ATLAS中国组进展总结

郭军（上海交通大学）

代表ATLAS中国组

第七届中国LHC物理工作会议

2021/11/25-28

报告内容

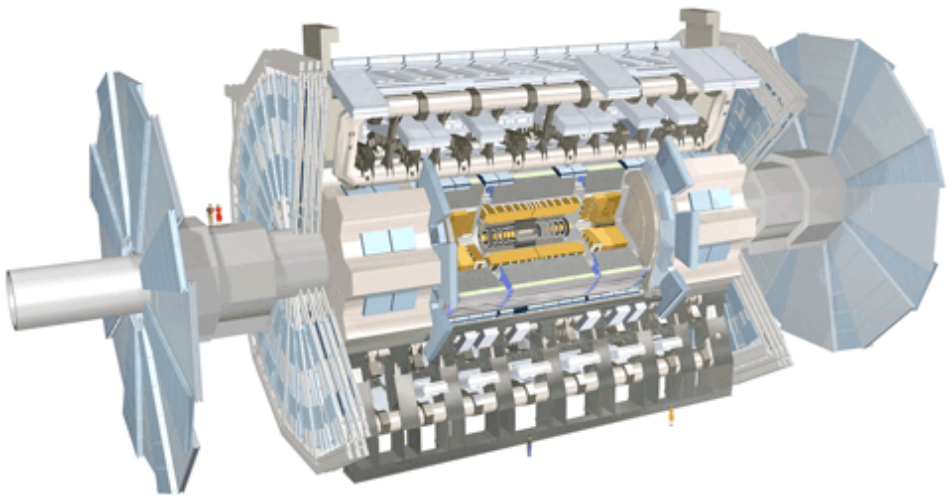
- 研究队伍介绍
- 主要物理成果总结
- 探测器运行和升级工作
- 总结

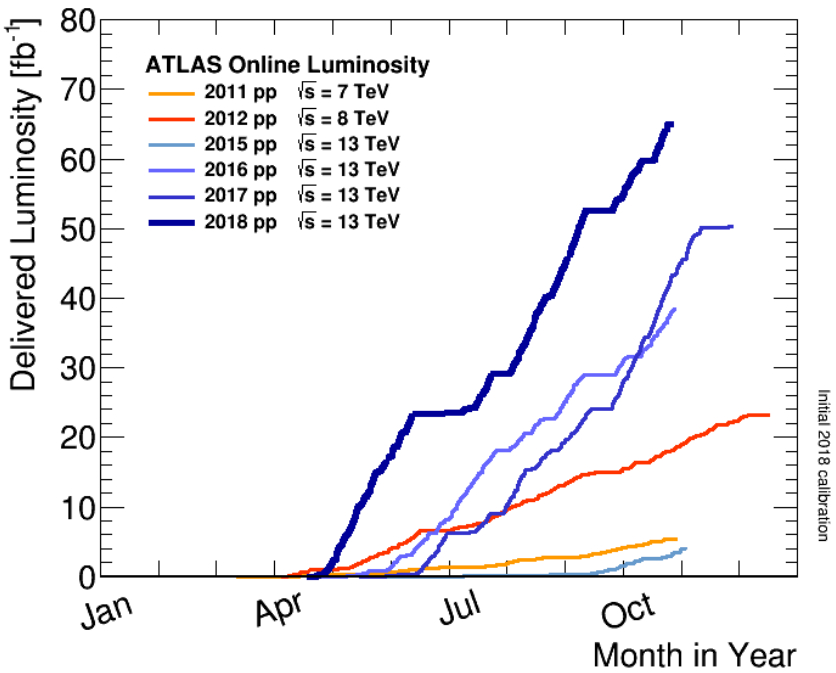
Large Hadron Collider——LHC
大型强子对撞机位于日内瓦的欧洲核子中心CERN

- 周长27公里，横跨瑞士-法国边境
- 世界上最大、能量最高的对撞机 —— 粒子物理研究的最前沿

ATLAS实验

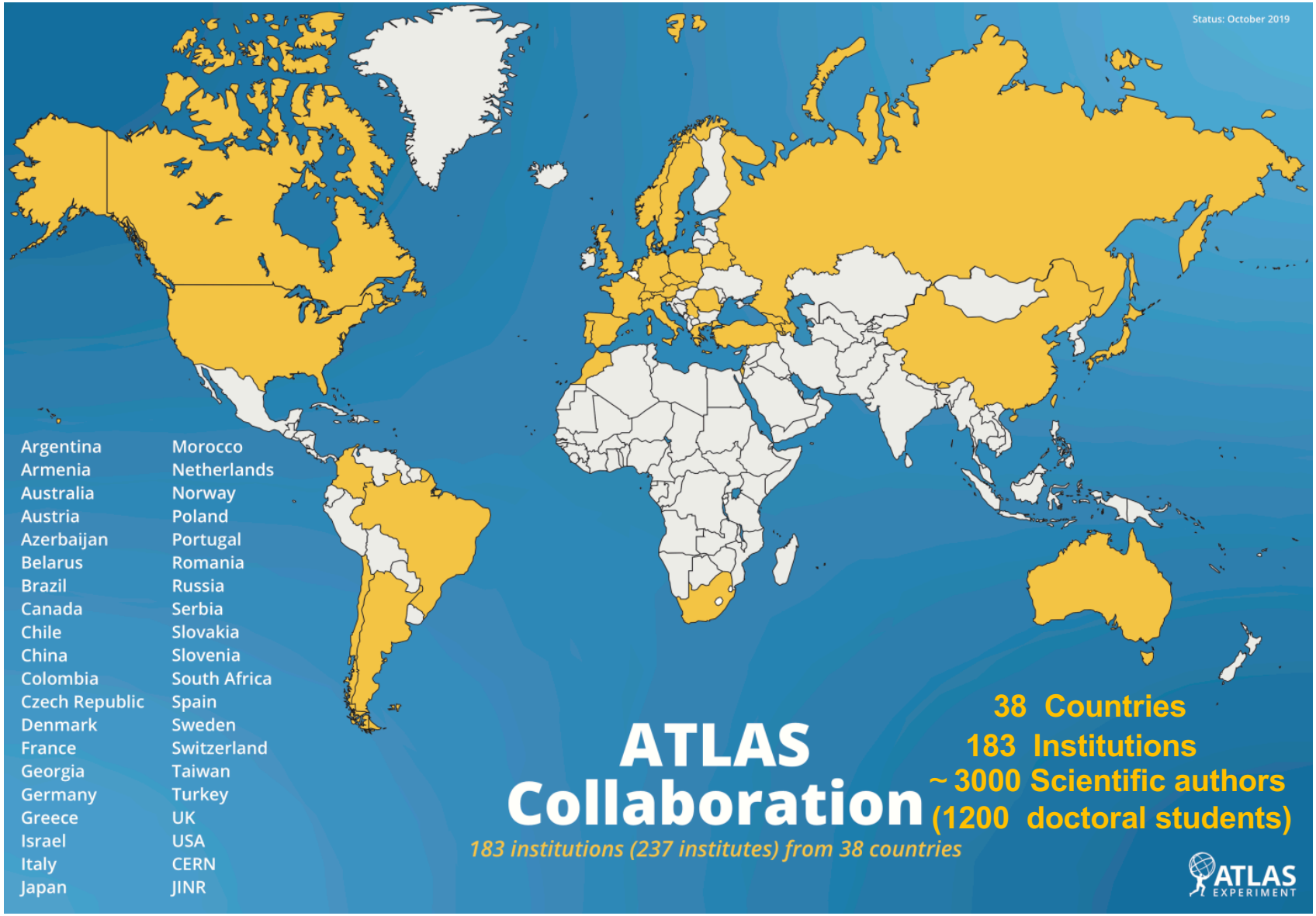
ATLAS是LHC上主要的通用实验之一，是世界上最大的粒子物理探测器。





LHC Run-1：	2010-2012	7-8TeV 质子-质子对撞	~ 26 fb^{-1}
Run-2：	2015-2018	13TeV 质子-质子对撞	~139 fb^{-1}
Run-3：	2022-2024	14TeV 质子-质子对撞	~350 fb^{-1}(预计)

ATLAS合作组


Status: October 2019
Argentina
Armenia
Australia
Austria
Azerbaijan
Belarus
Brazil
Canada
Chile
China
Colombia
Czech Republic
Denmark
France
Georgia
Germany
Greece
Israel
Italy
Japan
Morocco
Netherlands
Norway
Poland
Portugal
Romania
Russia
Serbia
Slovakia
Slovenia
South Africa
Spain
Sweden
Switzerland
Taiwan
Turkey
UK
USA
CERN
JINR
ATLAS Collaboration
183 institutions (237 institutes) from 38 countries
38 Countries
183 Institutions
~ 3000 Scientific authors
(1200 doctoral students)
ATLAS EXPERIMENT

国内外从事相关研究的主要机构

ATLAS合作组包含38个国家、180多个研究机构的近5000名研究者（其中3000名签名作者，约35%是研究生）。

- **ATLAS中国组：**

中科院高能物理所
清华大学
南京大学

IHEP-NJU-THU Cluster(高能所-南大-清华联合组)

山东大学
上海交通大学/李所
中国科学技术大学

USTC-SDU-SJTU Cluster（科大-山大-交大联合组）

中国组6个单位都参了本项目

- **国外著名的研究机构都参加了ATLAS，例：**

欧洲核子中心CERN
德国DESY
德国慕尼黑大学
法国CNRS， Saclay
英国牛津大学，RAL
美国SLAC，BNL
美国哈佛大学
美国密歇根大学
日本东京大学
……

ATLAS中国组

- 两个clusters,6家单位,中国参加LHC实验最大的研究队伍
- ATLAS中国组现有49名教职员工。

- 院士1名
- 万人领军人才2名
- 千人计划3名
- 杰青4名
- 优青2名
- 青千百人18名
- 博士后、学生、工程师和技术人员

IHEP-NJU-THU Cluster(高能所-南大-清华联合组)

- Institute of High Energy Physics(高能所)
  娄辛丑（千人A）、Joao Costa(外专千人)、欧阳群、庄胥爱（百人）、方亚泉（青千）、黄燕萍（青千）、梁志均（百人）、史欣（青千）、李一鸣（青千）、吕峰、单连友、徐达、刘佩莲（青千）、赵梅、张杰
- Nanjing University（南大）
  金山（万人、杰青）、陈申见、张雷（优青）、祁鸣、闵天觉、夏力钢
- Tsinghua University（清华）
  陈新（青千）

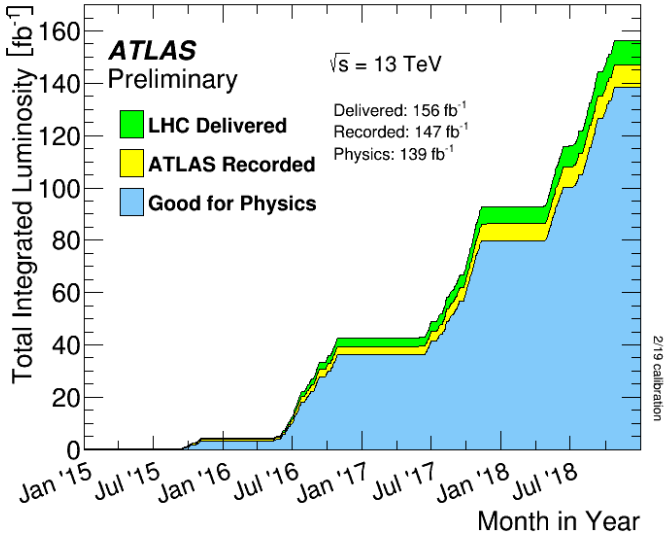
USTC-SDU-SJTU Cluster（科大-山大-交大联合组）

- University of Science and Technology of China(科大)
  赵政国（院士、千人）、韩良（万人、杰青）、蒋一、刘衍文（优青）、刘建北（杰青）、彭海平（杰青、百人）、朱莹春、刘明辉、吴雨生（青千）、孙勇杰、Rustem Ospanov、Antonio Baroncelli、徐来林（青千）、杨思奇
- Shandong University(山大)
  张学尧、冯存峰、祝成光、马连良（青千）、李海峰、李冰
- Shanghai Jiao Tong University(上海交大)
  杨海军（青千）、李亮（青千）、郭军（青千）、周宁（青千）、邬维浩（青千）
- T.D. Lee Institute(李政道研究所) 李数（青千）、刘坤

另外还有博士后、学生和工程师及技术人员，共200多人

主要物理成果总结

- 标准模型Higgs性质研究及相关新物理的寻找
- 标准模型物理过程的测量检验
- 新物理直接寻找：SUSY，Exotics

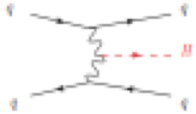
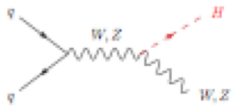
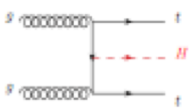


本报告中的物理结果仅限ATLAS中国组作出主导或者主要贡献

- 主导贡献：在该物理分析中担任分析联系人（Analysis Contact）或在ATLAS内部撰写期刊文章或会议文集ATLAS-CONF-NOTE时担任联系编辑（Contact Editor）

- 主要贡献：做合作组内各层级的批准报告（approval talks）或担任文章、会议文集的内部编辑（Editors）或代表合作组在国际会议报告与该分析相关的研究成果

