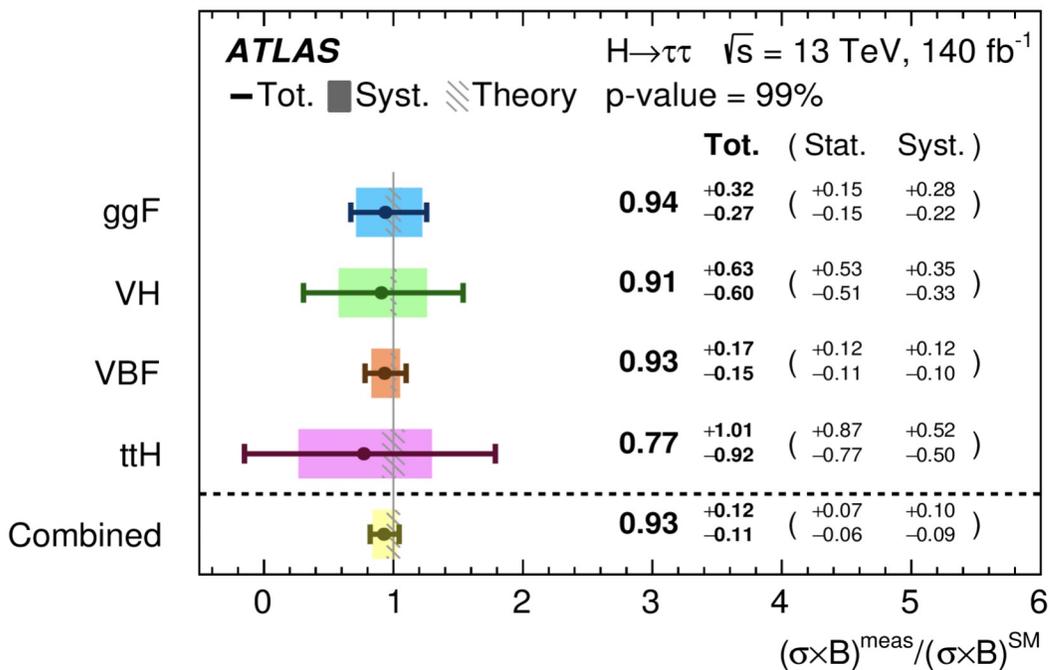


# 希格斯性质研究

Run2  $H \rightarrow \tau\tau$

首次在该末态进行微分截面测量  
测量精度显著提高

南大



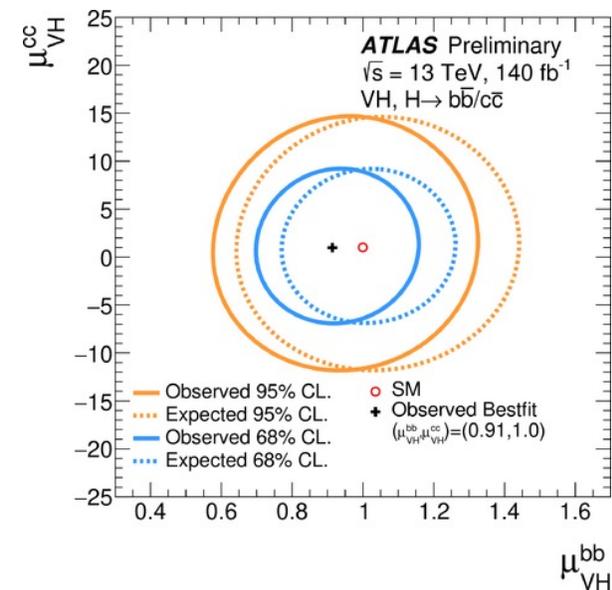
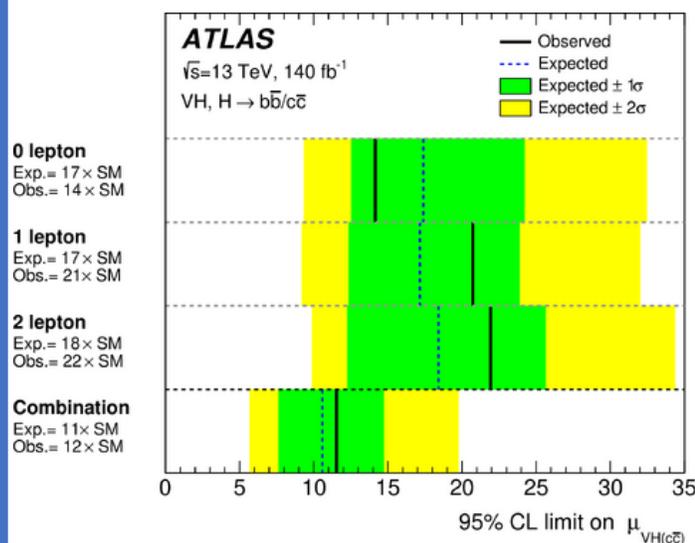
Run 2  $H \rightarrow b\bar{b}/c\bar{c}$

通过VH(cc)探索第二代粲夸克汤川耦合

通过c-tagging策略优化和机器学习优化获得  
当前最好 $k_c$ 观测统计限制 $|\kappa_c| < 4.2$  (95% CL)

arXiv: 2410.19611

南大、山大、中科大



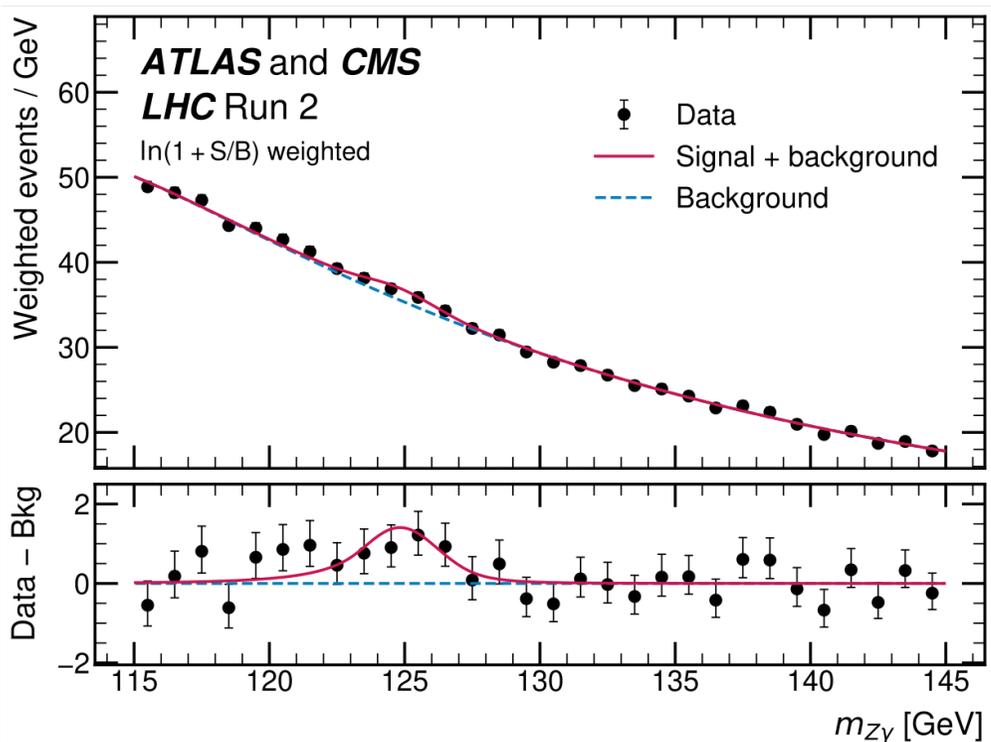
# 希格斯性质研究

稀有衰变道:  $H \rightarrow Z\gamma$

完成Run2首个 ATLAS-CMS联合测量:  
观测到 $H \rightarrow Z\gamma$  稀有衰变的迹象 ( $Z_{\text{obs}}=3.4\sigma$ )

PRL 132 (2024) 021803

高能所, 南大

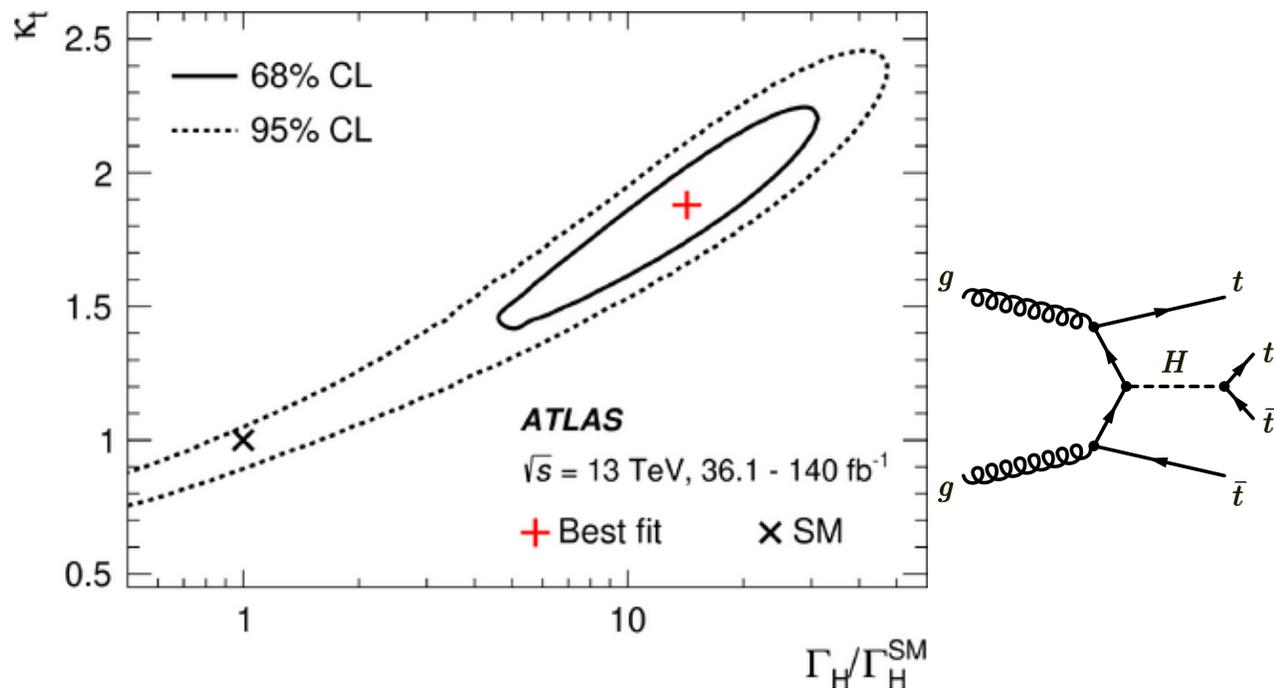


利用四顶夸克过程和壳希格斯过程测量希格斯总宽度

创新性的利用四顶夸克过程限制希格斯总宽度, 获得首个结果

arXiv:2407.10631

中科大

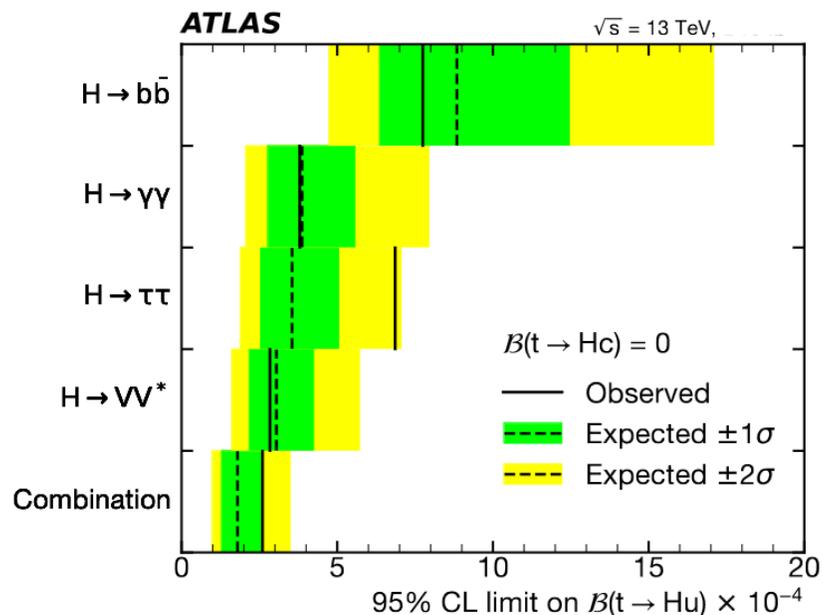
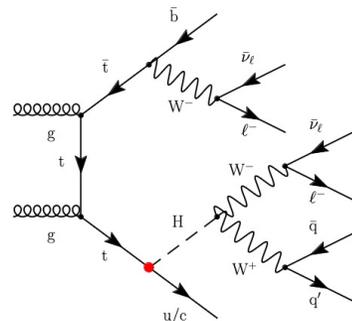


