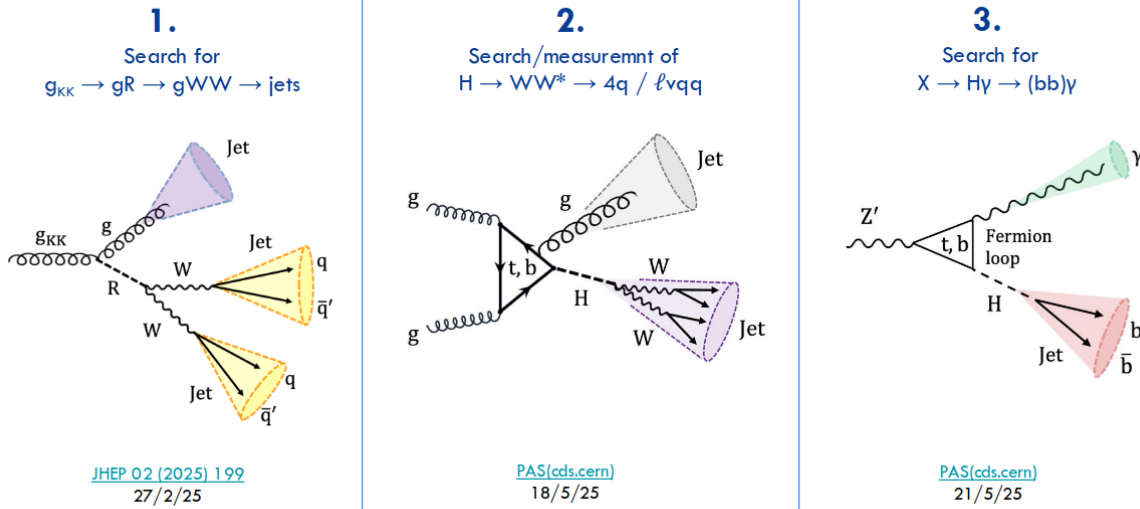


Data analyses with advanced jet taggers



15/9/25

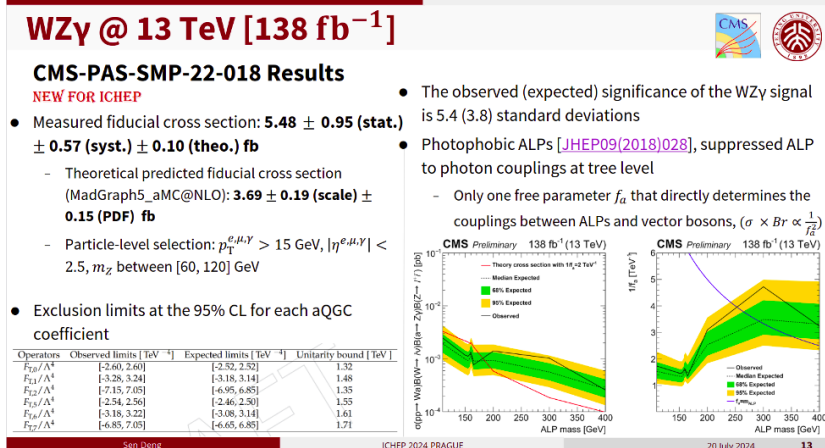
NKUA seminar - Antonis Agapitos

12

李聪乔因为在人工智能喷注标记方面的相关贡献, 获得**CMS**国际合作组**2024**年度优秀论文奖 (**2025年9月底CMSWeek**颁奖) 。

李强课题组在多玻色子物理研究领域取得一批重要进展, 对深入检验标准模型、探测杨-米尔斯非阿贝尔相互作用, 以及揭示可能的**新物理**迹象具有重要意义。

1) 主导完成WZ γ 过程的观测 ([CMS PAS-SMP-22-018](#), [arXiv:2503.21977](#), accepted by PRD)。WZ γ 过程对四规范玻色子耦合 (如WWZ γ 耦合) 提供灵敏度, 因此是标准模型电弱理论的重要试金石。此外, WZ γ 过程也可以用于寻找类轴子粒子, 为暗物质等新物理的发现提供可能的路径。在CMS实验的数据分析中, WZ γ 过程的观测显著度超过5sigma。李强课题组在CMS国际合作组提出并领导了这项工作, 博士研究生邓森担任该分析的负责人, 并做该分析的预审核和审核报告。



