



CMS中国组2020年研究进展

沈成平

谨代表CMS中国组



CMS是超大型的实验装置，总投资超过**5亿瑞士法郎**。世界上共有**55个国家**，**236个研究机构**，**5000余名科学家**参加。这些国家包括几乎所有的欧洲国家，以及美国，南韩，印度和巴西等。



CMS发言人团队

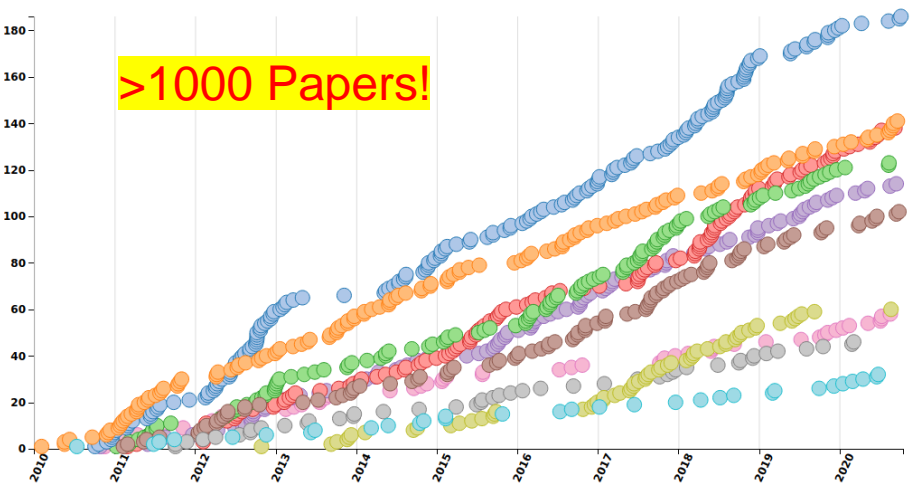
Meet the new CMS leadership team! The new spokesperson Luca Malgeri and the two deputies Gautier Hamel de Monchenault and Jim Olsen will lead more than 5000 people for the CMS collaboration for the next two years. Read more about our new spokespersons here <https://cms.cern/node/1985>

查看翻译



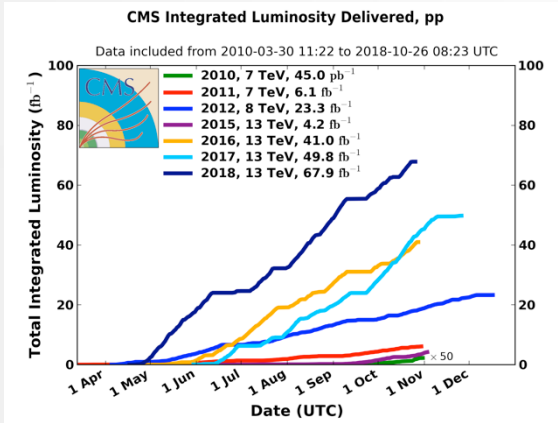
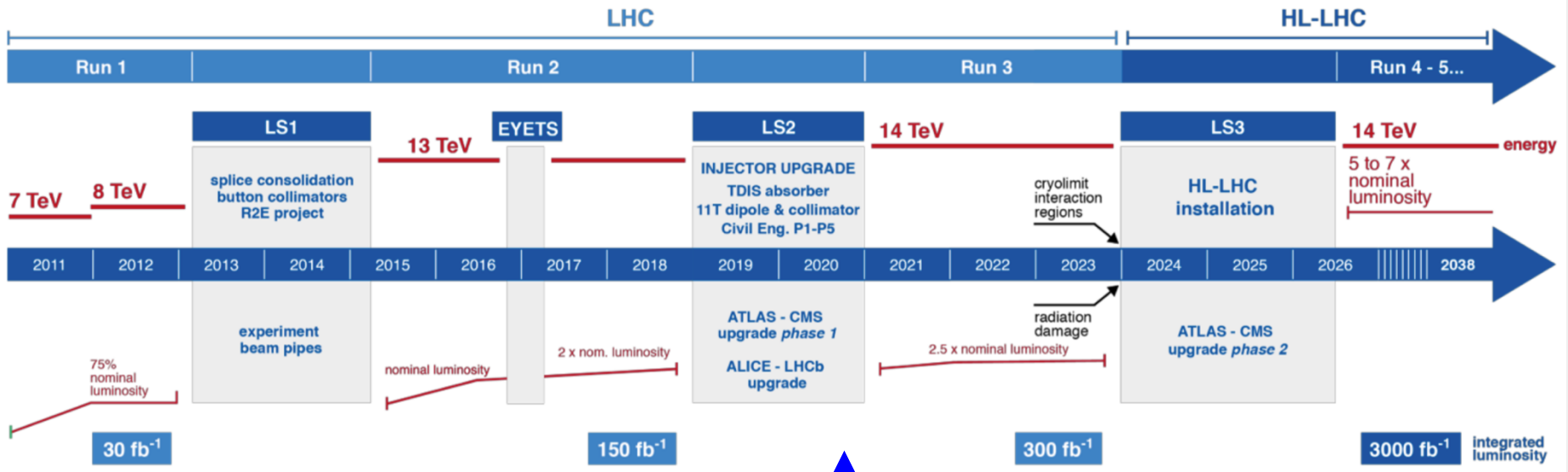
- Show all
- Total
- Exotica
- Standard Model
- Supersymmetry
- Higgs
- Top
- Heavy Ions
- B and Quarkonia
- Forward and Soft QCD
- Beyond 2 Generations
- Detector Performance

1000 collider data papers submitted as of 2020-10-06

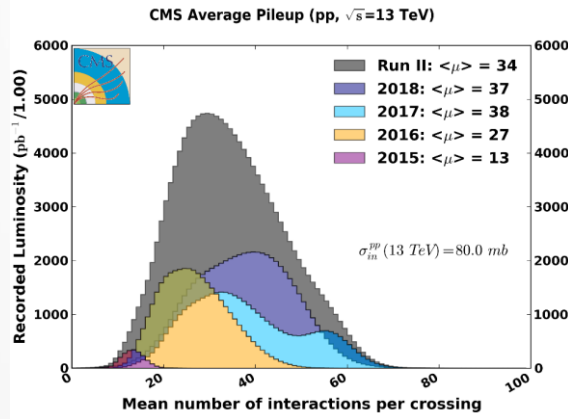


LHC将在**今后至少20年**，在高能物理前沿，粒子加速器技术，粒子探测器技术和数据获取及处理等方面引领世界。目前所取的数据只占计划中的**5%**，今后可能有比希格斯更重要的发现，实现对标准模型的突破，使人类对微观世界的认识提升到新的高度。**作为正在崛起中的大国，我们应该以更积极的姿态参与国际大科学装置实验，不仅为了获取技术，分享成果，而且也要输出科学和技术，为人类科学和文明的进步做出贡献。** 1

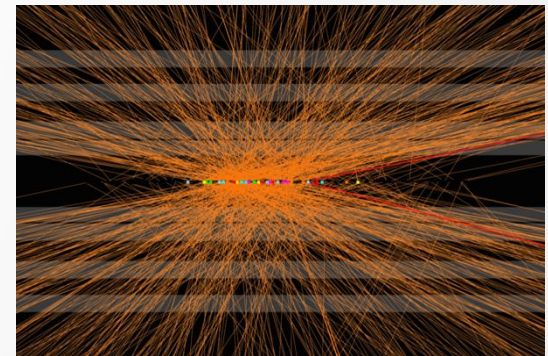
Where do we stand ?



Peak Lumi.
 $\sim 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



Run II Mean Pileup
34 interactions/Xing



A $Z \rightarrow \mu\mu$ event with 28 vertices

中国组参与CMS人数

单位	职工人数	博士后人数	学生人数	总人数	Authors
高能所	19	5	15	39	15
北大	5	4	21	30	12
北航	2	2	2	6	6
清华/南师大	5	5	24	34	7
中山大学	1	0	3	4	1
浙江大学	3	0	3	6	1
复旦大学	2	2	1	5	2
总数	37	18	69	124	44

CMS文章签名人数占CMS总签名人数2.2%

其中：**浙江大学**2019年2月份正式加入CMS合作组。**复旦大学**2019年12月正式加入CMS合作组。

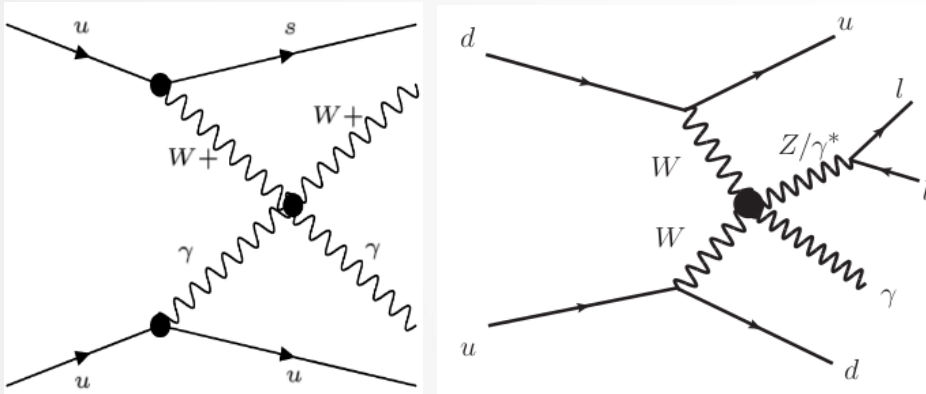
矢量玻色子散射过程的观测

北大组作为两个分析的负责人，以5倍标准偏差首次观测到W、Z与光子的散射过程。

JHEP 06 (2020) 076;
arXiv: 2008.10521 (submitted to PLB)

The large boson-boson collider 美国Symmetry杂志

大型玻色子玻色子对撞机

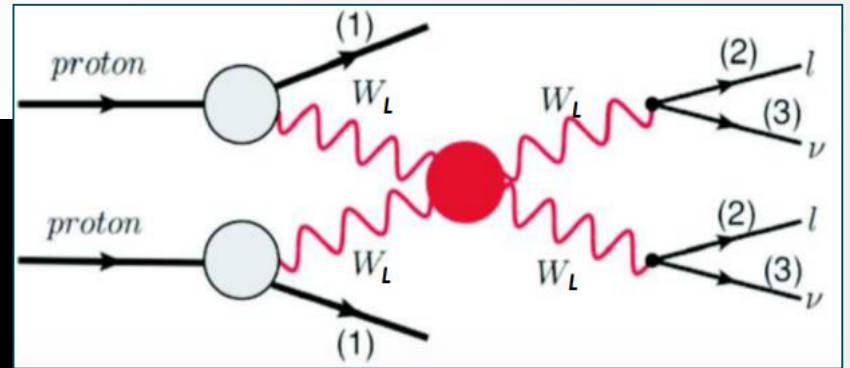


“These heavy boson-boson collisions inside the LHC provide physicists with a unique view of the subatomic world.” 玻色子对撞提供了对亚原子世界探测的独特视角。

欧洲物理学会[EPS-HEP 2019](#)以及[LHCP2020](#)等大会亮点工作。
CMS新闻通稿 [A boson-boson collider hiding inside proton-proton collisions](#)

玻色子极化散射过程的世界首次观测

同电荷 WW 玻色子极化散射，是LHC及HL-LHC最重要的物理目标之一。CMS近期进行了世界首次测量，**北大组**做了该工作审核报告。arXiv:2009.09429, submitted to PLB。



Recording You are viewing roberto.carlin@cern.ch's screen View Options

Production of polarized WW pairs

Motivation

- production of longitudinally polarized gauge bosons via vector boson scattering is tightly linked to the mechanism of EW symmetry breaking
- modifications of the production cross sections are expected in BSM models, e.g., in scenarios involving additional Higgs bosons
- the precise measurement of the cross section is a long-term goal of the LHC program

First measurement of production cross section of polarised $W^\pm W^\pm$ pairs in pp collisions

simultaneous measurement of $W_L W_L$ & $W_T W_X$, or $W_L W_X$ & $W_T W_T$ production

- EW production with at least one W_L measured with 2.3σ (3.1σ) obs (exp)
- Upper limits (95% CL) for $W_L W_L$ production at 1.17fb (0.88fb) obs (exp)

Process	σB (fb)	Theoretical prediction (fb)
$W_L^\pm W_L^\pm$	$0.32^{+0.42}_{-0.40}$	0.44 ± 0.05
$W_T^\pm W_T^\pm$	$3.06^{+0.51}_{-0.56}$	3.13 ± 0.35
$W_L^\pm W_T^\pm$	$1.20^{+0.56}_{-0.53}$	1.63 ± 0.18
$W_T^\pm W_T^\pm$	$2.11^{+0.49}_{-0.47}$	1.94 ± 0.21

fiducial cross sections in the WW frame

LH scan of the $W_L W_L$ cross section



**CMS发言人
Roberto Carlin教授**
在国际高能物理
2020大会上
highlight该工作

ZZ散射过程的研究

LHC上已探测的截面最小的标准模型过程。利用Full Run2年13TeV对撞数据，给出预期(观测)敏感度3.5(4.0)倍标准偏差。

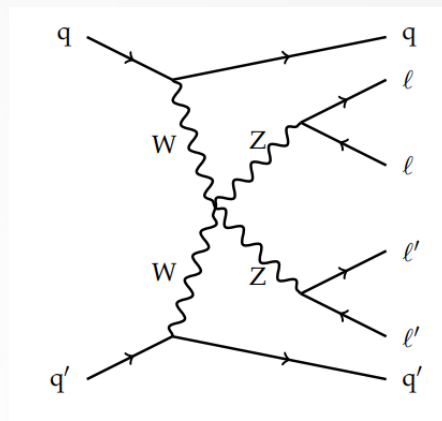
arXiv:2008.07013, submitted to PLB.

北京大学承担重要贡献，特别是实现了世界最精确的Loop-induced ZZ的模拟：

“将产生子计算能力推到极限”

arXiv:2006.12860, submitted to PRD

该工作在LHCP2020、ICHEP2020大会上作为CMS实验组的十几个亮点之一得到展示。



Loop-induced ZZ productions at the LHC: Improved description by matrix-element matching

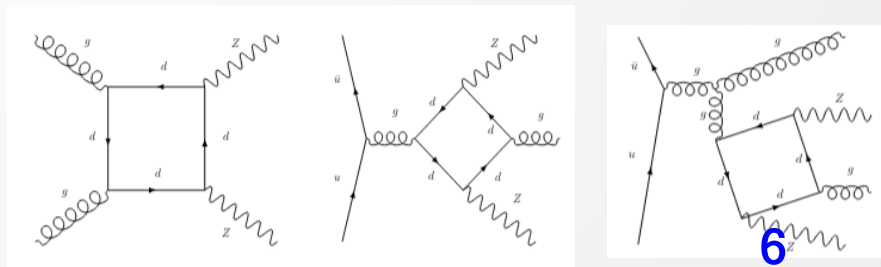
Congqiao Li,¹ Ying An,¹ Claude Charlot,² Roberto Covarelli,^{3,4} Zhe Guan,¹ and Qiang Li¹

¹ Department of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing, 100871, China*

² Laboratoire Leprince-Ringuet, École Polytechnique and IN2P3-CNRS, Palaiseau, France

³ Università di Torino, Torino, Italy

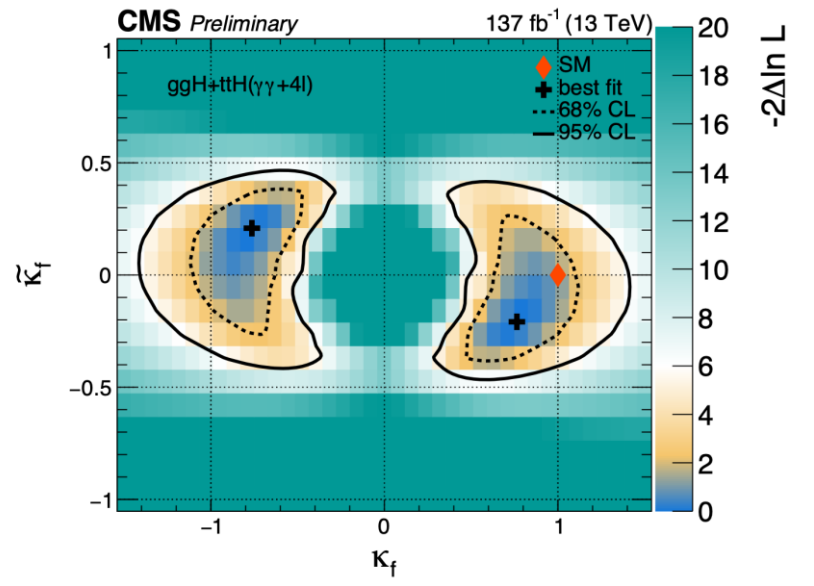
⁴ INFN Sezione di Torino, Torino, Italy



希格斯粒子的反常耦合测量

CMS-PAS-HIG-19-009

- 希格斯粒子与标准模型粒子的反常耦合
 - 目前最全面的反常耦合测量通过 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 末态, 并与 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 结果结合
- 浙大作终审报告, 担任文章编辑



CMS news报道: Scrutinizing production and decay kinematics of the Higgs boson using its golden decay channel [利用希格斯玻色子的黄金衰变通道对其产生和衰变运动学进行了研究]