ATLAS 实验 Higgs粒子性质研究全景

Channel	ggF	VBF 	VH 	ttH 	Mass	CP	X-sec.	Width
γγ	★ ★	★ ★	★★	★★	★ ★	★★	★ ★	★
ZZ*(4l)	★ ★	★ ★	★★	★★	★ ★	★ ★	★ ★	★ ★
WW*(lνlν)	★ ★	★ ★	★ ★	★ ★		★★	★★	★ ★
ττ	★ ★	★ ★	★ ★	★		★ ★		
bb	★ ★		★ ★	★ ★				
Zγ	★ ★							
cc			★ ★					
μμ	★★	★ ★	★ ★	★ ★				
invisible	★★	★ ★	★ ★					

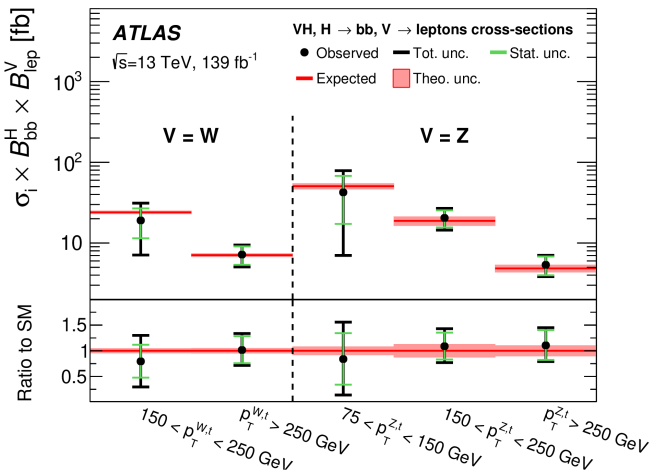
★ ATLAS进行的分析 ★中国组贡献的分析

中国组广泛深入地参与了ATLAS实验的 Higgs 粒子性质测量研究。

希格斯衰变到费米子

VH(→bb)

Eur. Phys. J. C 81 (2021) 178
Phys. Lett. B 816 (2021) 136204

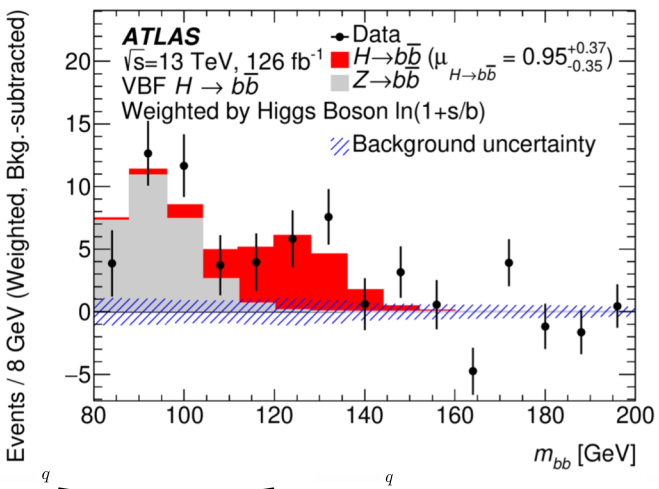


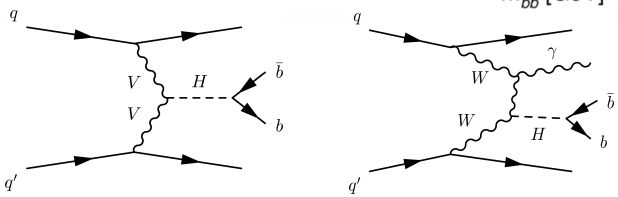
交大、科大、山大、南大作主要贡献：

- Resolved channel：WH/ZH 信号显著度分别为4.0σ/5.3σ
- Boosted channel：ATLAS实验上首次在该分析道研究boosted信号测得VHbb截面0.72+0.39(-0.36)，信号2.1σ显著度

VBF H(→bb)

Eur. Phys. J. C. 81 (2021) 537
JHEP 03 (2021) 268





高能所作出主导贡献

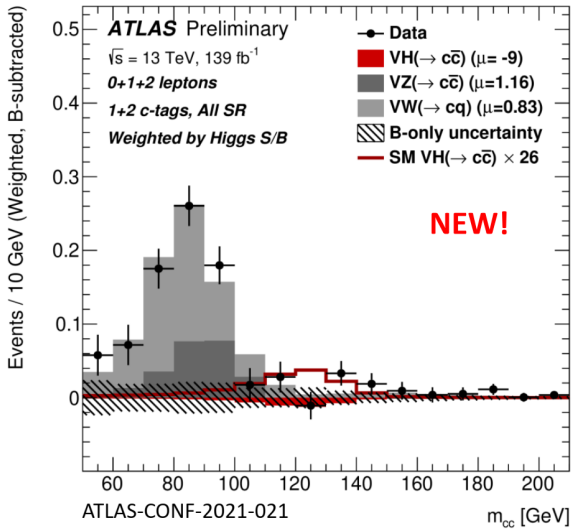
- All hadronic VBF H(→bb)；
- VBF H(→bb)+γ

在VBF末态，以3σ观测显著度（预期值3σ）观测到H→bb过程

提出原创分析末态VBF H(bb)+γ

H→cc

ATLAS-CONF-2021-021



Higgs与粲夸克的汤川耦合是在LHC上未观测到的耦合中最有前景观测到的一个。刚发布，给出当下最精确的VH(cc)过程截面上限：26 x SM prediction at 95% CL

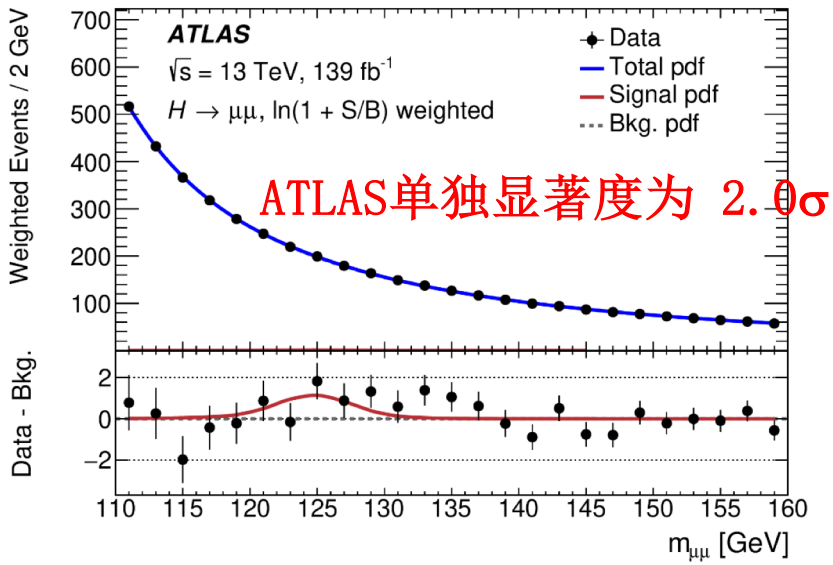
科大作出主要贡献

希格斯衰变到费米子

H→μμ

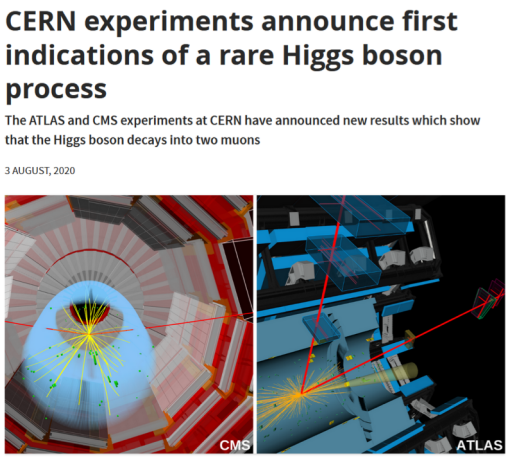
最新结果：PLB 812 (2021) 135980

前序结果：PRL 119 (2017) 051802 编辑推荐



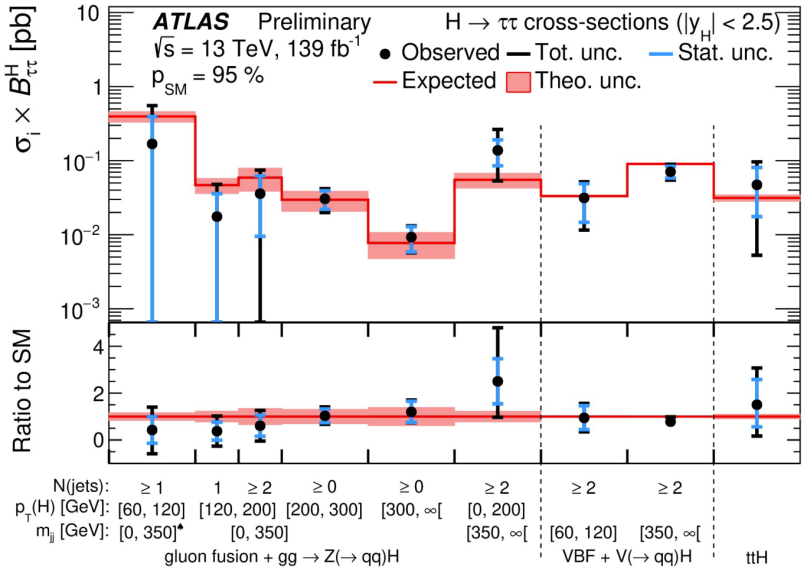
ATLAS单独显著度为 2.0σ

山大、科大、清华作出主导贡献



H→ ττ

ATLAS-CONF-2021-044



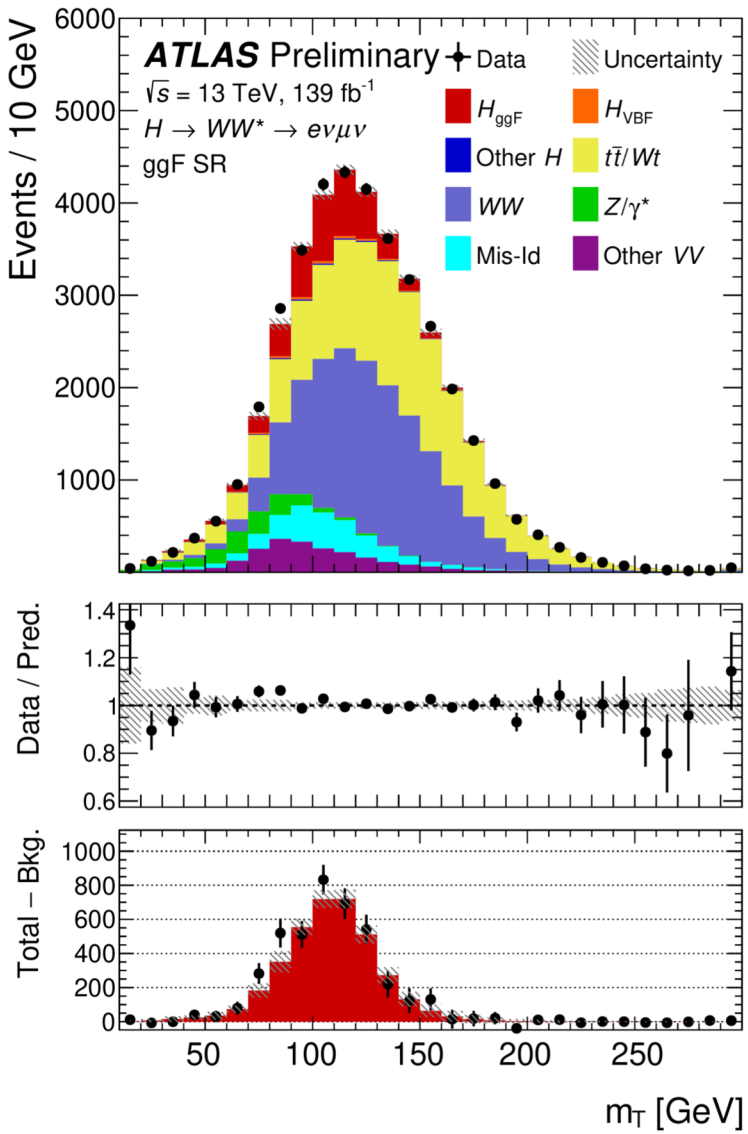
南大作出主导贡献：

担任Analysis Contact；

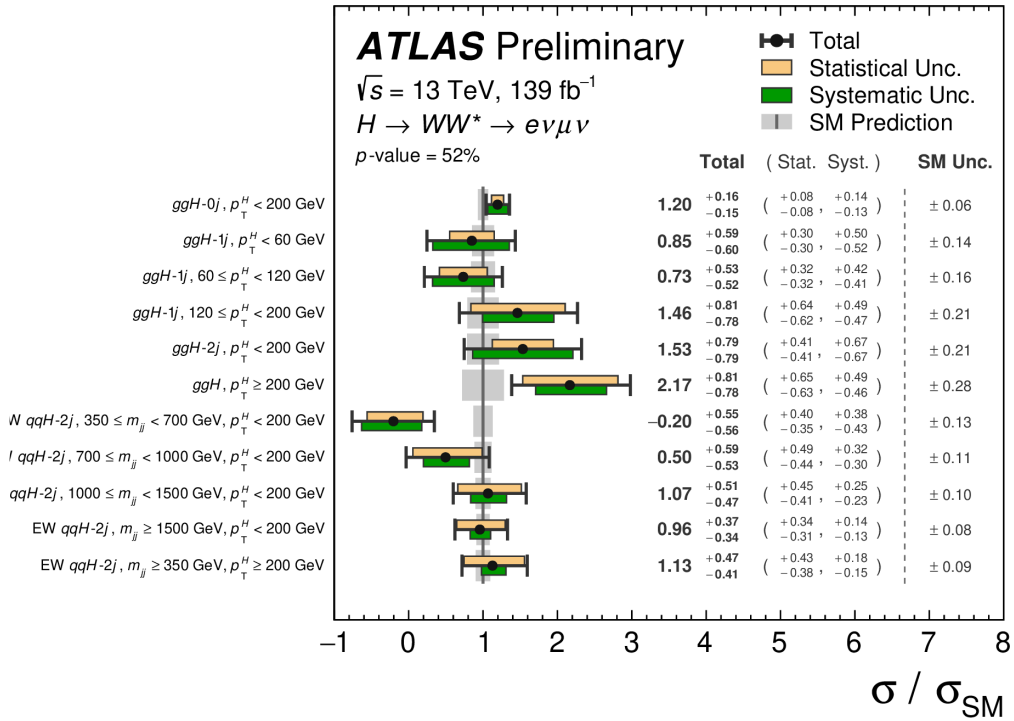
课题组成员今年担任了Higgs 与Leptons工作组Hlepton的召集人convener。