# 希格斯性质研究

TOP – Higgs FCNC寻找

Eur. Phys. J. C 84 (2024) 757

清华

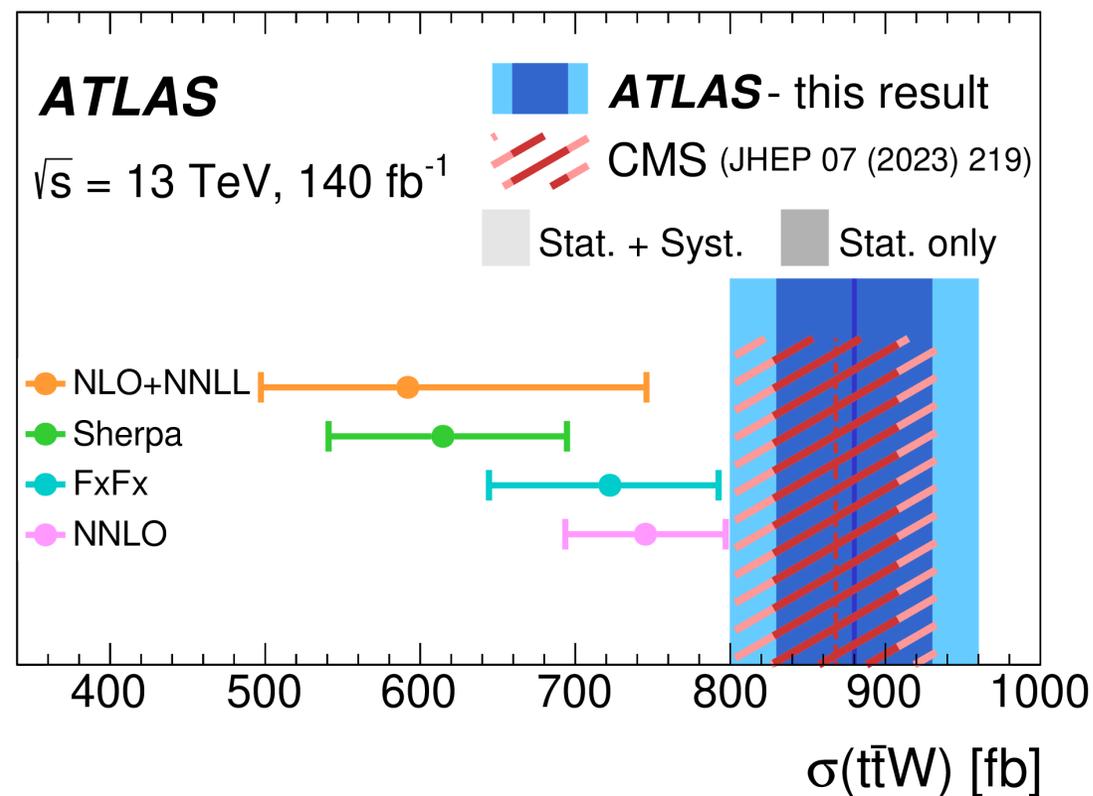


Signal	Observed (expected) 95% CL upper limits $B(t \rightarrow Hq)$	$ C_{u\phi}^{qt,tq} $
$tHu$	$2.8 (3.0) \times 10^{-4}$	0.71 (0.73)
$tHc$	$3.3 (3.8) \times 10^{-4}$	0.76 (0.82)

ttW/ttH多轻子道截面与CP测量进展

JHEP 05 (2024) 131

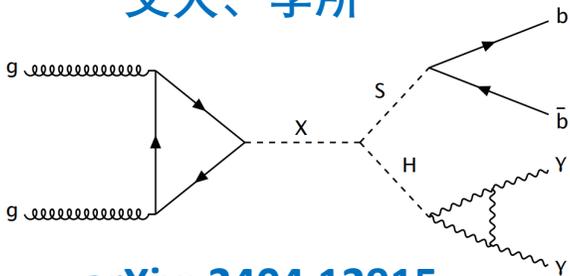
交大、李所



# 希格斯相关的新物理寻找

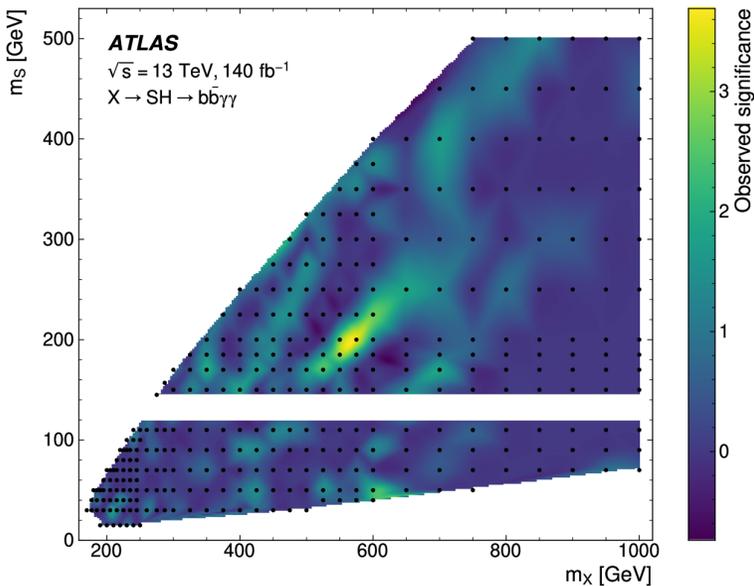
$X \rightarrow S(\rightarrow b\bar{b})H(\rightarrow \gamma\gamma)$

交大、李所



[arXiv: 2404.12915](https://arxiv.org/abs/2404.12915)

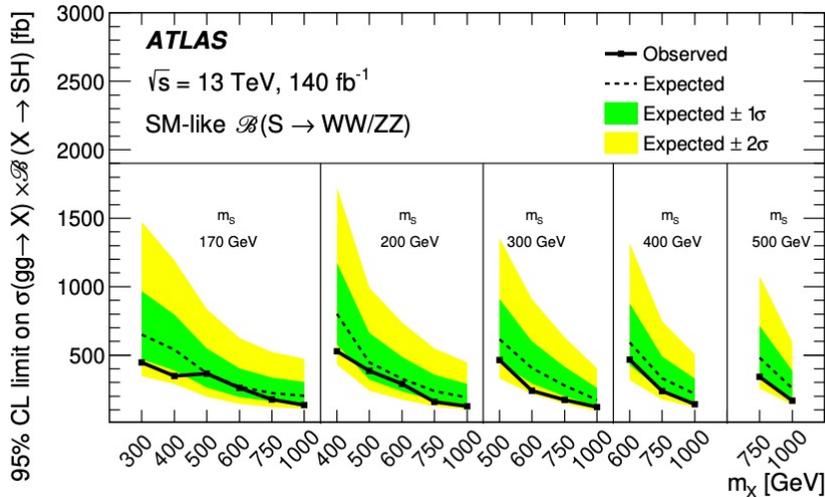
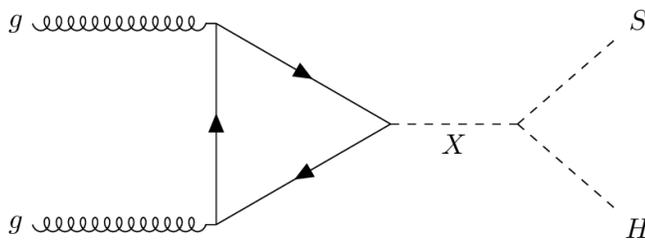
寻找自旋为0的标量粒子X和S



$X \rightarrow SH \rightarrow \gamma\gamma + \text{multilepton}$

高能所

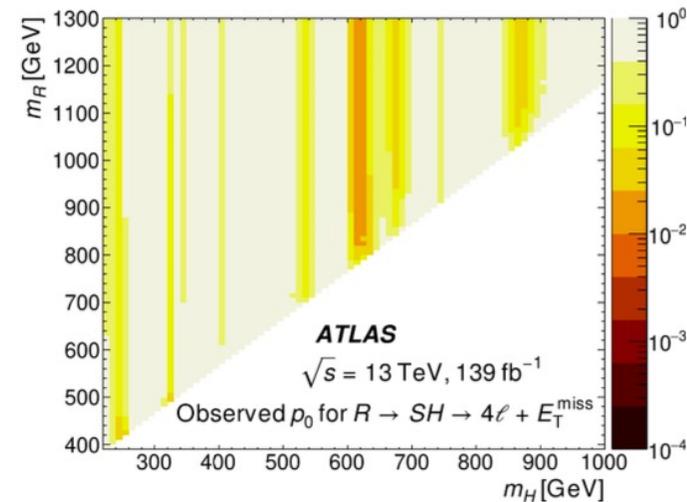
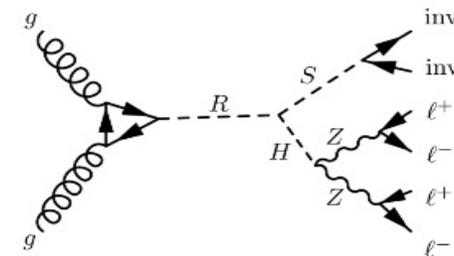
[JHEP 10 \(2024\) 104](https://arxiv.org/abs/2404.104)



