国家重点研发计划
“大科学装置前沿研究”重点专项
CMS上的Higgs 物理和新物理寻找

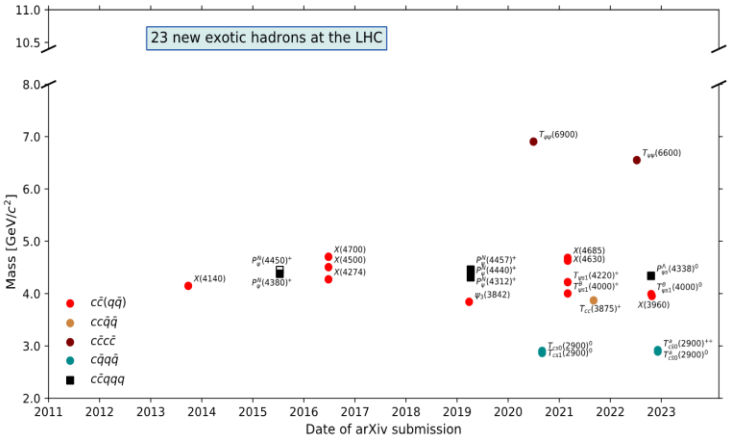
课题4”新粒子寻找”进展报告

廖红波 代表课题4组
中国科学院高能物理研究所
2025.07.01

课题4研究内容

新粒子寻找：完善和突破SM

✓ **奇特强子态的寻找与研究**



✓ **新粒子: LHC的重要寻找目标**

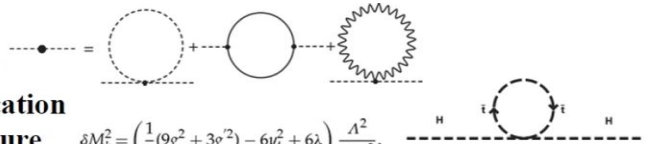
✓ **高亮度、新技术、新想法有助于寻找。**

✓ **寻找Z’ 新粒子**

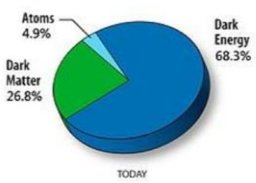
✓ **寻找激发态底夸克**

✓ **多玻色子共振态寻找**

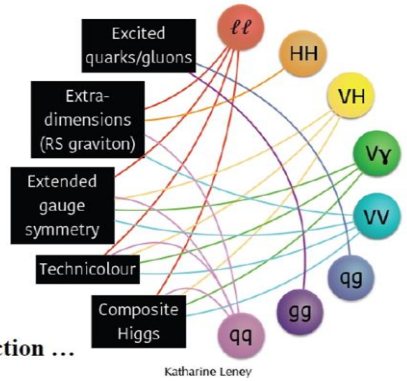
- Fine Tuning
- Dark matter
- Gauge Unification
- Flavor structure
- Baryon Asymmetry



$$\delta M_h^2 = \left(\frac{1}{4}(9g^2 + 3g'^2) - 6y_t^2 + 6\lambda\right)\frac{\Lambda^2}{32\pi^2}.$$

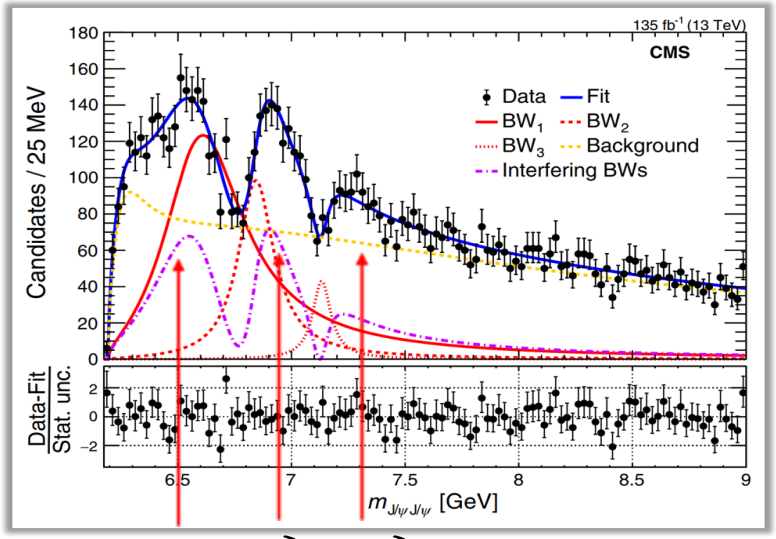


- SUSY
- Extra Dimensions
- Extra Symmetry: W’, Z’
- Exotic heavy Quarks
- Compositeness: contact interaction …