ICHEP 2020 CMS亮点工作

CP-structure and anomalous couplings of Higgs Bosons

Two analyses (both 137 fb⁻¹) were presented:

- **CP structure of the Yukawa coupling between H and τ**
 - Using $H \rightarrow \tau\tau$ decays, measuring angular correlation between decay planes in μh and $h h$ channels
 - Mixing angle between CP-even (SM) and CP-odd coupling found to be $4 \pm 17^\circ$
 - Observed (expected) significance of separation between scalar and pseudoscalar hypotheses is $3.2 (2.3) \sigma$
- **Studies of CP-violation and anomalous H coupling to V and fermions in the $H \rightarrow 4l$ channel**
 - using kinematics of the Higgs boson's $4l$ decay and its production in association with a vector boson, hadronic jets, or a top-quark pair
 - Simultaneous measurement of up to five HVV, two Hgg, and two Htt couplings, interpreted in the framework of effective field theory
 - CP-sensitive parameter $f_{a3}^{g\theta H}$ in the H couplings to gluons best-fit value:
 - $f_{a3}^{g\theta H} = -0.53^{+0.51}_{-0.47} (obs) 0 \pm 1 (exp)$

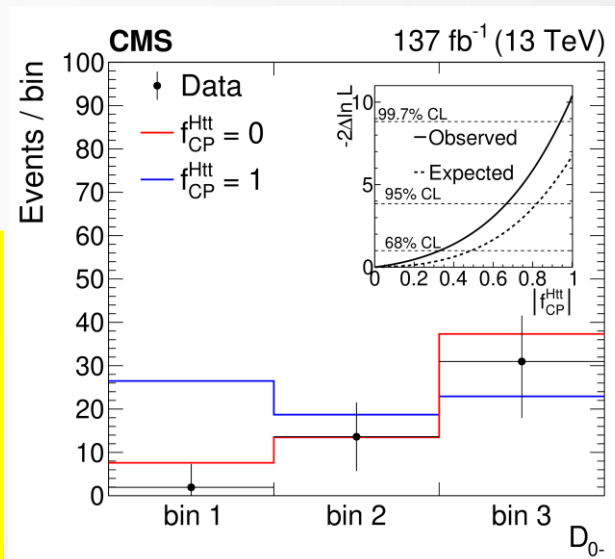
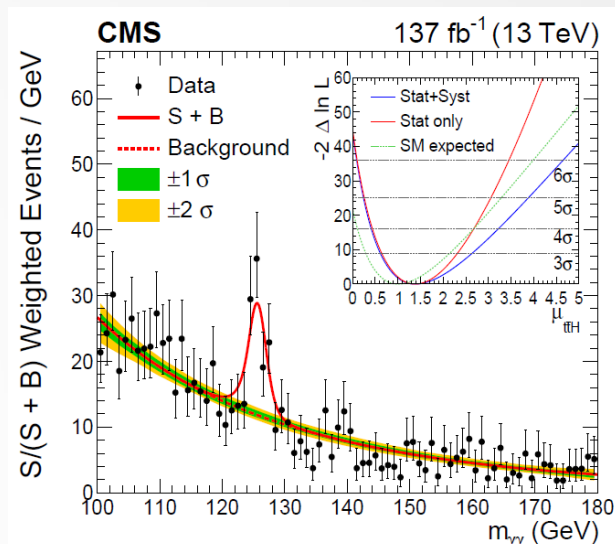
CMS-PAS-HIG-20-006

CMS-PAS-HIG-19-009

ttH – 双光子末态、希格斯与费米子作用CP结构的世界首测量

PRL 125 (2020) 6, 061801

- **高能所**团队一直是希格斯至双光子组主要成员之一
在分析框架(Run2 flashgg)、事例触发 (HLT)、光子鉴别、MC模拟修正、光子能量刻度、电子的排除以及效率等方面做出贡献，是 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 相关的多篇CMS内部文章的编辑之一
- **浙大**团队通过 $ttH(\gamma\gamma)$ 末态首次对希格斯与顶夸克耦合宇称 (CP) 性质测量，纯奇宇称 3σ 被排除。**浙大**作预审和终审报告，担任文章编辑
- 基于全部Run-2数据分析发在**PRL**
 - 显著性: 6.6σ obs. (4.7σ exp.)
 - 单一衰变道首次发现 ttH



CMS实验组发表新闻通稿 “Photon pairs illuminate the Higgs particle, top quarks, and their connection”

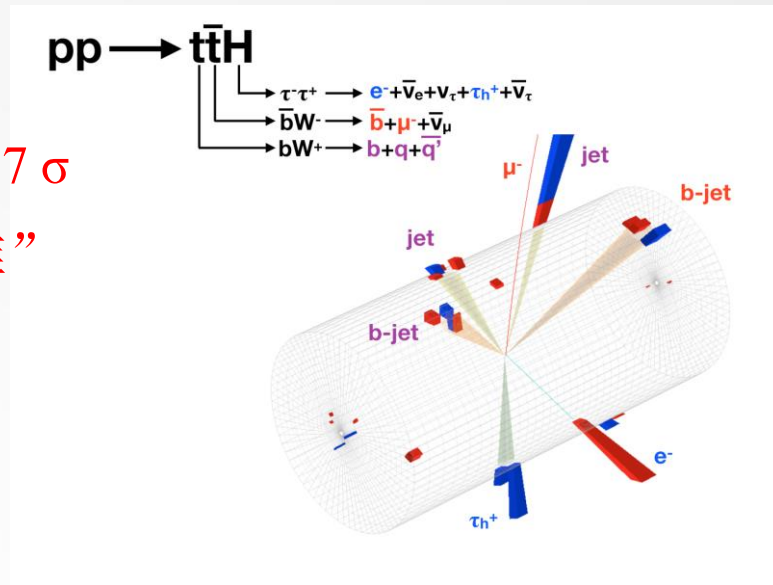
CERN courier 报道: First foray into CP symmetry of top-Higgs interactions

LHCP 2020 CMS亮点工作

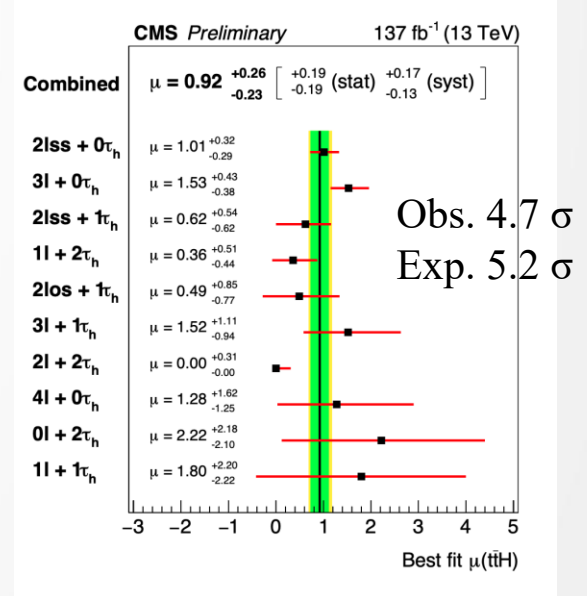
ttH – 多轻子末态

- 基于Run-2全部数据的分析，单末态观测到 4.7σ
 - 主导的DNN分析方案成为新的“分析基准”
 - 单末态预期灵敏度最高；
 - 改进轻子鉴别，原创Higgs-jet tagger等
 - 高能所做un-blinding报告
 - 发表CMS-PAS-HIG-19-008
- 高能所自2014年参加该末态分析，已经发表多篇会议论文和文章，做出多个贡献
 - 完整的分析交叉检验
 - 内部文集和PAS的editor
 - PAS-HIG-17-004 Pre-approval
 - 代表合作组做多个国际会议报告

CMS实验组发表新闻通稿“Higgs playing with top in singles and doubles”



末态复杂、分析难度高



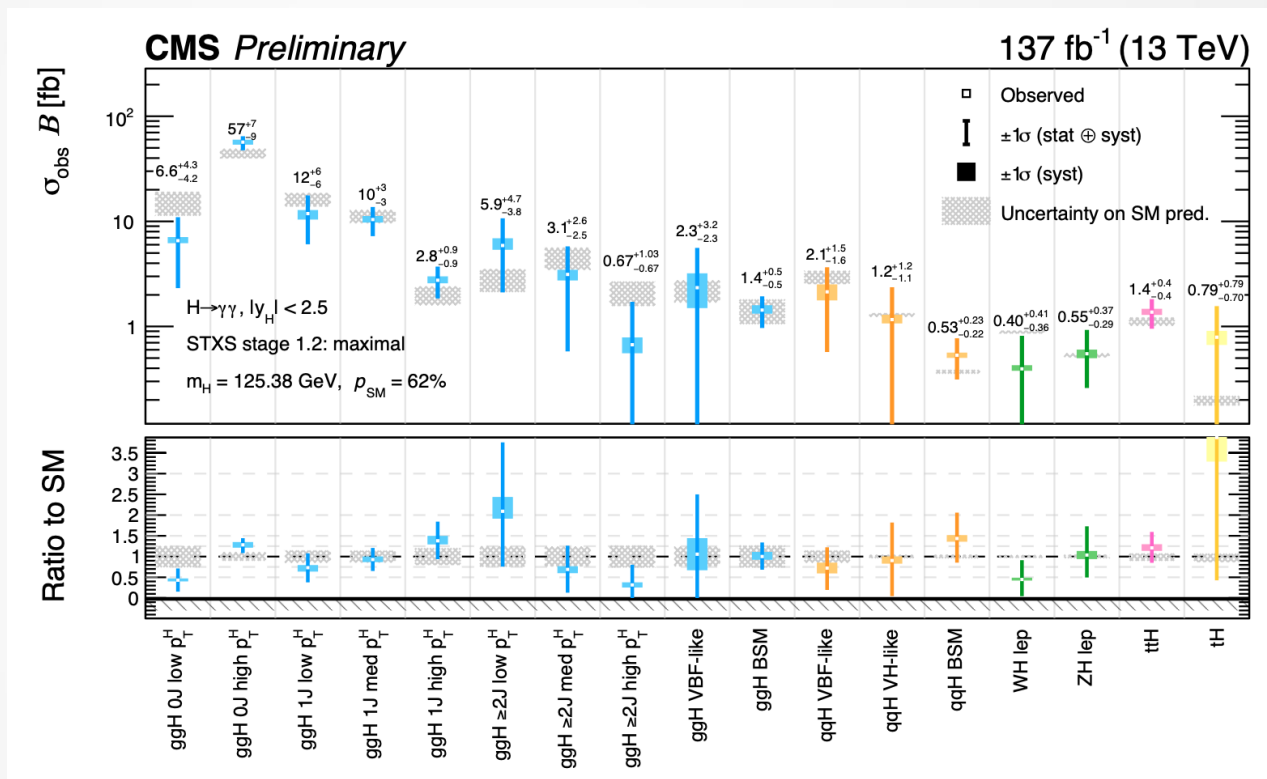
单末态预期灵敏度最高 9

H → $\gamma\gamma$ 产生截面测量

CMS-PAS-HIG-19-015

- 对希格斯粒子的性质进行更精细化的研究，深入检验标准模型理论，寻找超出标准模型的迹象

针对希格斯粒子产生及衰变的许多性质（例如横动量、赝快度、伴随产生的喷注等）进行简化模式截面测量



高能所在分析框架、事例触发、光子鉴别、MC模拟修正、光子能量刻度、电子的排除以及效率等方面做出贡献，是CMS内部文章的编辑之一

新粒子寻找：希格斯的奇异衰变

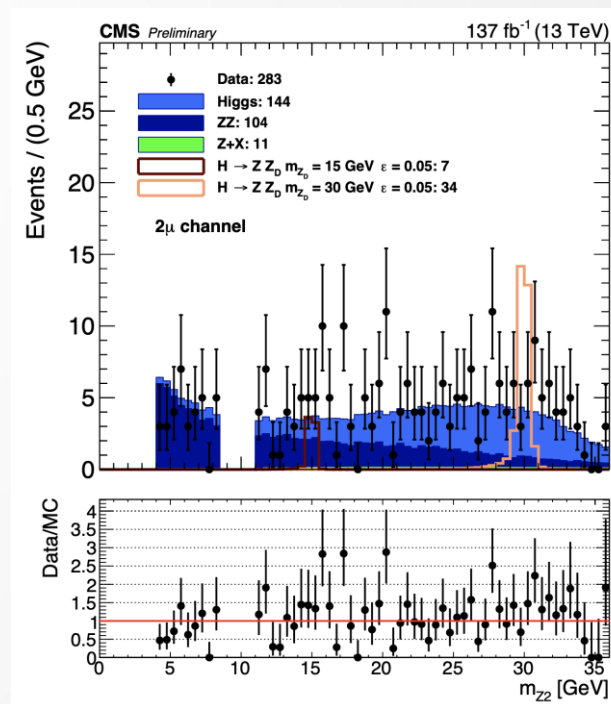
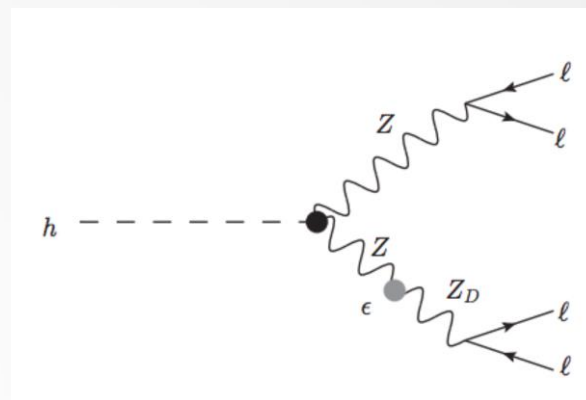
- 基于 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 分析，寻找希格斯的奇异衰变模式、暗光子/类轴子寻找

– $H \rightarrow ZX$ or $H \rightarrow XX$

- 基于Run-2全部数据发表会议文集CMS-PAS-HIG-19-007

– 对多种理论(暗光子模型、类轴子模型等)进行了约束

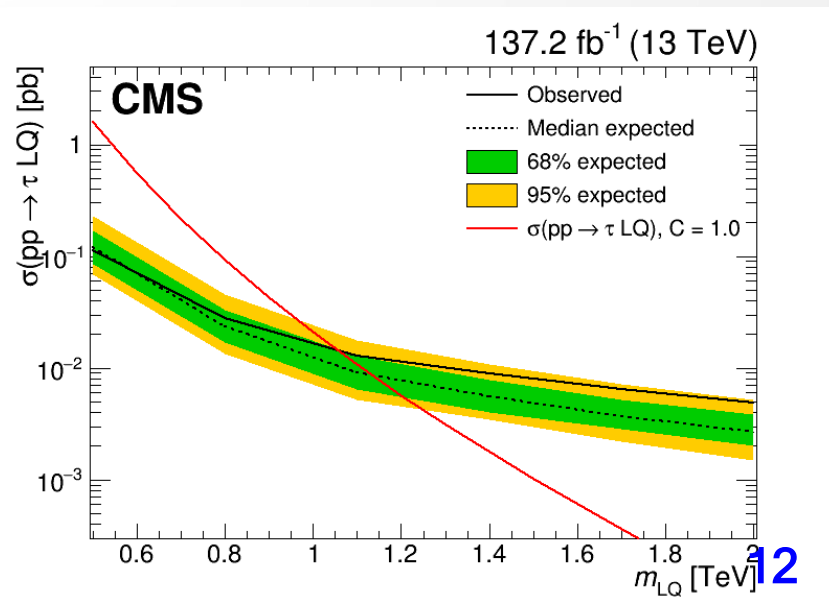
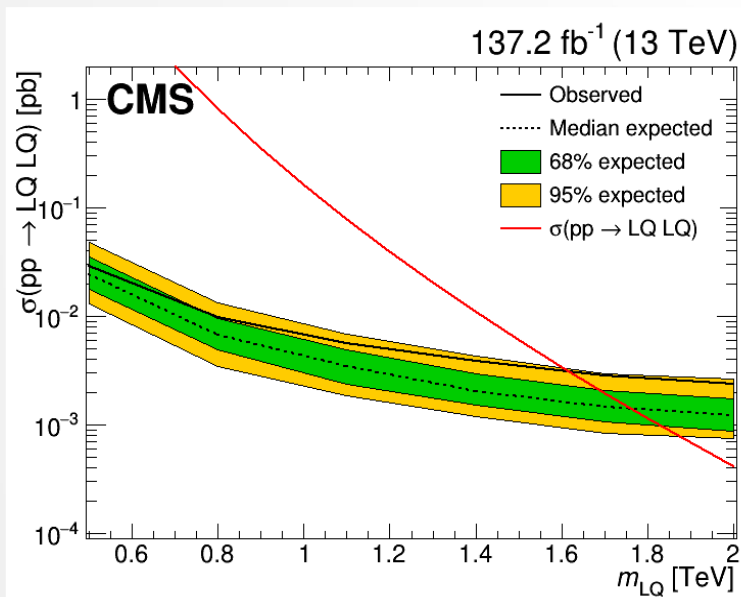
– 高能所在分析框架、轻子效率测量、蒙卡样本修正等方面做了重要贡献



含陶衰变的轻子夸克

CMS-PAS-EXO-19-015

- 轻子夸克的存在被许多新物理模型预言，可以解释当前一些实验上B介子衰变的反常迹象
- 提出在全新的顶夸克+陶子+中微子末态利用单个产生和对产生模式寻找轻子夸克
- 分析了完整的Run2数据，给出了目前最强的产生截面的上限。
 - **高能所**担任分析联系人，并做预审核报告



基于深度学习的喷注标注技术

北大组贡献于Scale-Factor, Mass Decorrelation Tagger。

DeepAK成为CMS Boosted Tagger的新标准。

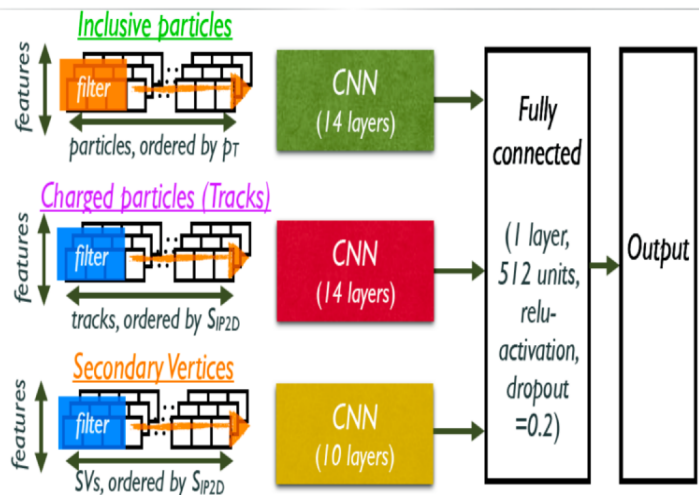
JINST15 (2020) P06005

DeepAK8

CMS-DP-2017-049
10.1007/JHEP10(2017)005

Many output categories!