$R \rightarrow ZZ (4\ell) + \text{MET}$  的寻找

高能所

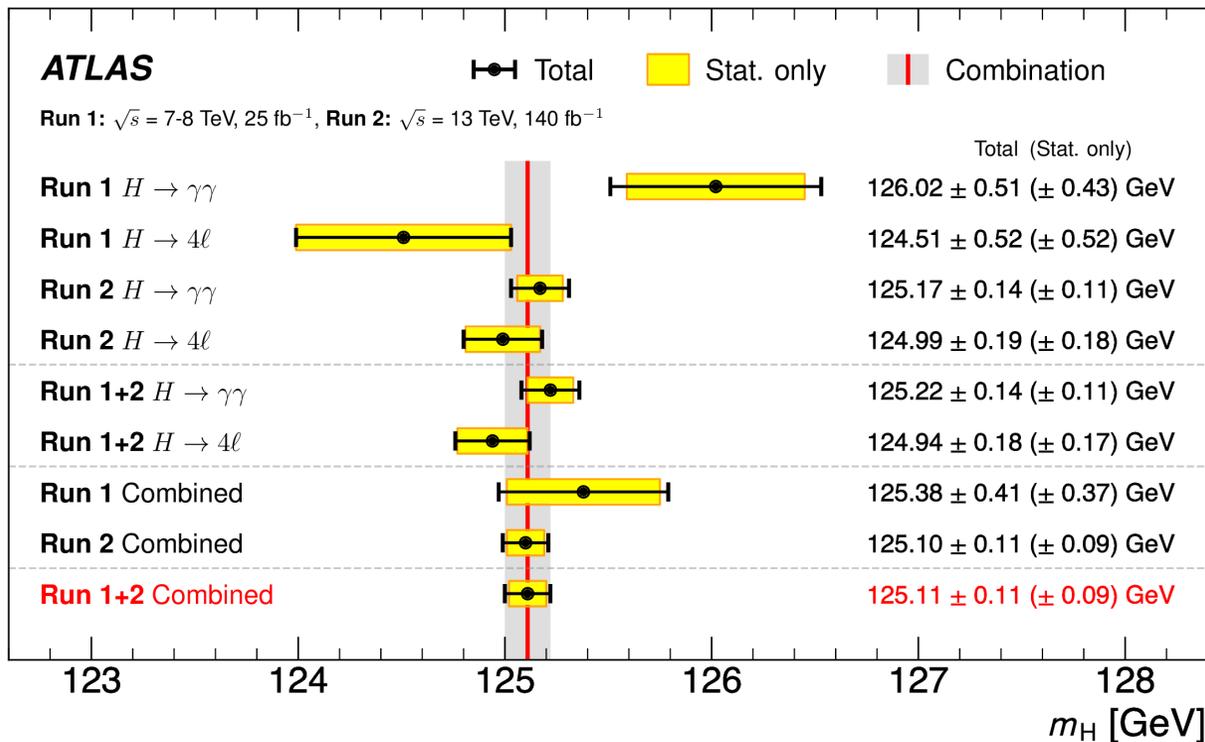
[JHEP 10 \(2024\) 130](https://arxiv.org/abs/2404.130)



# 标准模型测量：精确测量 → 更高精度

高能所、南大、中科大

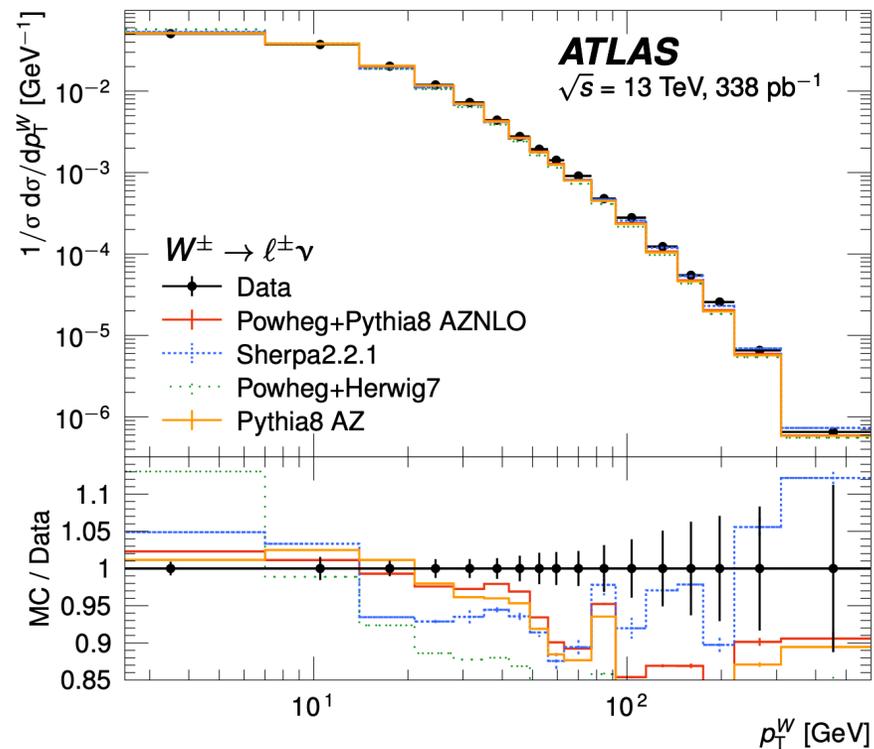
Phys. Rev. Lett. 131,(2023), 251802



对希格斯粒子质量的精确测量  
(四轻子和双光子衰变道)

高能所、中科大

Eur. Phys. J. C 84 (2024) 1126



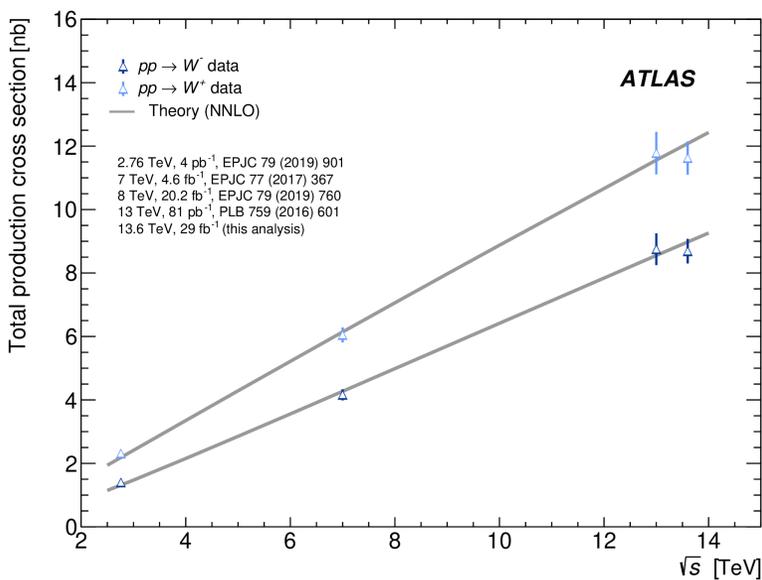
利用低堆积pp对撞数据对W玻色子横  
动量高精度测量 (<1%)，对W质量  
测量的重要输入