课题4由高能所、北大和南师大负责执行

奇特强子态的寻找与研究



✓ CMS 在J/ψJ/ψ末态的观测到了一个可能的全粲四夸克粒子（4c）家族（X(6600)、X(6900)、X(7100)）

		BW_1	BW_2	BW_3
No-interference	m [MeV]	$6552 \pm 10 \pm 12$	$6927 \pm 9 \pm 4$	$7287^{+20}_{-18} \pm 5$
	Γ [MeV]	$124^{+32}_{-26} \pm 33$	$122^{+24}_{-21} \pm 18$	$95^{+59}_{-40} \pm 19$
	N	470^{+120}_{-110}	492^{+78}_{-73}	156^{+64}_{-51}
Interference	m [MeV]	6638^{+43+16}_{-38-31}	6847^{+44+48}_{-28-20}	7134^{+48+41}_{-25-15}
	Γ [MeV]	$440^{+230+110}_{-200-240}$	191^{+66+25}_{-49-17}	97^{+40+29}_{-29-26}
Stat. significance		6.5σ	9.4σ	4.1σ

New

Confirm LHCb

✓ J^{PC} ？

- 确定J^{PC}能更好的和理论解释对比
- 有干涉拟合结果更好，确定J^{PC}能更好描述干涉

✓ 新结构能否在其它过程（如ψ(2S)J/ψ）中确认？

✓ 更多数据或者合并多个过程的结果，X(7100)能否超过5σ？

1. X(6900) 自旋宇称

目标进展： run2结果已公布，已投稿**Nature**

完成情况： 基于run2数据，对三个结构X(6600), X(6900)和X(7100)以超过5σ排除0^{-+},1^{-+}，以超过3σ排除2^{-+}；以超过2σ排除不同0^{+}结构的混合，及1^{+}； 只可能存在2^{++}。超额完成目标。

CADI line: BPH-24-002

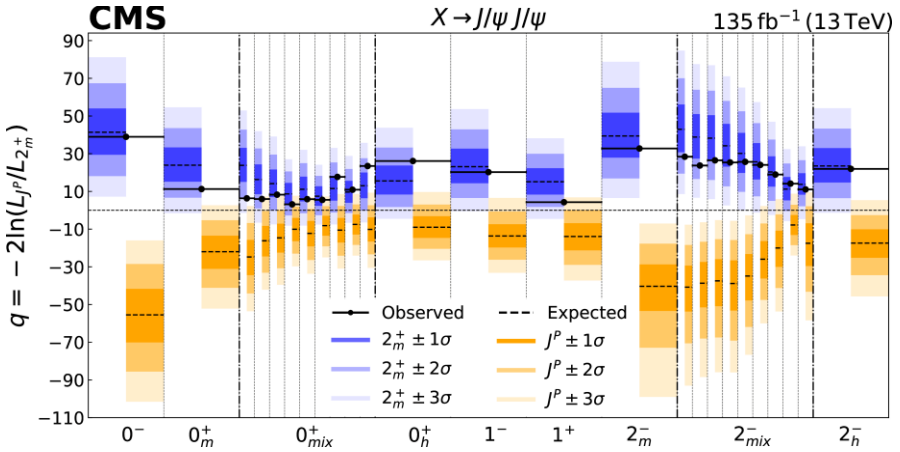
Paper(submitted): CMS-BPH-24-002

inaugural talk:张敬庆 (南师)

Pre-approval talk: 王晰宁（清华）

Approval talk:黄志园 (JHU)

Contact Person: Andrei Gritsan (JHU)