Sen Deng

ICHEP 2024 PRAGUE

20 July 2024

13

图:WZ γ 过程的发现及观测工作在两年一度的国际高能物理大会(ICHEP 2024)上作为对撞机物理的亮点得到展示。

2) 主导完成Run3 Z+光子过程的精确测量([CMS-PAS-SMP-24-002](#))。利用CMS实验2022年收集的13.6TeV质子-质子对撞的34.8 fb⁻¹数据, 通过轻子末态测量 Z γ 产生截面, 选取的事例包含一对电荷相反的 μ 子或电子以及一个孤立光子。测得的fiducial截面精度达到4%, 进而对反常中性三玻色子耦合进行了探测。李强课题组在CMS国际合作组提出并领导了这项工作, 北大组博士生牟天钰作为Analysis Contact, 给予Preapproval及Approval报告。

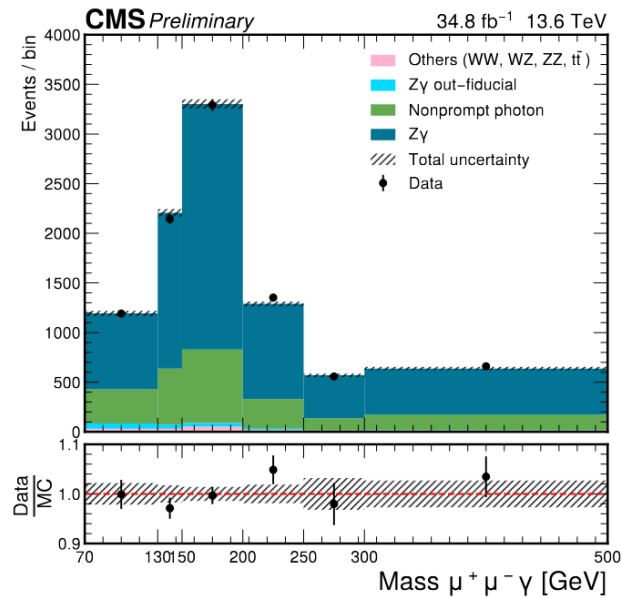


图 :Run3 Z+光子过程测量给出的三体不变质量分布图。

3) 主导完成VBS WH过程的首次探测([arXiv:2405.16566](#), [Phys.Lett.B 860 \(2025\) 139202](#))。利用CMS收集的Full Run2数据, 首次探测了Higgs与W的散射过程。以超过5个标准差的显著度, 排除了HWW 和 HZZ 耦合具有相反符号的新物理场景。李强课题组在CMS国际合作组提出并领导了这项工作, 北大组博士后Andrew Levin及博士生钱思天给予Preapproval及Approval报告。

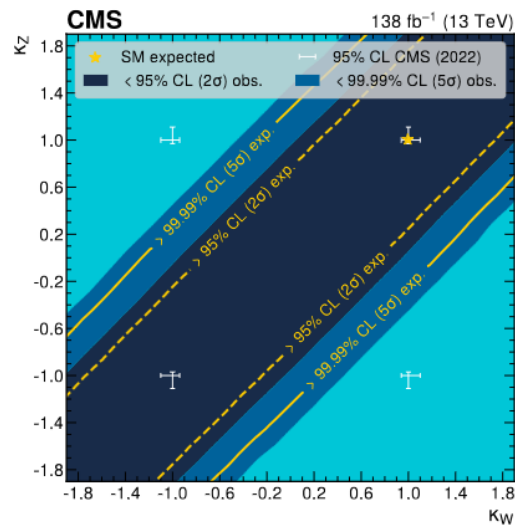


图: 利用CMS收集的Full Run2数据, 首次探测了Higgs与W的散射过程。以超过5个标准差的显著度, 排除了HWW和HZZ耦合具有相反符号的新物理场景。

4) 通过多玻色子末态寻找新物理

[JHEP 02 \(2025\) 199](#), [CMS PAS-B2G-24-007](#), [CMS-PAS-HIG-24-008](#)