# 标准模型测量：单玻色子过程

## W/Z 精确测量

PLB 854 (2024) 138725

中科大

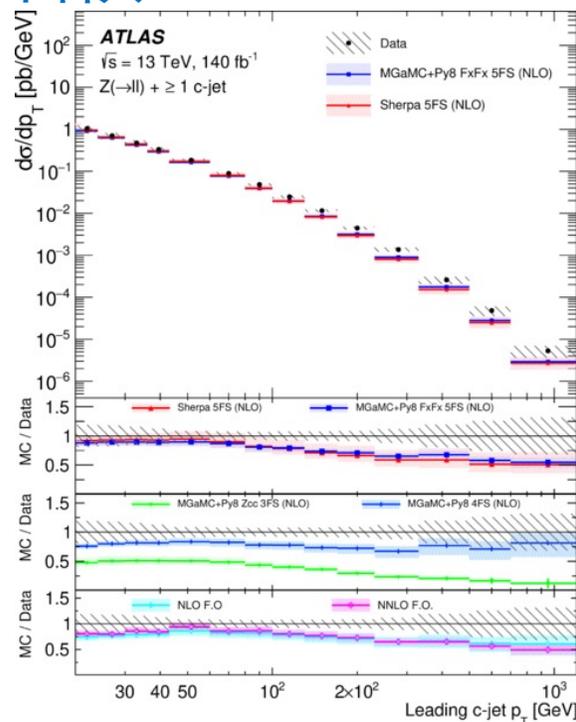


13.6 TeV下对单玻色子过程的首次测量，为Run-3精确测量作铺垫

## 测量 Z + 重味喷注过程

EPJC 84 (2024) 984

中科大

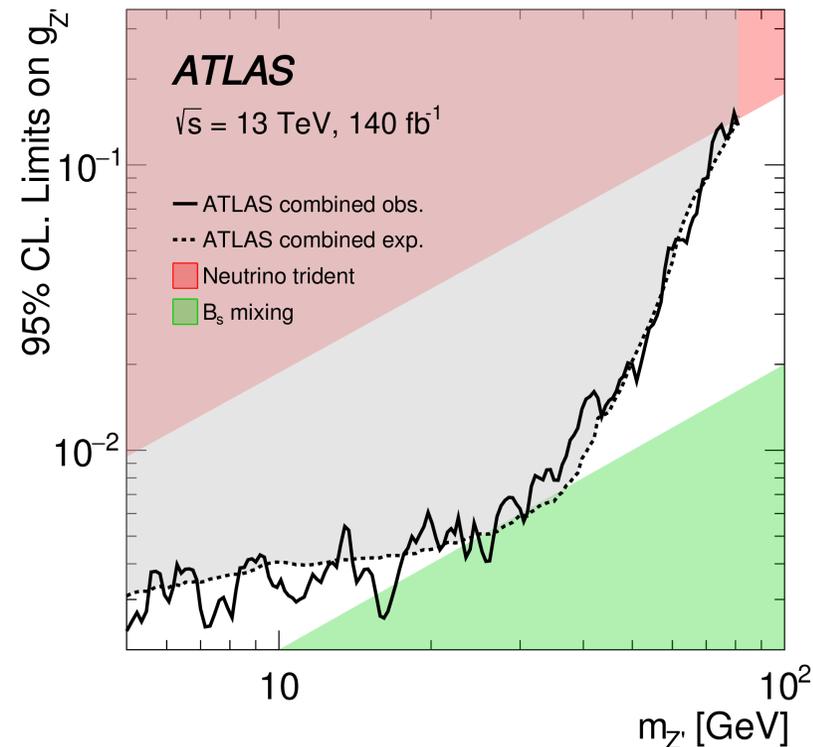


最精确Z+b(b)测量、ATLAS首次Z+c jet测量，利用该过程研究intrinsic charm

## 通过3轻子末态寻找Z'

PRD 110 (2024) 072008

中科大

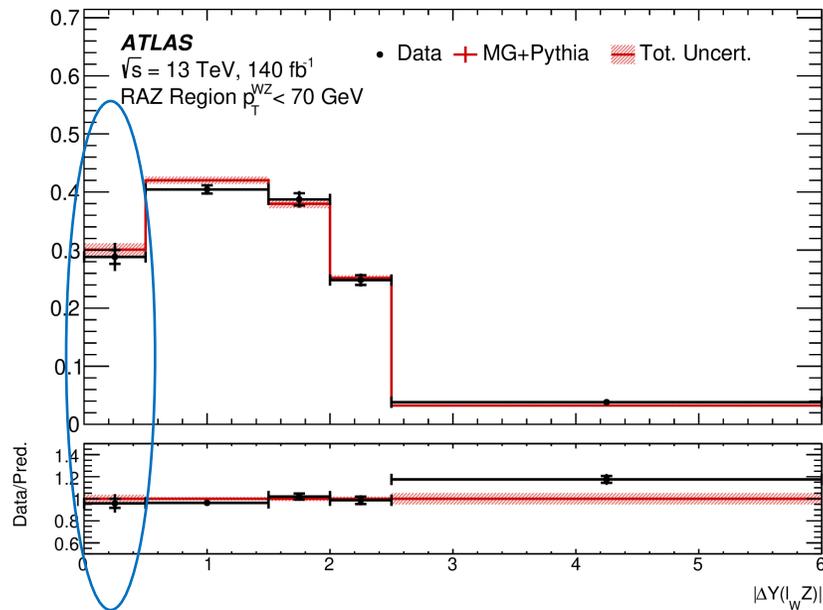


多轻子末态获得对低质量Z'相应参数空间最紧致的统计限制

# 标准模型测量：双玻色子散射

高横动量WZ测量：*PRL 133 (2024) 101802*  
极化、RAZ效应

中科大

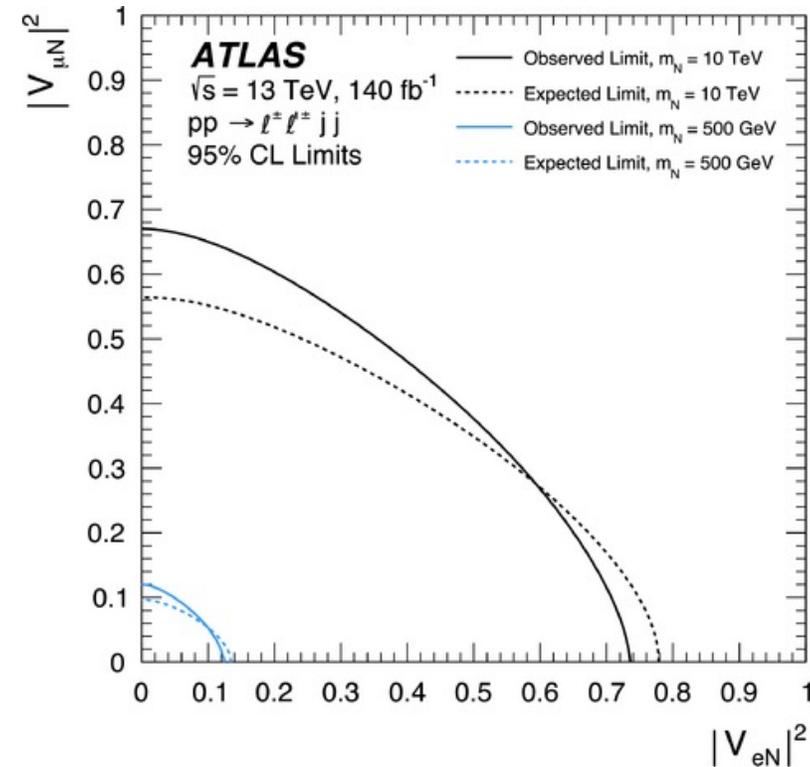
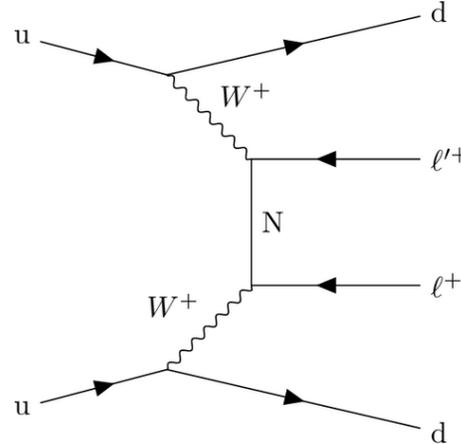


利用WZ过程对双纵向极化比率能量依赖性的首次测量，对WZ过程RAZ量子干涉效应的首次测量

通过同号W玻色子对散射寻找大质量马约拉纳中微子

*PLB 856 (2024) 138865*

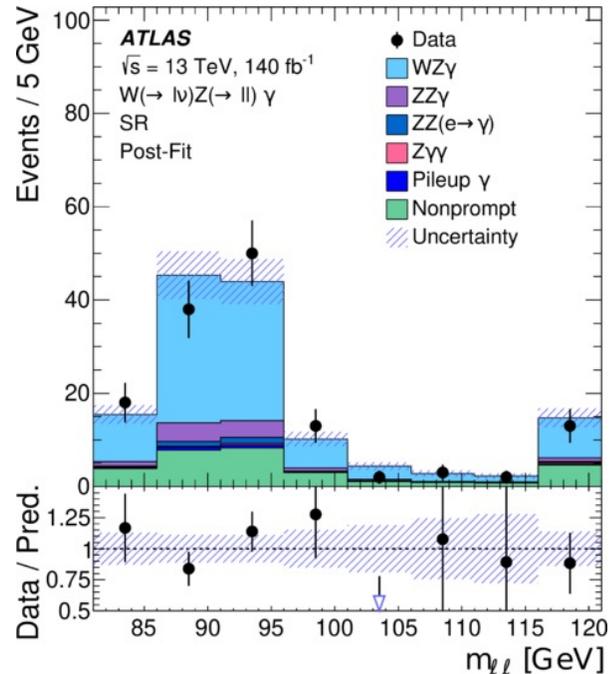
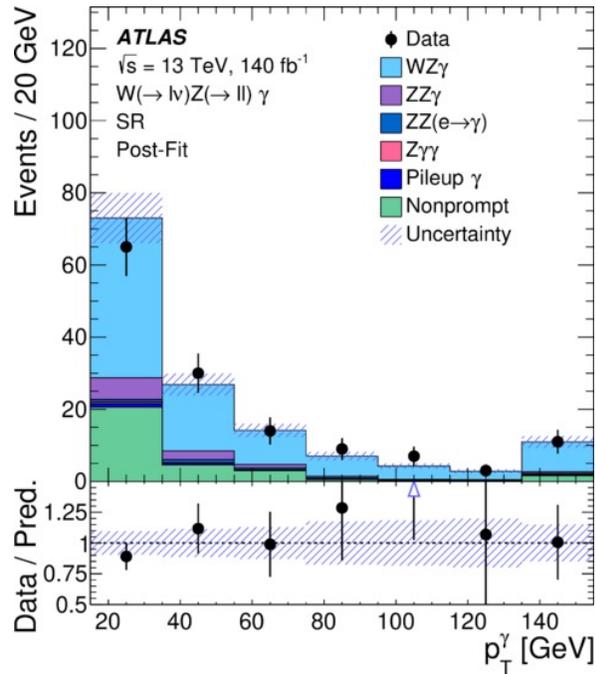
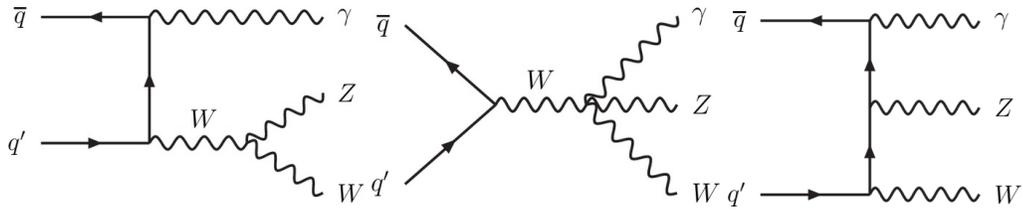
中科大



首次利用ssWW散射过程对大质量马约拉纳中微子的寻找，获得紧致统计限制

# 标准模型测量：发现稀有过程 → 结构探秘

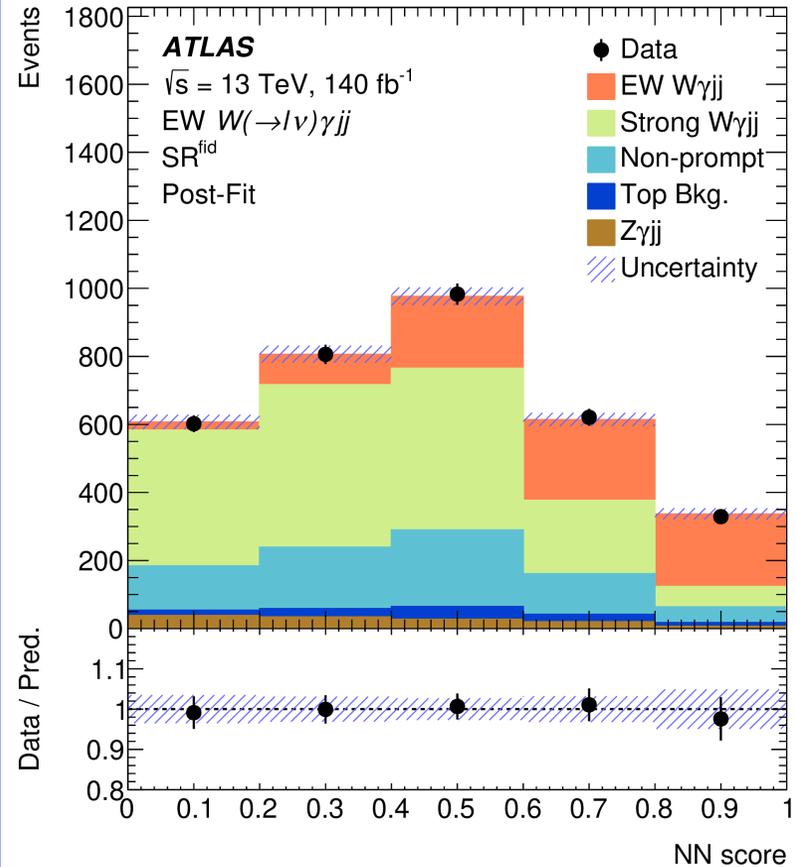
郑大



Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 021802

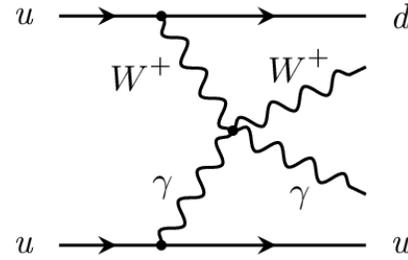
首次观测到WZγ三玻色子过程  
6.3σ (三轻子+光子衰变道)

交大、李所



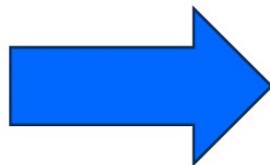
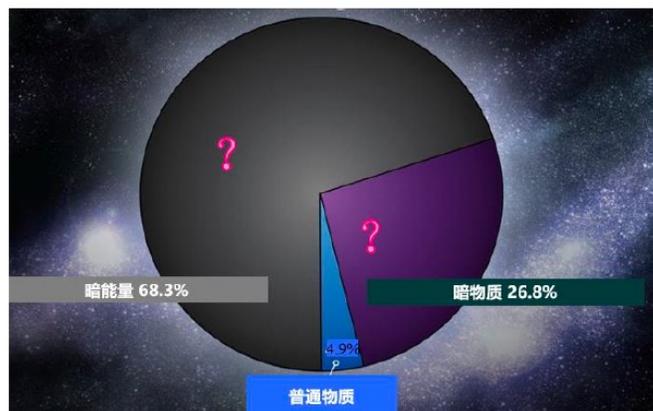
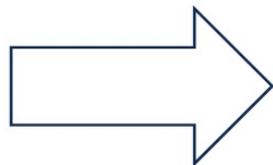
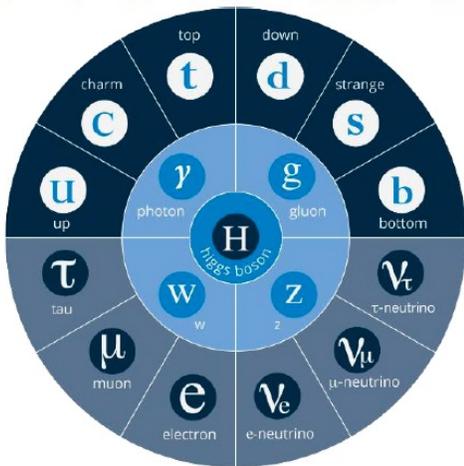
Eur. Phys. J. C 84 (2024) 1064