希格斯衰变到玻色子

H→WW



ATLAS-CONF-2021-014



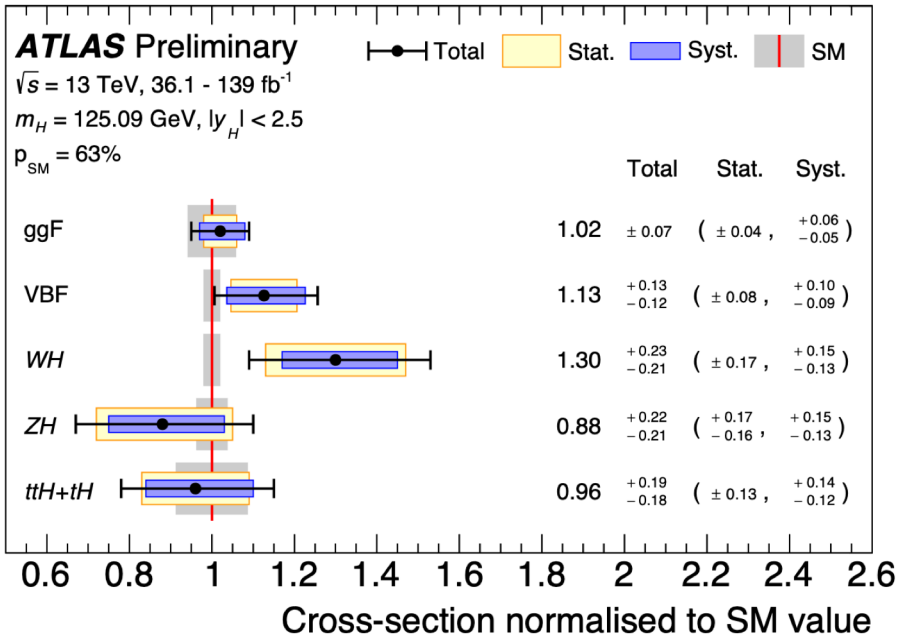
山大作出主要贡献:

- Top pt reweighting
- Study on the same-sign control region
- Statistical analysis for ggF production mode.
- Combination between ggF and VBF

希格斯粒子性质联合测量

综合Higgs的主要产生和衰变模式，更全面地测量Higgs性质并提高信号显著性

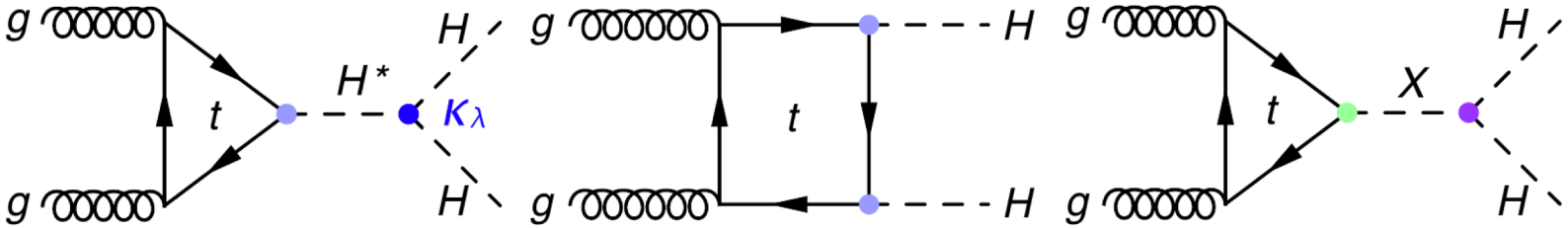
Decay channel	Target Production Modes	$\mathcal{L}$ [fb^{-1}]
$H \to \gamma\gamma$	ggF, VBF, $WH, ZH, t\bar{t}H, tH$	139
$H \to ZZ^*$	ggF, VBF, $WH, ZH, t\bar{t}H(4\ell)$	139
	$t\bar{t}H$	36.1
$H \to WW^*$	ggF, VBF	139
	$t\bar{t}H$	36.1
$H \to \tau\tau$	ggF, VBF, $WH, ZH, t\bar{t}H(\tau_{\text{had}}\tau_{\text{had}})$	139
	$t\bar{t}H$	36.1
$H \to b\bar{b}$	WH, ZH	139
	VBF	126
	$t\bar{t}H$	139
$H \to \mu\mu$	ggF, VBF, $VH, t\bar{t}H$	139
$H \to Z\gamma$	ggF, VBF, $VH, t\bar{t}H$	139
$H \to inv$	VBF	139



ATL-CONF-2021-053

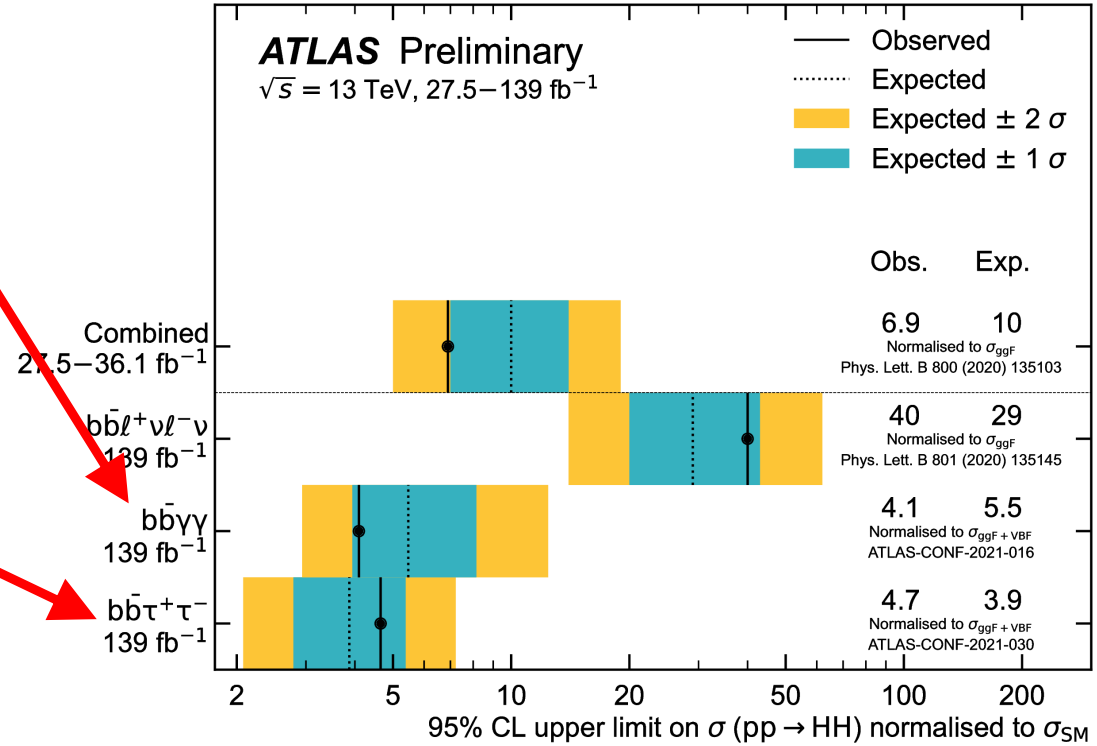
- 全局信号强度为μ=1.06±0.06(6%)，ttH产生模式>5σ，与标准模型符合
- 高能所作出主导贡献；交大、南大和山大作出主要贡献：在该分析中负责系统检测、统计分析，发表Conf-note【ATLAS-CONF-2021-053】（support-note editor, approval talk, analysis contact）
- 正在进行full-Run2的Higgs性质联合测量

双希格斯粒子过程寻找



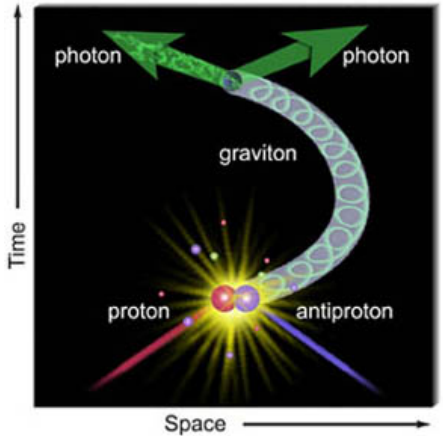
- HH→bb**γγ**:
  - ATLAS-CONF-2021-016
  - 南大和高能所作出主导贡献
  - 课题组成员担任 Analysis contact

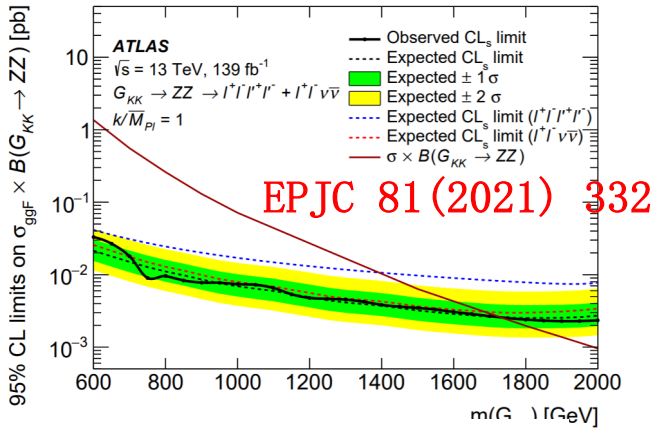
- HH-> bb**ττ**
  - ATLAS-CONF-2021-030
  - 南大作出重要贡献
  - Approval talk



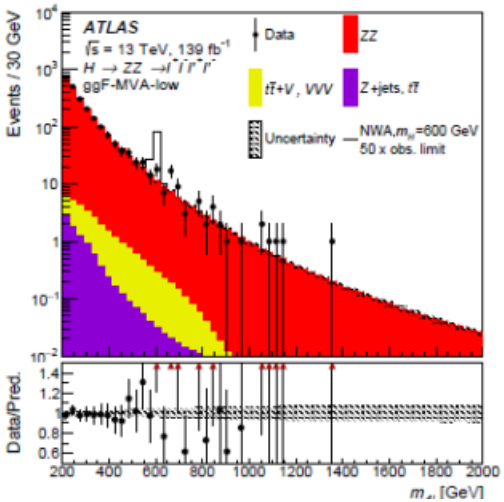
对HH的两大核心课题做出重要贡献

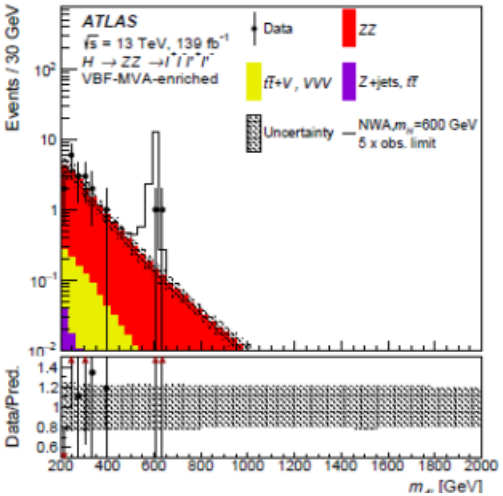
希格斯粒子相关新物理





EPJC 81(2021) 332





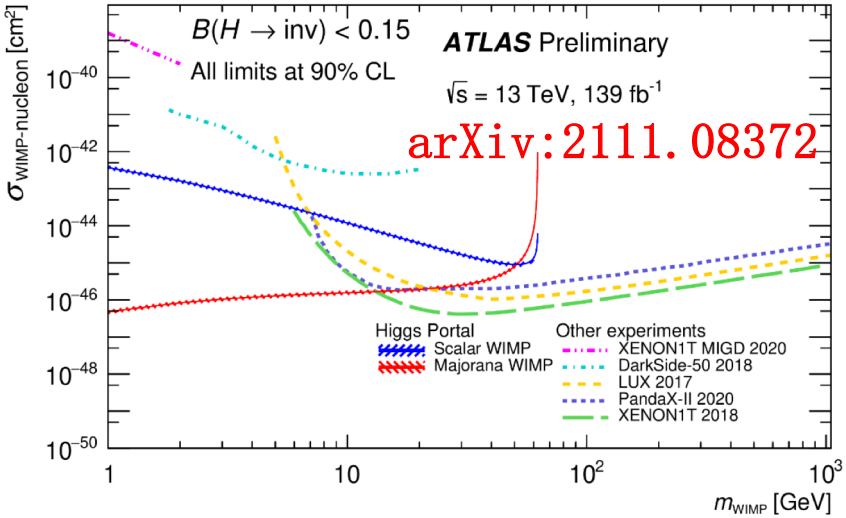
通过ZZ末态寻找重质量的希格斯玻色子，或者Randall-Sundrum模型预言的引力子，

