国家重点研发计划项目：2022YFA1602100

大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级

执行期限：2022年12月至 2027年11月

张华桥（项目负责人）

赵京周（课题1负责人）

班勇（课题2负责人）

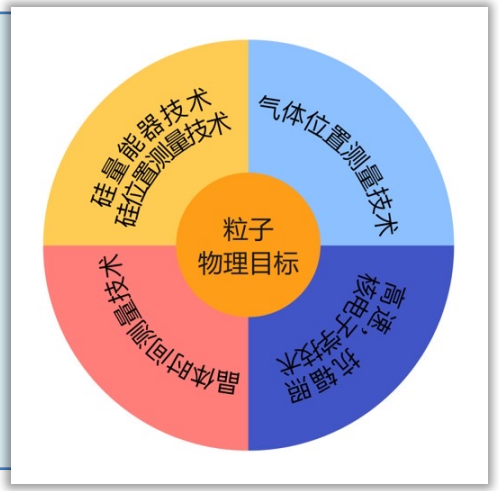
殷中宝（课题3负责人）

2024/07/13@安徽

中国科学院高能物理研究所， 北京大学， 清华大学， 北京航空航天大学， 华中师范大学， 中国原子能科学研究院

项目研究内容

- 2021年，**欧洲未来加速器委员会（ECFA）**对未来30年粒子探测技术发展的预测和判断：
  - 硅量能器是排在未来量能器推荐方案的第一位
  - 硅像素探测器是顶点探测器的必选方案
  - 大面积GEM是抗辐照气体探测器解决方向之一
  - 晶体时间探测器技术是时间探测的主要方案之一
  - 先进核电子学技术是实现，发挥探测器性能的保证



- 本项目所研究的**硅探测器**、气体探测器、晶体探测器和核电子学技术广泛应用于高能物理实验：

欧洲核子中心LHC对撞机实验　美国TEVATRON对撞机实验　北京正负电子对撞机实验　日本B工厂

- 国内科研单位在相关探测器研制方面有多年积累，承担并完成了多个国际合作实验探测器研制项目
- **高亮度LHC**上实验将面对最严酷的实验环境，采用**最尖端粒子探测技术**
- 本项目的探测器研制是国际粒子探测技术的最前沿，是该领域相关尖端技术的首次大规模应用