首次5σ以上观测矢量玻色子散射VBS Wγ过程  
首个EW Wγ微分截面联合测量结果



# 新物理寻找

希格斯的发现为标准模型奠定了关键的基石，成为完备的理论；  
但是无法解释暗物质和暗能量，其背后蕴含着更深刻的物理规律



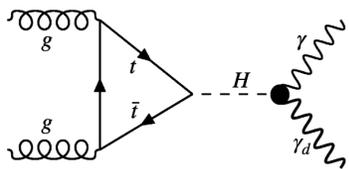
暗物质和暗能量：21世纪的两朵“乌云”

# 新物理研究 - 暗物质寻找

ATLAS暗光子寻找联合统计测量

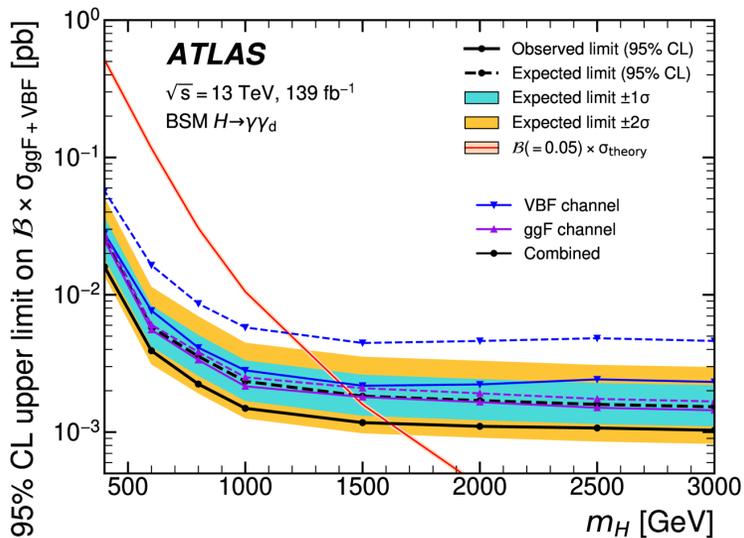
$$H \rightarrow \gamma \gamma_d$$

交大、李所



JHEP 08 (2024) 153

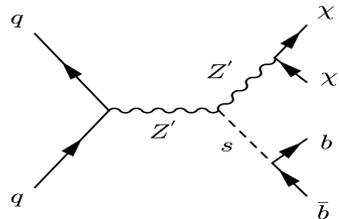
给出SM Higgs和BSM Higgs的 $H \rightarrow \gamma \gamma_d$ 分支比最严格上限



暗希格斯粒子寻找:

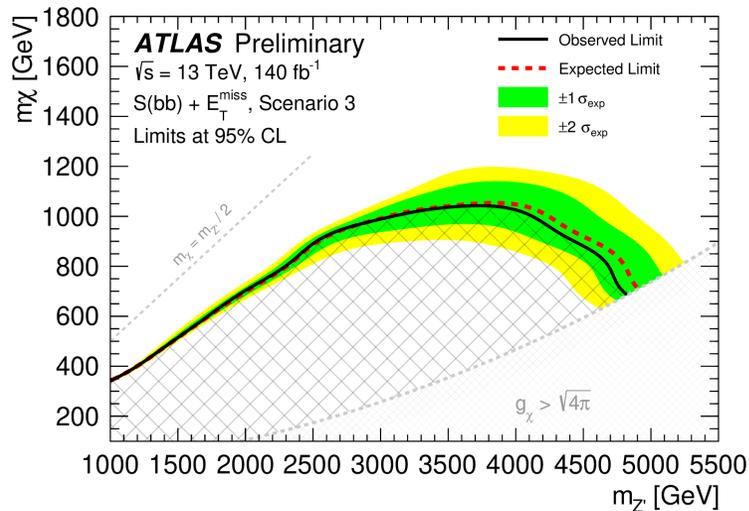
mono-S(bb)

交大、李所



arXiv:2407.10549

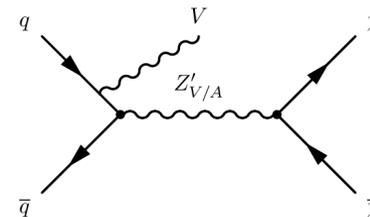
LHC首个基于Cosmology Coherent Context的暗希格斯粒子寻找物理结果



暗物质和矢量玻色子共同产生

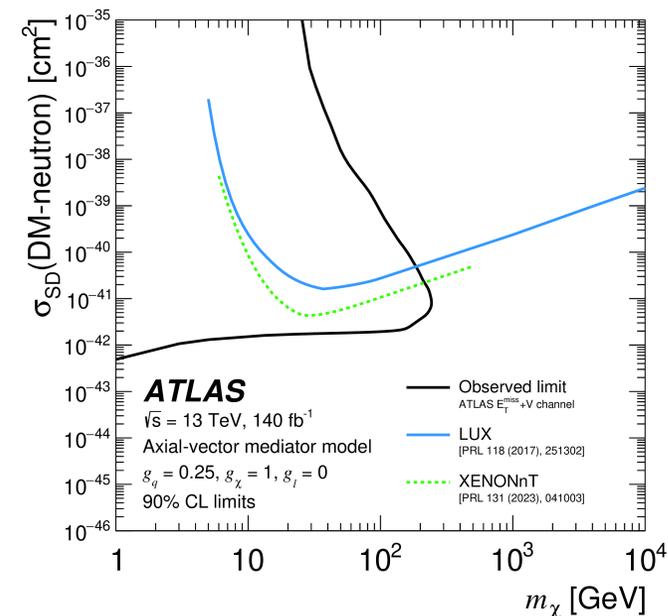
mono-V(jj)

交大、李所



arXiv:2407.10549

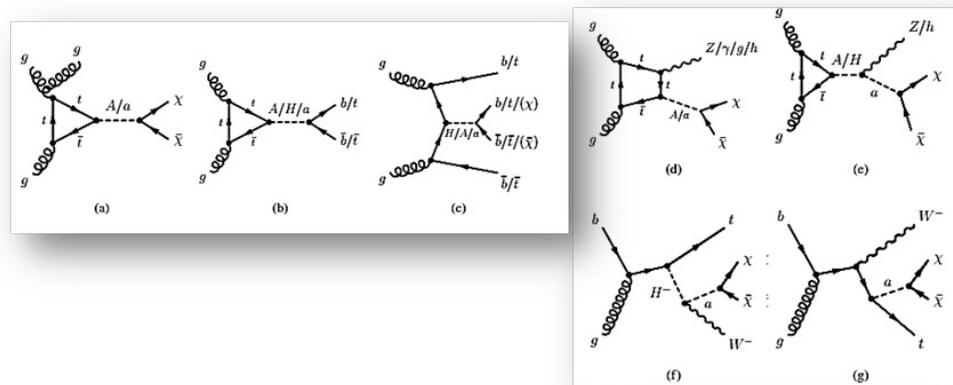
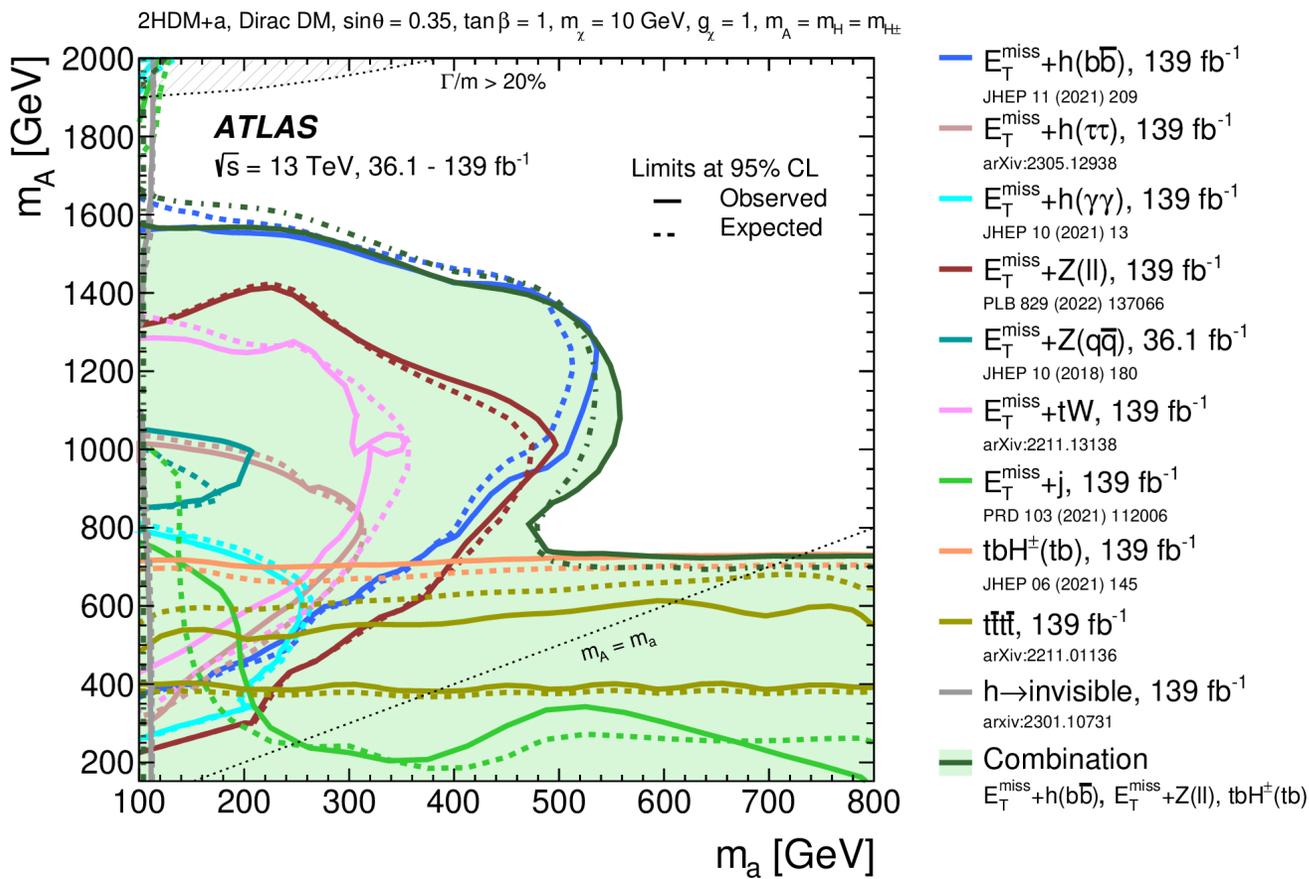
多种与矢量玻色子强耦合的暗物质模型