$m(G_{KK})$ < 1.75 TeV excluded at 95%CL

科大主导贡献，分析联络人，文章editor等

交大主要贡献，note editor和分析approval报告

H→ invisible 直接寻找 + Mono-Z暗物质寻找，利用ll+MET末态



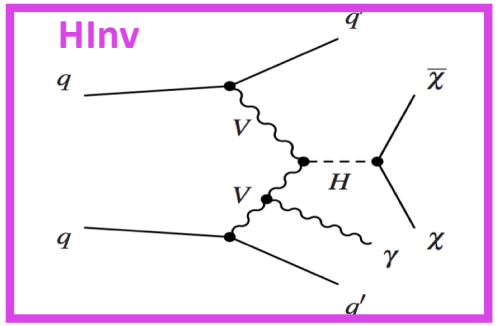
arXiv:2111.08372

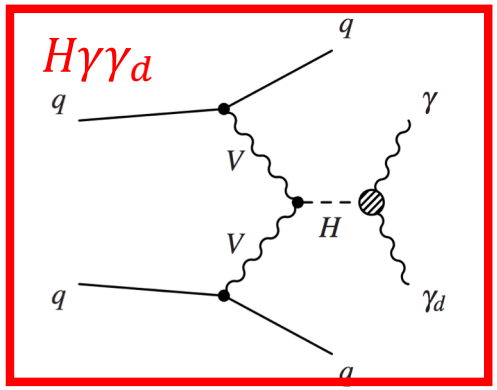
科大主导ZH → ll + invisible寻找，是mono-Z分析中的最好精度

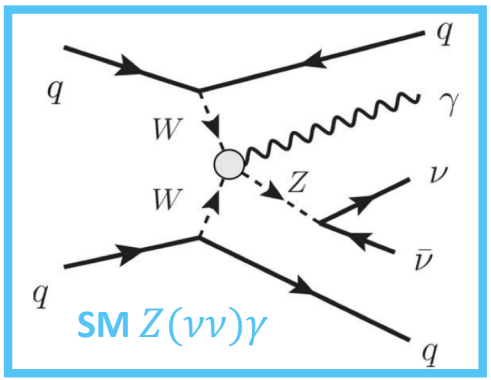
(H→inv) < 19% at 95% CL

希格斯粒子相关新物理

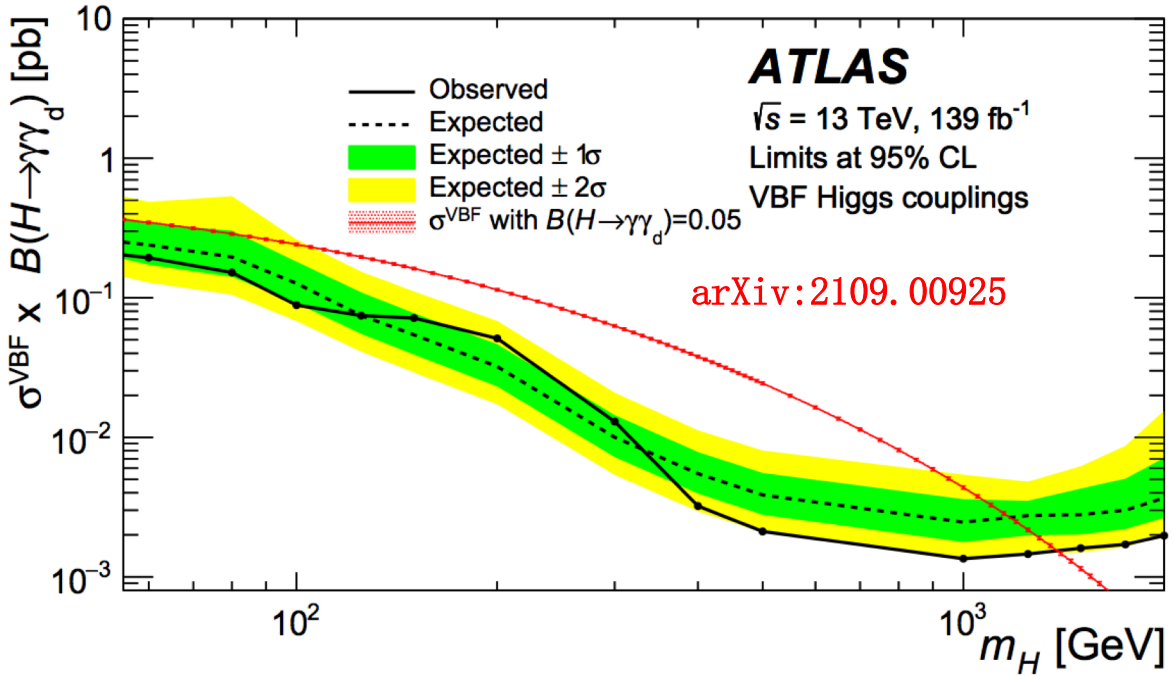
- 在VBF过程，光子和E_T^{miss}末态作了3个不同的分析
- 文章投稿到EPJC，高能所作了主要贡献
  - H →invisible寻找
    - 首次在VBF+γ+E_T^{miss}道上寻找Higgs不可见衰变
  - H → $\gamma\gamma_{dark}$暗光子寻找
    - 首个ATLAS上H → $\gamma\gamma_d$的分析
  - SM EWK Z(νν)γ测量
    - ATLAS首次观测到该过程信号：5.2σ（期望5.1σ）







$H \to \gamma\gamma_{dark}$暗光子寻找的截面上限

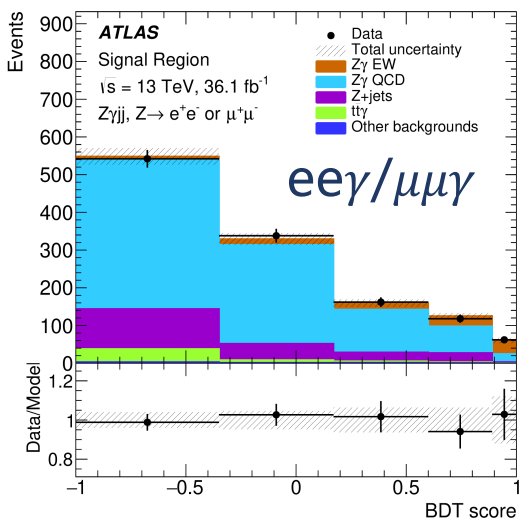


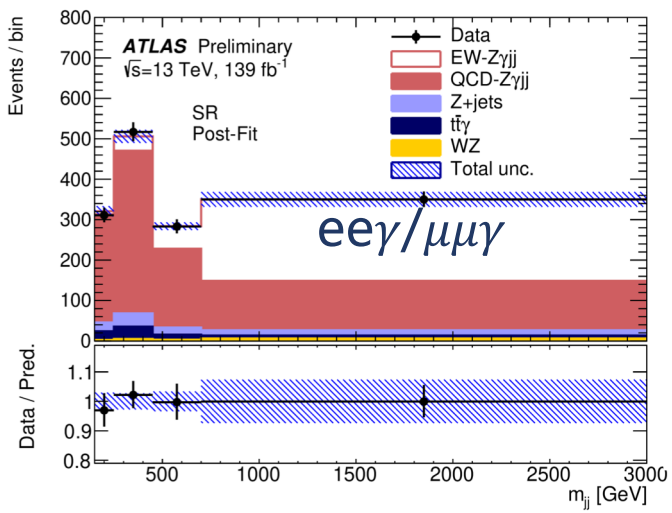
矢量玻色子散射(VBS)

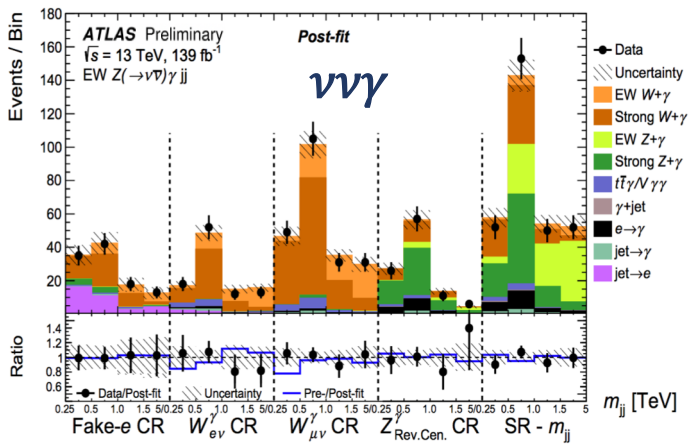
通过测量VBS Zγ散射过程：eeγ/μμγ/ννγ末态

交大作出主要贡献

- 13TeV 36fb^{-1}：eeγ/μμγ分析道获得ATLAS VBS Zγ首次显著性测量evidence(4.1σ)，承担干涉效应理论计算及测量系统误差估计
- 13TeV 139 fb^{-1}：承担eeγ/μμγ事例选择、多变量分析优化、系统误差分析，担任VBS Zννγ Editorial Board。获得ATLAS VBS Zllγ首次observation(10σ)，LHC首次VBS Zννγ observation(5.2σ)



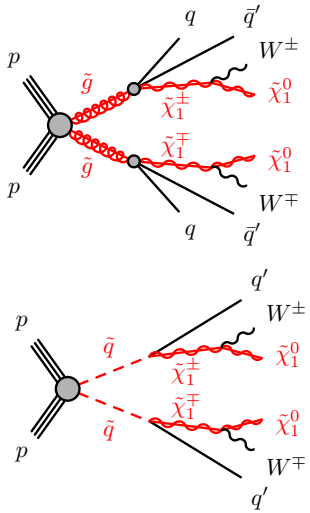




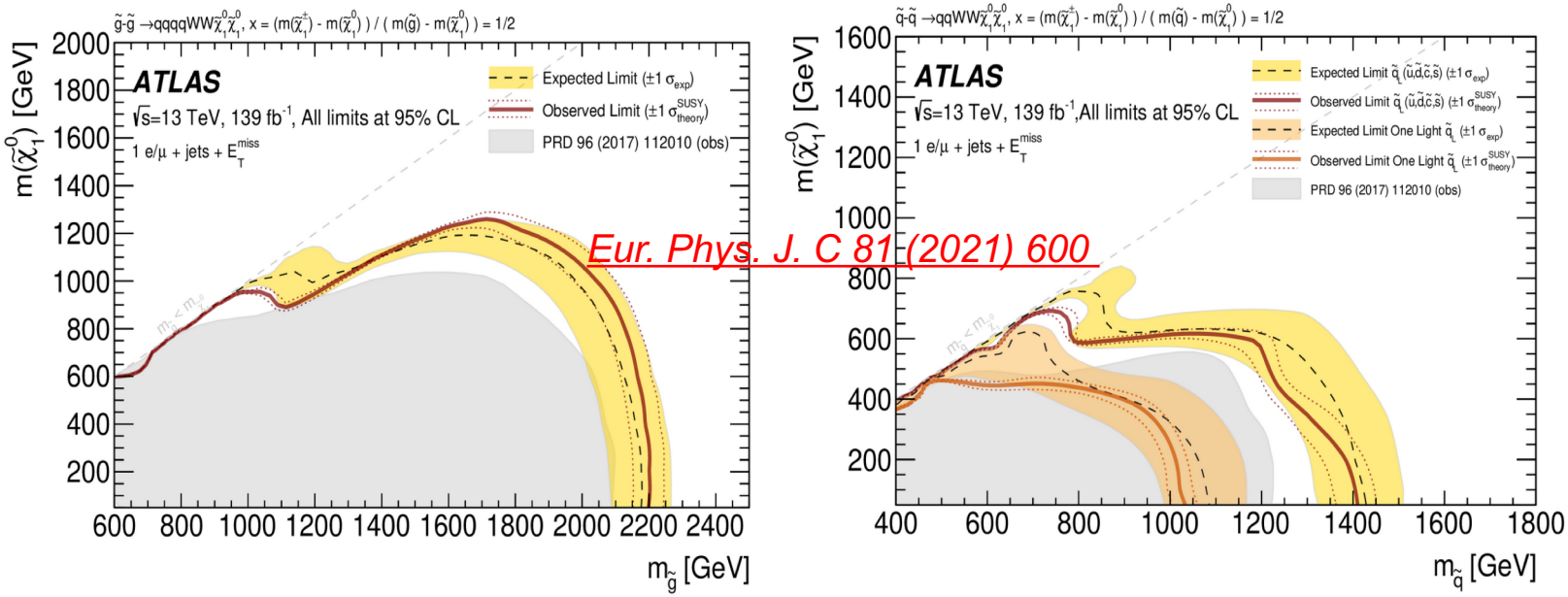
Phys. Lett. B 803 (2020) 135341 ATLAS-CONF-2021-038 arXiv:2109.00925