2. $\psi(2S)J/\psi$中X(6900)的存在

目标进展： run2+run3(22-24年）结果已公布。准备投稿Science Advance

完成情况： 以超过5σ显著性观察到X(6900)，$X(7100) \to \psi(2S)J/\psi$显著性为4$\sigma$。超过预期目标。

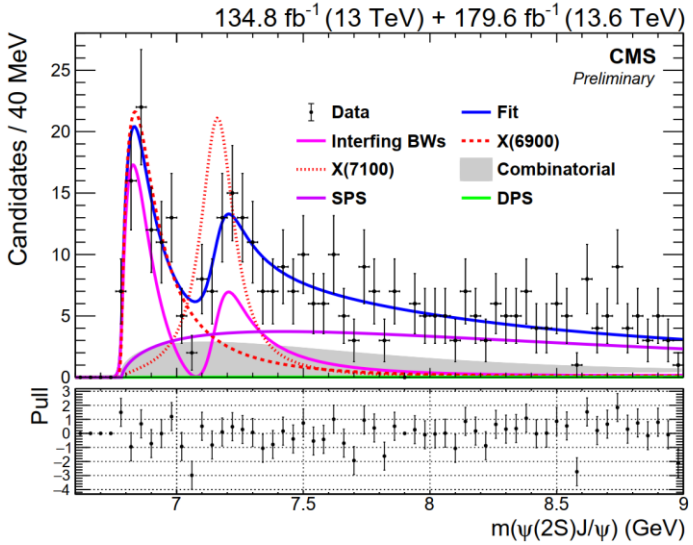
CADI line: BPH-22-004

PAS: CMS-PAS-BPH-22-004

Pre-approval talk:顾晋京（清华）

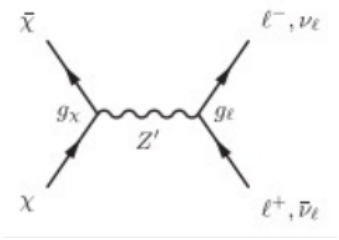
Approval talk: 陈亮亮（南师）

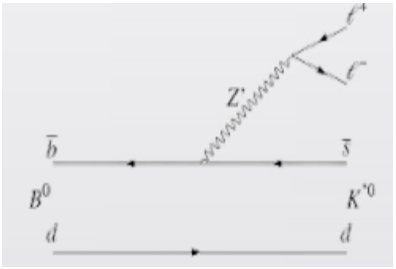
Contact person: 张敬庆（南师）

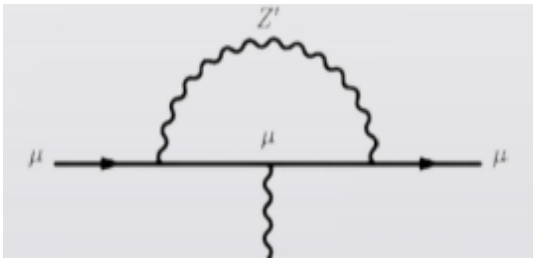


寻找Z’ 新粒子

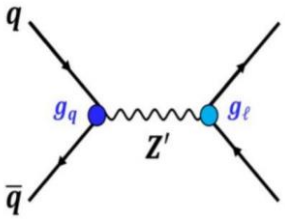
- ✓ 规范玻色子共振态新粒子Z’ 被用来解释物质-反物质不对称性、暗物质、B反常衰变，muon反常磁矩等等；



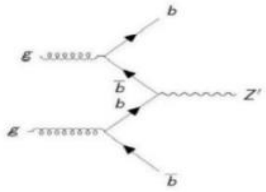




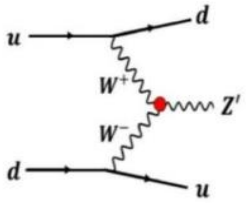
- ✓ LHC上已经进行了广泛的寻找，主要是通过Drell-Yan过程产生。
- ✓ 如果Z’ 和轻夸克耦合被压制，是否可能存在其它的产生机制？



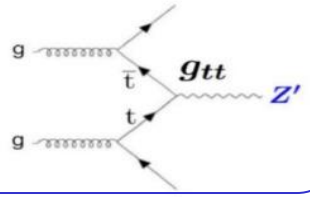
b-Quark Fusion



VBF



t-quark fusion



■ 寻找ttZ’ (Z’ ->tt)

--理论：复合希格斯模型，Top-philic Z’ ..

--实验：稀有的SM 4tops过程测量的偏离？

Probing top-philic new physics via four-top-quark production*

Qing-Hong Cao(曹庆宏)[1,2,3†] Jun-Ning Fu(付俊宁)[1‡] Yandong Liu(刘言东)[4,5§]
Xiao-Hu Wang(王小虎)[1‡] Rui Zhang(张睿)[6#]