# 新物理研究 - 暗物质寻找

交大/李所, 中科大

Science Bulletin 2024,69(19):3005-3035



**ATLAS国际合作组首篇《Science Bulletin》文章**

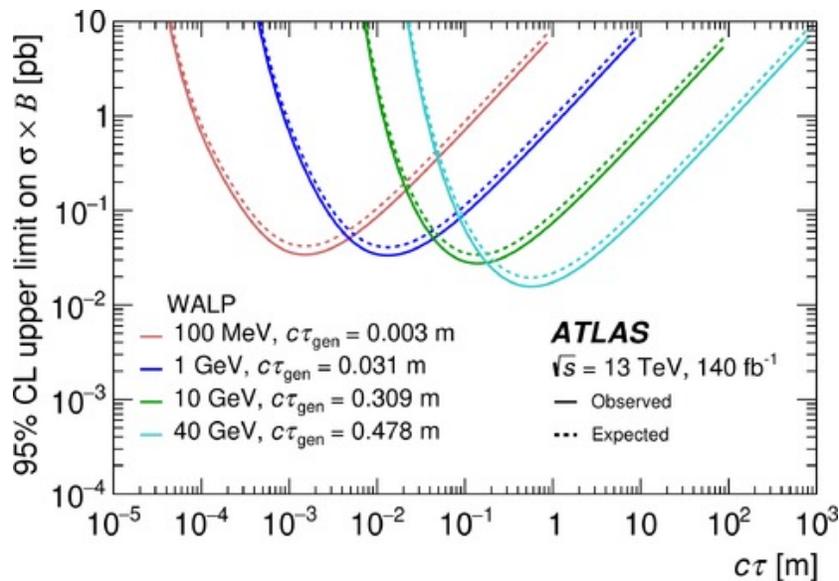
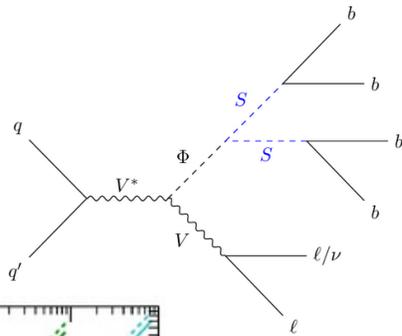
**合并主要搜寻过程, 针对2HDM+a模型进行统计联合, 给出最灵敏限制**

# 新物理寻找 - 长寿命粒子

长寿命中性粒子在强子量能器中衰变，伴随轻子/喷注末态的寻找

中科大

arXiv:2407.09183

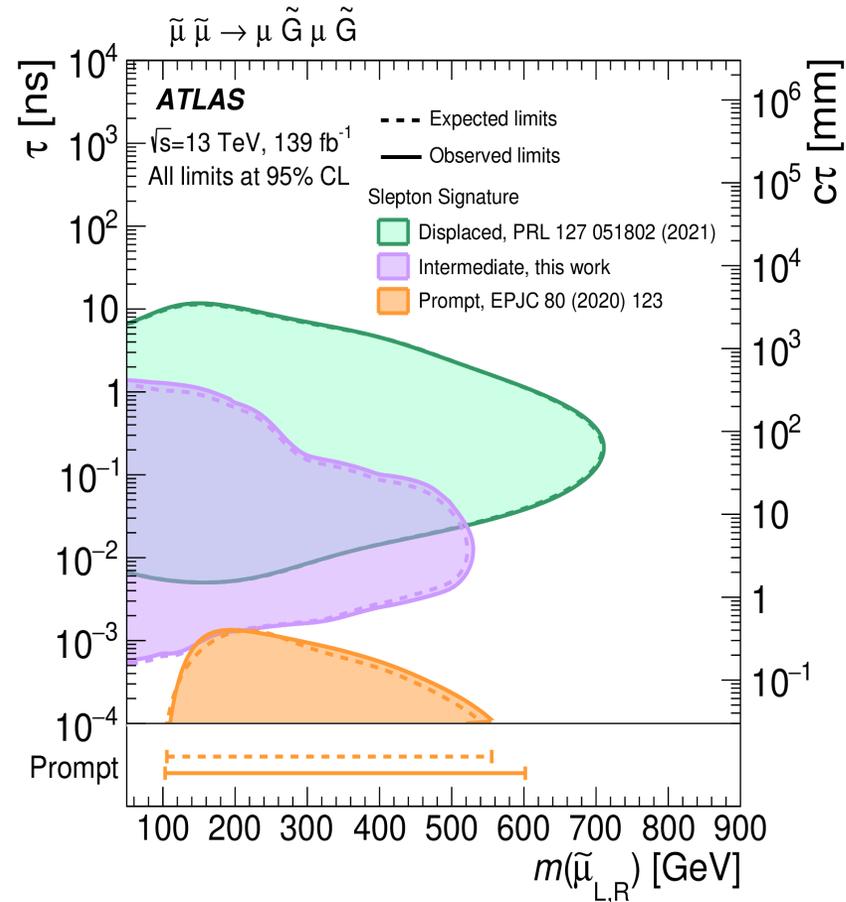


着重对寿命较长新粒子灵敏，利用强子与电磁量能器中沉积能量的比值来创新性的寻找

超对称长寿命 smuon寻找

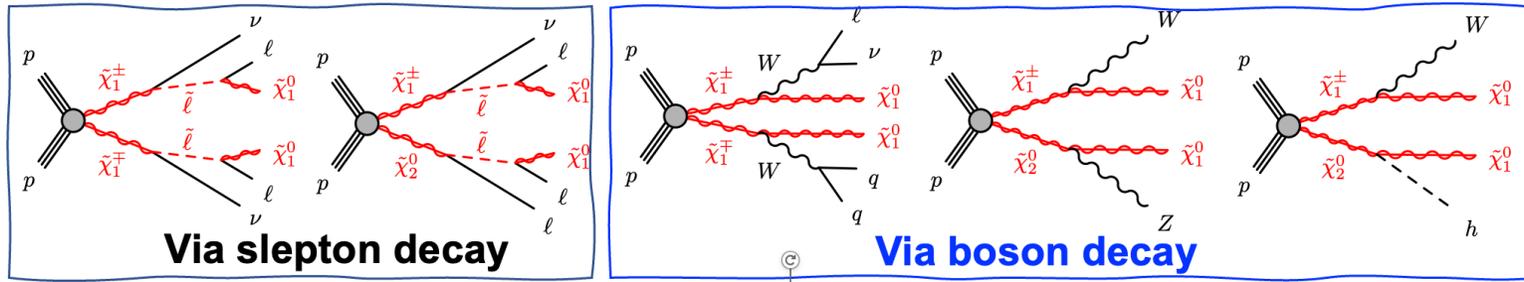
高能所/南大/中大

PLB 846 (2023) 138172



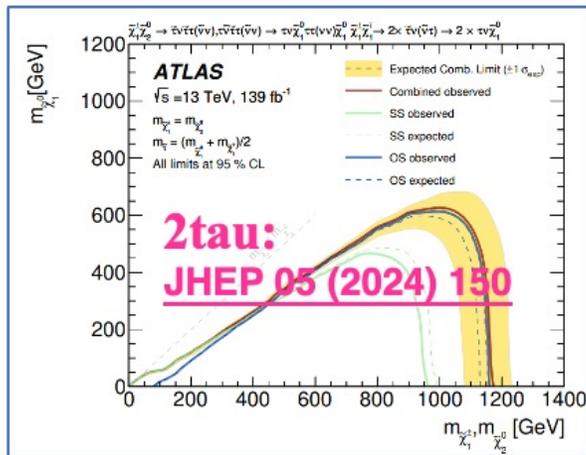
# 新物理寻找 - 超对称Gaugino 粒子的寻找

高能所/南大/中大

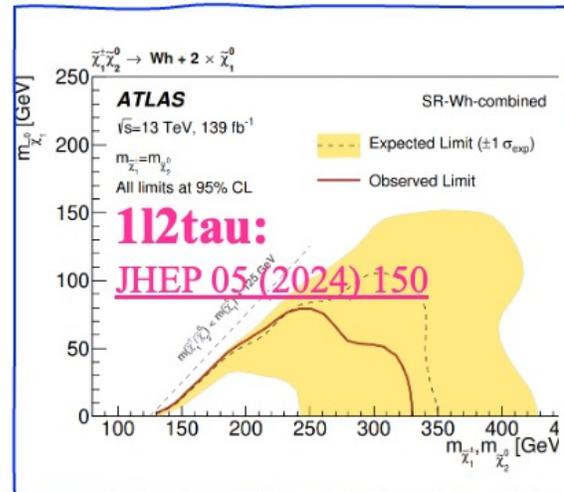


是电弱超对称的主要产生过程，能自然解释muon g-2反常等现象，其轻子末态信号灵敏度高

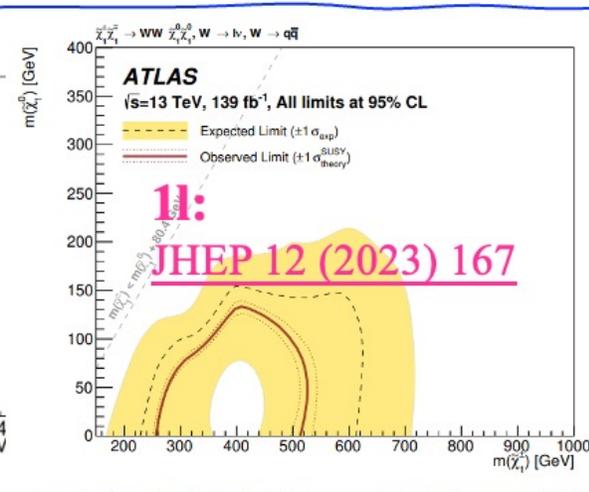
- 研究了主要的衰变过程：via stau; via WW, WZ, Wh
- 研究了主要的衰变末态：1, 2/3轻子和tau末态 (3个分析)