- Deep AK8 takes advantage of this additional information
 - Includes particle and detector-level quantities (tracking, vertex formation)
 - Individual jet constituents as inputs
- Uses convolutional NNs to take advantage of nearby correlations



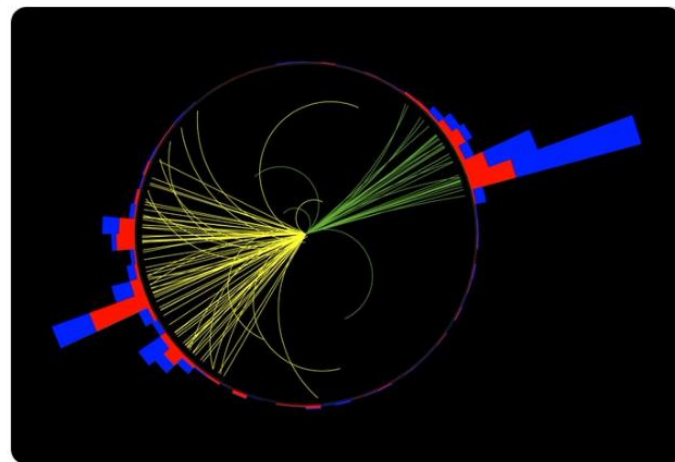
Category	Label
Higgs	H (bb)
	H (cc)
	H (VV* → qqqq)
Top	top (bcq)
	top (bqq)
	top (bc)
	top (bq)
W	W (cq)
	W (qq)
Z	Z (bb)
	Z (cc)
	Z (qq)
QCD	QCD (bb)
	QCD (cc)
	QCD (b)
	QCD (c)
	QCD (others)

“CMS实验的最新算法，利用了手机图像识别技术，可以更好理解LHC对撞”



CMS Experiment CERN
@CMSEperiment

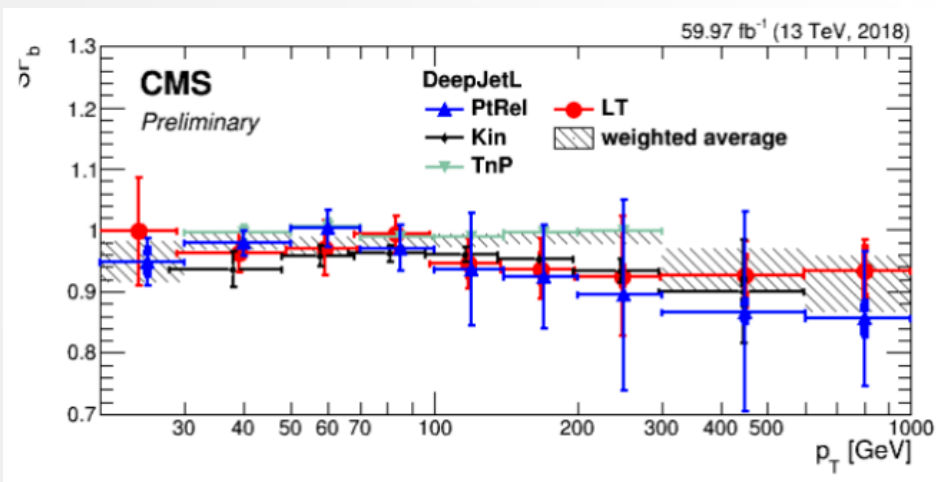
A recent paper by the CMS collaboration uses image recognition #MachineLearning methods (like those also used in mobile phone facial identification) to better understand the particles produced at the Large Hadron Collider. Read more in this briefing: cern.ch/go/8z8H



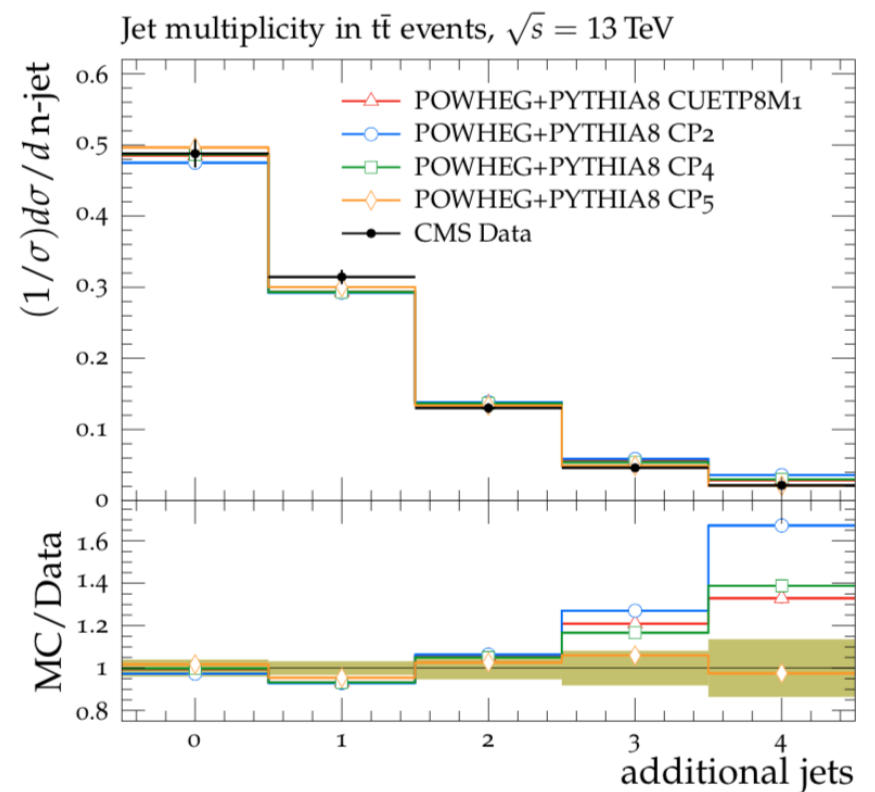
CMS物理对象性能优化

- 底夸克喷注的鉴别、修正及其相关系统误差估计：**高能所**课题组利用深度神经网络研究底夸克喷注鉴别以及效率测量，采用新方法修正不同横动量范围的鉴别效率

- **CMS-DP-2018-058** (做审核报告)
- 高能所成员任协调人，协调多个团队的研究



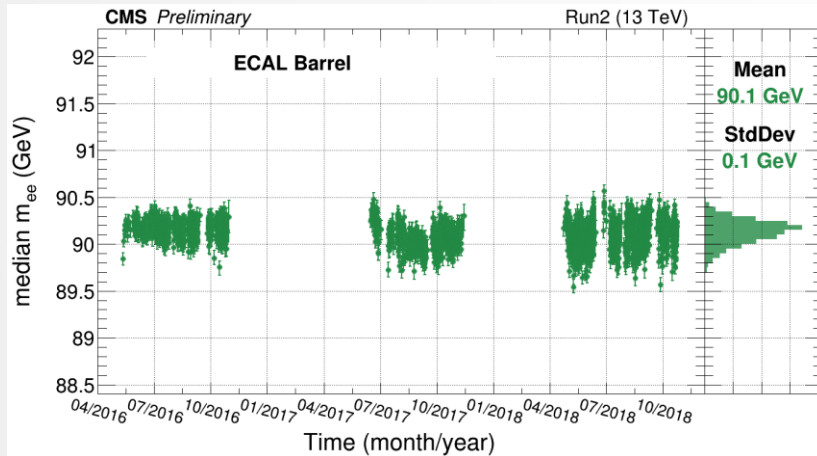
- 利用13TeV数据验证、调试New set of CMS PYTHIA8 tunes
 - Eur. Phys. J. C 80, 4 (2020)
 - **高能所**给出Approval Talk/group convener



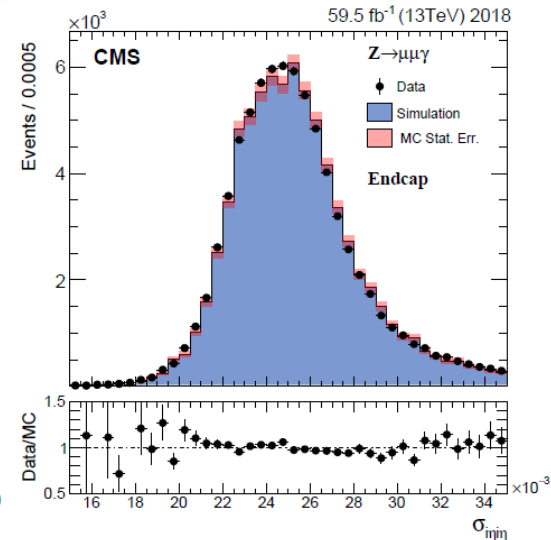
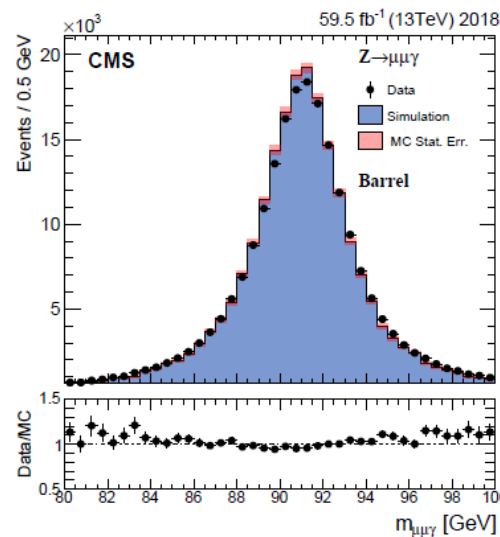
CMS探测器刻度、物理对象性能优化

- 研究优化了CMS电磁量能器的电子及光子能量分辨率，稳定了探测器的时间响应
 - 高能所负责产生部分公开发表的电磁量能器Run 2性能图，[twiki](#)
 - 进行Run 3电磁量能器刻度方法研究及性能预期

- Run-2 电磁量能器的性能研究， e/γ 重建与鉴别
 - 高能所组负责光子能量刻度的验证、光子有关可观察量数据与MC的比对，发表了1个公开文集(EGM-17-001)



Run 2 电磁量能器数据能量重建稳定性



正在进行的物理分析

◆ $b \rightarrow s\mu^+ \mu^-$ 角度分析 (北大):

- 味改变中性流过程对新物理敏感, 多种新物理模型
- Run-II 将分析扩展为全角度分析, K^{*+} 和 K^+ 道的数据分析正在进行中

◆ 全重味奇特强子态(清华、南师、复旦):

- CMS在2013年对Run 1数据在 J/ψ J/ψ 末态做了初步探索并有所斩获
- 目前LHCb在 J/ψ J/ψ 末态看到了新的结构。CMS将做独立无偏差的分析, 并对LHCb结果进行检验
- 除在 J/ψ J/ψ 末态的研究以外, 也在 J/ψ $\psi(2S)$ 末态, J/ψ Υ 末态, Υ Υ 末态等展开了系统研究

◆ $WZ\gamma$ 三玻色子的测量 (中山大学)

- 利用8TeV数据和半轻衰变模式中, 已经测量了 $WZ\gamma$ 散射截面
- 将利用纯轻衰变模式进行测量

◆ 4顶夸克产生截面测量(复旦、高能所)

- 4 顶夸克的物理过程是标准模型允许的稀有衰变过程
- 对顶夸克的汤川耦合强度和 CP 特性非常敏感, 也会受到超出标准模型物理过程的影响
- 在含有 tau 轻子的末态中寻找 4 顶夸克的产生过程, 新的衰变模式; 预期可以增加 4 顶夸克产生截面测量的灵敏度

正在进行的物理分析

◆ 寻找大质量的轻子味破缺(复旦):

- 很多超标准模型理论都允许存在轻子味破缺现象，是寻找新物理/新粒子的重要途径
- 利用2016年数据电子-缪子末态寻找轻子味破缺过程相关的新物理现象[JHEP, 04 (2018) 073]
- 利用全部Run 2 数据的分析，结合电子-缪子，电子-陶子，缪子-陶子的新分析正在顺利进行

◆ 顶夸克轻子味破缺(复旦):

- 利用电子-缪子末态在顶夸克（对）的产生和衰变过程中寻找轻子味破缺现象
- 对有效场论框架下的非标准模型耦合给出严格限制
- 利用Run 2阶段全部数据，分析正在进行中

◆ 希格斯自耦合性质研究(高能所)

- 是一种全新的基本相互作用，它的观测及测量有助于深入地理解弱电真空自发破缺机制，确定希格斯场参与的真空相变的形式
- 可以利用双希格斯粒子(HH)的产生过程直接探测希格斯的自耦合性质
- 目前在 $HH \rightarrow WW\gamma\gamma$ ， $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 分析以及双希格斯多衰变道联合分析中做出重要贡献
- $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 末态是HH分析中最灵敏的衰变道之一，高能所成员负责蒙特卡罗（MC）样本的产生、光子MC模拟的修正研究、光子能量重建和刻度以及鉴别、电子排除效率等。Run2分析已经通过CMS内部审核，准备提交发表JHEP期刊文章

正在进行的物理分析

◆ 双希格斯粒子的寻找--新产生模式VHH (北大):

- 研究希格斯场自耦合，揭示希格斯场势能结构，并测量四玻色子点VVHH的耦合
- 在CMS上首次提出该产生模式的探索
- 利用V的轻子衰变作为触发，利用HH到bbbb的末态获取最大统计量
- 利用Run 2阶段全部数据，分析正在进行中

◆ 希格斯粒子性质联合分析（浙大）：

- 利用Run2数据，结合所有末态联合测量希格斯粒子性质

◆ 希格斯粒子衰变宽度及奇异耦合上限研究（北航）：

- 通过 $2l2\nu$ 末态研究希格斯粒子离壳事例
- Run II 数据分析正在进行中

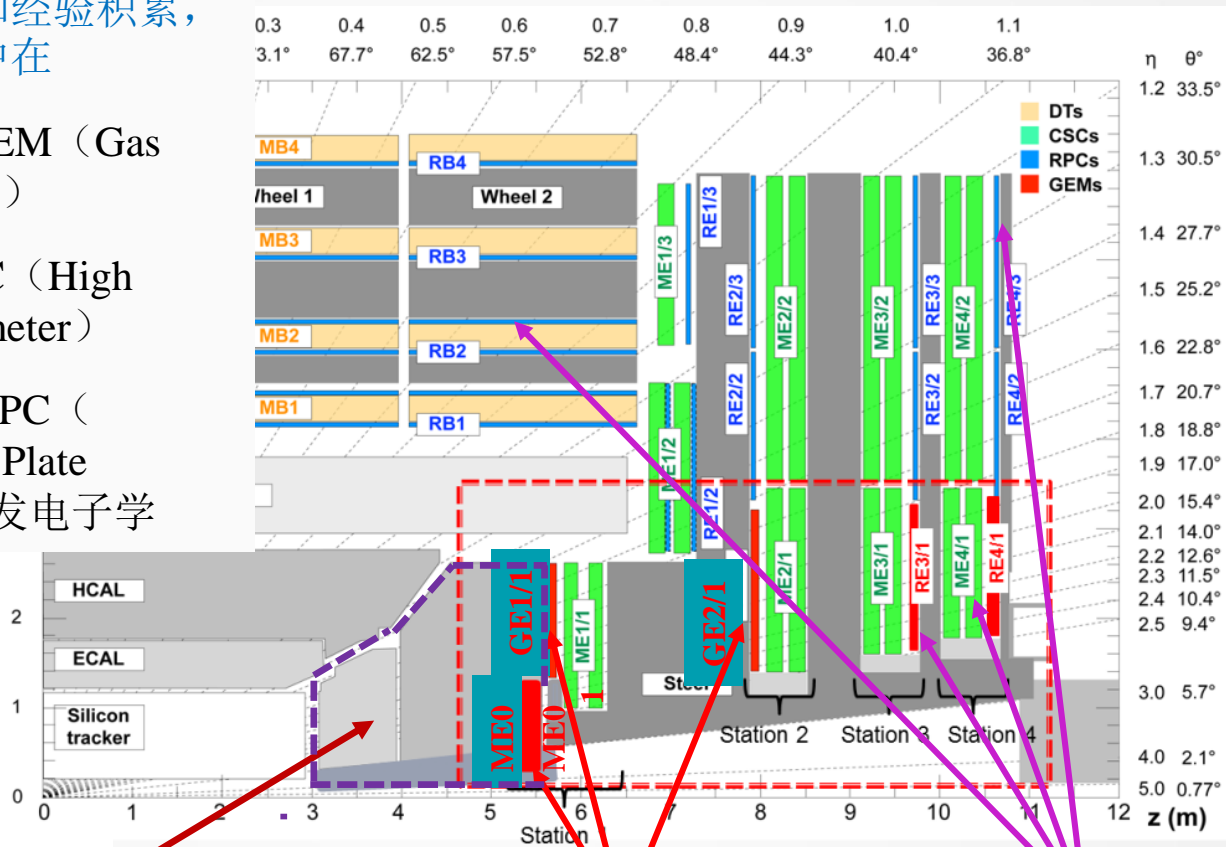
◆ 通过级联衰变寻找Z'粒子（北航）：

- 假设Z'粒子经由新粒子衰变至标准模型粒子
- 利用衰变特征构建运动学变量
- Run II 数据分析正在进行中

CMS实验中国组承担的二期升级（2016-2026）任务：

➤ 根据中国组前期工作和经验积累，目前二期升级工作集中在

- 端盖缪子探测器GEM（Gas Electron multipliers）
- 高粒度量能器HGC（High Granularity Calorimeter）
- 端盖缪子探测器iRPC（improved Resistive Plate Chamber）后端触发电子学