课题分解及主要研究工作

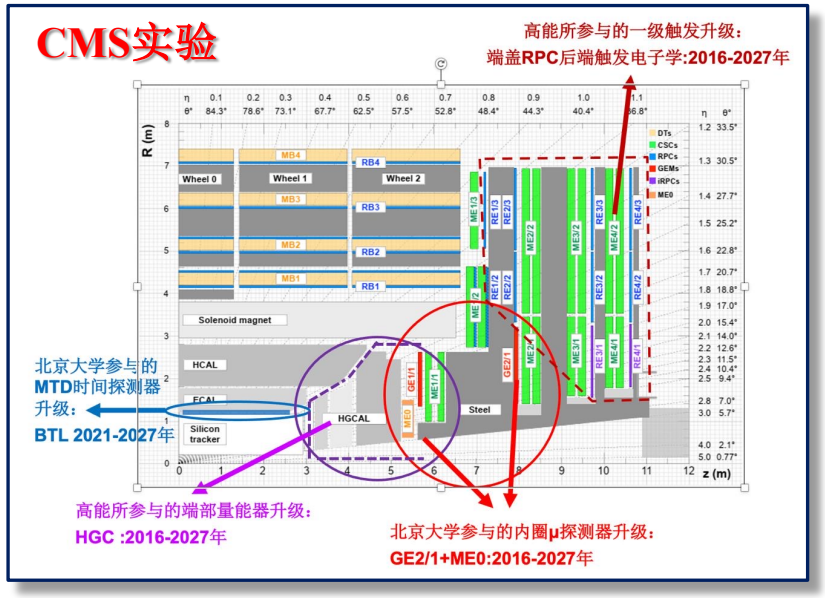
本项目：**CMS/ALICE探测器二期升级研究：**

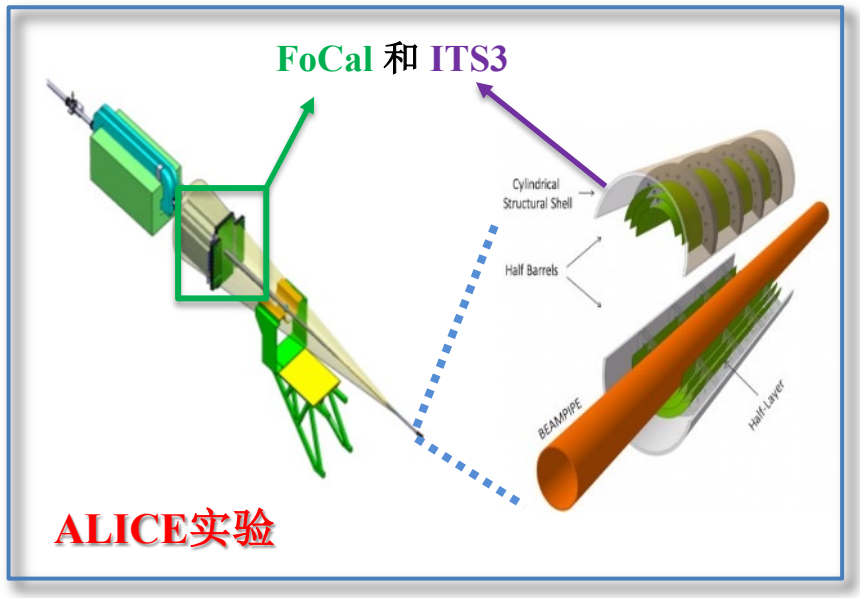
课题一：CMS高粒度量能器和一级触发升级（中国科学院高能物理研究所、清华大学）

课题二：CMS 缪子谱仪 GEM 和时间探测器 MTD 升级 （北京大学、清华大学，北京航空航天大学）

课题三：ALICE探测器升级（ITS3和FoCal）（华中师范大学、中国原子能科学研究院）