李强课题组与欧洲核子研究中心(CERN)合作, 长期致力于喷注标记技术的开发及应用, 特别是近期开发了基于图神经网络的深度学习并应用于新物理寻找以及大动量希格斯的探测, 大幅提高了物理灵敏度。近期成果包括在世界上首次实现了双W玻色子和胶子的共振态、三W玻色子共振态的寻找、开发了3夸克和4夸克特征喷注的鉴别及校准技术。此项研究开拓了新物理寻找的新航线; 在强子对撞机上首次观测到Z玻色子到粲夸克衰变过程, 并获得了希格斯与粲夸克汤川耦合的世界最强实验限制。

课题组提出并完成了对衰变成胶子 g 和两个 W 玻色子的高质量共振的搜索。考虑了 Kaluza--Klein 胶子 g_{KK} 通过标量粒子 R 的级联衰变, $g_{KK} \rightarrow g R \rightarrow gWW$ 。研究的最终状态由三个大半径喷注组成, 其中两个包含强子衰变 W 玻色子的产物, 第三个包含胶子的强子化产物。该分析使用 2016-2018 年 CERN LHC CMS 实验收集的 13 TeV 的质子-质子碰撞数据进行, 对应的积分亮度为 138 fb^{-1} 。 g_{KK} 和 R 候选者的质量分别重建为 trijet 和 dijet 质量。该工作没有观察到超出标准模型背景预期的过量数据事件, 给出了 g_{KK} 的生产截面的上限。CMS Collaboration, Search for high-mass resonances in a final state comprising a gluon and two hadronically decaying W bosons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$, CMS PAS-B2G-23-004, [arXiv:2410.17303](#), [JHEP 02 \(2025\) 199](#). 北大组博士生郭启隆为 Analysis Contact, 郭启隆及博士后 Antonis Agapitos 给予 Preapproval 及 Approval 报告。

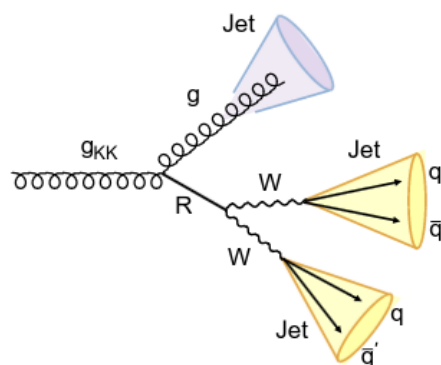
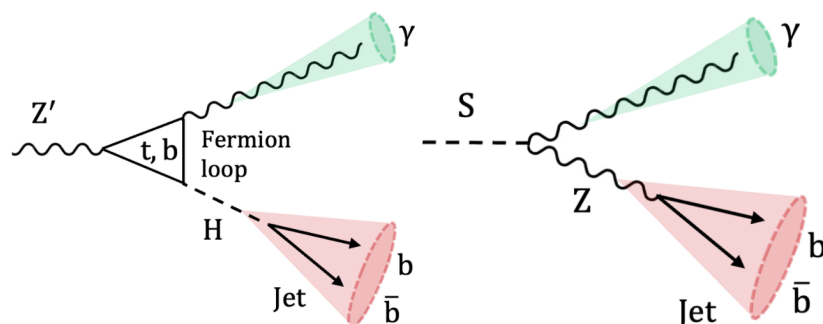