3. 多顶夸克末态寻找Z′ 新粒子

目标进展： run2结果已公布。**准备投稿JHEP**

完成情况： CMS上首次研究， 结果好于ATLAS结果。研究结果已经公布，初步完成预期目标。

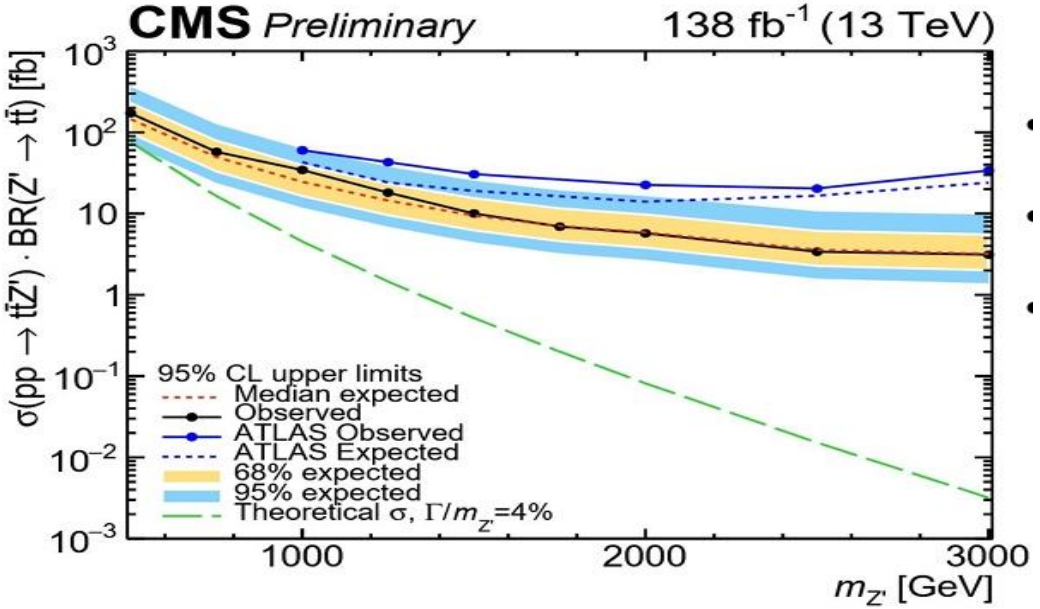
CADI line: B2G-24-009

PAS: CMS-PAS-B2G-24-009

Pre-approval talk:Francesco Romeo（VU）

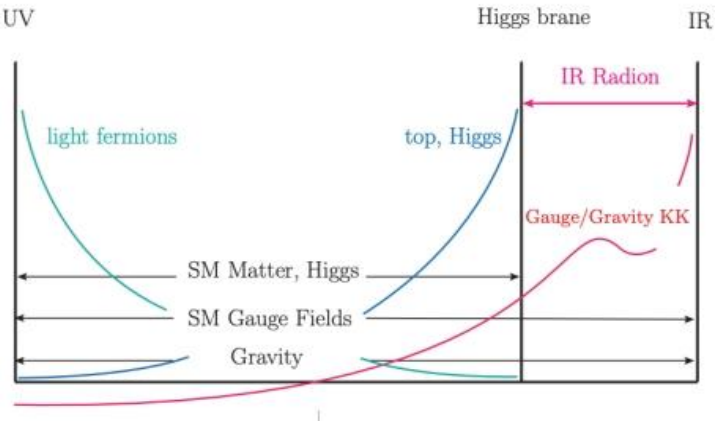
Approval talk: 侯霄楠（高能所）

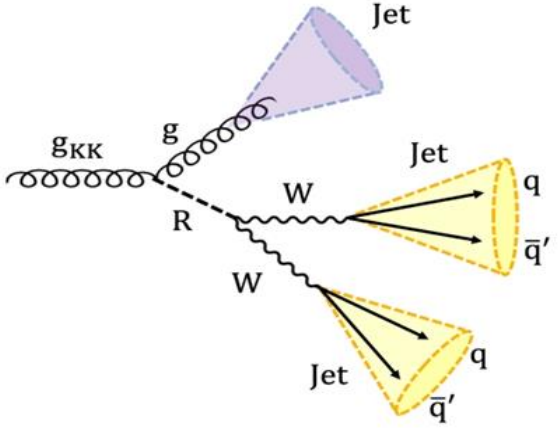
Contact person:侯霄楠（高能所）



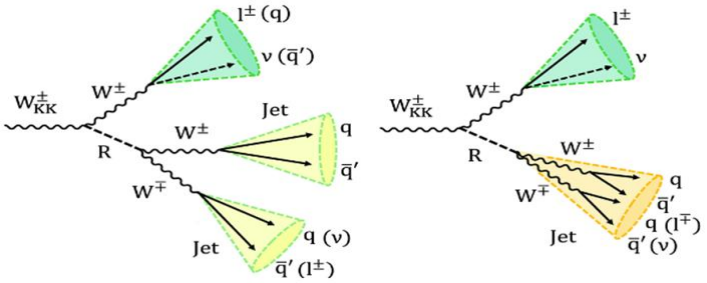
多玻色子共振态寻找

- ✓ 胶子激发态等是否存在?
- ✓ 扩展卷曲额外维模型: 3玻色子末态中存在大质量的胶子激发态;





✓北大主导多玻色子共振态寻找分析:不同玻色子甚至不同级联衰变;



- ✓ 优化方案以提高敏感度
  - -- 引入更多事例分类;
  - -- 采用更好的Pile Up减除方案;
  - -- 新的Jet Substructure技术,

4夸克喷注的鉴别及校准

4. 多玻色子共振态寻找

目标进展： run2结果已公布。**期刊论文已经发表：JHEP 02 (2025) 199**

完成情况： 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gKK 的质量下限为3.55TeV。研究结果已经发表，完成预期目标。