高辐照区域新型粒子探测器技术



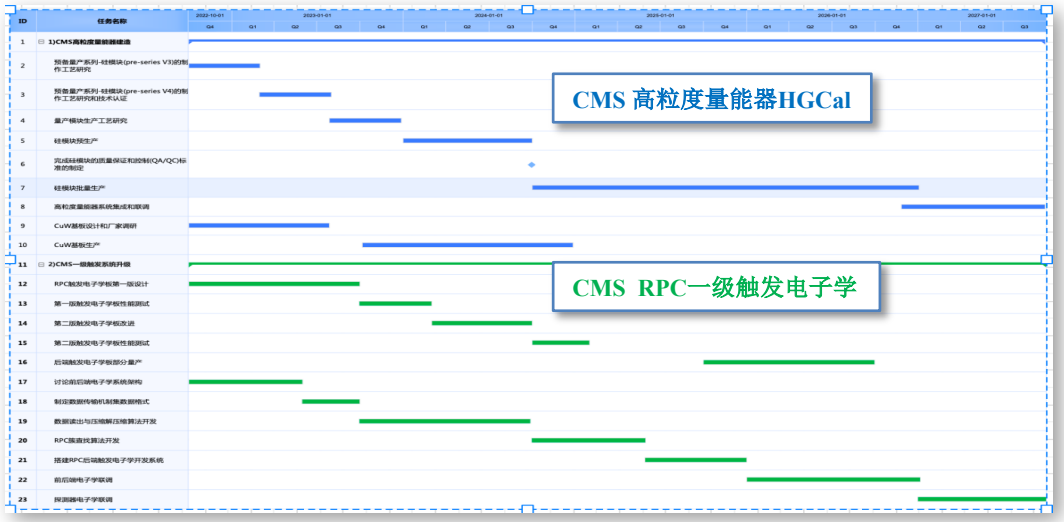


→ 掌握高计数率、抗辐照、高性能探测器研发和生产能力

→ 实现中国组对国际合作实验的硬件义务

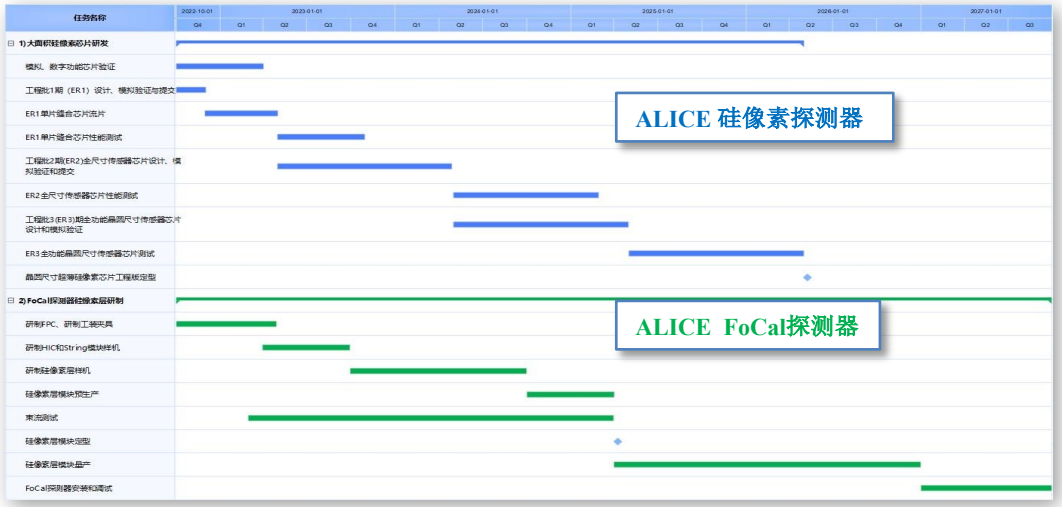
进度安排

- 根据CMS/ALICE合作组升级总体安排，本项目各课题具体子探测器研发处于不同阶段
- 本项目执行期间，各课题子探测器研制、生产具体进度由图表所示
- 项目结束时，各个探测器完成设计，验证；部分建造和安装