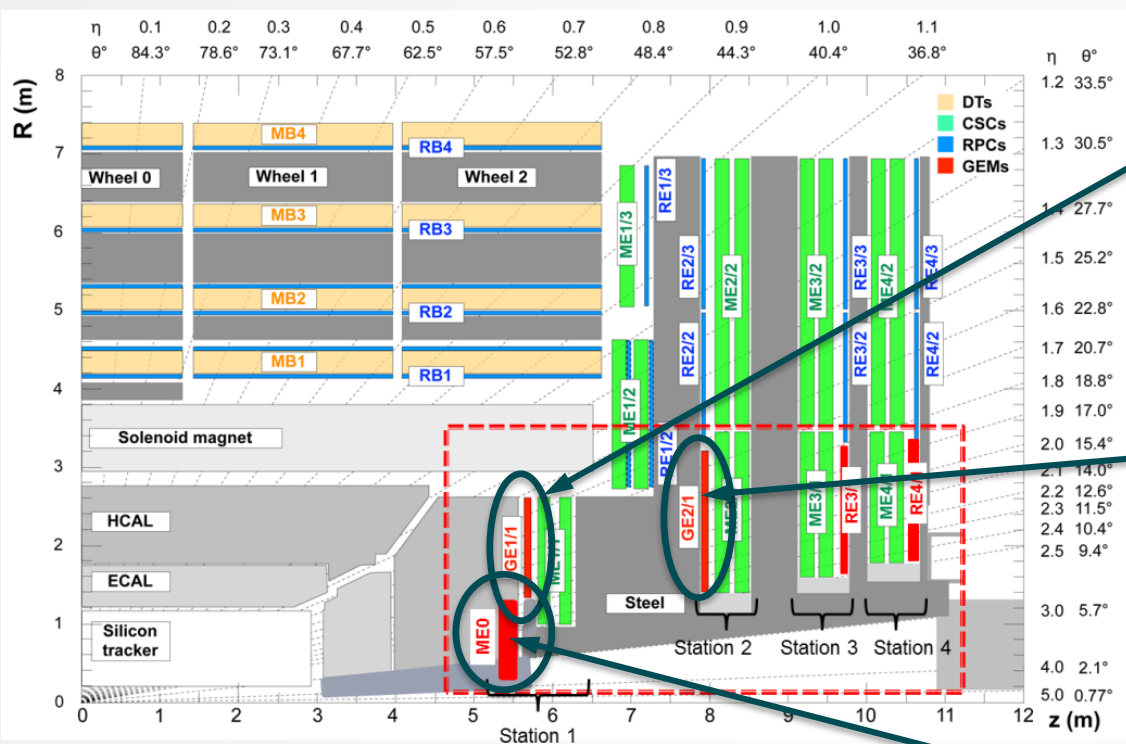


端部高粒度量能器
HGCal升级(高能所)

端盖μ探测器GEM升级
GE1/1,GE2/1,ME0(北京大学)

iRPC/RPC系统
backend电子学
(高能所)

CMS-GEM探测器升级年度进展



中国组任务:

第一站内圈GE1/1 GEM: 全部前端电子板GEB生产测试, 在CERN的探测器组装测试、安装调试 (2013-2020)

第二站内圈GE2/1 GEM: 设计研发及生产测试全部GEB, 在北大生产1/8 GEM探测器, 在CERN进行组装测试、安装调试 (2014-2024)

前向内圈ME0 GEM: 设计研发及生产测试全部GEB, 在北大生产~1/5 GEM探测器, 在CERN进行组装测试、安装调试 (2014-2026)

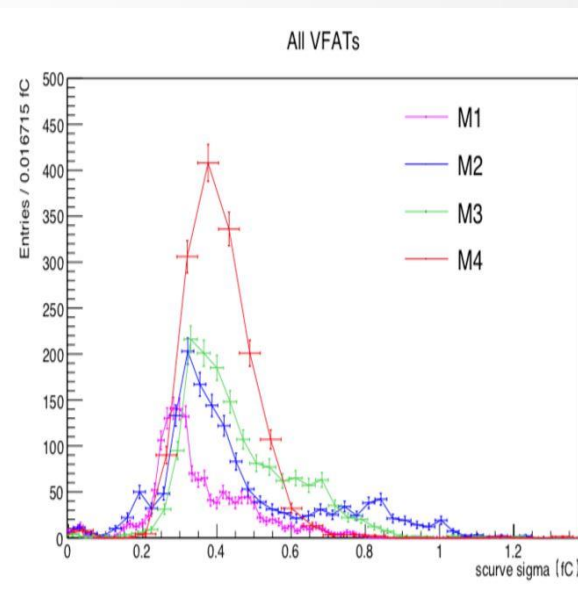
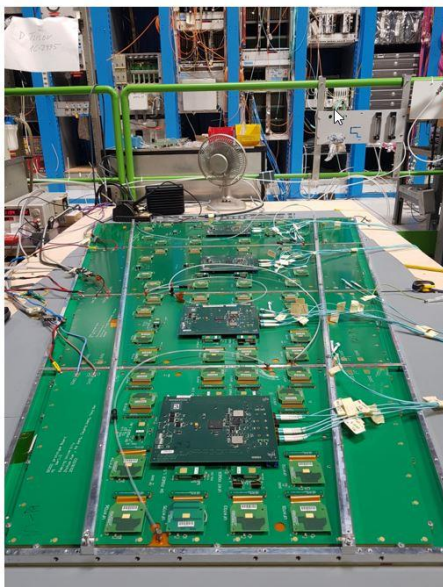
CMS-GEM升级参加单位:

北京大学、清华大学、中山大学、北京航空航天大学

CMS-GEM探测器升级年度进展

➤ GEM探测器前端电子学板研发

- 设计、研发成功端部第二站全部8种型号GEM前端电子学板。样机经过CERN及美国初步测试达到要求：噪声 $<0.5\text{fC}$ ，一小时实测误码率 $<10^{-13}$ 。预计2020年年底开始批量生产。
- 完成了第一版ME0 GEM前端电子学板设计并通过了合作组审核，目前正在深圳鑫诺捷公司进行样机生产。



四种型号(M1-M4) GEB 2/1样机、测试平台和噪声测试结果。

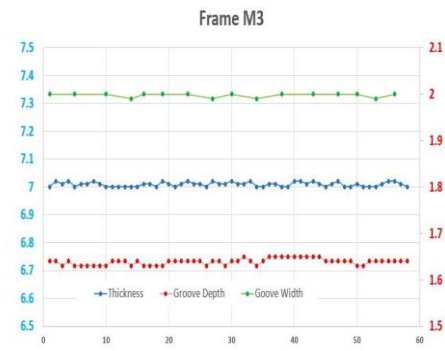
CMS-GEM探测器升级年度进展

- 承担了在中国研制FR4探测器内框架的任务，研制的样机2020年2月在CERN通过测试。经过合作组评审，2020年底将在中国批量生产。
- 对原尺寸第一站GEM探测器样机进行了高压性能、X射线增益等测试，达到CERN指标。



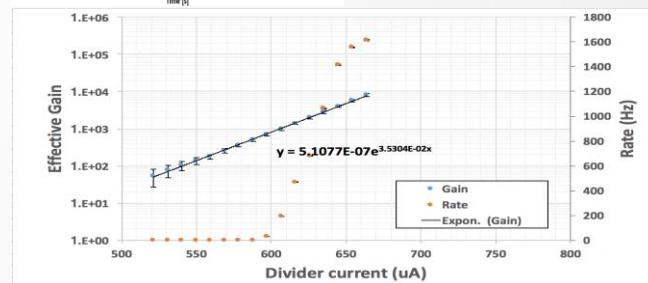
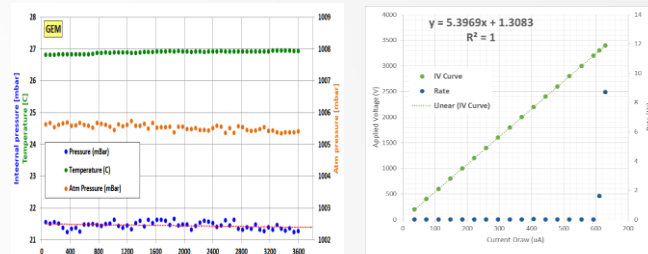
GEM Frame QC Check list (draft)

Plot of QC result for each frame (e.g.: from Jeremie's test at CERN)



中国试制的探测器内框架在CERN的精度测试结果。

原尺寸第一站GEM探测器样机正在北大进行X射线增益测试



对GEM探测器气密性、高压、增益等性能的部分测试结果

→ 北京大学GEM批量生产测试基地建设基本完成

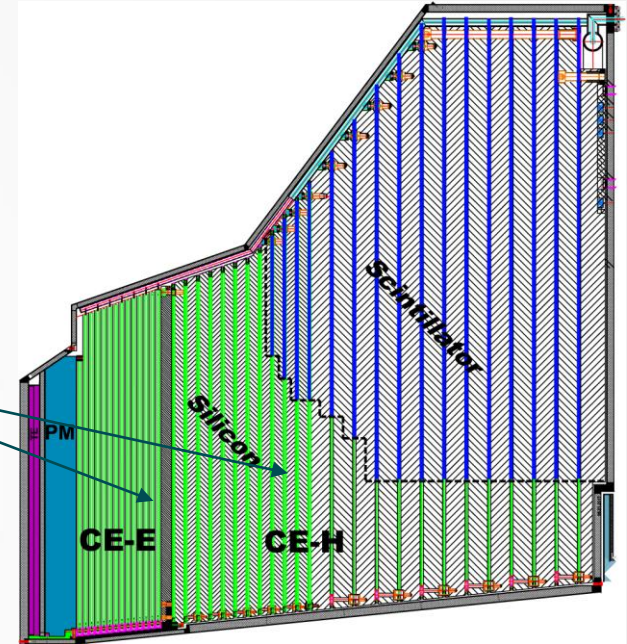
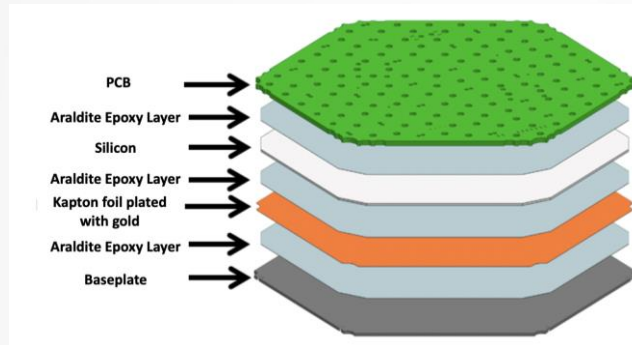
CMS二期升级HGCal 任务

- **CMS HGCal:** 首个真正意义上的基于粒子流的五维量能器
3D 位置 + 能量 + 时间

巨大挑战:

2MGy 辐照
140 堆积事例
220kW 发热功率
640m² 硅传感器

共需~31000硅传感器模块



- 中国组的主要任务: 在**高能所**建立一个**HGCal**硅模块中心
 - 共**6**个中心, 每个平均要建造~**5200** 模块
 - 参与模块相关的工作: 原型机制作, 实验束测试等
- 计划 (今年**3**月份制定, 需重新根据新冠疫情的影响调整)

Milestone	WBS	Title	Date
CE.MO.4	7.4.5	All Si module assembly sites & procedures qualified (HL)	01 Feb 21
CE.MO.7	7.6.2	Silicon Module components orders placed (HL)	2 DEC 21
CE.MO.9	7.6.4	Silicon Modules production 5% complete (HL)	26 OCT 22
CE.MO.10	7.6.6	Silicon Modules production 50% complete (HL)	21 OCT 23
CE.MO.11	7.6.8	Silicon Module production 100% complete (HL)	22 JUL 24

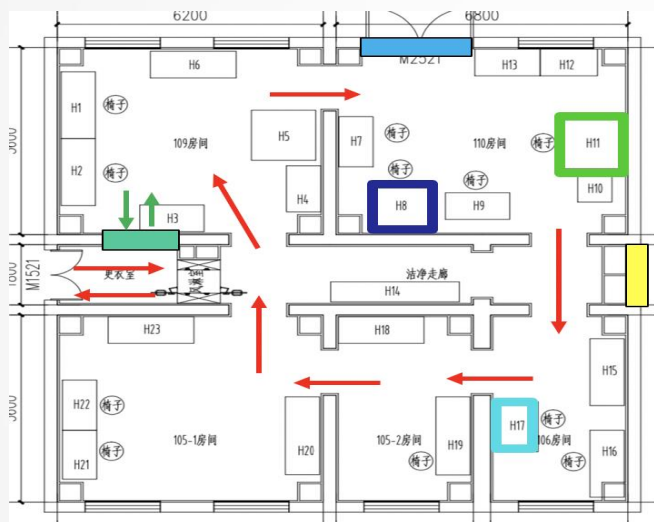
北京硅模块中心现状：准备认证

- 2019年底建成140平米洁净间
- 目前主要仪器购置，安装到位
 - 包括部分受疫情，禁运影响的仪器
- 仪器使用初步培训完毕

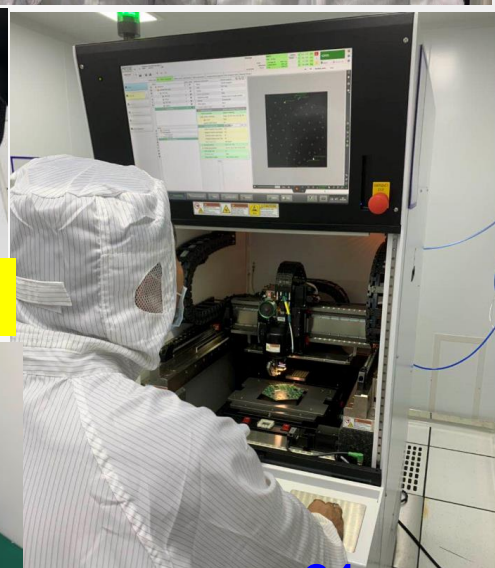
CMS/HGCal 管理层检查进展



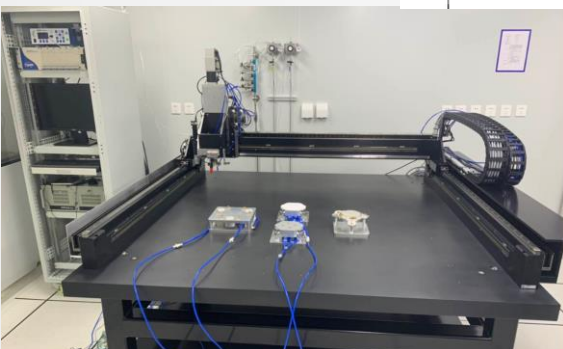
- H8: OGP
- H11: Gantry
- H17: Bonder
- : Material window
- : Emergency door
- : Equipment door