1st Evidence at ATLAS 1st Observation at ATLAS 1st Observation at LHC

SUSY粒子寻找



- 通过单轻子末态寻找gluino和squark粒子：该过程产生截面较大，末态要求一个轻子可有效压低QCD本底，对新物理的寻找比较敏感。是SUSY寻找的黄金衰变道，也是Run2的热门课题
- 95%置信度下 2.2（1.4）TeV以下的gluino （squark）粒子基本被排除
- 发表了1篇文章 *Eur. Phys. J. C 81 (2021) 600*，高能所组成员担任该分析的联系人、编辑和通讯作者，作了主导贡献

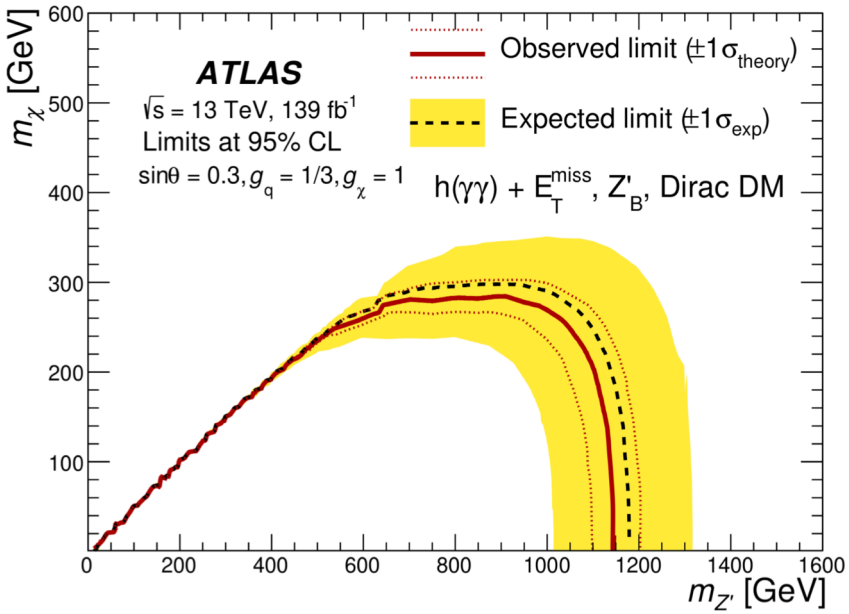


Eur. Phys. J. C 81 (2021) 600

暗物质粒子寻找

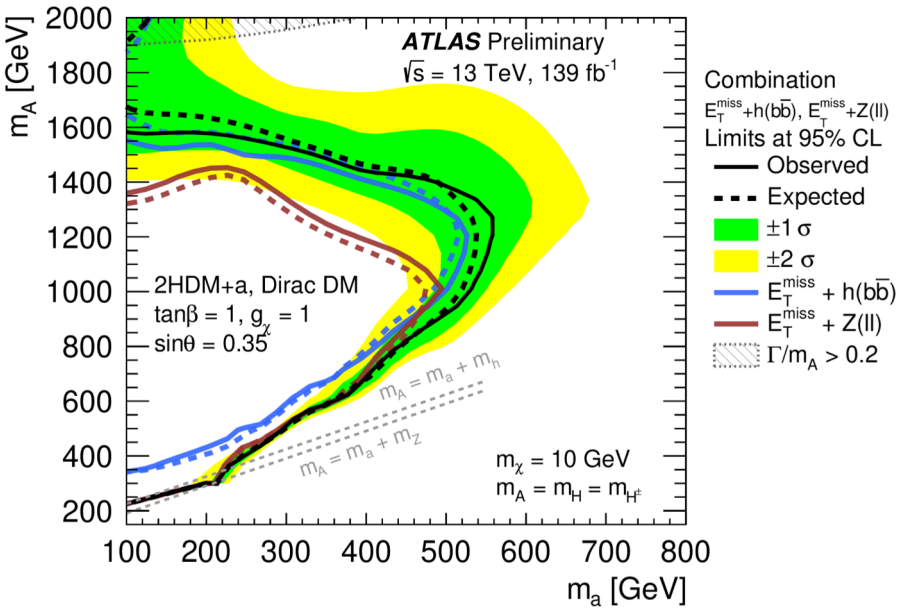
H(γγ)+MET

JHEP 10 (2021) 13



2HDM-a模型的联合分析

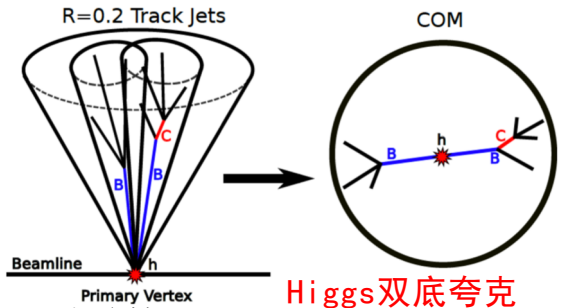
ATLAS-CONF-2021-036



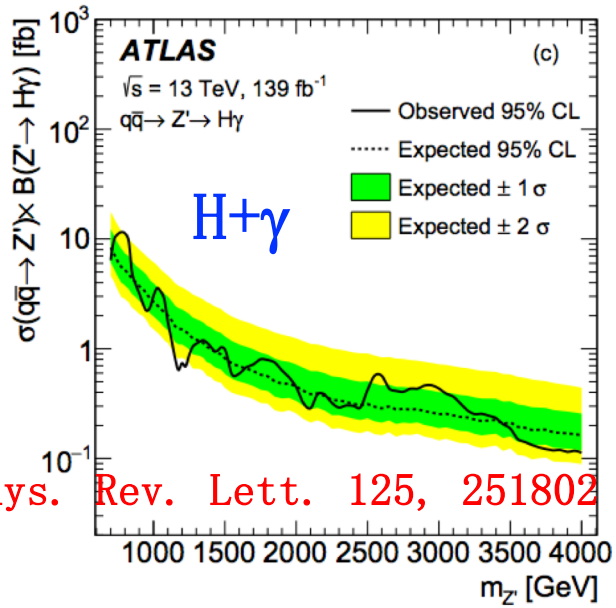
- 得到2HDM+a, Z’B 和Z’2HDM模型的上限（ 95%置信度），并在Z’B模型中与暗物质直接测量结果进行比较，相对之前分析结果提高了排除范围
- 负责事例选择、横向丢失能量的性能研究、暗物质解释及统计分析，给出approval talk，高能所和南大主导该分析，发表一篇文章JHEP 10 (2021) 13
- 基于benchmark 2HDM-a模型的联合分析： ATLAS-CONF-2021-036，科大主导贡献

新物理：V/H+γ末态寻找

- 在H(bb)+γ的末态寻找新粒子，发表在Phys. Rev. Lett；原创性的提出Higgs双底夸克tagging的算法
- 新算法显著提高高能区信号灵敏度，得到PRL评委认可；高能所与交大作主导贡献



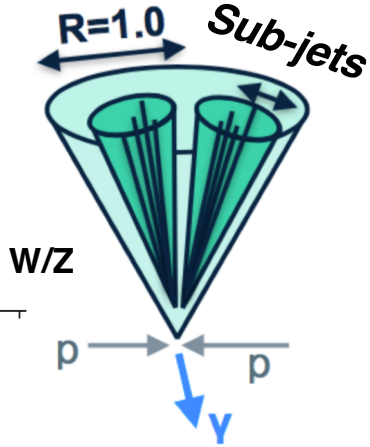
传统算法　　Higgs双底夸克tagging的新算法

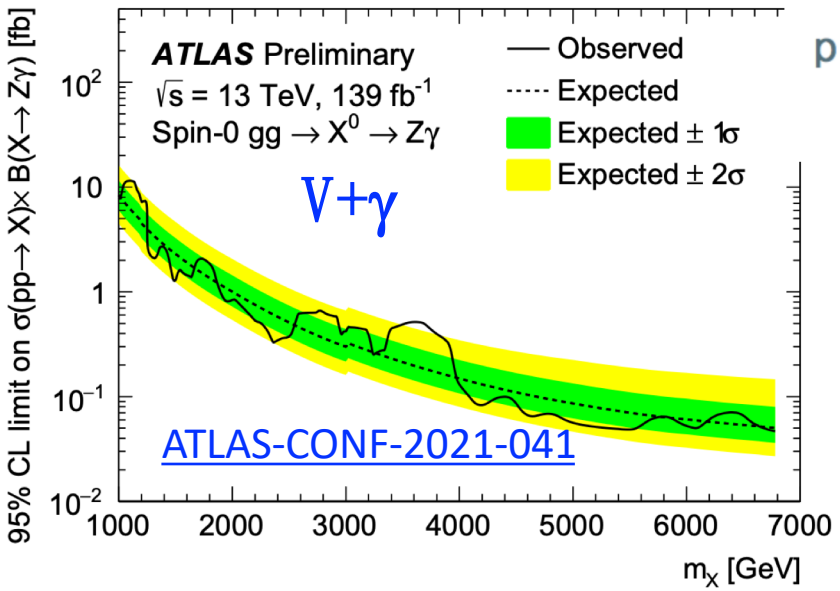


Phys. Rev. Lett. 125, 251802

在W/Z+γ的强子末态寻找新粒子

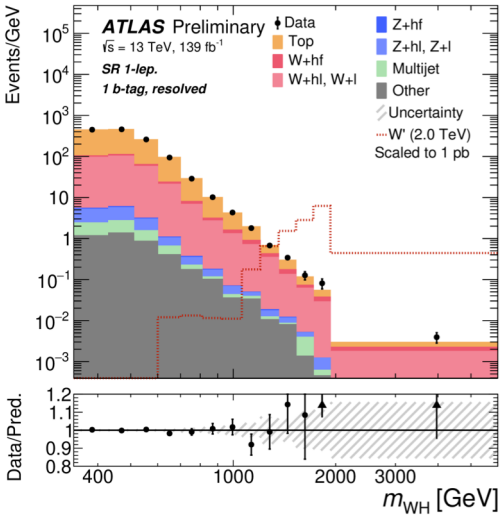
- 相对上一轮ATLAS(36.1fb^{-1})结果：$m_{Z'} > 2.5TeV$ 截面上限的限制强了3~5倍
- 高能所与交大作主导贡献