图: Kaluza--Klein 胶子 g_{KK} 通过标量粒子 R 的级联衰变的示意图。

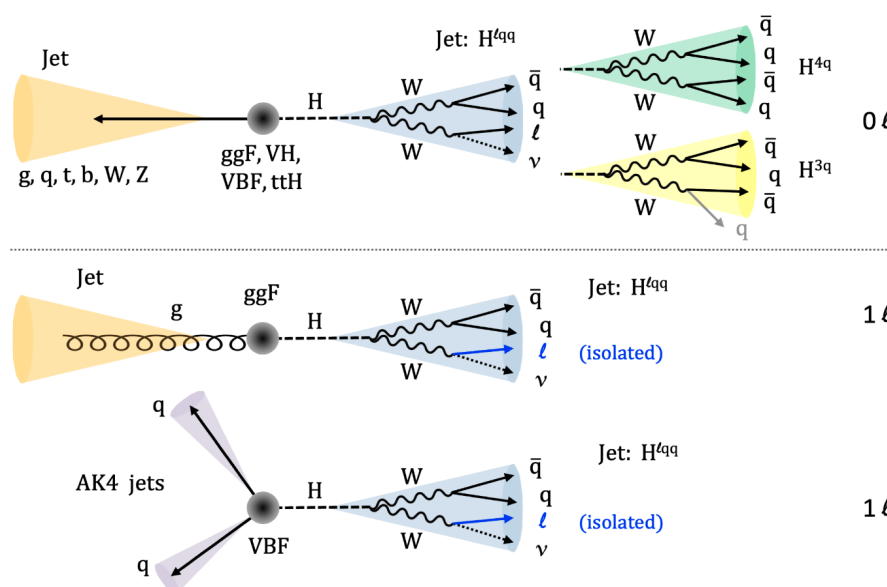
课题组还进行了探寻重共振态衰变为希格斯(H)或Z玻色子以及一个光子的研究, 其中 H 和Z玻色子进一步衰变为一对底夸克($b\bar{b}$)。分析使用的是CMS实验在CERN大型强子对撞机(LHC)以 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ 质子-质子碰撞收集的数据, 总积分亮度为 138 fb^{-1} 。所分析的事例包含一个光子和一个具有显著洛伦兹增益的大半径大质量喷注, 该喷注包含 $b\bar{b}$ 系统, 并被识别为 H 或Z玻色子的候选体。分析中采用了一种基于Transformer架构的先进味识别算法, 对喷注的子结构进行分类, 将其分为314类, 并用于高效识别和选择衰变为 $b\bar{b}$ 的 H 和Z玻色子候选喷注, 同时抑制背景。通过一组参数化函数对光子-喷注不变质量谱进行拟合, 以提取潜在信号。未观察到超出标准模型预期的显著超额。研究结果被解释为对狭窄的自旋-1 $H\gamma$ 共振态和不同宽度的自旋-0 $Z\gamma$ 共振态的产生截面

与衰变分支比乘积的上限。这些限制目前是最严格的。CMS Collaboration, Search for heavy H_γ and Z_γ resonances with a b quark pair final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, [CMS PAS-B2G-24-007](#), 北大组博士生付大为作为 Analysis Contact, 付大为及北大组博士后 Antonis Agapitos 分别给予 Preapproval 及 Approval 报告。



图：重共振态衰变为希格斯(H)或Z玻色子以及一个光子的示意图。

课题组还进行了对大横动量希格斯粒子衰变(非全轻衰变)到两个 W 玻色子过程的寻找, 该物理分析利用了大型强子对撞机在 2016-2018 年质心能量为 13 TeV 的积分亮度为 138/fb 的质子-质子对撞过程中由 CMS 探测器收集到的数据。希格斯粒子的所有产生模式均被该分析考虑在内, 并针对横动量大于 200 GeV 的大动量的希格斯粒子衰变到两个 W 玻色子并形成一个单一的胖喷注的过程, 要求末态不存在孤立的轻子, 存在一定的丢失横动量, 以及两个或者三个胖喷注。该分析使用了基于 Transformer 机器学习模型开发的 Particle Transformer 喷注标记器对信号进行筛选, 是 CMS 实验上首批应用了该标记器的物理分析之一。CMS Collaboration, Search for Higgs boson production at high transverse momentum in the WW^* decay channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, [CMS-PAS-HIG-24-008](#), 北大组博士后 Antonis Agapitos 作为 Analysis Contact, 北大组博士生赵宇哲给予 Preapproval 报告。



图：大动量希格斯(H)衰变WW*的示意图。

5) 人工智能方法的开发

CMS-PAS-BTV-22-001 (to be submitted to JINST)

CMS-PAS-JME-25-001 (to be submitted to JHEP)