CADI line: B2G-23-004

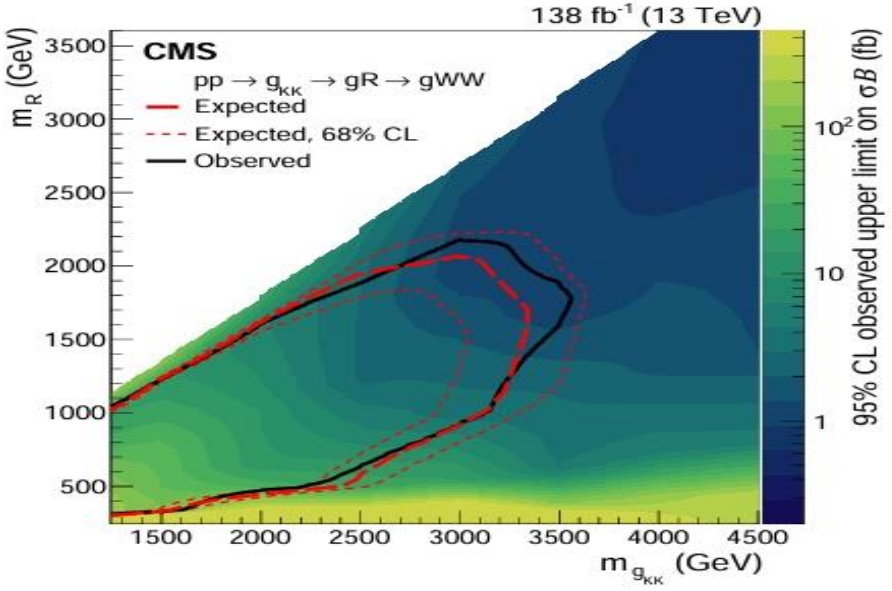
PAS: CMS-PAS-B2G-23-004

期刊论文: JHEP 02 (2025) 199

Pre-approval talk:郭启隆(北大)

Approval talk: Antonis Agapitos (北大)

Contact person:郭启隆(北大)



国际会议报告

大会报告

- ✓ Qiang Li, Multiboson Physics to Explore, The 5th LHCb Physics Frontier workshop, Wuhan, 27 April, 2025

分会报告

- ✓ Kai Yi, Heavy flavor spectroscopy studies at CMS, LHCP2024, 3-7 Jun 2024, Northeastern Univ., Boston, MA (United States)
- ✓ Kai Yi, New Structures in the J/ψ J/ψ Mass Spectrum at CMS, FPCP2024, 27-31 May 2024, Chulalongkorn University, Bangkok (Thailand)
- ✓ Antonios Agapitos, Searches for Heavy Resonances Decaying into Bosons at CMS, PIC2024, 22-25 Oct 2024, Athens (Greece)
- ✓ Ye Chen, Searches for additional Higgs bosons (high & low mass) at CMS, DIS2025, 24-28 Mar 2025, Cape Town (South Africa)
- ✓ Jingqing Zhang, Observation a Family of All-Charm Tetra-Quark Candidates with spin-2 and positive parity at CMS, CHARM2025, May 2025
- ✓ Xining Wang, Observation of a family of all-charm tetraquarks with spin-2 and positive parity at CMS, EPS-HEP2025, 7-11 Jul 2025, Marseille (France)
- ✓ Kai Yi，Observation of a family of all-charm tetraquarks with spin-2 and positive parity，FPCP2025, 2-6 Jun 2025, University of Cincinnati, Ohio (United States)

海报

- ✓ Kai Yi，Observation of a family of all-charm tetraquarks with spin-2 and positive parity, LHCP2025, 5-10 May 2025, NTU, Taipei

课题考核指标

预期成果				考核指标[2]				考核方式（方法）及评价手段[4]
预期成果名称			预期成果类型	指标名称	立项时已有指标值/状态	中期指标值/状态[3]	完成时指标值/状态	
主要成果	1	X(6900)自旋宇称	√论文	预期显著度	无	无	超过3σ	以CMS合作组所发表同行评议论文
	2	ψ(2S)J/ψ末态中X(6900)的存在	同上	预期显著度(关键核心指标)	无	无	超过3σ	同上
	3	多顶夸克末态中寻找Z'粒子	同上	文章发表	无	无	发表新模型的最新结果	同上
	4	multi-boson共振态寻找	同上	kkgluon在gWW末态的质量下限	无	无	kkgluon质量下限超过3 TeV	同上

预期成果名称	成果	指标值/状态
X(6900)自旋宇称	已投稿Nature	超过3σ
$\psi(2S)J/\psi$中X(6900)的存在	已公开，准备投稿Science Advance	超过5σ
多顶夸克末态寻找Z'新粒子	已公开，准备投稿JHEP	已公开发表最新结果
Multi-boson共振态寻找	JHEP 02 (2025) 199	质量下限为3.55TeV

✓ 预期成果：PAS均已发表，期刊论文发表JHEP1篇，投稿Nature1篇，准备投稿Science Advance和JHEP各1篇

✓ **课题考核指标均已完成或超额完成**

经费使用情况

单位	到位经费(万元)	执行经费(万元)	执行率
高能所	127	105.95	83.4%
北大	46	40.1	87.2%
南师	99	97.2	98.2%
合计	272	243.25	89.4%