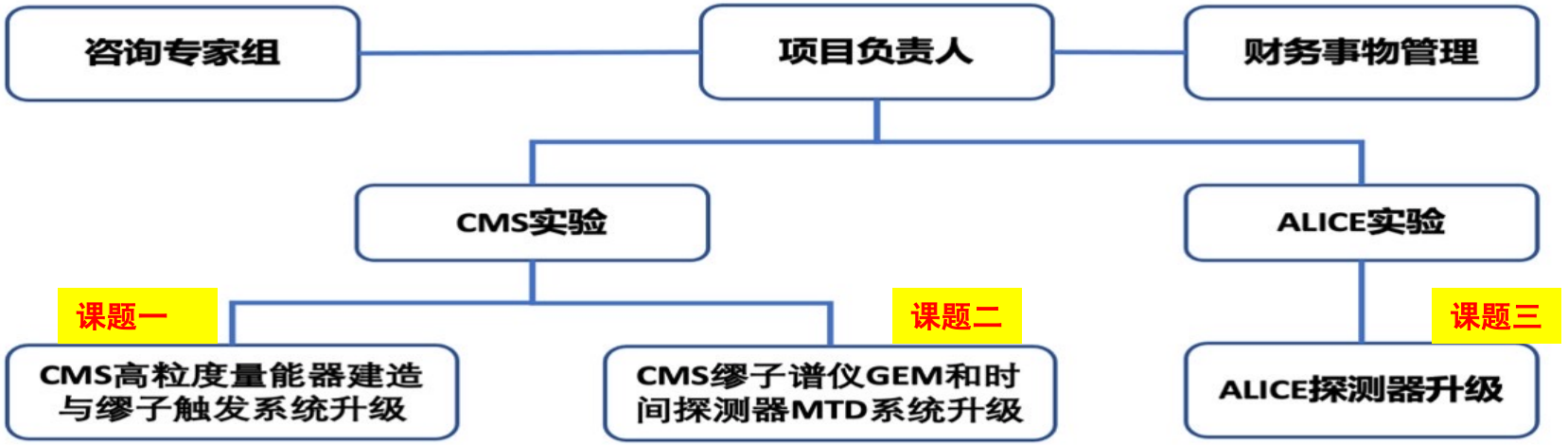
课题一进度

课题二进度



课题三进度

项目的组织与管理



项目办成员

姓名	职责
徐红娟	项目秘书/财务
王峰	项目科研助理
龚文煊	课题一联系人
孙小虎	课题二联系人
王钰	课题三联系人

咨询层

科技部责任专家 郑阳恒
业内专家

保障项目实施的建议
把关研究方向
审查技术路线
评价研究成果

协调实施层

项目/课题负责人
课题骨干、参与人员

确认需求、设计方案
协调与沟通项目
监督项目执行
交流项目进展

管理支撑层

项目/课题承担单位财务、事物管理，科研助理等

组织项目会议
管理项目经费
协助年度总结、科技报告、中期检查、结题验收
与上级主管部门沟通

- 每周课题会/每两个月一次远程例会/半年一次线下会

项目成果指标及测试方法

性能指标：实验测试

探测器数量指标：合作组检验合格

序号	指标	指南要求	本项目	考核方式	说明
1	指标1.1：高速数据传输速率	好于 16Gb/s	单通道≥16Gbps	实验测试	满足指南要求
2	指标1.2：高粒度量能器硅模块	无	160	CMS合作组检验合格	额外指标
3	指标1.3：高粒度量能器硅模块精度控制	无	X-Y方向精度好于100微米	实验测试	额外指标
4	指标2.1 GEM探测器有效增益	无	>10000（量产大面积GEM探测器）	X射线测试	额外指标
5	指标2.2 GEM探测器模块	无	40	CMS合作组检验合格	额外指标
6	指标2.3 MTD时间分辨	好于 60ps	优于60皮秒(大面积传感器模块成品)	通过放射源或束流测试其时间分辨	满足指南要求
7	指标2.4桶部传感器模块	无	500	通过质控系统测试其信号品质（信号幅度一致性等）	额外指标
8	指标3.1：芯片面积和功耗	芯片面积90mm×140mm，像素大小约 15μm×15μm，功耗低至 20mW/cm^2	芯片面积达90 mm×140 mm，像素大小约15 um×15 um，功耗低至20 mW/cm^2	合作组安排测试，提供测试结果	满足指南要求
9	指标3.2：FoCal双光子位置分辨	优于5 mm	优于5 mm	合作组安排测试，提供测试结果	满足指南要求

项目会议历史

- 2023年4月：项目启动【线下】
- CLHCP 2023：项目年度结果总结【线下】
- 2024年7月：项目年度会议【线下】

July 2024

Jul 13 《大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级》2024年年会

May 2024

May 17 大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级双月会 (protected)

March 2024

Mar 28 大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级双月会 (protected)

November 2023

Nov 16 - Nov 20 大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级 双月会暨CLHCP2023年会

August 2023

Aug 21 大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级双月会 (protected)

June 2023

Jun 19 大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级双月会 (protected)

April 2023

Apr 16 国家重点研发计划《大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级》启动会 (protected)

年度会议安排

上午

9:05 AM → 9:15 AM 项目专家致辞

9:15 AM → 9:20 AM 项目介绍
Speaker: Huaqiao ZHANG (IHEP)

9:20 AM → 9:55 AM 课题一进展：CMS 高粒度量能器和一级触发升级
Convener: Jingzhou ZHAO (高能所)