李强、李聪乔课题组与欧洲核子研究中心(CERN)合作, 长期致力于喷注特别是肥标记技术的开发及应用。课题组开发了多个基于人工自能技术的喷注标定技术及其校准方案, 并应用于新物理寻找以及大动量希格斯的探测, 大幅提高了物理灵敏度。由于粗喷注包含更多可重建结构、任务更复杂, 高级神经网络相较以往方法能够获得更显著的性能提升。该进展显著提升了复杂强子道末态的探测灵敏度, 使得近年来 CMS 实验在利用粗喷注的相关物理测量方面(如 Higgs 玻色子与粲夸克的耦合强度、双 Higgs 衰变至 4b 末态测量 HHVV 四点耦合等)取得的成果备受关注。

近数年来, 课题组以“大模型+多分类”作为技术路线, 并作为基于监督学习进行预训练的在 LHC 上的最早实践者, 主导在 CMS 国际合作组内部推出了 GloParT 模型(其多分类预训练理念示意图见下图), 以及面向 CMS 外部应用的原型模型 Sophon。

李聪乔因为相关贡献，获得**CMS国际合作组2024年度优秀论文奖**。

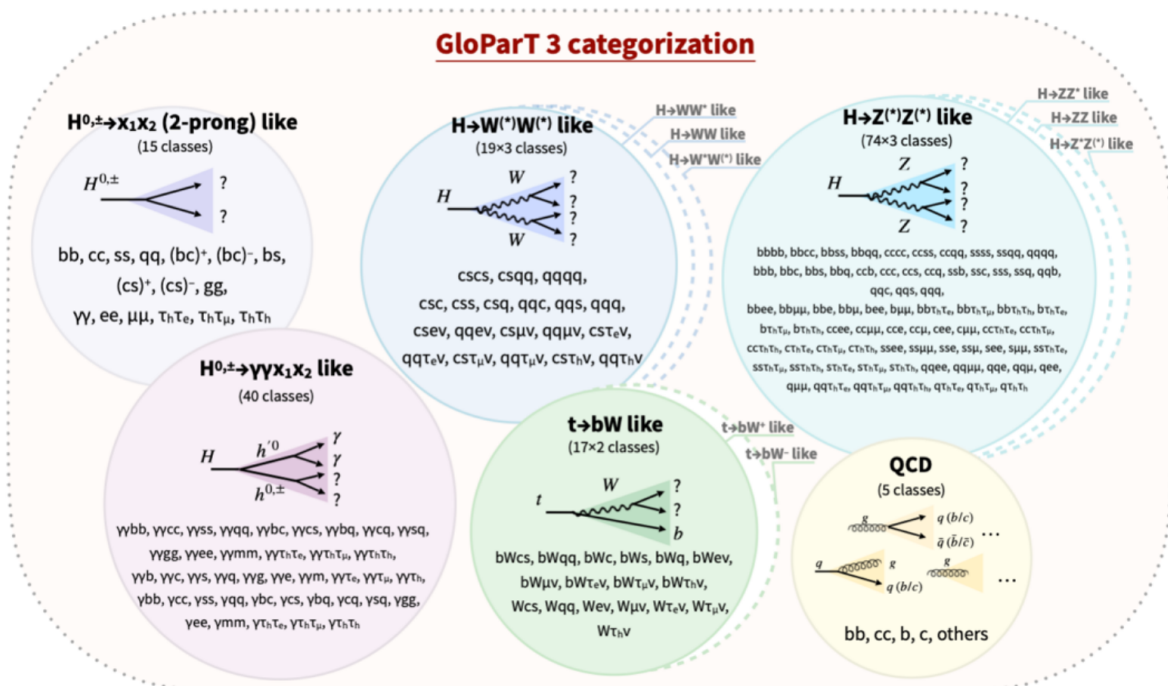


图:课题组近年主导在 CMS 国际合作组内部成功推出了 GloParT 模型。该大模型包含数百个分类且具有泛化能力,可以很大程度地扩展对撞机上物理课题。

发表CMS论文:

1. CMS Collaboration, Observation of $WZ\gamma$ production and constraints on new physics scenarios in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, [arXiv:2503.21977](https://arxiv.org/abs/2503.21977).