- ✓ 三个单位执行率均超过80%
- ✓ 总执行率为89.4%

总结

- ✓ 在本项目的资助下，课题4团队已在多个物理课题上取得显著的进展；
- ✓ 课题考核指标均已完成或超额完成；
- ✓ 四个预期成果的PAS均已发表，并且期刊论文发表JEHP 1篇，投稿Nature 1篇，准备投稿Science Advance和JHEP各1篇。

感谢科技部和各位专家的大力支持！

课题研究队伍

✓ **参与单位：**

- **高能所**：
  -- 寻找Z’ 新粒子
  -- 寻找激发态底夸克
- **北大**：
  -- 多玻色子共振态寻找
- **南师大**：
  -- 奇特强子态的寻找与研究

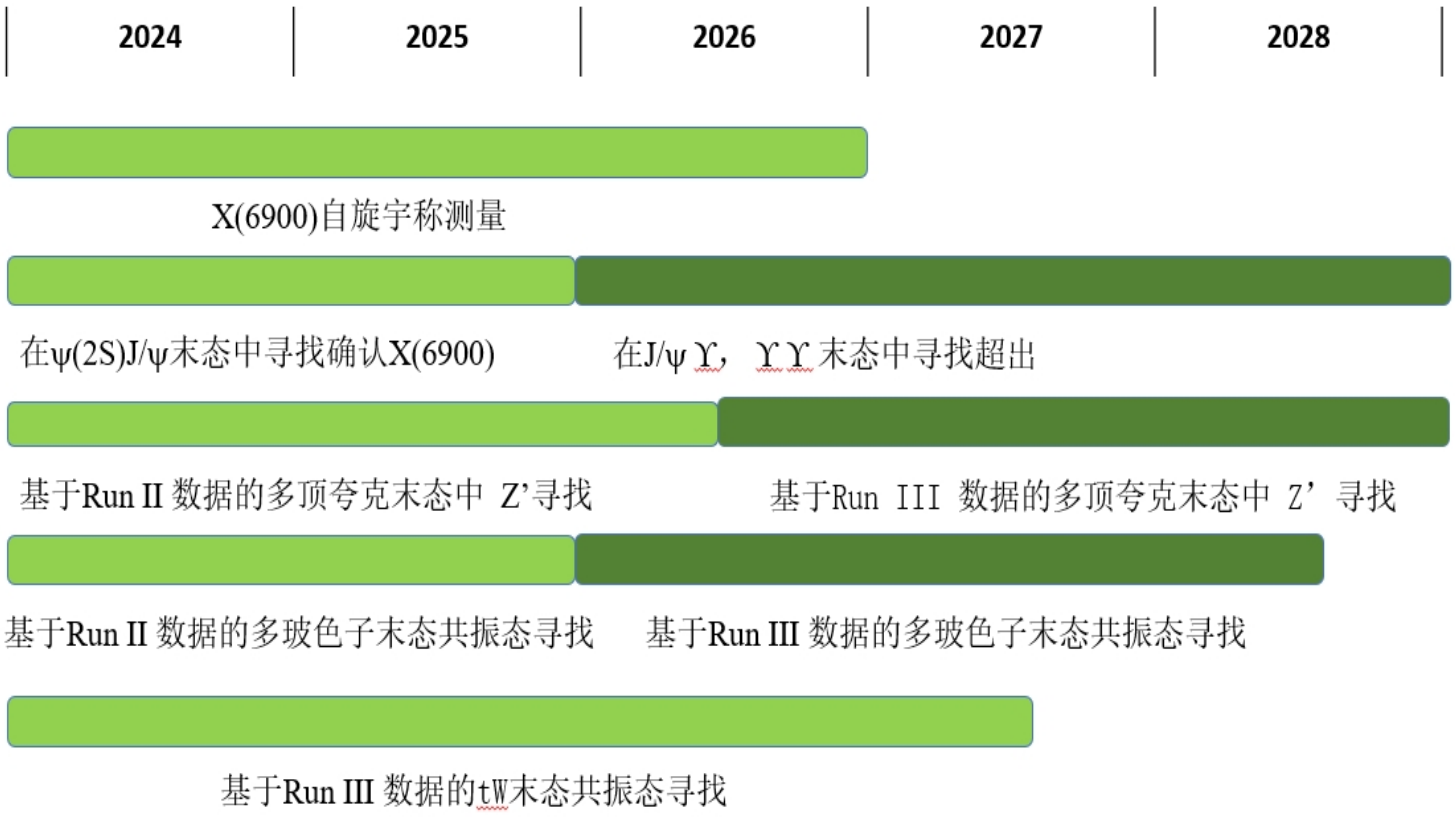
✓ **参与人数：22人**

- **职工 6人：**
  -- **高能所**：廖红波、陈晔；
  -- **北大**：班勇；
  -- **南师大**：易凯、张敬庆、Gerry Peter Bauer
- **博士后 3人：**