- 9:20 AM **CMS一级触发升级进展**
  Speaker: Jingzhou ZHAO (高能所)
  20240713年会-课题...
- 9:40 AM **CMS高粒度量能器升级进展**
  Speaker: Huaqiao ZHANG (IHEP)
  HGCal-20240713.pdf

9:55 AM → 10:30 AM 课题二进展：CMS 缪子谱仪 GEM 和时间探测器 MTD 系统升级
Conveners: YONG BAN (Peking University) , Yong BAN (Peking University)

- 9:55 AM **CMS-GEM探测器升级进展** ¶
  Speaker: Dayong Wang (Peking University)
- 10:15 AM **CMS时间探测器升级进展【远程】**
  Speaker: Xiaohu SUN (Peking University)

10:30 AM → 11:00 AM 茶歇及合影

11:00 AM → 11:35 AM 课题三进展：ALICE 探测器升级
Convener: Zhongbao Yin (华中师范大学)

- 11:00 AM **ALICE探测器升级进展**
  Speaker: Zhongbao Yin (华中师范大学)
  ALICE探测器升级 - ...
- 11:20 AM **ALICE FoCal读出电子学研制进展**
  Speaker: Shoulong（守龙） Lin（吝） (China Institute of Atomic Energy)
  ALICEFoCal电子学...

11:35 AM → 12:05 PM 项目进展总结与讨论（1）

下午

2:00 PM → 3:30 PM 技术进展报告

- 2:00 PM **CMS iRPC簇查找算法的设计实现【远程】**
  Speaker: UNKNOWN 侯庆峰
- 2:10 PM **CMS iRPC Check-Sort-Push数据传输机制研究【远程】**
  Speaker: UNKNOWN 刁伟卓
  CMS iRPC Check-So...
- 2:20 PM **高粒度量能器硅模块集成工艺介绍**
  Speaker: Feng Wang (Institute of High Energy Physics)
- 2:30 PM **北京硅传感器测试中心简介【远程】**
  Speaker: Yong Liu (Institute of High Energy Physics)
- 2:40 PM **CMS-ME0 GEM 探测器前端电子学设计与生产**
  Speakers: 志华 薛 (北京大学) , 志华 薛 (北京大学物理学院)
- 2:50 PM **CMS时间探测器设计及建造工艺【远程】**
  Speaker: jin wang (school of physics Peking Uniersity)
- 3:00 PM **ALICE FoCal硅像素层模块设计及组装工艺介绍**
  Speaker: jun liu (Central China Normal University)
- 3:10 PM **ALICE内径迹探测器硅像素芯片的设计【远程】**
  Speaker: qiaomu tong
- 3:20 PM **FoCal硅像素层性能研究** ¶
  Speaker: Jie Yi (Central China Normal University)

3:30 PM → 4:00 PM 茶歇

4:00 PM → 5:00 PM 项目进展总结和讨论（2）

敬请各位专家检阅指正！

Backup

CMS/ALICE 探测器升级前后的性能对比

探测器	性能指标	升级前	升级后	备注
CMS高粒度量能器	希格斯粒子到双光子质量分辨率	～1.5%	<1.4%	端盖部分，Run3结束时
	时间分辨	～1纳秒	50皮秒	
	位置分辨	2维位置	3维位置	
RPC一级触发系统	前端电子学高速数据传输速率	1.6Gbps	4.8-10Gbps	
	触发高速数据传输速率	10Gbps	16-25Gbps	
缪子GEM探测器	位置分辨	～厘米量级	～0.01厘米量级	
最小电离时间探测器	带电径迹时间分辨	无	60皮秒	CMS新增探测器
ALICE ITS3	芯片面积	1.5 cm*3 cm	90 cm*140 cm	
	像素大小	30 um*20um	15 um*15 um	
	功耗	50 mW/cm^2	20 mW/cm^2	
	辐射厚度	0.35%X_0	0.05%X_0	
ALIICE FoCal	双光子簇团位置分辨	～10 mm	5 mm	