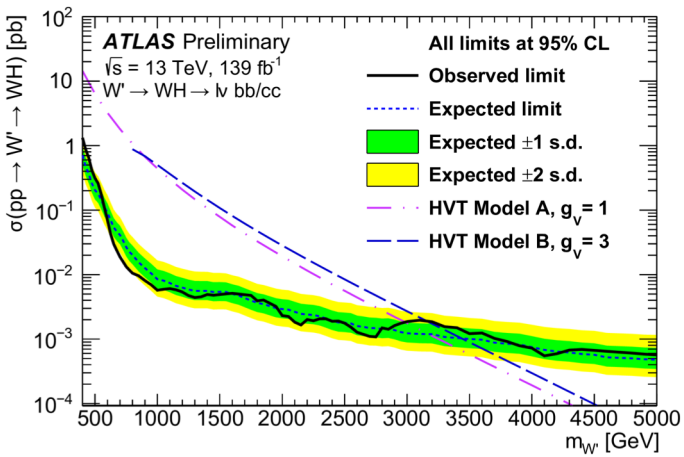




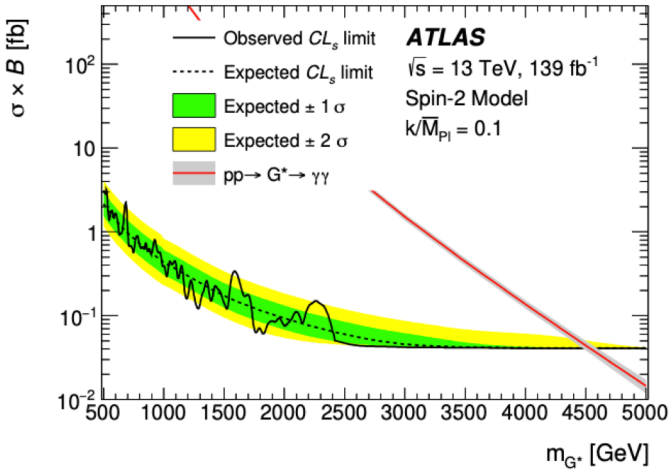
新物理：其他重粒子寻找

山大主要贡献： W’ ->WH->lνbb
ATLAS-CONF-2021-026

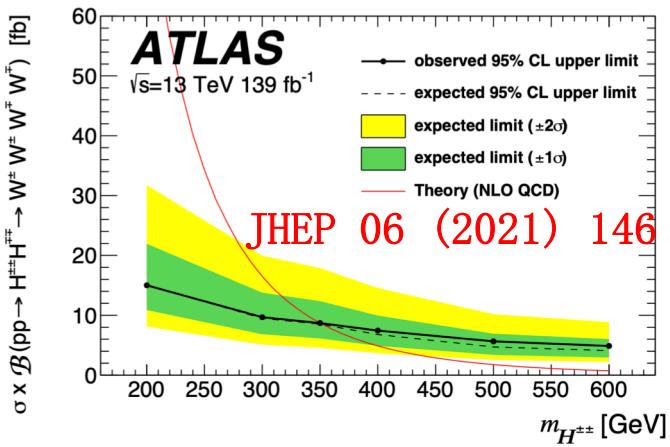




科大主要贡献：寻找双光子共振态；自旋0或2
PLB 822 (2021) 136651



科大主导贡献：$H^{++} \rightarrow W^+W^+$



利用全部Run 2数据，通过WH→lνbb过程寻找共振态W’，其中H是标准模型中125 GeV的希格斯粒子。

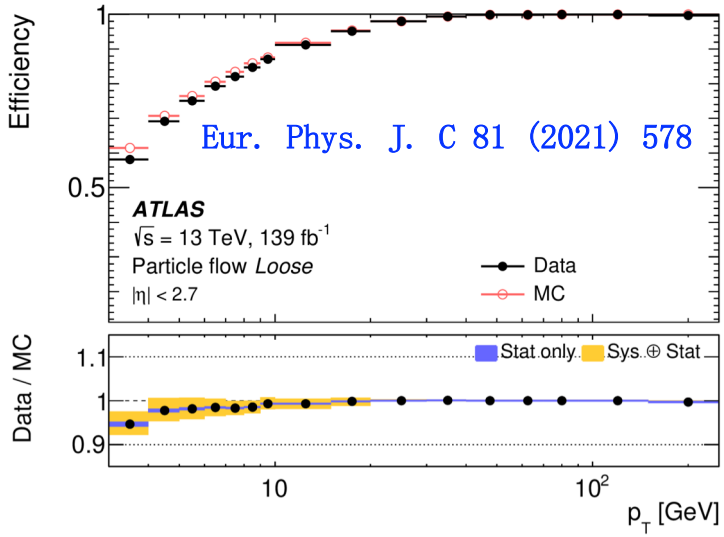
对于HVT benchmark Model A，质量低于2.95 TeV被排除，

对于HVT benchmark Model B，质量低于3.15 TeV被排除。

第一次在LHC上寻找此类粒子

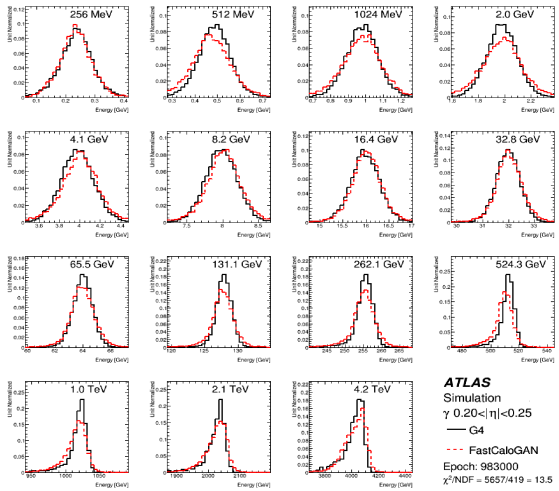
探测器运行和Performance

arXiv:2109.02551



ATLAS fast simulation AtlFast3,,

- ATLAS 新的快速模拟方法。基于深度学习的生成对抗网络GNN极大地改进的快速模拟的精度和速度
- 南大负责GNN方法的重新优化和tau的validation

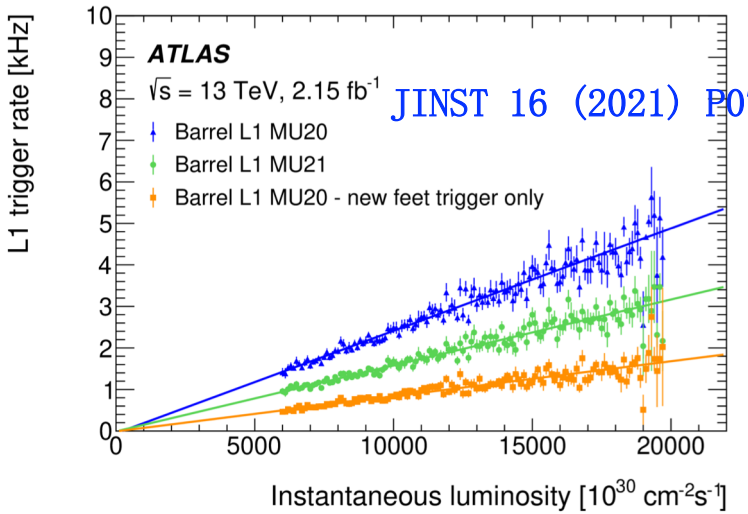


基于Run-2 完整数据测量缪子重建与鉴别效率

pT 3GeV~x00GeV, |η|< 2.7

大统计量Z→ μμ 和 J/Ψ → μμ数据与蒙卡样本

交大负责前向缪子鉴别与效率测量



JINST 16 (2021) P07029

"基于双底夸克衰变末态强子喷注次级结构的质量无关标定法研究与刻度"

交大主导贡献：ATL-PHYS-PUB-2021-35

RPC DQ: 对RPC性能的系统性研究

科大作出主导贡献

LHC升级计划

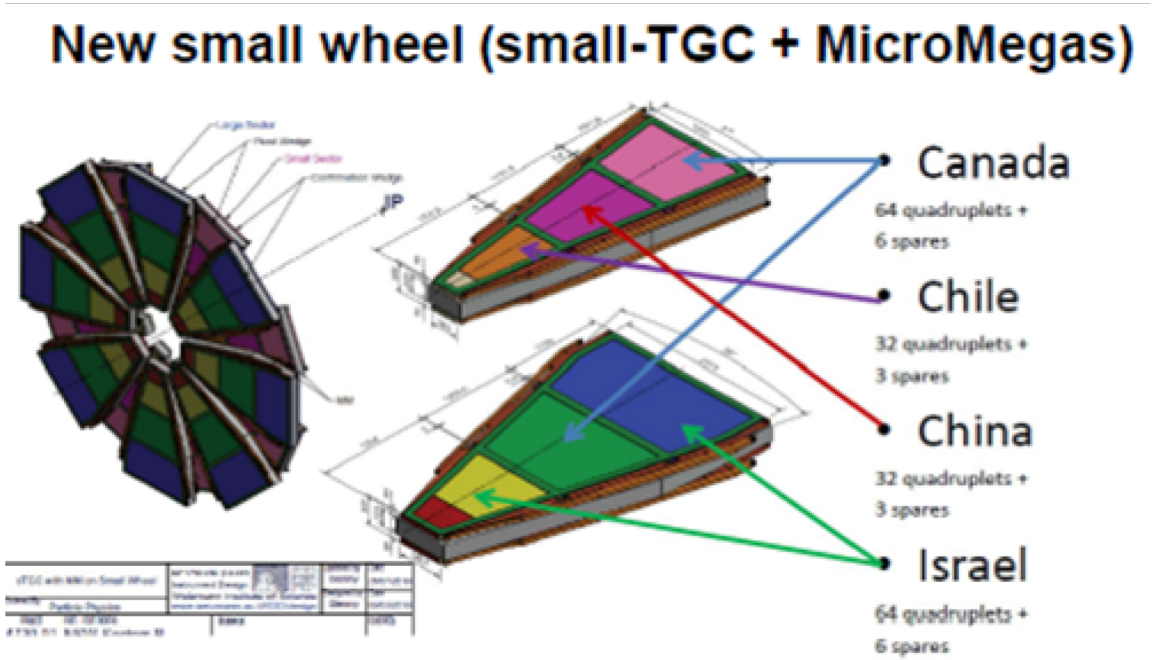
ATLAS Phase-1
NSW: 科大/山大

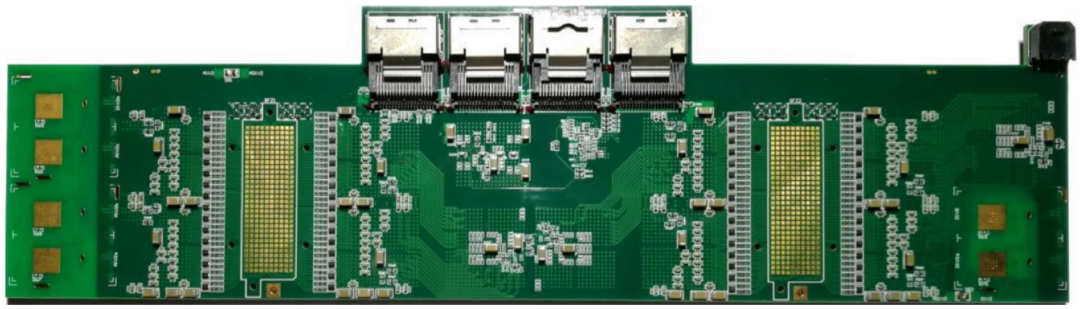
ATLAS Phase-2
ITK: 高能所/清华
RPC: 科大/山大/交大
HGTD: 6家单位

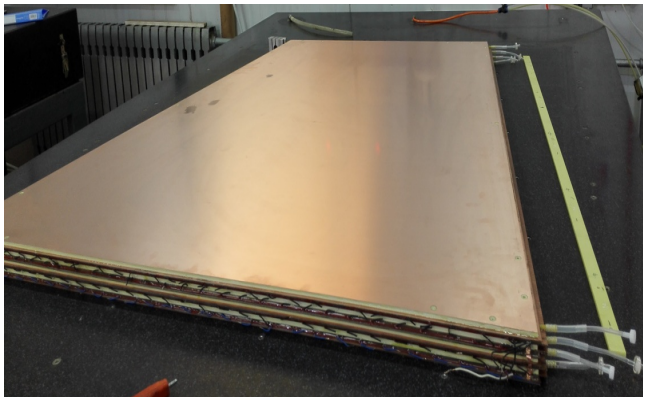
中国组NSW项目

科大/山大

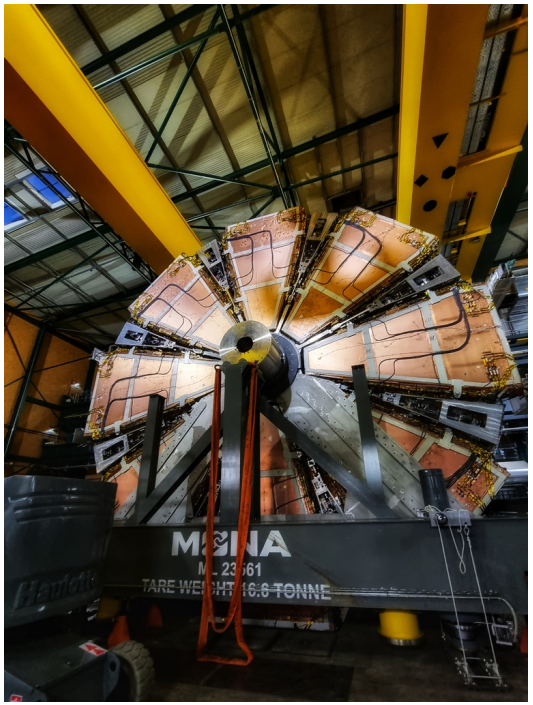
- 山大完成全部160 sTGC chambers生产
- 科大承担生产1840 Front-end readout (FEB) boards







探测器已经放进ATLAS



Phase-II RPC升级

科大/山大/交大

承担ATLAS Phase-II RPC升级任务，开展探测器性能研究，并为工程建造做好准备。

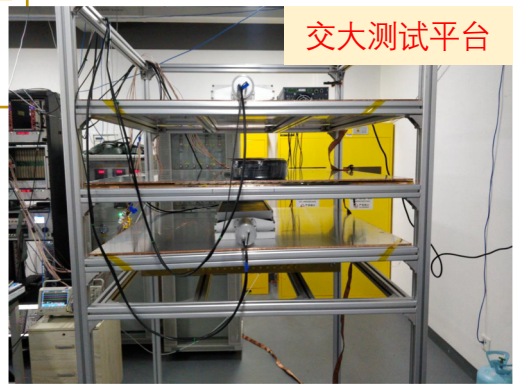
科技部重点研发项目已结题（2021.6）

- 蜂窝结构读出板方案已被RPC升级项目采纳
- 论证了双端读出方法的性能，满足升级要求
- 广泛开展RPC性能研究：
  信号传输性能、气体流动性、前端电子学……
- 建立批量生产和测试工艺流程和相关大型平台
  制作工艺手册&质量跟踪流程、性能测试的在线监测程序
  大面积宇宙线触发系统、大规模TDC系统、读出板厚度质量检测方法