Ram Krishna Sharma、余涛哲、Antonios Agapitos

- **在读学生 13人**

进度安排概况


2024
2025
2026
2027
2028
X(6900)自旋宇称测量
在ψ(2S)J/ψ末态中寻找确认X(6900)
在J/ψ ϒ， ϒ ϒ 末态中寻找超出
基于Run II 数据的多顶夸克末态中 Z'寻找
基于Run III 数据的多顶夸克末态中 Z' 寻找
基于Run II 数据的多玻色子末态共振态寻找
基于Run III 数据的多玻色子末态共振态寻找
基于Run III 数据的tW末态共振态寻找

进度安排

1、年度：2023 年 12 月—2024 年 5 月

任务：基于完整 Run II 数据，开展 X(6900)在ψ(2S)J/ψ道中的验证寻找工作，X(6900)自旋宇称测量工作，多顶夸克末态中 Z'寻找工作，多玻色子末态共振态寻找工作；开展基于 Run III 数据的 tW 共振态寻找。

考核指标：X(6900)在ψ(2S)J/ψ道中的验证寻找工作通过合作组预审核

成果形式：预审核报告

2、年度：2024 年 6 月—2024 年 11 月

任务：利用全部 Run II 数据，完善 X(6900)在ψ(2S)J/ψ道中的验证寻找工作，继续 X(6900)自旋宇称测量工作，多顶夸克末态中 Z'寻找工作，多玻色子末态共振态寻找工作；完善推进 Run III 数据的 tW 共振态寻找。

考核指标：X(6900)在ψ(2S)J/ψ道中的存在通过合作组审核，显著度超过 3σ

成果形式：完成有中方重要贡献的 PAS 1 篇

3、年度：2024 年 12 月—2025 年 5 月

任务：开展其它新型强子态在ψ(2S)J/ψ道中的验证寻找工作， 完善 X(6900)自旋宇称测量工作，多顶夸克末态中 Z'寻找工作，多玻色子末态共振态寻找工作；继续推进 Run III 数据的 tW 共振态寻找。

考核指标：多玻色子末态共振态寻找工作通过合作组预审核

成果形式：审核报告

4、年度：2025 年 6 月—2025 年 11 月

任务：继续其它新型强子态在ψ(2S)J/ψ道中的验证寻找工作， 完善 X(6900)自旋宇称测量工作，多顶夸克末态中 Z'寻找工作，多玻色子末态共振态寻找工作；继续推进 Run III 数据的 tW 共振态寻找。

考核指标：多玻色子末态共振态寻找工作通过合作组审核，kkgluon 质量下限超过 3 TeV

成果形式：发表有中方重要贡献的 PAS 或者正式文章 1-2 篇

进度安排(续)

5、年度：2025 年 12 月—2026 年 5 月↵

任务：继续完善 X(6900)自旋宇称的测量工作， 开展基于 Run II 和 Run III 数据寻找新的纯重味夸克组成的可能其他态工作，即在 J/ψϒ，ϒϒ等末态中寻找各种超出并寻找 X(6900)；完成多顶夸克末态中 Z’寻找工作；开展基于 Run III 数据的多玻色子末态共振态寻找工作；完善基于 Run III 数据的 tW 共振态寻找。↵

考核指标：多顶夸克末态中 Z 是否存在，若不存在则设置截面上限↵

成果形式：发表有中方重要贡献的 PAS 1 篇↵

↵

6、年度：2026 年 6 月—2026 年 11 月↵

任务：完成 X(6900)自旋宇称的初步测量工作， 继续基于 Run II 和 Run III 数据寻找新的纯重味夸克组成的可能其他态工作；基于 Run III 数据，优化的多玻色子末态共振态寻找工作，完成 tW 共振态寻找， 开展多顶夸克末态的新物理寻找研究。↵

考核指标：显著度超过 3σ来确认 X(6900)自旋宇称，以及确认底夸克激发态是否存在↵

成果形式：发表有中方重要贡献的 PAS 或者正式文章 1-2 篇↵

7、年度：2026 年 12 月—2027 年 5 月↵

任务：合并多个末态中新的可能其他态寻找，完善基于 Run II 和 Run III 数据寻找新的纯重味夸克组成的可能其他态工作；基于 Run III 数据，优化的多玻色子末态共振态寻找工作，完善多顶夸克末态的新物理寻找研究。通过合并其它末态，提高 tW 共振态灵敏度。↵

考核指标：新的奇特强子态是否存在↵

成果形式：发表有中方重要贡献的 PAS 或者正式文章 1 篇↵

↵

8、年度：2027 年 6 月—2027 年 11 月↵

任务：完成在 J/ψϒ，ϒϒ等末态中寻找各种超出并寻找 X(6900)的工作，开展新的奇特强子态的自旋宇称测量工作；继续优化基于 Run III 数据多玻色子末态共振态和多顶夸克末态的新物理寻找研究。↵