中国在CMS/ALICE 二期升级各项目中占比

探测器系统	升级项目总费用	中国材料费投入占比	中国主攻关键技术方向占比	备注
CMS高粒度量能器	6900万瑞郎	1.3%	硅模块研制投入占比～17%	
CMS一级触发系统	619万瑞郎	12.9%	iRPC/RPC簇查找固件开发占比100%	
CMS 缪子GEM探测器	1200万瑞郎	8.7%	GEM前端电子学板占比100%	
CMS最小电离时间探测器	2200万瑞郎	1.3%	模块研制投入占比25%	
ALICE ITS3	5300万瑞郎	0%	传感器芯片R&D投入占比～14%	只参与芯片研发
ALIICE FoCal	1100万瑞郎	2.4%	硅像素层研制占比～36%	

所有数据均不包含港澳台的投入

中国在LHC国际合作中的收获

- 分享了～10%物理成果，包括发现希格斯粒子
  - 在国际高能物理舞台上展示了中国力量
- 跟踪、掌握了最先进的粒子探测技术
  - 使用了原需求的1%左右的经费和人力
- 培养、锻炼了高能物理实验人才和队伍
  - 有LHC合作经历的同事活跃在国内各高能物理最前沿
- 和欧洲建立长期稳定的国际合作
  - 在当前中美“脱钩”的国际背景下尤为重要
- 为“发起中国主导的国际大科学装置”结交国际朋友

入场券：探测器研制方面的合作与贡献

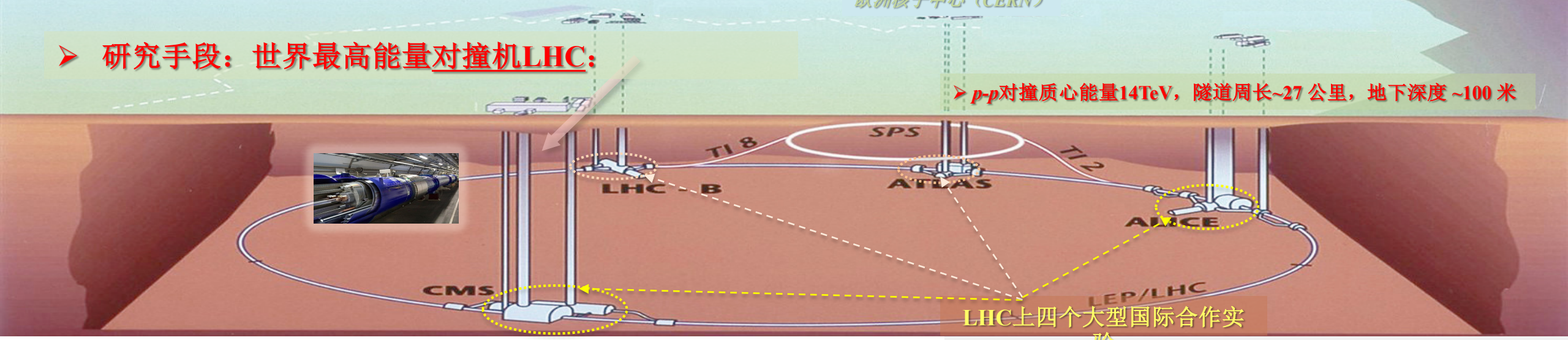
项目背景：大型强子对撞机（LHC）

➢ 物质世界的基本问题：

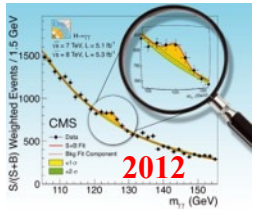
- 质量起源（希格斯粒子）
- 微观粒子运动规律(标准模型)
- CP破坏怎么发生的？
- 超对称粒子是否存在？
- 暗物质的本质？
- 早期宇宙物质特性如何？
- 额外维度是否存在？
- ……