accepted by **PRD**. 北大组博士生邓森作为Analysis Contact, 邓森及中山大学博士后卢梦分别给予Preapproval及Approval报告。

2. CMS Collaboration, Search for anomalous Higgs boson couplings in WH to Inub production through Vector Boson Scattering , [arXiv:2405.16566](#), [Phys.Lett.B 860 \(2025\) 139202](#). 北大组博士后Andrew Levin及博士生钱思天给予Preapproval及Approval报告。

3. CMS Collaboration, Search for high-mass resonances in a final state comprising a gluon and two hadronically decaying W bosons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, CMS PAS-B2G-23-004, [arXiv:2410.17303](#), [JHEP 02 \(2025\) 199](#). 北大组博士生郭启隆为Analysis Contact, 郭启隆及博士后Antonis Agapitos给予Preapproval及Approval报告。

非**CMS**发表论文:

1. Leyun Gao, Cheng-en Liu, Qite Li, Chen Zhou, Qiang Li, Liangwen Chen, Xueheng Zhang, Yu Xu, Zhiyu Sun, Probing and Knocking with Muons, arXiv:2503.22956, [Modern Physics Letters A \(2025\) 253000](#).
2. Leyun Gao, Alim Ruzi, Qite Li, Chen Zhou, Liangwen Chen, Xueheng Zhang, Zhiyu Sun, and Qiang Li, Quantum state tomography with muons, arXiv:2411.12518, [J.Phys.G 52 \(2025\) 7, 075002](#).
3. Leyun Gao, Alim Ruzi, Qite Li, Chen Zhou, and Qiang Li, Testing spooky action between free-traveling electron-positron pairs, arXiv:2502.07597, [Phys. Rev. D 111 \(2025\) 116018](#).
4. Youpeng Wu, Ruobing Jiang, Alim Ruzi, Yong Ban, Xueqing Yan, and Qiang Li, Testing Bell inequalities and probing quantum entanglement at CEPC, arXiv:2410.17025, [Phys.Rev.D 111 \(2025\) 3, 03600](#).
5. Ran Ding, Jingshu Li, Meng Lu, Zhengyun You, Zijian Wang, and Qiang Li, Study of charged Lepton Flavor Violation in electron muon interactions, arXiv:2405.09417, [JHEP 01 \(2025\) 16](#).

已投稿**CMS**论文:

- 1.

已投稿非**CMS**论文:

1. Cheng-en Liu, Rongfeng Zhang, Zijian Wang, Andrew Michael Levin, Leyun Gao, Jinning Li, Minxiao Fan, Youpeng Wu, Qite Li, Chen Zhou, and Qiang Li, Probing Cosmic Ray Composition and Muon-philic Dark Matter via Muon Tomography, [arXiv:2507.23458](#).
2. Rongfeng Zhang, Zibo Qin, Cheng-en Liu, Qite Li, Yong Ban, Chen Zhou, and Qiang Li, Revealing Secondary Particle Signatures in PoCA-Based Muography, [arXiv:2507.03914](#).
3. Alim Ruzi, Youpeng Wu, Ran Ding, and Qiang Li, Searching Quantum Entanglement in pp to ZZ process, [arXiv:2506.16077](#).

4. Ran Ding, Alim Ruzi, Sitian Qian, Andrew Levin, Youpeng Wu, and Qiang Li, Quantum Entanglement between gauge boson pairs at a Muon Collider, [arXiv:2504.09832](#).
5. Yuzhe Zhao, Congqiao Li, Antonios Agapitos, Dawei Fu, Leyun Gao, Yajun Mao, and Qiang Li, Novel Vcb extraction method via boosted bc-tagging with in-situ calibration, [arXiv:2503.00118](#).
6. Leyun Gao, Zijian Wang, Cheng-en Liu, Jinning Li, Alim Ruzi, Qite Li, Chen Zhou, Qiang Li, Probing charged lepton flavor violation in an economical muon on-target experiment, [arXiv:2410.20323](#).
7. Congqiao Li, Antonios Agapitos, Jovin Drews, Javier Duarte, Dawei Fu, Leyun Gao, Raghav Kansal, Gregor Kasieczka, Louis Moureaux, Huilin Qu, Cristina Mantilla Suarez, Qiang Li, Accelerating Resonance Searches via Signature-Oriented Pre-training, [arXiv:2405.12972](#).