考核指标：在 J/ψϒ，ϒϒ等末态中是否存在 X(6900)↵

成果形式：审核报告或者发表有中方重要贡献的 PAS 1 篇↵

9、年度：2027 年 12 月—2028 年 5 月↵

任务：完善新的奇特强子态的自旋宇称测量工作，完成基于 Run III 数据多玻色子末态共振态寻找，并且完善多顶夸克末态的新物理寻找研究。↵

考核指标：多玻色子末态共振态寻找 kkgluon 质量下限继续提升↵

成果形式：发表有中方重要贡献的 PAS 或者正式文章 1 篇↵

↵

10、年度：2028 年 6 月—2028 年 11 月↵

任务：完成新的奇特强子态的自旋宇称测量工作以及基于 Run3 数据的多顶夸克末态的新物理寻找研究↵

考核指标：新的奇特强子态的自旋宇称存在显著度，是否在 run3 数据中存在多顶夸克末态的新物理↵

成果形式：发表有中方重要贡献的 PAS 或者正式文章 1 篇↵

最新进展

✓ 下列分析获得认可，进入CMS合作组内部审核

奇特强子态的寻找与研究

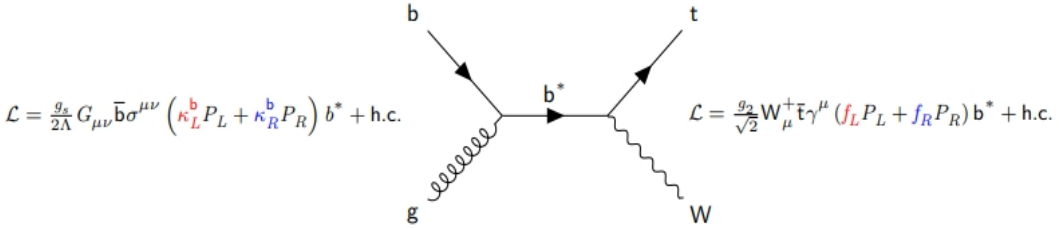
- ✓ “Search for X(6900) in the Psi(2S)Jpsi channel at CMS”
  Cadi-line: BPH-22-004
- ✓ “Spin-parity analysis of the JpsiJpsi structure in the four-muon invariant mass spectrum”
  Cadi-line: BPH-24-002
- ✓ “JpsiJpsi spectroscopy in the four-muon final state using Run 3 data”
  Cadi-line: BPH-24-003

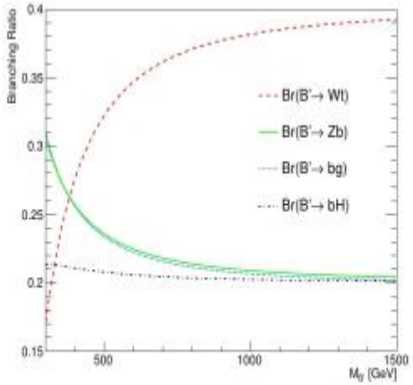
多规范玻色子共振态寻找

- ✓ “Search for diresonant new physics in a final state comprising a gluon and two hadronically decayed W bosons”
  Cadi-line: B2G-23-004

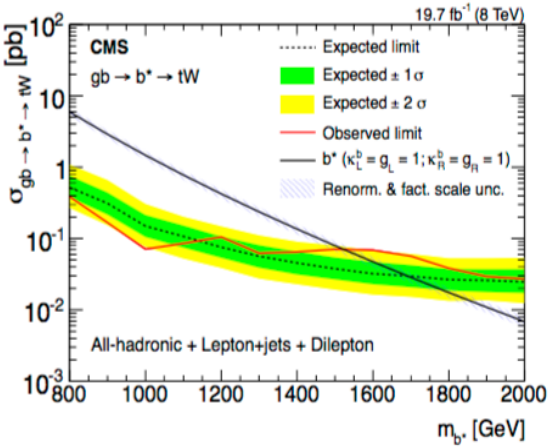
激发态底夸克b*的寻找

- ✓ **研究内容**：寻找第三代夸克激发态
- ✓ **物质无限可分**: 激发态 = >夸克内部结构?





J.Nutter, R. Schwienhorst et al.: Phys. Rev. D 86, 094006,



- ✓ 高能所主导了CMS Run1和Run2 b*的寻找
- ✓ 将继续使用CMS Run3 的数据寻找b*。
- ✓ **研究计划**：单轻子末态和全强末态
  - tW系统可以完全重建;
  - 事例选择以及分类优化提高灵敏度;
  - top重建方法的研究应用;
  - 从数据中估计QCD本底;
  - 多区间联合拟合限制本底;
  - 联合多个末态合并分析。