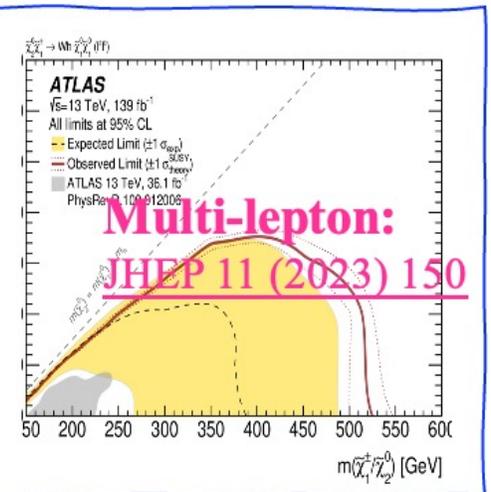
首次研究同号2tau过程，对紧凑区间有很大提升



首次通过h -> tau tau过程寻找SUSY粒子

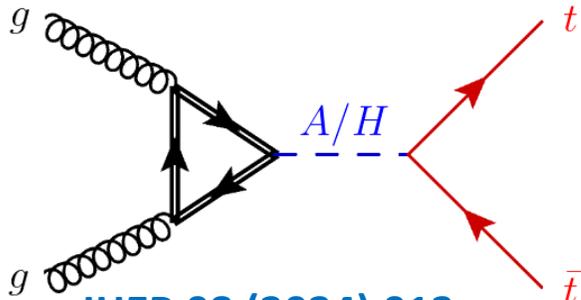


首次研究，显著提高gap区间灵敏度



研究了Wh主要末态：h -> tau tau, bb, multi-lep

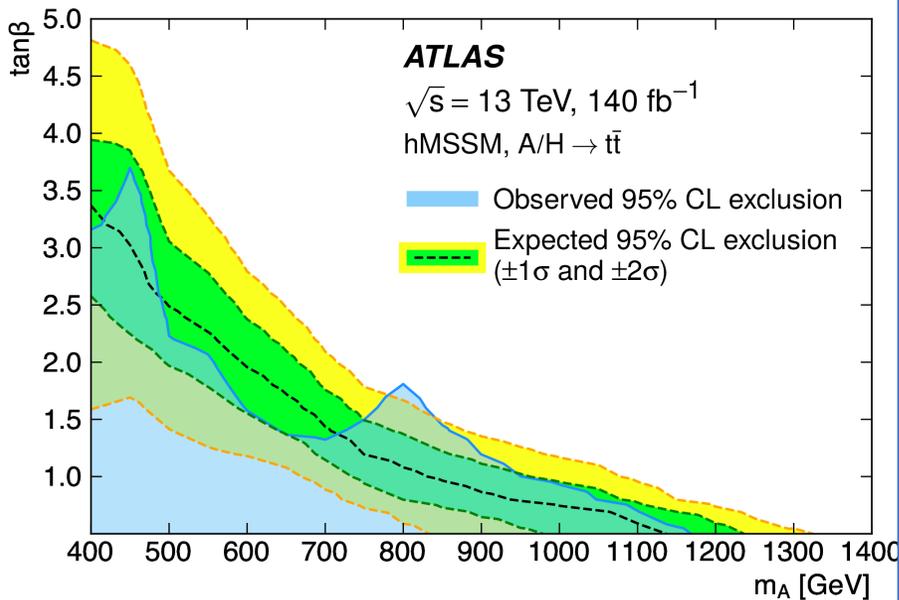
# 新物理寻找 - 超对称粒子的寻找



JHEP 08 (2024) 013

高能所/南大

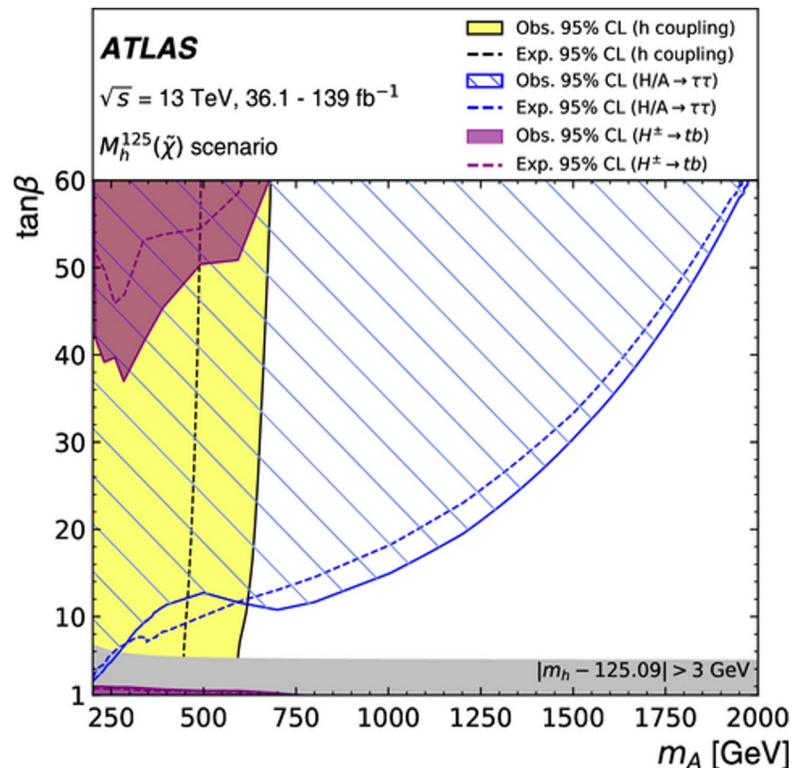
寻找重希格斯粒子衰变到顶夸克



希格斯耦合的BSM interpretation

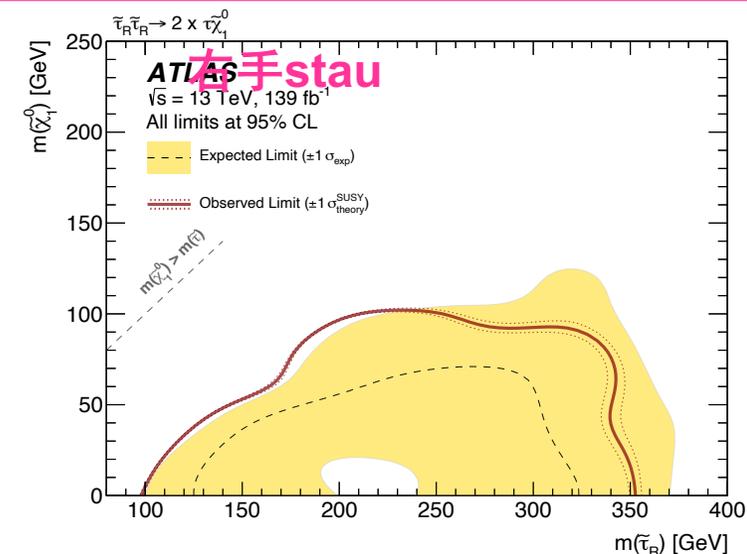
[arXiv:2402.05742](https://arxiv.org/abs/2402.05742)

南大



JHEP 05 (2024) 150

高能所/南大/中大

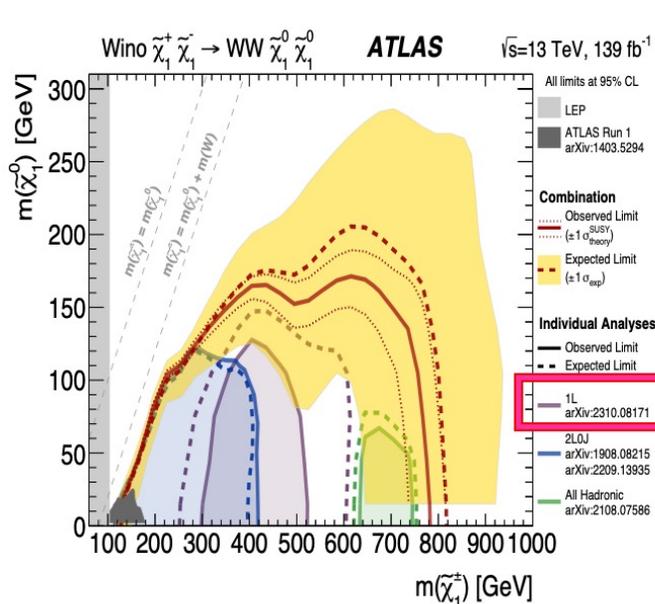


首次利用双陶轻子过程寻找stau，得到最紧致排除限，首次研究右手stau排除限

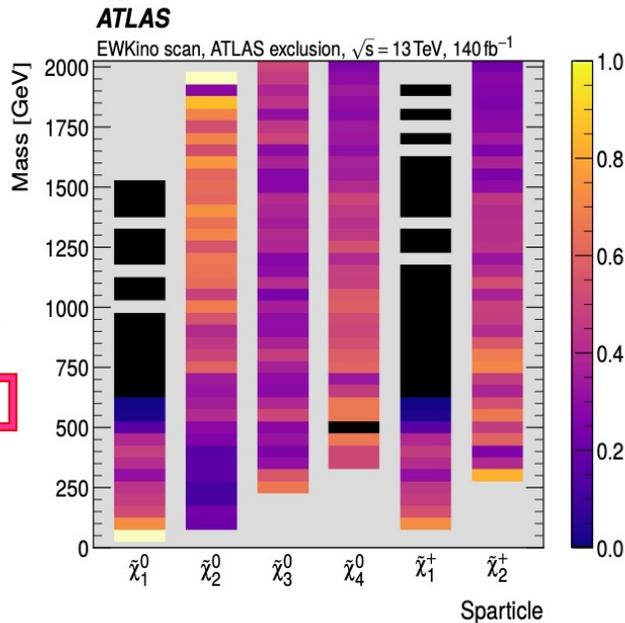
# 新物理寻找 - 寻找超对称粒子联合研究

完成**多项SUSY统计联合研究**, EWK Combination、pMSSM EWK scan, SUSY summary, RPC-to-RPV等总结性文章研究

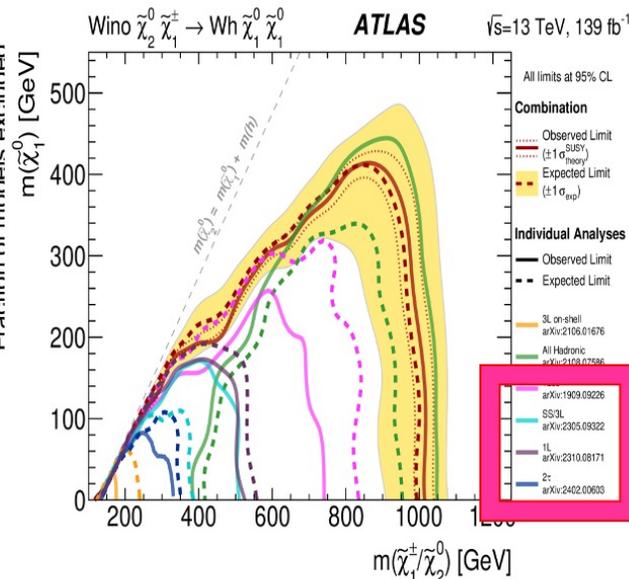
高能所/南大/中大



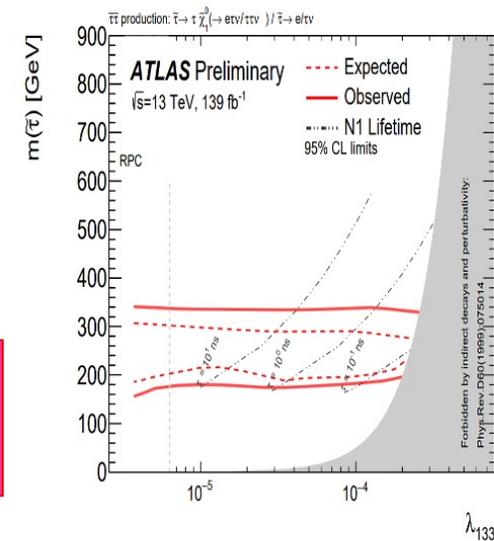
**EWK Combination**  
[PRL 133 \(2024\) 031802](#)