CMS公开文档(PAS) :

1. CMS Collaboration, Search for heavy H_γ and Z_γ resonances with a b quark pair final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, [CMS PAS-B2G-24-007](#), 北大组博士生付大为作为Analysis Contact, 付大为及北大组博士后Antonios Agapitos分别给予Preapproval及Approval报告。
2. CMS Collaboration, Zgamma cross section measurement at 13.6 TeV, [CMS-PAS-SMP-24-002](#), 北大组博士生牟天钰作为Analysis Contact, 给予Preapproval及Approval报告。
3. CMS Collaboration, Search for Higgs boson production at high transverse momentum in the WW^* decay channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, [CMS-PAS-HIG-24-008](#), 北大组博士后Antonios Agapitos作为Analysis Contact, 北大组博士生赵宇哲给予Preapproval报告。
4. CMS Collaboration, Performance of heavy-flavour jet identification in boosted topologies in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, [CMS-PAS-BTV-22-001](#), 北大组博士后李聪乔作为Analysis Contact, 北大组博士生邓森给予Preapproval报告。
5. CMS Collaboration, Particle transformers for identifying Lorentz-boosted Higgs bosons decaying to a pair of W bosons, [CMS-PAS-JME-25-001](#), 北大组博士后李聪乔, 博士生付大为给予Approval报告。

参加学术报告 :

序号 报告名称 时间、地点 活动名称 特邀/邀请/主题/分会/其他

1. Qiang Li, Probing and Knocking with Muons, NuFact2025, Liverpool, UK, 1-6 Sep, 2025, 分会报告。
2. Dawei Fu, Searches for new physics in CMS in events with photons and leptons in the final state, SUSY2025, UC Santa Cruz, California Aug. 22th, 2025, 分会报告。

3. Dawei Fu, Congqiao Li, Blooming LHC analyses with all-inclusive pretrained boosted-jet models, ML4jets, 17–23 Aug 2025 California Institute of Technology, US, 分会报告。
4. Tianyi Yang, Boosting HH(4b) beyond boosted HH(4b): a calibratable full-particle search framework, ML4jets, 17–23 Aug 2025 California Institute of Technology, US, 分会报告。
5. Qiang Li, testing entanglement between free-traveling electron-positron or electron-muon pairs, WQC Workshop on Quantum Entanglement of High Energy Particles, Shanghai, 19-23 July, 2025, 大会报告。
6. Qiang Li, Various sides of bosons, Seminar at Jianwei Forum, USTC, 13 June, 2025, 学术报告。
7. Leyun Gao, Probing charged lepton flavor violation and quantum entanglement in muon on-target experiments, Muon4Future, Venice, Italy, 26-30 May, 2025, 大会报告。
8. Zijian Wang, Search for light Dark Sectors with the HIAF Muon Beam: HFRS-PKMu experiment proposal, Muon4Future, Venice, Italy, 26-30 May, 2025, 大会报告。
9. Qiang Li, PKMu-HFRS: Probing and Knocking with a GeV Muon beam at the HIAF HFRS facility, International Workshop on Muon Physics at the Intensity and Precision Frontiers (MIP2025), Changsha, 16-20 May, 2025, 分会报告。
10. Qiang Li, Multiboson Physics to Explore, The 5th LHCb Physics Frontier workshop, Wuhan, 27 April, 2025, 大会报告。
11. Leyun Gao, Testing Bell inequalities and probing quantum entanglement at a muon collider, Firenze, Italy, 7-10 April, 2025, 大会报告。
12. Qiang Li, Multiboson Physics to Explore, Seminar at Zhengzhou Univ., April 24, 2025, 学术报告。
13. Andrew, Levin, Results from global EFT fits from ATLAS+CMS, WIN2025, 9-13 June 2025, Brighton (United Kingdom), 分会报告。
14. Congqiao Li, A calibratable jet-free HH(4b) search framework at the LHC, Higgs Pairs Workshop 2025, 11-15 May, Italy, 分会报告。