Centrifuge



Full auto Bonder BJ855



1.25m*1.25m acc. Gantry



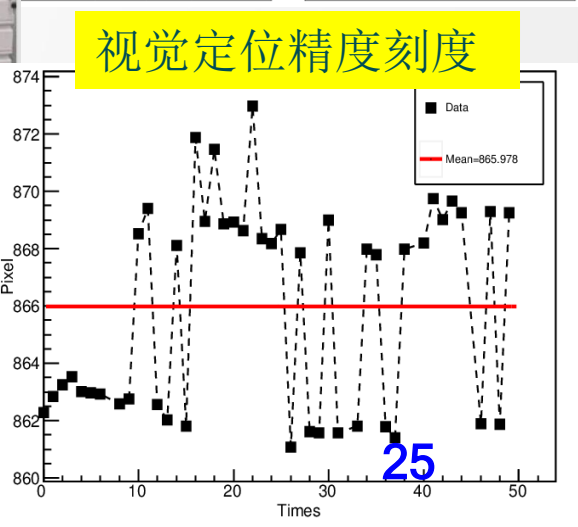
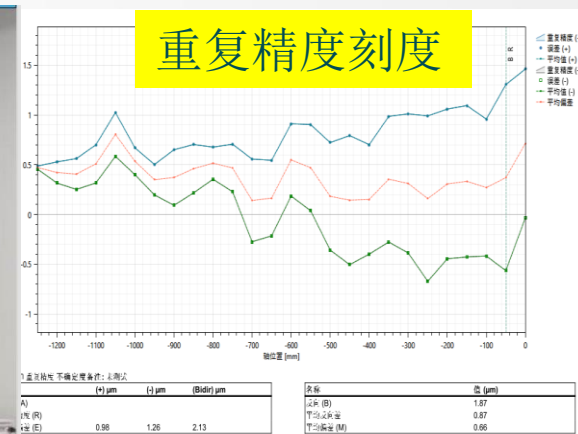
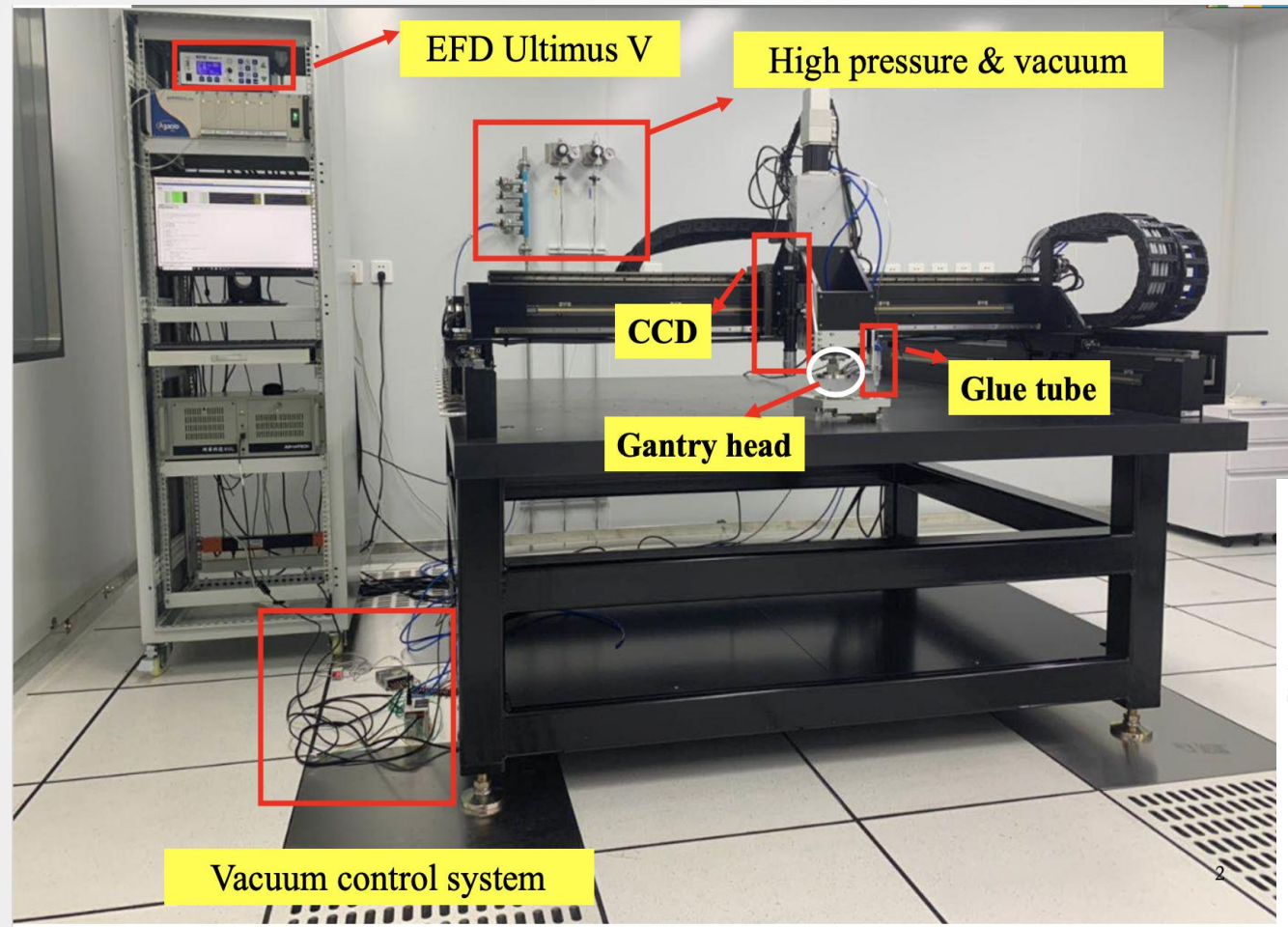
OGP ZIP 635



Mini gantry

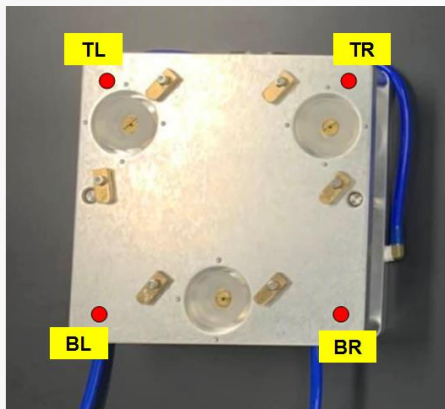
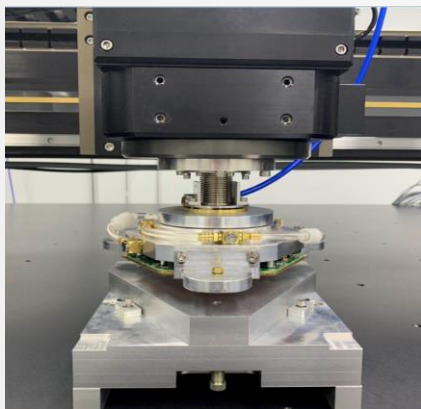
高粒度量能器模块集成研究 (1)

- 高粒度量能器硅模块集成
 - 平均需要集成>100平米的硅探测器，100万道读出
 - 模块元件定位，结构胶面积/厚度，稳定性，抗辐照性，集成速度
 - 搭建大行程高精度gantry+专用工具 (1.25米*1.25米*0.1米 @ < +/-5微米)

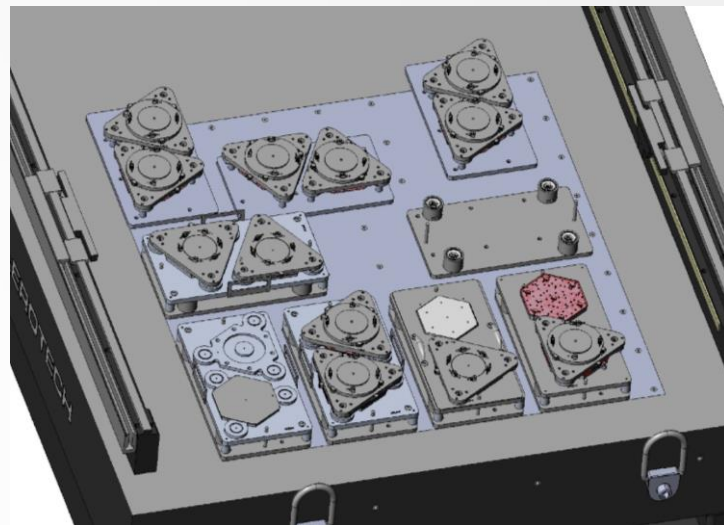


高粒度量能器模块集成研究 (2)

- 制作模块工具，优化模块制作模式，正在进行模块中心站点认证步骤



高能所制作的6寸模块工具



UCSB正在为高能所制作的8寸模块工具

Exercises for learning to use the gantry system

By UCSB

1. Measure how parallel gantry head is to gantry table and fixtures.
2. ✓ Exercise movement X,Y, Z, Theta(Linear movement, Circles etc.)
3. ✓ Practice controlling dispenser(Controlling pressure, moving speed, different patterns)
4. ✓ Practice controlling vacuum(Turn on/off vacuum programatically, read out sensors etc.)
5. Practice Gluing on acrylic sheets(Glue gap consistency and spread)
6. ✓ Practice picking and placing pick up tool(without any components)
7. ✓ Practice picking and placing pick up tool and dummy acrylic components
8. ✓ Practice gluing on acrylic dummy pieces On going
9. Practice gluing and picking and placing on dummy components(non-acrylic)

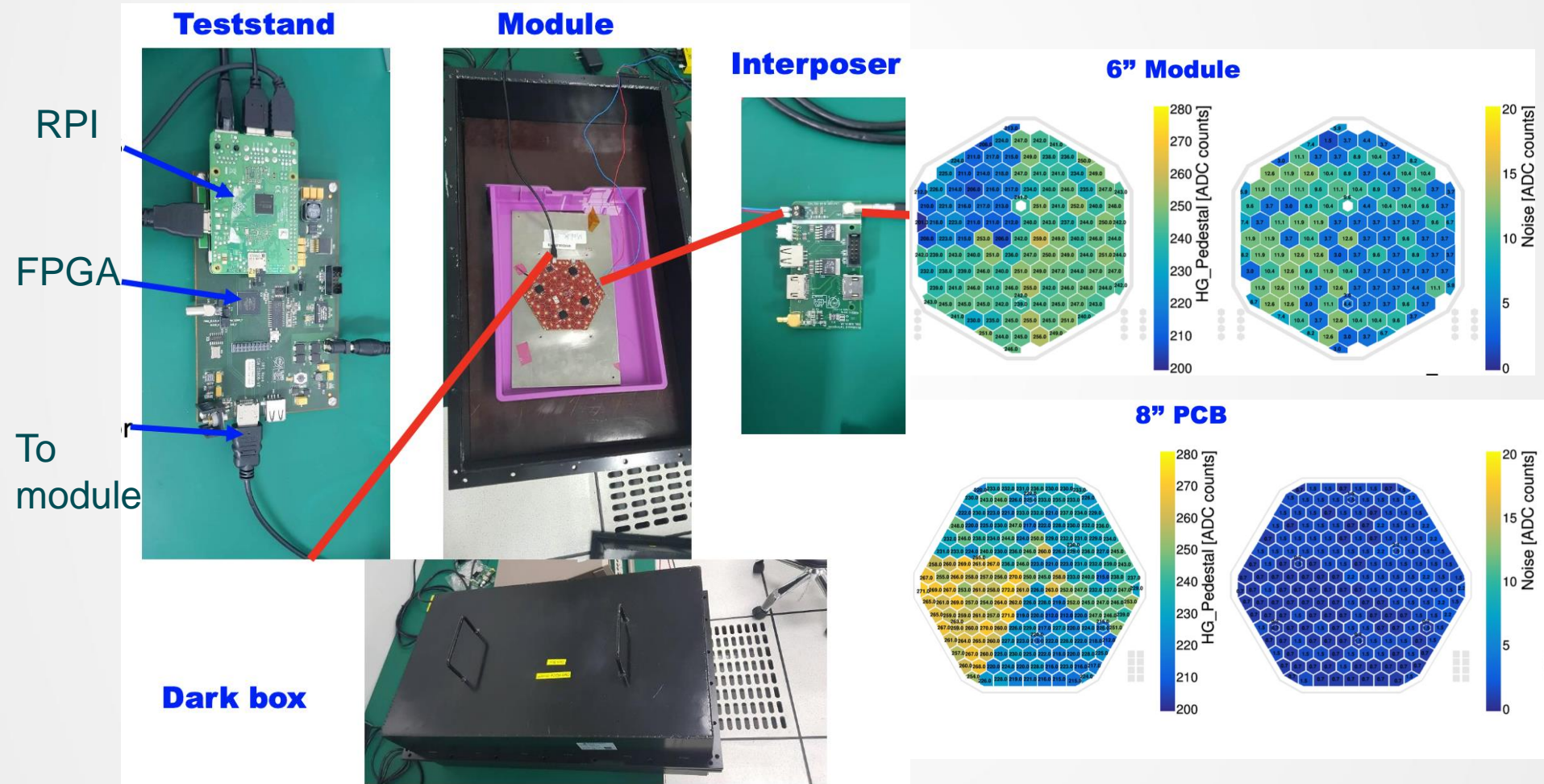
26



点胶模式优化

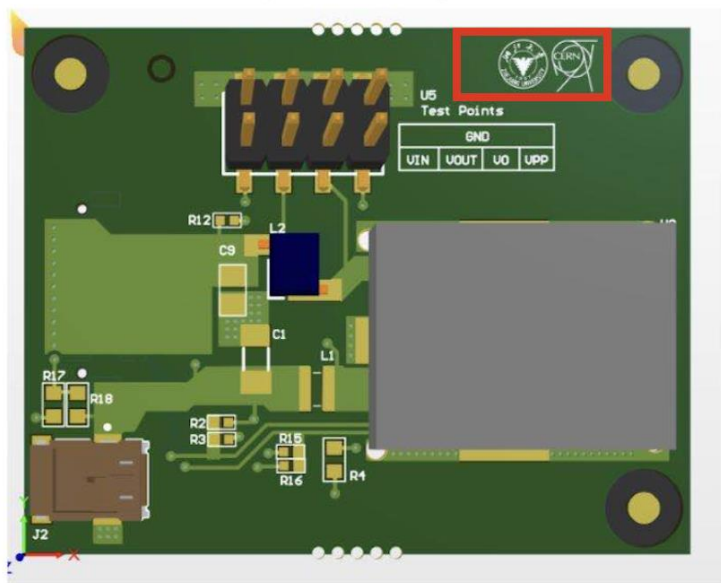
高粒度量能器模块测试 (3)

- 单模块测试系统：已经安装完毕，测试6寸模块/8寸电子学板
 - 测量模块的基线(Pedestal), 噪声, 电子学刻度等电学性能

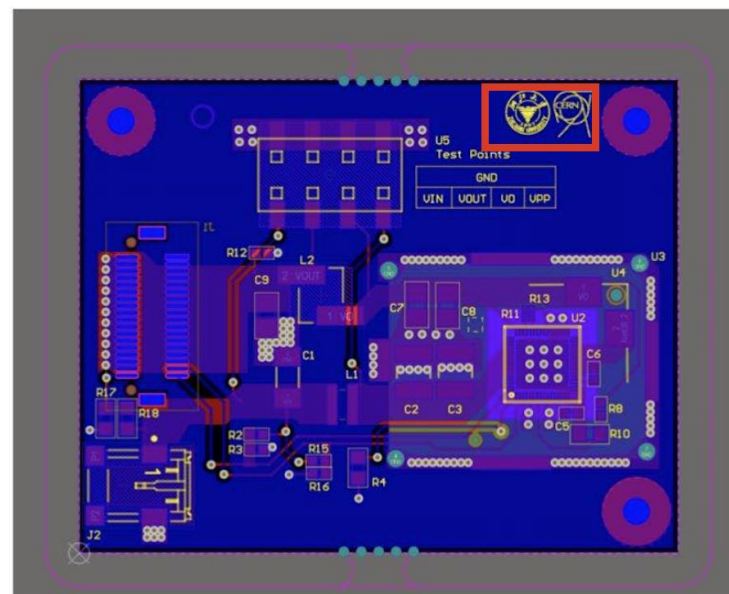


高粒度量能器升级-电路设计

- **浙大**承担整体模块和电源(DCDC)电路的设计
- 目前根据设计生产了60块电源电路板原型，CERN测试，设计微调中



单板 3D view / Top Layer



单板 2D view / all layers

CMS-RPC 触发升级年度进展 (1)

任务一

- 负责新建改进型阻性板探测器 (iRPC) 触发电子学的设计与建造, 包括触发、快控制、慢控制、DAQ

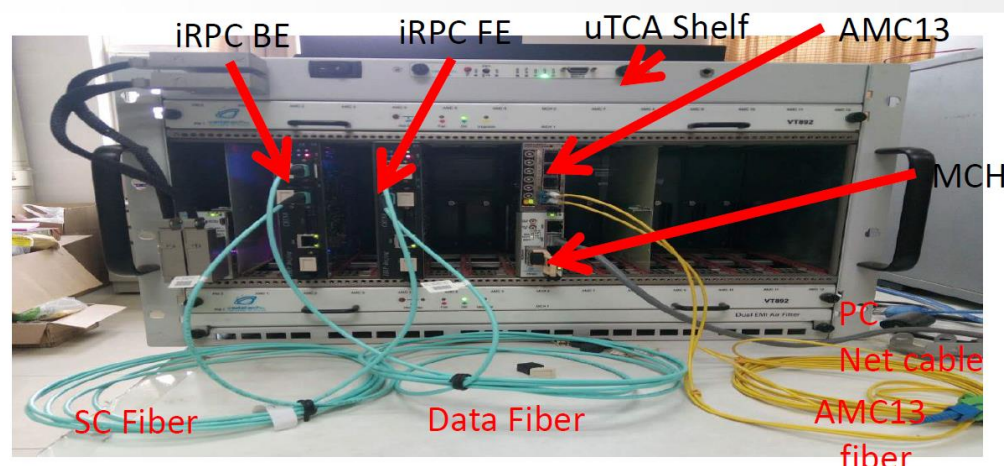


年度进展(1):