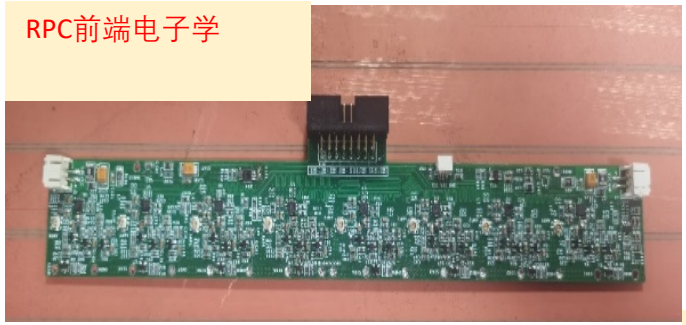
大面积宇宙线触发系统（山大）

蜂窝结构读出板

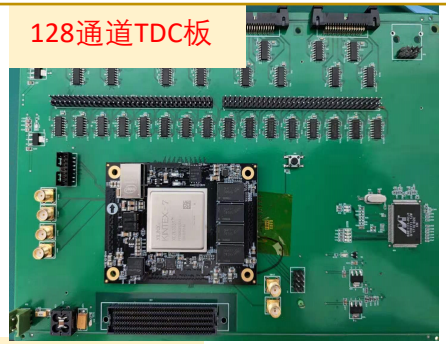
交大测试平台



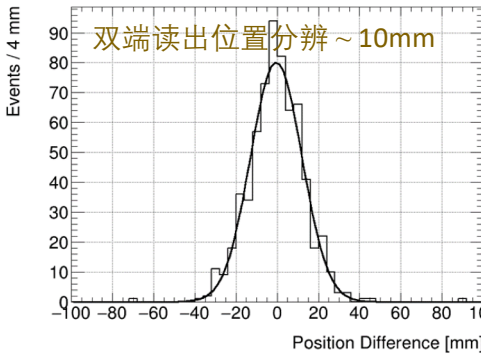
RPC前端电子学

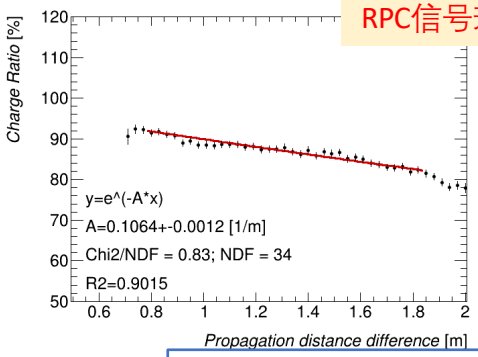


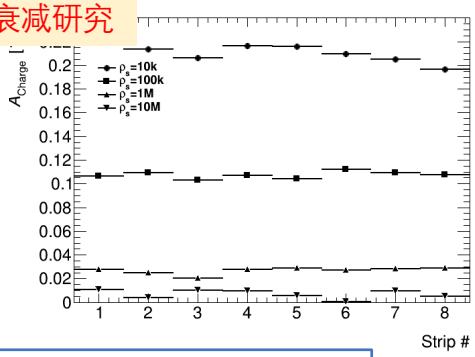
128通道TDC板

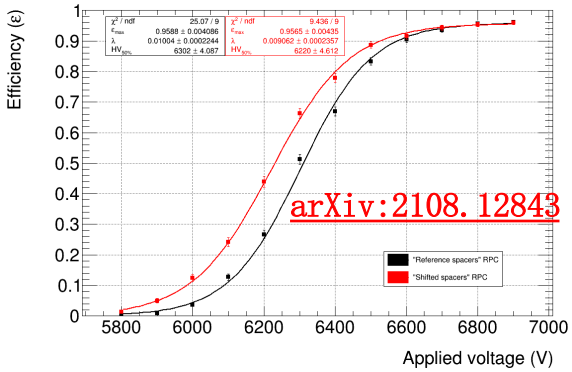


RPC信号衰减研究









MIP Eff. ~ 95.7%

RPC气室设计优化

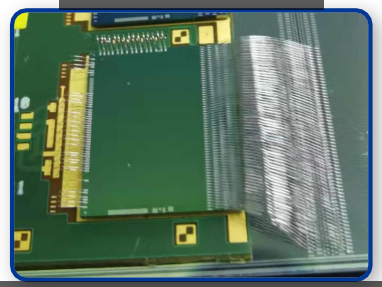
非灵敏区面积减少~24%

X.Y. Xie, et al., *Measuring attenuation in signal propagation in Resistive-Plate Chambers*, **JINST** V16 (2021) P01001

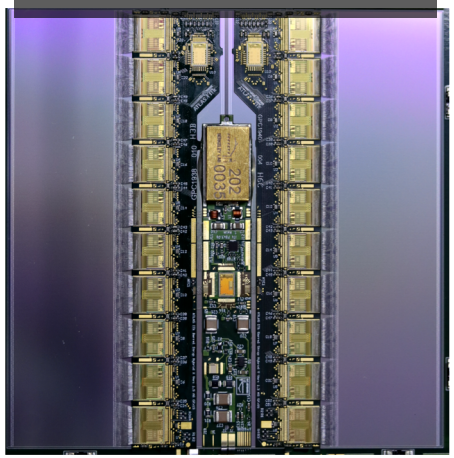
ATLAS 硅微条探测器中国组进展（高能所/清华）

- 承担研制1000个桶部硅微条探测器模块（硅传感器表面约10平方米，占总共的10%）
- 已预研制出若干电子学级别探测器模块
  - 已掌握高速线邦定、自动精准点胶、高精度非接触测量等关键技术
- 正在准备模块站点审核、读出芯片与传感器的抗辐照研究

高速线邦定



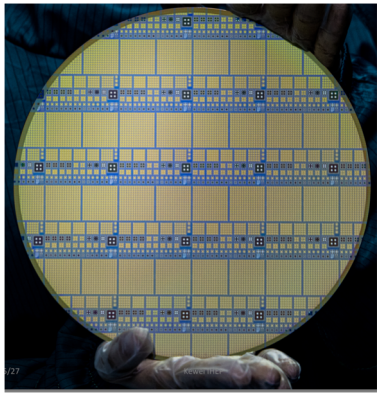
短微条模块 (5120道)



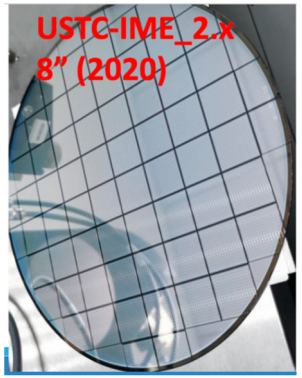
高颗粒度高时间分辨探测器（HGTD）

- 中国组在项目中占主导地位，担任项目经理等多个领导职务。
  - 高能所Joao Guimaraes da Costa 担任项目经理，中国组首次担任ATLAS子探测器系统项目经理
  - 高能所梁志均：HGTD module assembly coordinator
  - 科大刘衍文：HGTD Speakers committee (member 2021,chair 2022)
  - 科大吴雨生：HGTD simulation/performance/physics coordinator
  - 高能所张杰：L3 coordinator Peripheral electronics & module flex
  - 高能所赵梅：L3 coordinator for Sensors
  - 高能所樊磊：L3 coordinator for HV
- 传感器：高能所与科大分别自主研制国产超快硅传感器（LGAD），都获得重大进展
  - 中国组与日本滨松、意大利竞争ATLAS的订单；高能所与科大的传感器性能优秀：自主设计，国内流片。
  - 高能所和科大传感器，都得到非常好抗辐照性能；时间分辨35皮秒@300V，低电压避免了单粒子效应
- 高能所/南大主导外围电路板的设计和制作，研制出电路板读出系统原型机，设计和提供高压电源
- 探测器模块：中国组主导模块研制，中国组将组装～4000个模块，占项目45%
- ASIC超快读出芯片：中国组承担ASIC的50%晶圆级测试任务，与抗辐照测试任务。

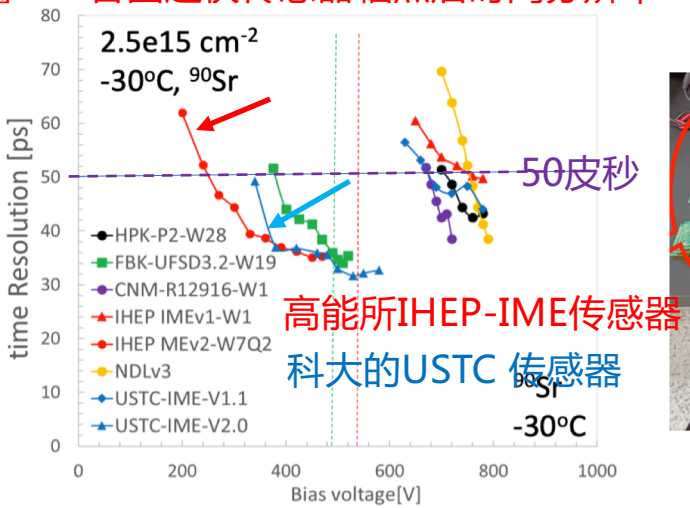
高能所的硅传感器晶圆



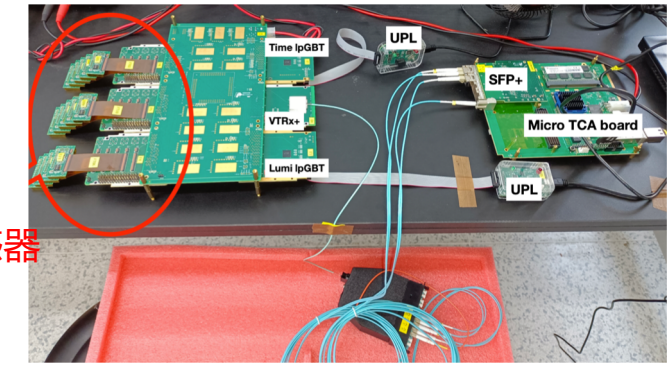
科大硅传感器晶圆



各国超快传感器辐照后时间分辨率



高能所与南大研制的
外围电路板读出系统原型机



中国组成员在ATLAS合作组内的显示度大幅度提高

- 执行委员会委员： 金山（南大 2016-2017）；Joao(高能所 2021-至今)
- ATLAS合作组委员会顾问组成员：5人次
  - 金山 （高能所 2010-2011）
  - 赵政国（科大 2012-2013）
  - 庄胥爱（高能所 2016-2017）
  - 杨海军（交大 2018-2019）
  - 黄燕萍（高能所 2020-2021）
  - Joao （高能所 2022-2023）
- HGTD 项目经理: Joao （高能所 2021-至今 ）；项目副经理： 2020-2021
- HGTD Risk Manager: 张照茹 （高能所 2021-至今 ）
- HGTD Steering Committee: Joao、吴雨生、梁志均、张杰、赵梅、张照茹(2020-至今)
- HGTD Speakers committee: 科大刘衍文(member 2021,chair 2022)
- Speakers Committee :吴雨生（科大 2018-2021, 2020-2021 Chair）
- Speakers Committee 顾问组: 陈新 （清华 2017-2018）
- Publication committee : 梁志均（高能所 2020-至今）
- ITK Institute Board: 娄辛丑 （高能所 2016-至今 ）
- Pixel Institute Board: Joao （高能所 ）
- Calorimeter Institute Board: 郭军 （交大 2020-至今 ）
- Pixel Technical Coordinator and Steering Committee: JuanAn Pascual （高能所）
- Muon IB Chair: Antonio Baroncelli （科大 2017-2019）
- Resource Manager of the Phase-2 Muon Upgrade: Antonio Baroncelli(科大2019-至今)

中国组在ATLAS合作组内职务 近几年统计

物理组和基础软件组：

- Nishu Nishu（交大）：PMG jet&photon subgroup convener（2019.04-2021.04）
- 徐达（高能所） ：SUSY EW Group Convener (2019-2020)
- 李数 （李所/交大）： LHC(ATLAS+CMS+Theory) EW multi-boson group convener（2018至今）; ATLAS MC generator development and tuning group convener(2018.4-2019.9); CERN Yellow Report Editor（2018至今）； ATLAS SM Electroweak group convener, 2017.04~2018.03
- Antonio De Maria（南大）： Co-coordinator of “ATLAS Fake Tau Task Force” (2018-2019), Tau Trigger Convener (2020-)
- Chikuma Kato的：Higgs Working Group Physics Validation Coordinator (2020-2021)
- Claudia Bertella （高能所）： HWW Group Convener （2018 - 2019）
- Javier Llorente Merino （高能所）： photon+jet Group Convener （2018 - 2019）
- 吴雨生（科大）： Convener of Subgroup Quarkonia production and b Xsection measurements (2017-2019), Speakers committee (deputy) chair (2020-2021), HGTD simulation/performance/physics convener (2020-)
- 张雷 （南大）：LHC Higgs Cross Section bbH/bH Group convener (2017-2020), BSM Higgs convener (2020-)
- 黄燕萍 （高能所）： Photon ID group convener (2016-2018), Egamma Calibration Group Convener (2019-)
- Mohamad Kassem Ayoub （高能所）： ATLAS Fake Tau group convener (2020-)
- 刘洋 (南大/高能所)： Tau measurement and energy calibration group convener (2021-至今)

探测器运行组：

- 孙勇杰(科大)： RPC Level-3 coordinator (2019-)
- Joao Barreiro Guimaraes Da Costa （高能所）: HGTD 项目资源管理与风险管理召集人 (2019-2020)
- JuanAn Pascual（高能所）：HGTD项目触发与数据获取组召集人 (2019-)
- JuanAn Pascual（高能所）： Pixel Run Coordinator (2018/4-2018/9)
- 梁志均 （高能所） ： HGTD项目探测器模块Level-2组召集人 (2020-)
- 张杰（高能所） ： HGTD项目外围电路Level-3 协调人与探测器模块电路Level-3 协调人 (2020-)
- 张照茹（高能所）： HGTD风险管理召集人 （2021-）
- 赵梅（高能所）： HGTD 传感器测试与性能评估Level-3协调人（2021.6-至今）
- 樊磊（高能所）， HGTD高压电路Level-3 协调人（2021-）