**pMSSM EWK scan**  
[JHEP 05 \(2024\) 106](#)



**SUSY summary**  
[arXiv.2403.02445](#)  
(accepted by Physics Reports )



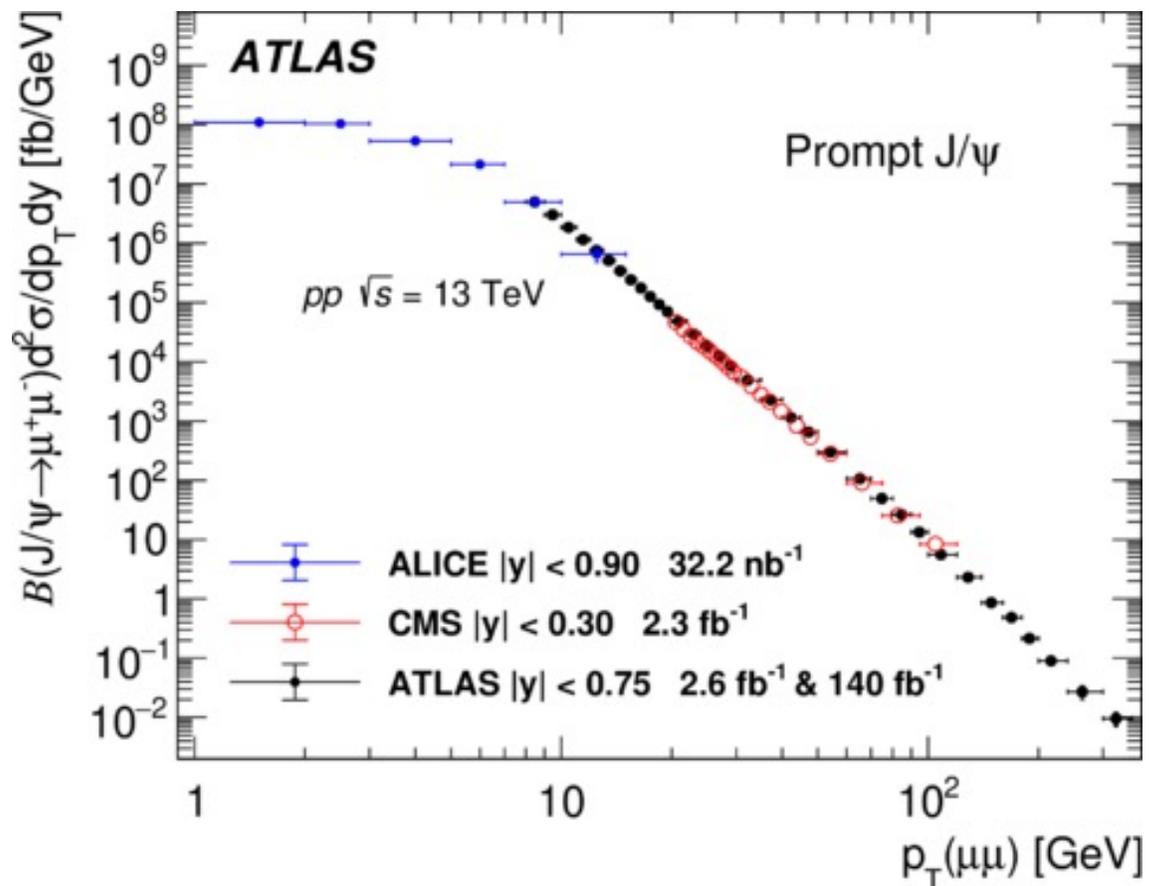
**RPC-to-RPV (stau)**  
[ATL-PHYS-PUB-2024-007](#)

# 味物理

J/ψ and ψ(2S)测量

交大/李所、中科大

[Eur. Phys. J. C 84 \(2024\) 169](#)

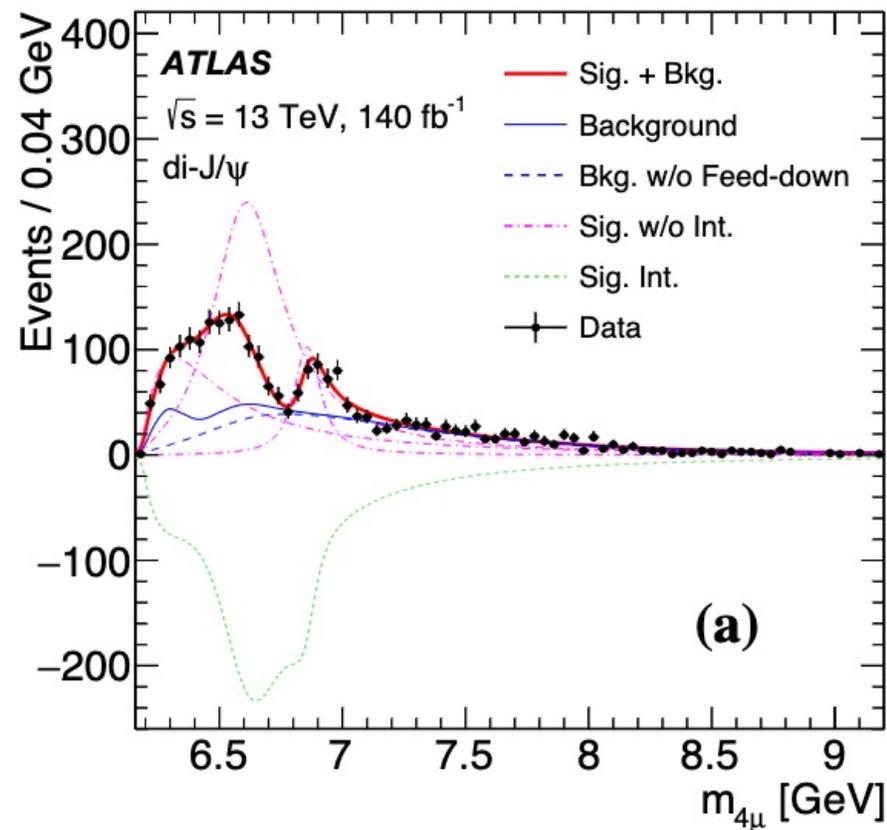


寻找  $cc\bar{c}\bar{c}$  tetraquarks

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

清华

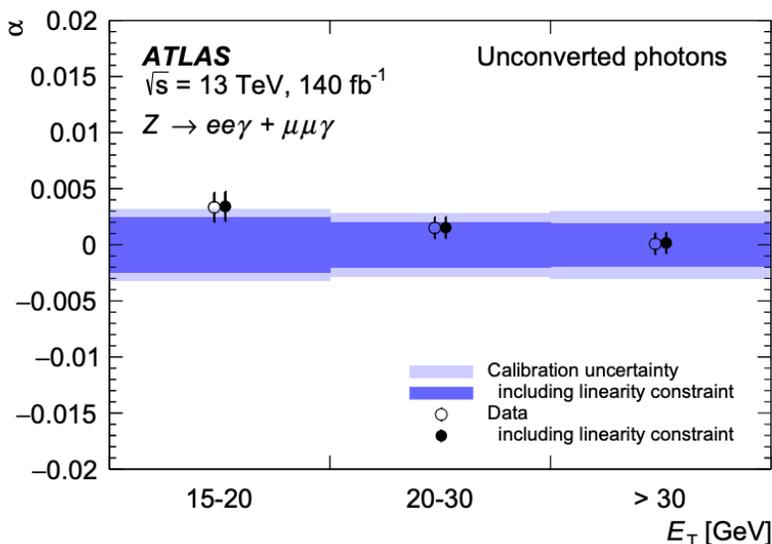
[Phys. Rev. Lett. 131 \(2023\) 151902](#)



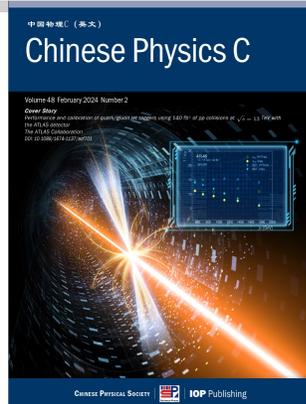
# 探测器性能等研究

## 电子光子刻度及相关研究

高能所、南大  
JINST 19 (2024) P02009

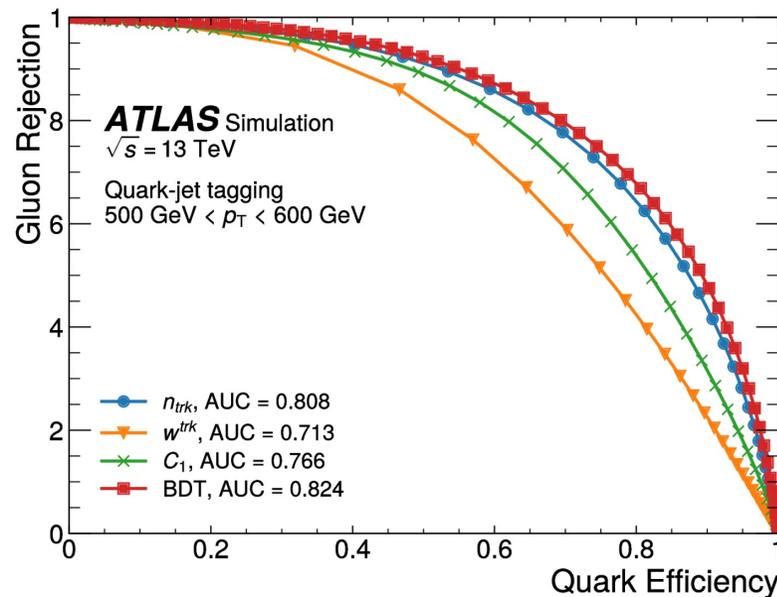


为希格斯质量精确测量打下基础



## 夸克/胶子喷注区分

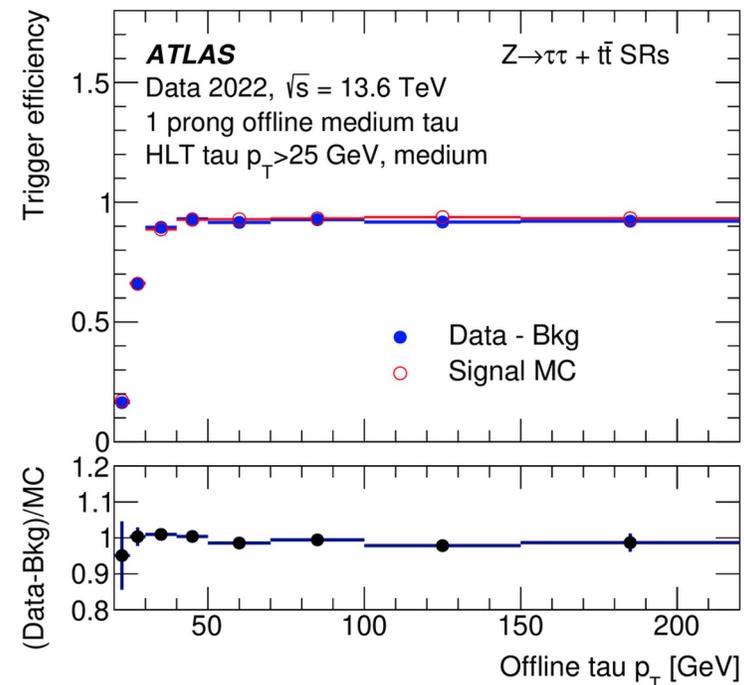
交大/李所  
Chin. Phys. C 48  
(2024) 023001



ATLAS合作组首次于中国期刊上发表论文  
《中国物理C》，入选封面文章

## Tau触发的研究

南大  
JINST 19 (2024) P06029



# 总结

---

本年度ATLAS中国组

→硬件升级方面，中国组逐步起到领导作用

→如担任了HGTD探测器的项目经理与Level-2召集人等多个管理职务

→第三期取数运行进展顺利，取得丰富的物理成果

→本年，中国组有2个新的Level-2 召集人的任命，其中包括标准模型物理召集人

期待顺利完成探测器量产，完成仪器的研制、安装，用于前沿物理研究

**感谢科技部、基金委、中科院长期稳定的支持！**