完善了**高能所**实验室的演示系统的硬件、固件、和软件的功能

- 完成了iRPC探测器的模拟, 模拟结果作为演示系统的输入数据, 用于系统功能的验证
- 在Muon和RPC合作组提出了数据压缩和传输的高能所方案
- 在北京实验室成功实现了模拟前端电子学和后端触发电子学的完整系统的功能测试

高能所为CMS iRPC研制的插件



改进后的高能所触发实验室的iRPC 完整演示系统

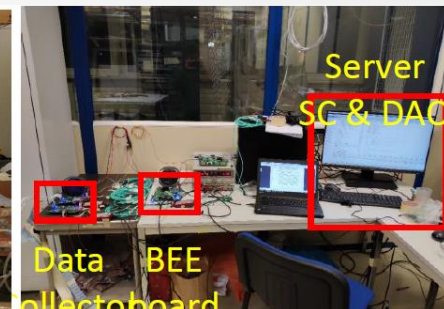
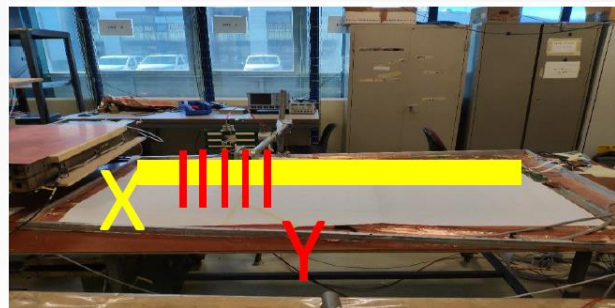
细节见刘振安于11月9日上午的报告

CMS-RPC 触发升级年度进展 (2)

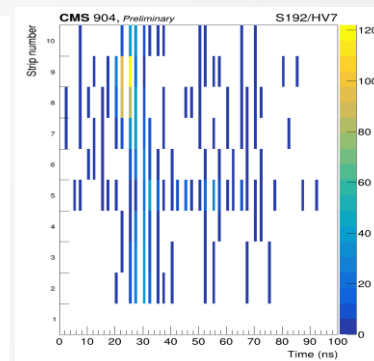
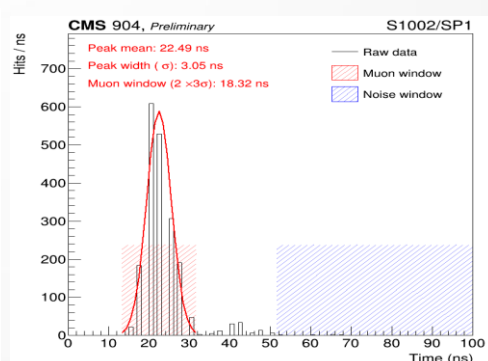
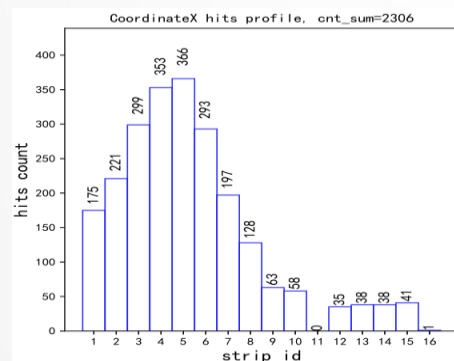
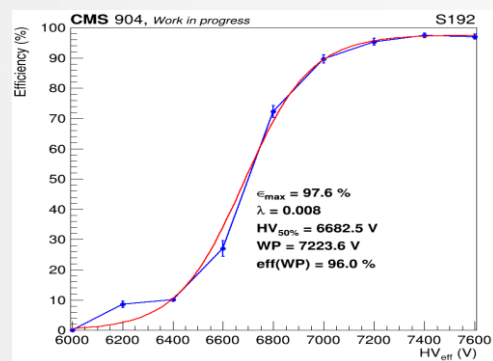
任务一

年度进展(2):

- 2020.3 在CERN完成了与探测器的联调，取得了里程碑进展
- 联调结果符合预期，得到合作组认可
- 数据分析结果代表合作组在RDTM发表



在CERN与iRPC
探测器联调



部分联调测试结果

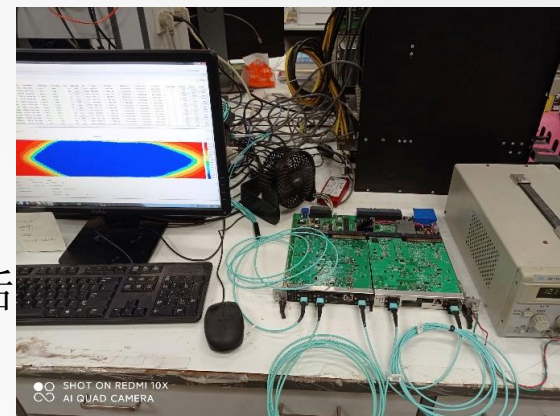
CMS-RPC 触发升级年度进展 (3)

任务二

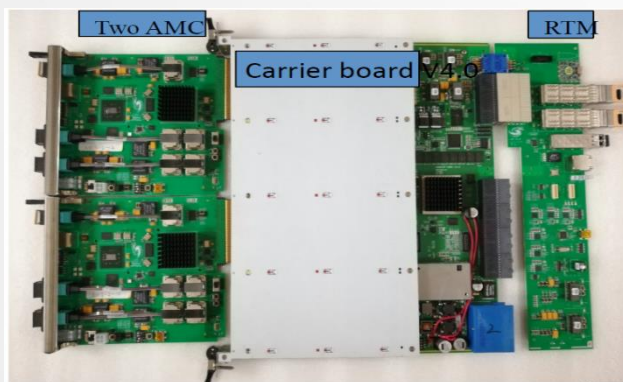
- 负责现RPC升级的后端综合电子系统的设计与建造
(统一的触发预处理、快控制、慢控制及数据获取)

年度进展 (3)

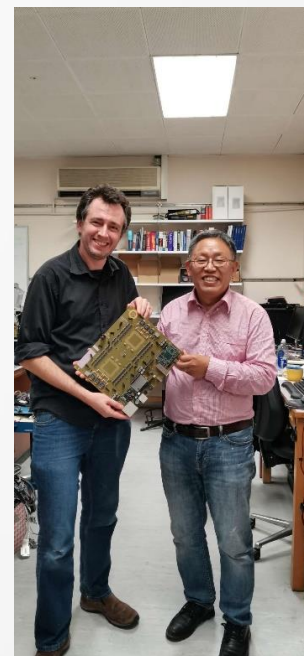
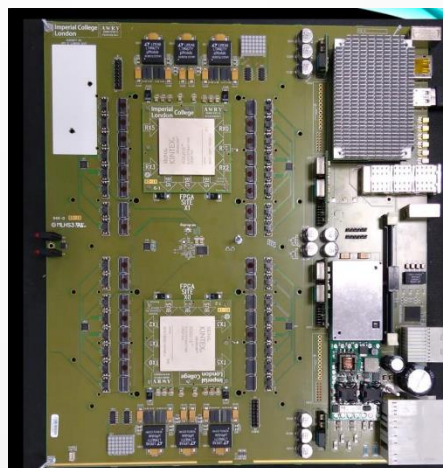
- 基于高能所研制的 ATCA 原型样机在 高能所建立了 ATCA 后端综合电子学开发系统
- 刘振安访问了英国帝国理工大学粒子物理实验室，讨论 CMS Serenity ATCA 板开发联合体的开发设计技术讨论
- 开始了高能所载板加双插件板的设计转化为载板加双子板的探讨
- 在 高能所开始了基于 lpGBT 底层协议的 ATCA 验证平台



高能所 ATCA 开发测试平台



高能所为CMS设计的 ATCA原型板



2020年发表的有中国组重要贡献的分析

序号	物理道	文章 / PAS号	中国组的贡献
1	RunII VBS $Z\gamma$	CMS-PAS-SMP-18-007	北大: 分析负责人, 预审、审核报告
2	RunII VBS $W\gamma$	CMS-PAS-SMP-19-008	北大: 分析负责人, 预审、审核报告
3	Polarized VBS	CMS-PAS-SMP-20-006	北大: 审核报告
4	VBS ZZ	CMS-PAS-SMP-20-001	北大: loop induced ZZ 本底模拟及分析
5	Heave Jet Tagger	CMS-PAS-JME-18-002	北大: Scale factor; Mass Decorrelation Tagger
6	New physics search with top	CMS-PAS-TOP-17-020/EPJC79(2019)886	北航: 审核报告
7	ttH ($\gamma\gamma$)	PRL 125, 061801 (2020) CMS-HIG-19-013	浙大: 在CP测量方面做出贡献, 文章编辑, 预审、审核报告 高能所: 在分析框架、事例触发等方面做出贡献, 是CMS内部文章的编辑之一
8	HZZ anomalous couplings	CMS-PAS-HIG-19-009	浙大: 分析负责人, 审核报告

CMS的分析负责人每个分析只有一个

2020年发表的有中国组重要贡献的分析

序号	物理道	文章 / PAS号	贡献
9	H->gg质量测量	CMS-PAS-HIG-19-004 PLB 805 (2020) 135425	高能所：在分析框架、事例触发、光子鉴别、MC模拟修正、光子能量刻度、电子的排除以及效率等方面做出贡献，是CMS内部文章的编辑之一
10	H->gg截面测量	CMS-PAS-HIG-19-015	
11	HH (bbgg)	CMS-PAS-HIG-19-018	
12	ttH 多轻子道	CMS-PAS-HIG-19-008	高能所：主推的DNN方案成为新的分析基准， unblinding 报告
13	暗光子、类轴子寻找	CMS-PAS-HIG-19-007	高能所：负责轻子效率测量、蒙卡样本修正、
14	轻子夸克	CMS-PAS-EXO-19-015	高能所：预审核报告
15	ZZ->4l截面及aTGC约束	CMS-PAS-SMP-19-001 arXiv:2009.01186	高能所：负责缪子效率及其误差确定，独立分析框架检验
16	pPb对撞中Drell-Yan过程	CMS-PAS-HIN-18-003	高能所：分析联系人，预审核、审核报告
17	产生子模型调节	CMS-PAS-GEN-17-001 Eur. Phys. J. C 80 (2020) 4	高能所：审核报告
18	e和 γ 重建、鉴别性能研究	CMS-PAS-EGM-17-001	高能所：负责光子能量刻度的验证、光子相关数据与MC的比对
19	B \rightarrow K* $\mu\mu$ 角分析	CMS-BPH-15-009 arXiv 2010.13968	北大：选择条件与拟合优化

2020发表有中国组重要贡献的CMS文章/PAS

1. SMP-18-007, AN-2017/053, **JHEP 06 (2020) 076**, Measurement of the cross section for electroweak production of a Z boson, a photon and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV and constraints on anomalous quartic couplings; 预审、审核报告、文章编辑、分析负责人
2. SMP-19-008, AN-2017/060, **arXiv: 2008.10521**, Observation of the electroweak production of $W\gamma$ in association with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV; 预审、审核报告、文章编辑、分析负责人
3. SMP-20-001, AN-2019/172, **arXiv:2008.07013**, Evidence for vector boson scattering in events with four leptons and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV;
4. SMP-20-006, AN-2020/045, **arXiv:2009.09429**, Measurements of production cross sections of polarized same-sign W boson pairs in association with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV; 审核报告
5. JME-18-002, AN-2018/107, **JINST 15 (2020) P06005**, Identification of heavy, energetic, hadronically decaying particles using machine-learning techniques;
6. BPH-15-009, AN-2012/066, Study of the angular distributions and differential branching fraction of the decay $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$, **arXiv:2010.13968**
7. Top-17-020, AN-2017/132, **EPJC 79 (2019) 886**, Search for new physics via top quark production in dilepton final state at 13 TeV; 审核报告
8. HIG-19-013, AN-2019/186, **PRL 125, 061801 (2020)**, Measurements of $t\bar{t}H$ production and the CP structure of the Yukawa interaction between the Higgs boson and the top quark in the diphoton decay channel; 预审、审核报告, 文章编辑
9. HIG-19-009, AN-2019/095, Constraints on anomalous Higgs boson couplings to vector bosons and fermions in production and decay in the $H\mu\mu$ channel; 审核报告, 分析负责人

2020发表有中国组重要贡献的CMS文章/PAS

10. CMS-GEN-17-001, Extraction and validation of a new set of CMS PYTHIA8 tunes from underlying-event measurements, arXiv:1903.12179, **Eur. Phys. J. C 80 (2020) 4**; 审核报告
11. CMS-HIG-19-004, A measurement of the Higgs boson mass in the diphoton decay channel, **PLB 805 (2020) 135425**; 文章编辑, **HiggsCouplings2019**结果首发报告
12. CMS-HIG-19-013, Measurements of ttH production and the CP structure of the Yukawa interaction between the Higgs boson and top quark in the diphoton decay channel, **PRL 125 (2020) 6, 061801**; 文章编辑之一
13. CMS-SMP-19-001, Measurements of $pp \rightarrow ZZ$ production cross sections and constraints on anomalous triple gauge couplings at $\sqrt{s} = 13$ TeV, arXiv:2009.01186, 提交EPJC
14. CMS-PAS-EGM-17-001, Electron and photon reconstruction and identification with the CMS detector in LHC Run 2; 文章编辑之一, CWR结束
15. CMS-PAS-HIN-18-003, Differential measurements of the Drell-Yan process in the muon channel in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV, **PAS public**, CWR结束, 分析联系人, 审核报告
16. CMS-PAS-HIG-19-007, Search for a low-mass dilepton resonance in Higgs boson decays to four-lepton final states at $\sqrt{s} = 13$ TeV, **PAS public**, CWR结束
17. CMS-PAS-HIG-19-008, Higgs boson production in association with top quarks in final states with electrons, muons, and hadronically decaying tau leptons at $\sqrt{s} = 13$ TeV (**unblinding talk**), **PAS public**, CWR结束

2020发表有中国组重要贡献的CMS文章/PAS

18. CMS-PAS-EXO-19-015, Search for singly and pair-produced leptoquarks coupling to third-generation fermions in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV; PAS public, CWR结束, 预审核报告
19. CMS-PAS-HIG-19-015, Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel at $\sqrt{s} = 13$ TeV; PAS public, 文章编辑
20. CMS-PAS-HIG-19-018, Search for nonresonant Higgs boson pair production in final states with two bottom quarks and two photons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV; 进入CWR, 文章编辑

单独署名文章:

- Chaochen Yuan *et al.*, "Producing and detecting long-lived particles at different experiments at the LHC", arXiv:2004.08820
- Congqiao Li *et al.*, "Loop-induced ZZ production at the LHC: an improved description by matrix-element matching", arXiv:2006.12860
- Junho Lee *et al.*, "Polarization fraction measurement in ZZ scattering using deep learning", Phys. Rev. D 100, 116010 (2019)
- Qun Wang *et al.*, "Production of Z-bosons in the parton branching method", PRD 100, 074027 (2019)

中国组代表CMS在国际会议报告Plenary 3个

1. Experimental status of $b \rightarrow s(d)\mu\mu$ transitions, [Dayong Wang](#), FPCP2020, 8-12 June 2020, (Spain) .
2. CMS Higgs cross section combination and EFT interpretations, [Meng Xiao](#), Higgs Couplings 2019, 2019/10
3. Latest calibration methods: CMS, [Joshua Thomas-Wilsker](#), HFT2020: ATLAS-CMS Flavour tagging workshop 2020, 21 Apr 2020, CERN, Video only (Switzerland)

中国组代表CMS在国际会议报告分会报告 6个

1. Search for new particles in the process of $ZZ^* \rightarrow 4l$ at CMS, [Qianying Guo](#), EIPHANY2020, 06-06-11 Jan-2020
2. JHU generator framework new features for Higgs boson studies , [Meng Xiao](#), ICHEP2020, 2020/08
3. Latest experimental results related to the initial state, [Emilien Chapon](#), LHCP2020: The Eighth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics (LHCP2020), 25-30 May 2020, Video-only (Virtual World)
4. Recent results on hard and rare probes from CMS, [Emilien Chapon](#), LHCP2020: The Eighth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics (LHCP2020), 25-30 May 2020, Video-only (Virtual World)
5. Recent $t\bar{t}H$ Measurements with CMS, [Joshua Thomas-Wilsker](#), LHCP2020: The Eighth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics (LHCP2020), 25-30 May 2020, Video-only (Virtual World)
6. Higgs cross section measurements in the four lepton final state at CMS, [Tahir Javaid](#), Epiphany: XXVI Cracow Epiphany Conference on LHC Physics: Standard Model and Beyond, 7-10 Jan 2020, Cracow (Poland)

中国组代表CMS在国际会议报告Poster 3个

1. Measurement of the cross section and constraints on anomalous quartic couplings from VBS Zgamma with CMS detector (poster), [Ying An](#), LHCC, 19 Feb 2020, CERN (Switzerland).
2. Constraining nPDFs with Drell-Yan production in pPb collisions with the CMS experiment, [Emilien Chapon](#), HardProbes2020: 10th International Conference on Hard and Electromagnetic Probes of High-Energy Nuclear Collisions, 31 May-5 Jun 2020, Austin, TX (United States) online
3. Higgs cross section measurements in the four lepton final state at CMS, [Tahir Javaid](#), Posters@LHCC: Students' Poster Session at the 2020 Winter LHCC meeting, 19 Feb 2020, CERN, Geneva (Switzerland)