总结与展望

- 过去一年ATLAS中国组在Higgs性质研究、标准模型检验及新物理寻找等多个热点分析成果中做出了主导或主要贡献，并在其中10几个分析中发挥了主导作用（担任分析负责人，文章编辑等）

- 过去一年共发表期刊文章20多篇，会议文章近20篇，代表ATLAS合作组国际会议报告30多个

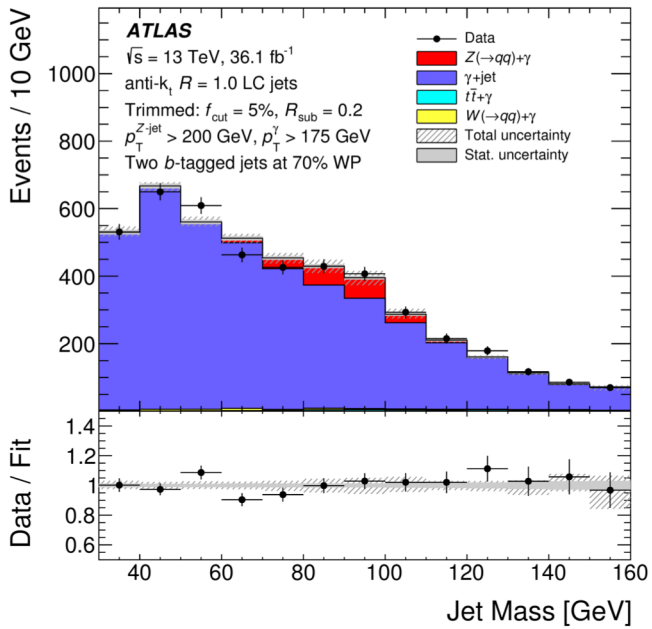
- 在硬件方面，同时开展了多个升级项目：NSW、ITK、RPC、HGTD，并进展顺利。

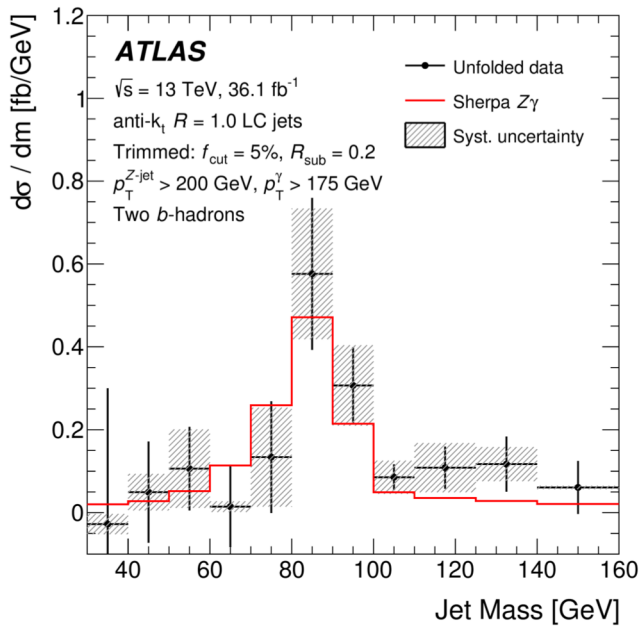
将在物理分析、硬件升级、和探测器运行等方面进一步提高中国组在ATLAS合作组的贡献，期待继续得到基金委、科技部和中科院以及全国同行的大力支持！

backup

其他标准模型测量

Phys. Lett. B 812 (2020) 135991



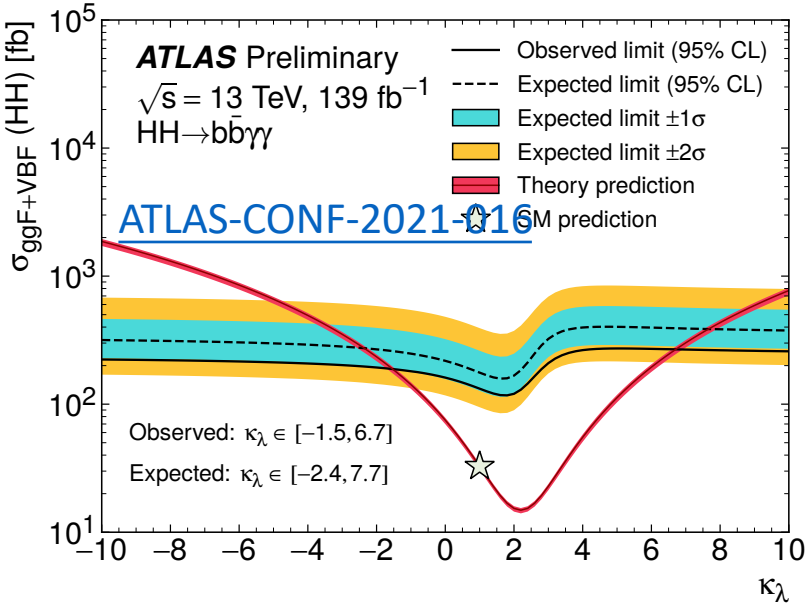


- 通过标准模型Z(→bb)+γ过程检验大张角高动量双b强子喷注(DeltaR=1.0)的性状，首次基于Z(→bb)喷注质量的微分截面测量
- 检验大半径高动量喷注重建算法在标准模型典型过程中的性状
- 交大做主要贡献：Z(→bb)+γ信号过程模拟，ttbar+γ本底过程模拟及计算

通过$bb\gamma\gamma$末态寻找双Higgs产生过程

HH产生过程能够直接探究Higgs自耦合，有助于深入理解电弱对称性自发破缺的Higgs机制

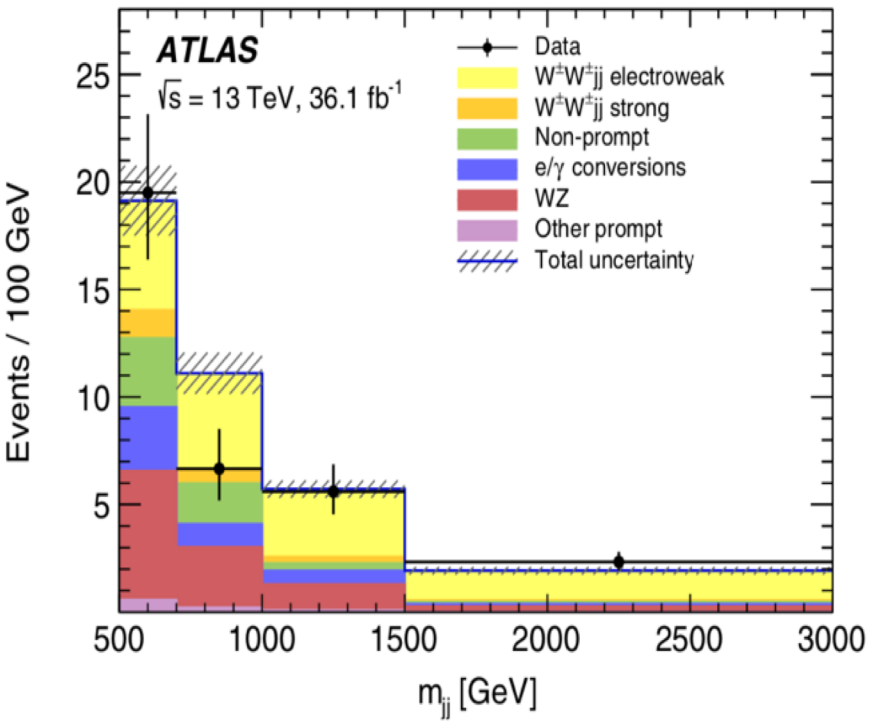
$HH \to bb\gamma\gamma$综合了$H \to bb$最大衰变分支比与$H \to \gamma\gamma$显著性高的优点，是寻找HH过程的黄金道之一



- 标准模型HH产生截面上限(95%置信度)为130 fb，没有观测到相对本底期望的明显超出，并给出Higgs自耦合最严格束缚，
- 负责优化事例选择与分类，本底组分研究与统计学分析，给出approval talk，担任paper editor，发表会议文章：[ATLAS-CONF-2021-016]，预计2022年初发表期刊文章
- 另外，在利用矢量玻色子耦合产生过程测量HHVV耦合强度的分析中担任分析联系人，预计2022年发表文章

规范玻色子散射

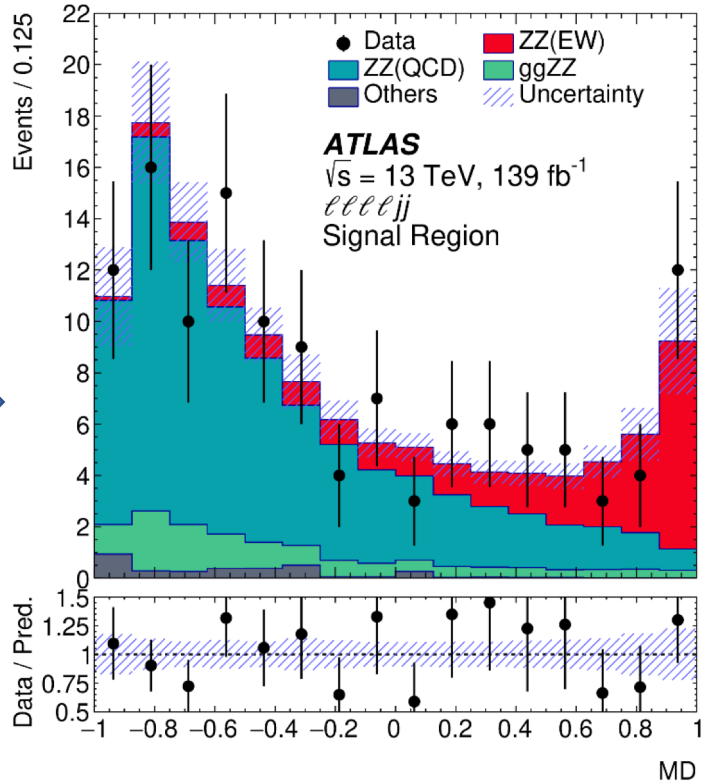
双玻色子散射过程的发现



ATLAS实验发现同号WW散射 6.5σ

PRL 123 (2019) 161801

arXiv:2004.10612



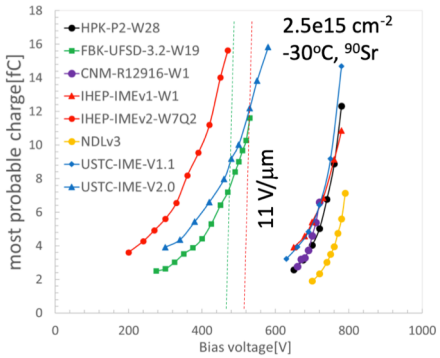
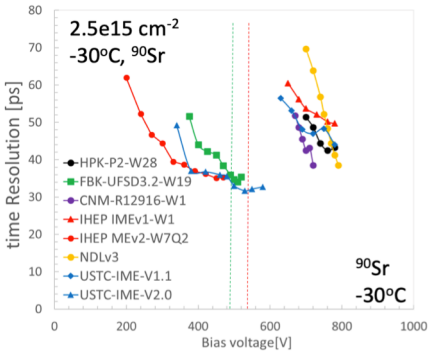
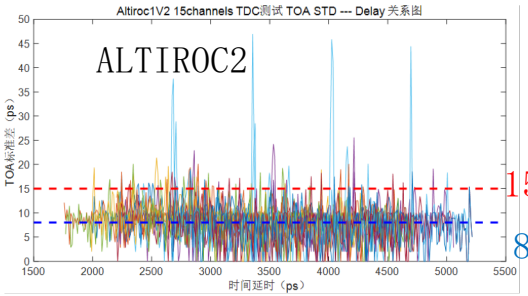
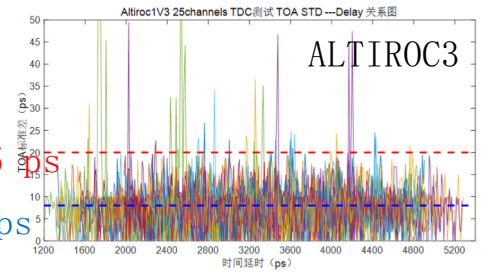
首次发现VBS ZZ过程： 5.5 σ

科大、交大、山大主导了WW、WZ、ZZ、Zγ双玻色子散射的发现

科大HGTD情况概述

2021年主要研究内容和进展

- 设计并制作USTC-IME-v2 LGAD,中子辐照至2.5E15 1MeV N_{eq}/cm^2后，初步结果显示电荷收集和时间分辨率均达到HGTD指标要求。(更多测试工作还在进行，并参加了JSI中子辐照，CERN质子辐照和束流测试，数据分析进行中)。
- 测试ALTIROC1_v2/v3芯片：时间分辨率不一致，推测有进位错误。准备测试ALTIROC2芯片。
- 苏州纳米所：研究倒装焊凸点工艺，提高焊球高度。

科大在HGTD项目中的责任和任务

- LGAD探测器技术研发，10% sensor
- 联合苏州纳米所研究组装：production site at USTC, 10% modules assembly
- 吴雨生：HGTD simulation/performance/physics coordinator
- 刘衍文：HGTD Speakers committee (member 2021, chair 2022)