任CMS实验二/三级管理职位统计表

分组 (二级)	人员	管理级别	所属三级 分组	服务期限
软件计算组	李强	二级	-	2020.6-
产生子组	李强	二级	-	2018. 09-2020. 09
重离子物理组	Emilien Chapon	二级		2018.09-2020.09
RPC 触发组	刘振安	二级	-	2019.09-
Top group/Top+X	Joshuha Thomas- Wilsker	三级	-	2020.7-
Egamma ID group	Anshul Kapoor	三级	-	2020.9-
B-Tagging组	J. Thomas-Wilsker	三级	Performance	2018.9-
物理性能以及数据集 PdmV	M. Ahmad	二级	-	2020.9-
物理性能以及数据集 DQM	J. Martins	二级	-	2020.9-
物理性能以及数据集	M. Ahmad	三级	Validation	2017.12-2020.8
Egamma HLT group	Ram Krishna Sharma	三级		2020.10-
B2G分析组	Antonis	三级	共振态组召集人	2020.9-
标准模型分析组	彭靖	三级	MC Contact	2019.6-
Jetmet 组	吕旭东	三级	MC Contact	2019.10-
希格斯物理组	肖滕	三级	Higgs联合分析 和EFT组召集人	2020.09 -

任CMS实验二/三级管理职位统计表

物理分组 (二级)	人员	管理级别	所属三级 物理分组	服务期限
LHC实验 Higgs物理工作组	J. Thomas-Wilsker	/	WG1 ttH	2019.06-
希格斯物理组	郭倩颖	/	HZZ MC联络人	2019.01-
产生子组	Junquan Tao	/	MC generator photos++联络人	2018年-
产生子组	卞建国	/	MC generator BCVEGPY 联络人	2011-
标准模型分析组	卢梦	/	MC联络人	2017.4-2019.12
B-Tagging组	王锦	/	MC联络人	2019.05-
希格斯物理组	王锦	/	Hgg MC联络人	2019.10-
B2G 分析组	Agapitos	三级	MC Contact	2019.5-
标准模型分析组	安莹	三级	Electron Contact	2019.10-
标准模型分析组	肖杰	三级	机器学习联络人	2020.9-
RPC电子学	赵京周	三级	RPC 触发组	2020. 9-
TOP组/ Tracking 组	Duncan Leggat	/	MC联络人/ tracking validator	2019.11-/ 2020.03-
EXOTIC分析组	Anshul Kappor	/	Electron Object Expert	2018.04-2020.09
EXOTIC分析组	Ram Krishna Sharma	/	联络人	2019.12-
产生子组	Duncan Leggat		generator operator	2020.1-

举办国际学校 – CMS Data Analysis School

北京大学于2019年12月9日至13日举办了第22届CMSDAS国际数据分析学校，李强任主席。共有学生54人、讲课教师30人参加，总参与人数84人，包括CMS实验组发言人Roberto Carlin教授。这是CMSDAS也是LHC实验组类似学校首次在中国大陆举行，对于加强国内各高校的学生培养、增加亚洲地区CMS组合作有重要意义。



任CMS实验其它管理职位统计表

高能所陈和生院士2016.09至今担任Management Board member (执委会委员)和发言人顾问委员会委员

北大王群2020年获选担任Thesis Award Committee Member

浙大肖朦2019.09至今为CMS CB advisory board member(合作组顾问委员会),
2020.10至今为CMS diversity office member (多元委员会)

北大钱思进长期担当CMS Authorship Committee成员

获奖情况

- 高能所博士后Efe Yazgan获得2019年CMS Achievement Award表彰 (2019年合作组共28人获得该奖项)

Efe Yazgan

Chinese Academy of
Sciences

For his work in the validation tools for
generators and for sample production.

Efe自2016年加入高能所CMS组，2017-2019年担任CMS Generator组召集人（L2）

- 北航新引进成瞳光博士也获得2019年CMS Achievement Award表彰
 - 曾在高能所做第一期博士后

<https://cms.cern/content/achievement-awards-2019>

小结

- CMS中国组努力工作，尽管没有突破标准模型，仍然在希格斯性质测量、新粒子寻找、标准模型检验三方面取得一批很好的成果，发表了有我方贡献的CMS文章16篇。
- 队伍稳中前进：2019年底复旦大学申请加入！
- Phase-2 R&D多项工作，目前进展良好，升级经费获得了基金委、科技部的大力支持，但经费缺口依然较大，希望基金委、科技部能给予更多经费支持，以便完成中国组对CMS二期升级 1% 的贡献。

**感谢基金委、科技部、科学院和兄弟单位长期大力支持！
请大家指正！**



感谢您的批评指正

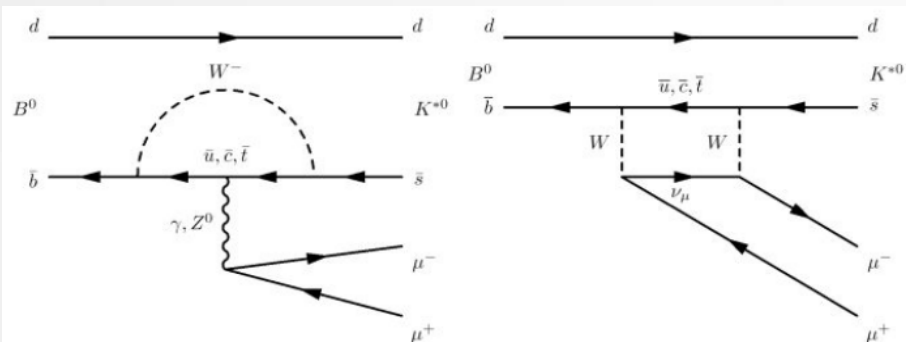
沈成平

shencp@fudan.edu.cn



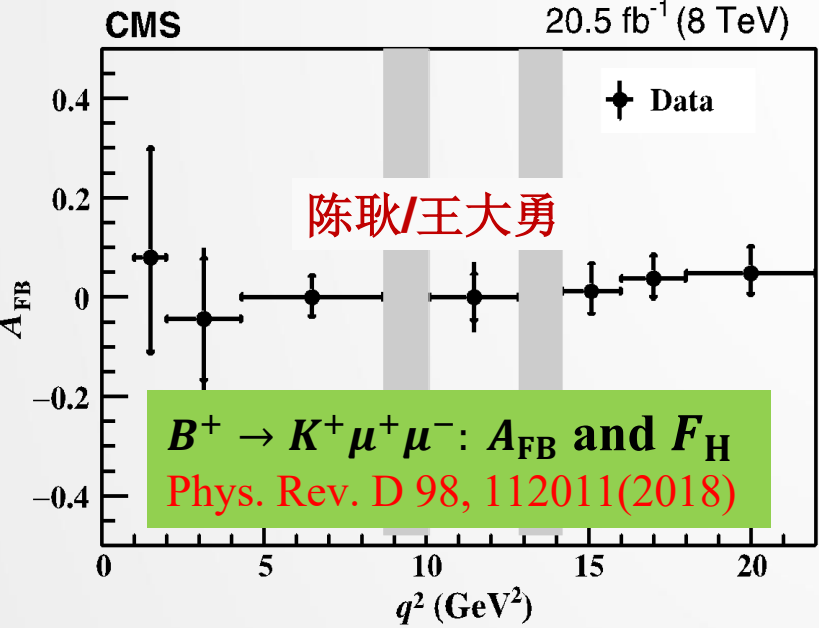
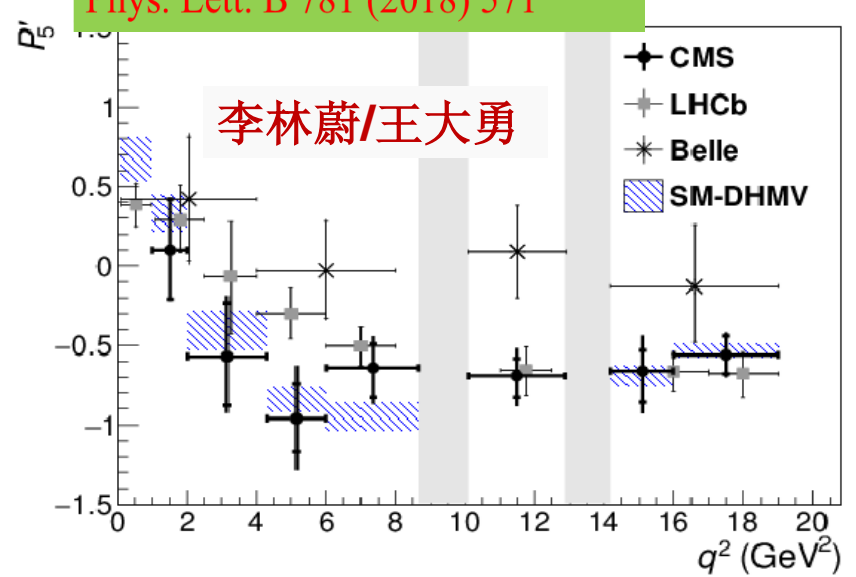
$b \rightarrow s \mu^+ \mu^-$ 角度分析

味改变中性流过程对新物理敏感!



“B 介子反常” → 多种新物理模型

$B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$: P_1 and P_5'
Phys. Lett. B 781 (2018) 571



$B^+ \rightarrow K^{*+} \mu^+ \mu^-$: 首次角度分析
(陈耿/王大勇参与)
得到ICHEP2020大会总结报告展示

国际会议报告展示:
BEAUTY2018 (口头) BEACH2018 (口头)
ICHEP2018 (口头) LP2019 (海报)
FPCP2020 (口头)

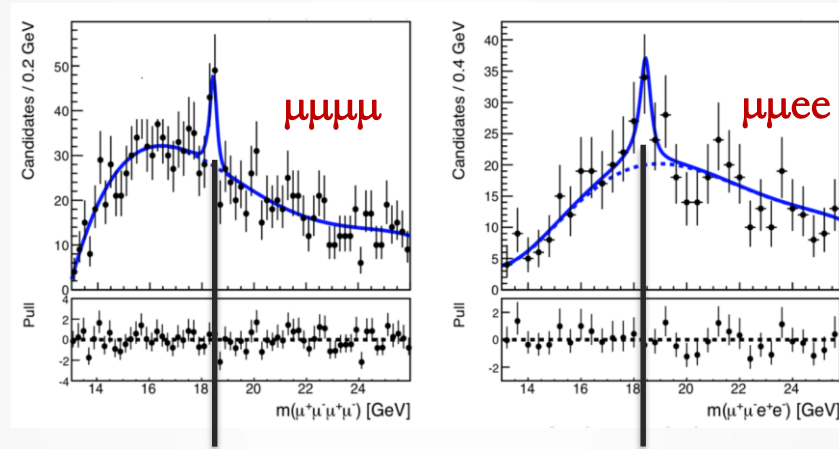
Run-II 数据分析进行中

全重味奇特强子态

- 早在上世纪八十年代，赵光达等理论学家预测了**全粲四夸克态**的存在
 - CMS在2013年对Run 1数据在 $J/\psi J/\psi$ 末态做了初步探索并有所斩获
 - **清华(+南师)** CMS组目前正对此进行系统全面的研究。如Run 1的痕迹在Run2的海量数据中得到确认，将对全粲四夸克态的存在做出决定性的判定
 - 目前LHCb在 $J/\psi J/\psi$ 末态看到了新的结构。CMS将做独立无偏差的分析，并对LHCb结果进行检验
 - **清华(+南师)、复旦** CMS组除在 $J/\psi J/\psi$ 末态的研究以外，也在 $J/\psi \psi(2S)$ 末态， $J/\psi \Upsilon$ 末态， $\Upsilon \Upsilon$ 末态等展开了系统研究，对全重味四夸克态进行前所未有的全面探测，预期未来几年取得突破性结果
- 8项分析同步推进
 - 第1篇(四夸克态cccc)预计年底前发出
 - 其它7篇预计未来1-2年内发出

超出标准模型新物理

- 在 LHC Run 1 的数据中，在 $\mu\mu\mu\mu$, $\mu\mu ee$, $\mu\mu\gamma$ 等衰变道看到了新的结构，不变质量均在18 GeV 附近 (4b阈值之下)



- 阈值之下是否存在束缚态不确定
- 如果不是统计涨落，也可能是超出标准模型的新物理
- 清华(+南师)CMS组在JJ*, $\Upsilon\Upsilon^*$ 末态开展了研究

Analysis	AN
Below 4c threshold search	AN-20-173
Below 4b threshold search	AN-19-244, AN-19-274

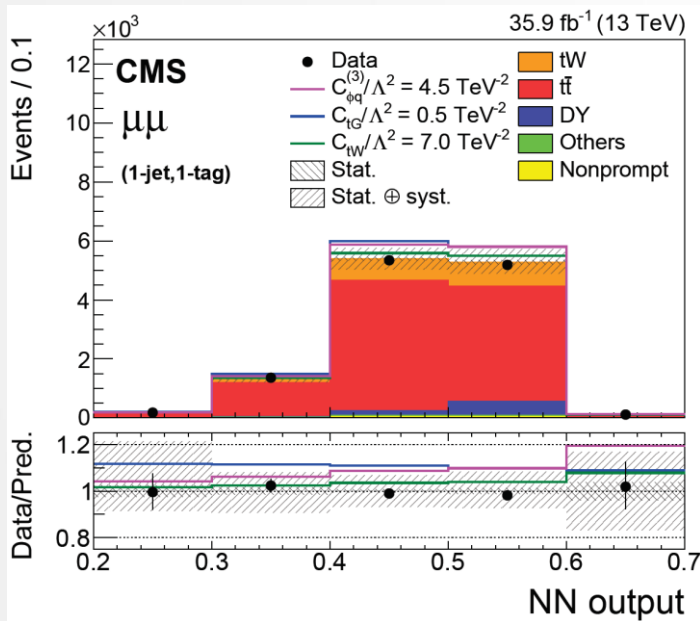
利用双轻子末态寻找含top产生过程的新物理

首次利用tW过程在有效场论框架下来寻找新物理

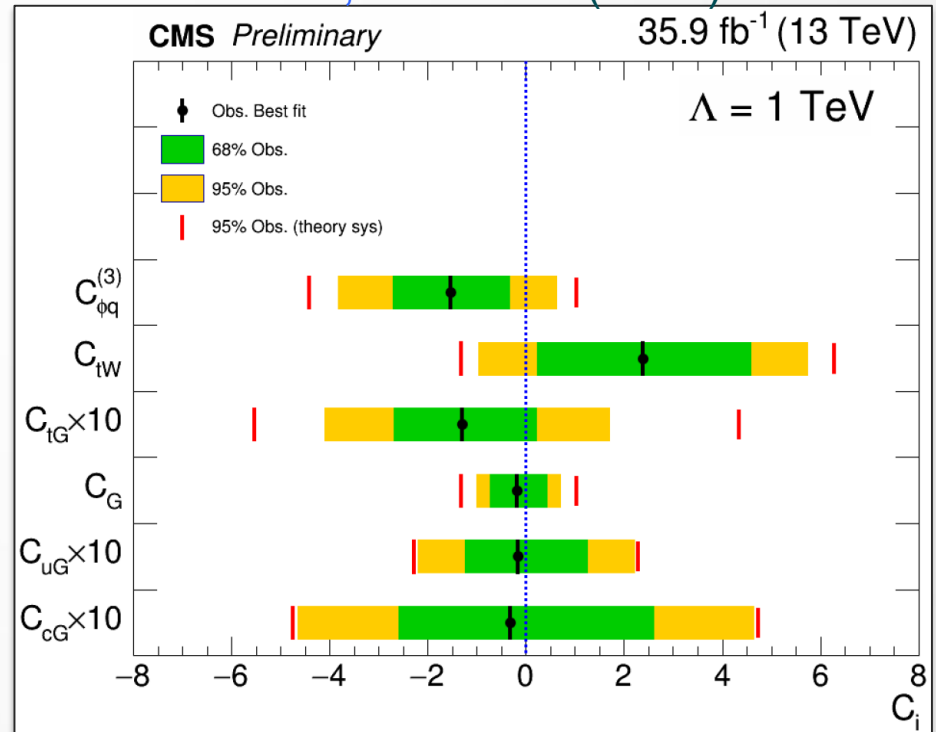
对有效场论框架下的反常耦合给出了严格的限制

北航组成员方文兴，高旭阳在该分析中作出主导性贡献，做审核报告

2016年数据分析结果发表在CMS-PAS-TOP-17-020, EPJC 79 (2019) 886



双缪子末态的神经网络输出

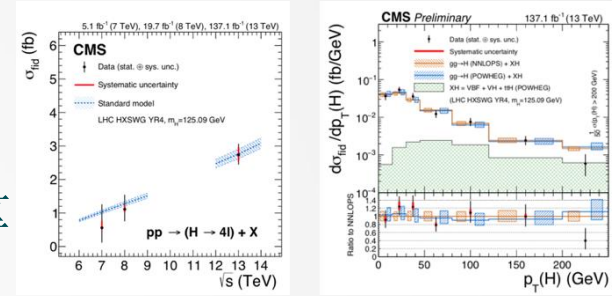


首次对 C_G 给出了限制，提高了之前 C_{tG} 的结果，首次利用tW过程对 C_{tW} , $C_{\phi q}^{(3)}$, C_{uG} , C_{cG} 给出限制

清华CMS组其他物理分析

– 希格斯到四轻子的性质测量HIG-PAS-19-001

- PAS released (Moriond 2019), paper In progress
- 主要贡献: 信号形状参数化, 基准(fiducial)截面测量

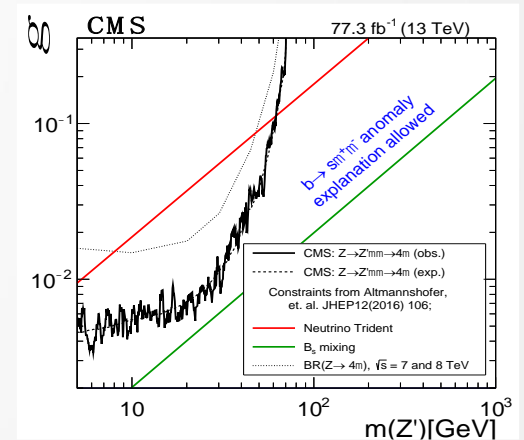
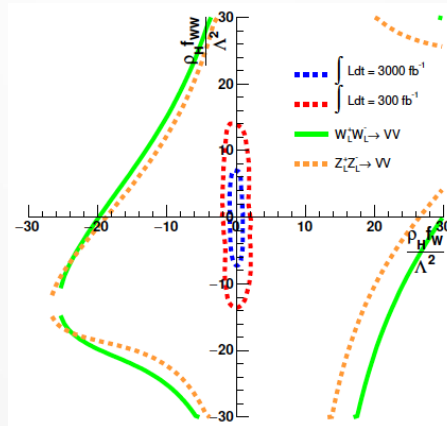
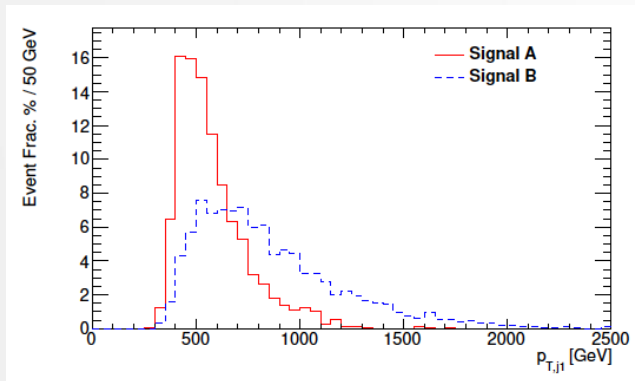


– 在Z到四缪子衰变中寻找Z'

- 2017+2018数据已发表, 全部Run 2数据新衰变道 (3μ)正在进行中

– 一般重希格斯粒子的寻找 (Run 3)

- 预研结果已发表, Phys. Lett. B 804 (2020) 135358



WZγ 三玻色子的测量

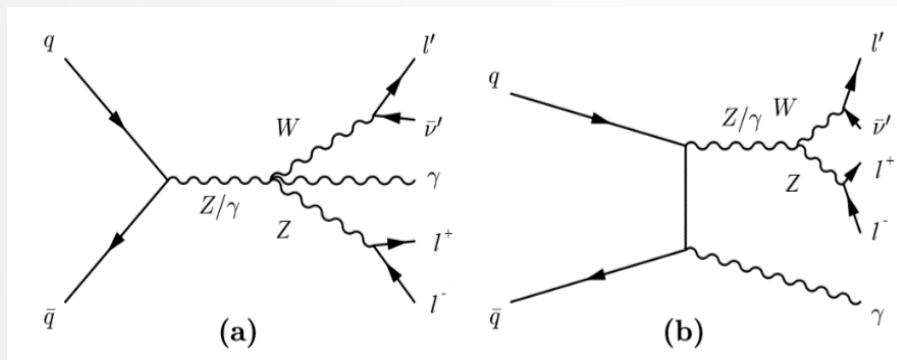
中山大学

		E_1^γ threshold	Observed	Expected	SM Prediction
		[GeV]	limit [fb]	limit [fb]	σ_{theo} [fb]
Fully leptonic	$e\nu\mu\nu\gamma$	120	0.3	$0.3^{+0.3}_{-0.1}$	0.076 ± 0.004
Semileptonic	$e\nu jj\gamma$	200	1.3	$1.3^{+0.5}_{-0.3}$	0.057 ± 0.013
	$\mu\nu jj\gamma$	200	1.1	$1.1^{+0.5}_{-0.3}$	0.051 ± 0.011
	$\ell\nu jj\gamma$	200	0.9	$0.9^{+0.3}_{-0.2}$	0.054 ± 0.009

- 利用8TeV数据和半轻衰变模式中, 已经测量了WZγ 散射截面
- 将利用纯轻衰变模式进行测量
- 分析正在进行中

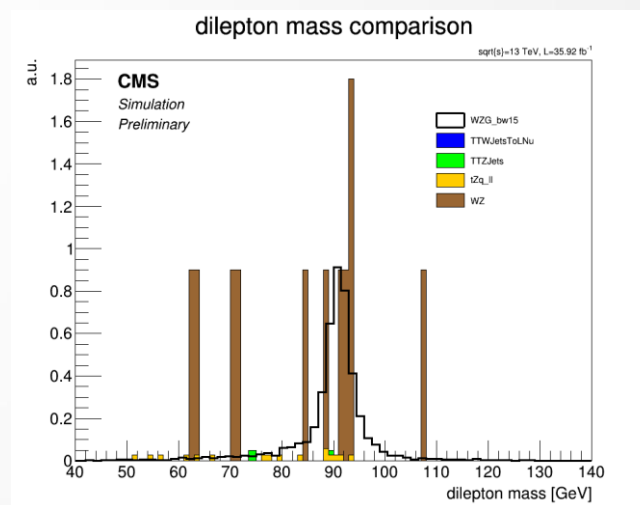
ATLAS, Eur. Phys. J. C (2017) 77:646

$pp \rightarrow WZ\gamma \rightarrow \ell\nu\ell^+l^-\gamma$
 ($W^\pm \rightarrow \ell^\pm + \nu$, $Z \rightarrow \ell^+ + \ell^-$)
 检验标准模型的电弱理论
 对反常四规范玻色子耦合进行



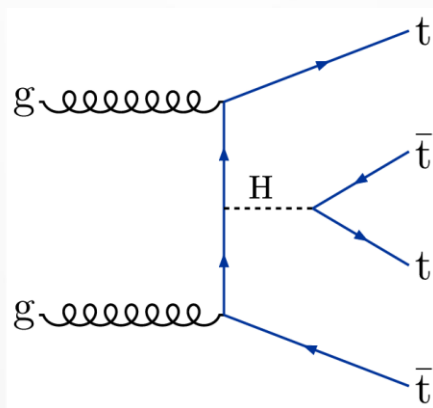
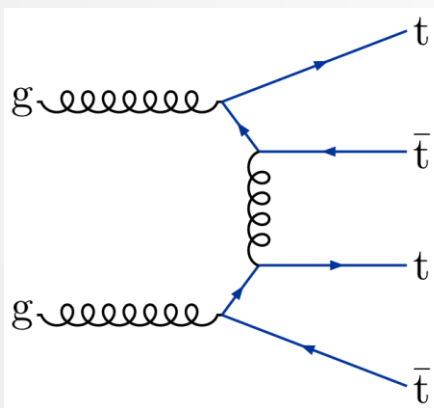
Quartic Gauge-boson Coupling Triple Gauge-boson Coupling

Phys. Rev. D 2013, 88, 015023.

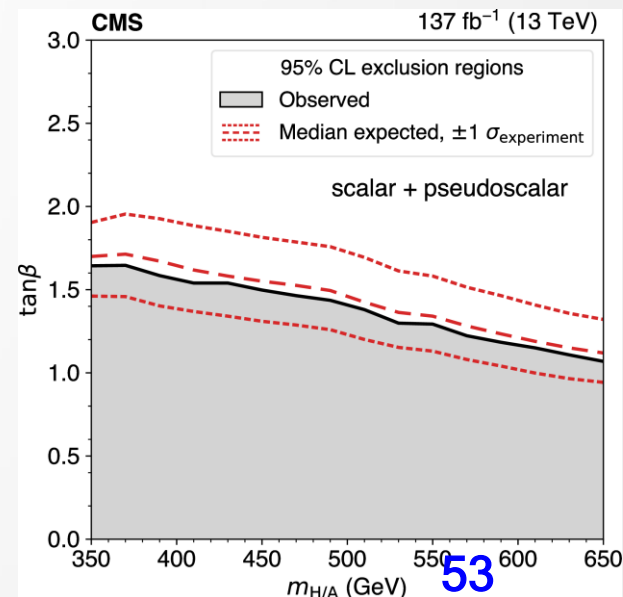


标准模型测量：4顶夸克产生截面测量

- 4 顶夸克的物理过程是标准模型允许的稀有衰变过程。
- 对顶夸克的汤川耦合强度和 CP 特性非常敏感，也会受到超出标准模型物理过程的影响（如重希格斯玻色子衰变到顶夸克对）。
- 在含有 tau 轻子的末态中寻找 4 顶夸克的产生过程，这是在之前的 ATLAS 和 CMS 分析中还没有尝试过的衰变模式。
- 预期可以增加 4 顶夸克产生截面测量的灵敏度，从而在 Run-3 阶段发现 4 顶夸克的产生过程并给出反应截面的测量结果。
- **复旦**大川英希和**高能所**廖洪波做主导性贡献。

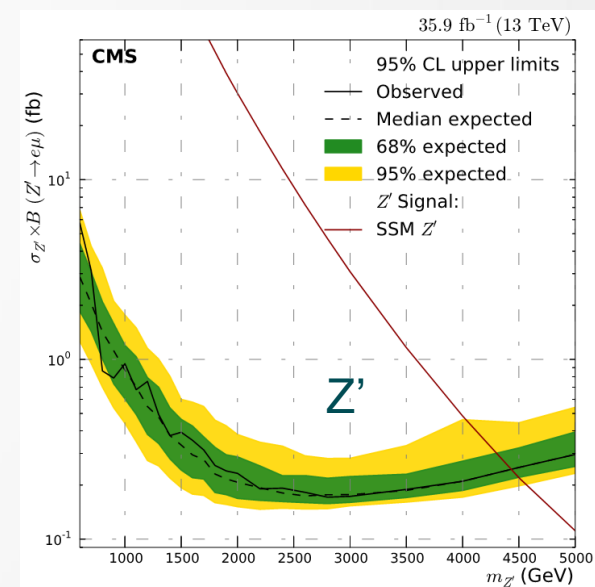
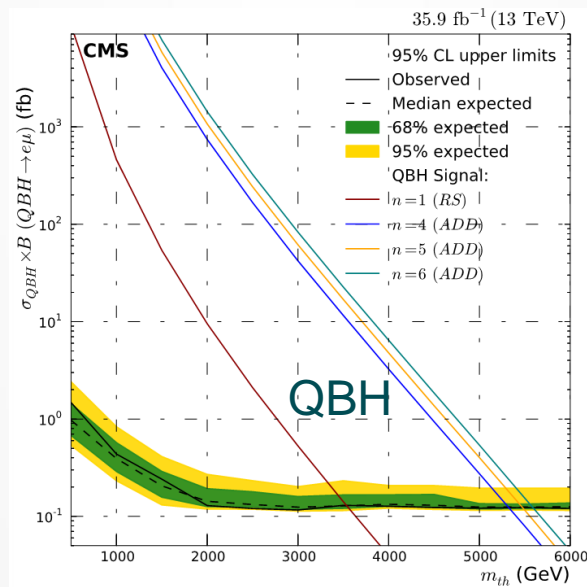
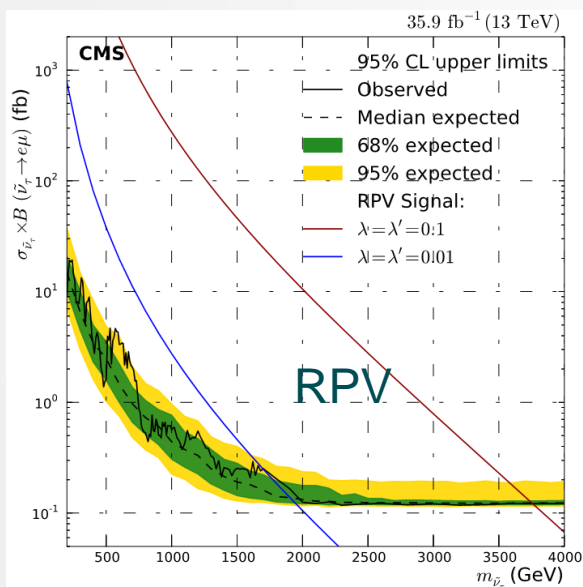


4顶夸克产生过程



新粒子寻找：大质量的轻子味破缺

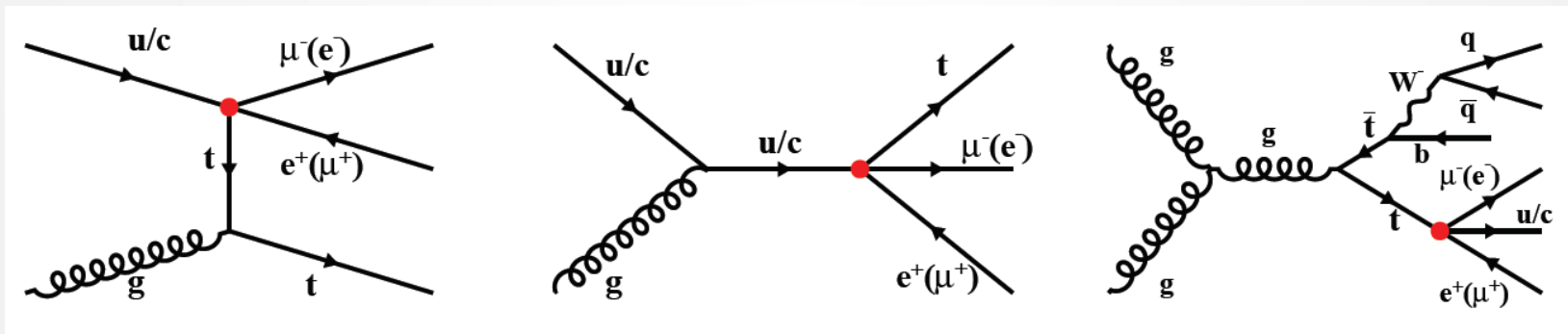
- 标准模型中的轻子味守恒并未有对称性支持，很多超标准模型理论都允许存在轻子味破缺现象，是寻找新物理/新粒子的重要途径。
- 已经利用2016年数据电子-缪子末态寻找轻子味破缺过程相关的新物理现象。结果发表于JHEP, 04 (2018) 073，**复旦**组成员高旭阳在该分析中作出主要贡献。
- 利用全部Run 2 数据的分析，结合电子-缪子，电子-陶子，缪子-陶子的新分析正在顺利进行。



CMS 2016年数据得到的不同理论模型截面上限。

新物理寻找：顶夸克轻子味破缺

- 利用电子-缪子末态在顶夸克（对）的产生和衰变过程中寻找轻子味破缺现象。
- 对有效场论框架下的非标准模型耦合给出严格限制。
- 分析利用Run 2阶段全部数据，正在进行中。
- **复旦**组成员高旭阳在该分析中作出主要贡献。



顶夸克（对）产生和衰变过程

希格斯自耦合性质研究

- 希格斯的自耦合即自相互作用是一种全新的基本相互作用，它的观测及测量有助于深入地理解弱电真空自发破缺机制，确定希格斯场参与的真空相变的形式。希格斯的自耦合研究是当前LHC和未来HL-LHC希格斯性质研究的重点。
 - 可以利用双希格斯粒子(HH)的产生过程直接探测希格斯的自耦合性质
- 高能所组目前在 $HH \rightarrow WW\gamma\gamma$ ， $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 分析以及双希格斯多衰变道联合分析中做出重要贡献
 - CMS实验上首个 $HH \rightarrow WW\gamma\gamma$ 分析，高能所主导全轻子及全强子衰变道的数据分析，以及半轻衰变道多变量分析方法的研究。
 - 预计明年发表1-2篇PAS
 - $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 末态是HH分析中最灵敏的衰变道之一，高能所成员负责蒙特卡罗 (MC) 样本的产生、光子MC模拟的修正研究、光子能量重建和刻度以及鉴别、电子排除效率以及数据与MC的修正因子的研究和应用。
 - Run2分析已经通过CMS内部审核，准备提交发表JHEP期刊文章
 - 利用全部双希格斯的衰变模式，最大化双希格斯产生过程的测量精度，高能所在当前双希格斯联合测量统计分析中做出重要贡献。
 - 预计明年发表一篇期刊文章

希格斯与费米子作用CP结构的世界首测量

PRL 125, 061801 (2020)

- 首个希格斯与顶夸克耦合宇称 (CP) 性质测量, 纯奇宇称 3σ 被排除
 - 通过 $ttH(\gamma\gamma)$ 末态
- 浙大作预审和终审报告, 担任文章编辑
- CERN courier 报道: First foray into CP symmetry of top-Higgs interactions
- CMS news 报道: Photon pairs illuminate Higgs particle top quarks and their connection
- LHCP 2020 CMS 亮点工作