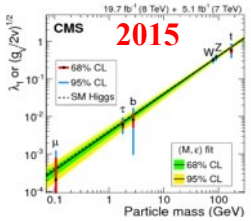
➢ 研究手段：世界最高能量对撞机LHC：

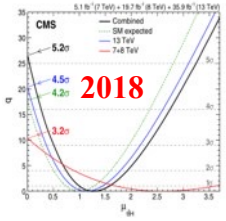
➢ *p-p*对撞质心能量14TeV，隧道周长~27 公里，地下深度 ~100 米



LHC上四个大型国际合作实验







>3000物理成果

◆ LHC建造：~1990启动，2009年对撞出束

→ 2012：发现希格斯粒子！

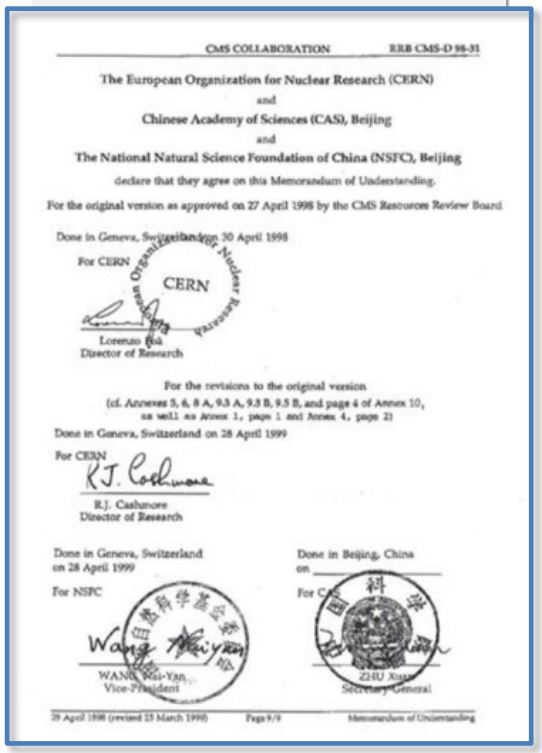
◆ 2025-2028： 高亮度升级安装

CMS ATLAS

项目背景：中国与LHC

- LHC合作方式：CERN提供设施，合作单位分担探测器任务，合作研究，共享成果
- 中国自1990年代持续参与LHC实验，完成了探测器建造和一期升级，贡献了总探测器经费~1-1.5%(在各子探测器系统的贡献约～1.5%-～20%)。目前正参与二期升级
- 中国组在LHC实验国际合作中分享了丰硕的物理成果，跟踪、掌握了最先进的粒子探测技术，培养、锻炼了人才和队伍

1998年，中国基金单位和CERN签署的合作协议



CMS COLLABORATION RRB CMS-D 98-31

The European Organization for Nuclear Research (CERN)
and
Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing
and
The National Natural Science Foundation of China (NSFC), Beijing
declare that they agree on this Memorandum of Understanding.
For the original version as approved on 27 April 1998 by the CMS Resources Review Board

Done in Geneva, Switzerland on 30 April 1998
For CERN
Lorenzo Foà
Director of Research

For the revisions to the original version
(cf. Annexes 5, 6, 8 A, 9.3 A, 9.3 B, 9.5 B, and page 4 of Annex 10, as well as Annex 1, page 1 and Annex 4, page 2)
Done in Geneva, Switzerland on 28 April 1999
For CERN
R.J. Cashmore
Director of Research

Done in Geneva, Switzerland on 28 April 1999
For NSFC
WANG Nai-Yan
Vice-President

Done in Beijing, China on
For CAS
ZHU Xiaohuan
Secretary General

29 April 1998 (revised 25 March 1999) Page 9/9 Memorandum of Understanding

目前CMS中国组成员单位（不含港澳台）：

中科院高能所、北京大学、清华大学、北京航空航天大学、浙江大学、复旦大学、中山大学、南京师范大学、中国科学技术大学，山东大学，华南师范大学

ALICE中国组成员单位（不含港澳台）：

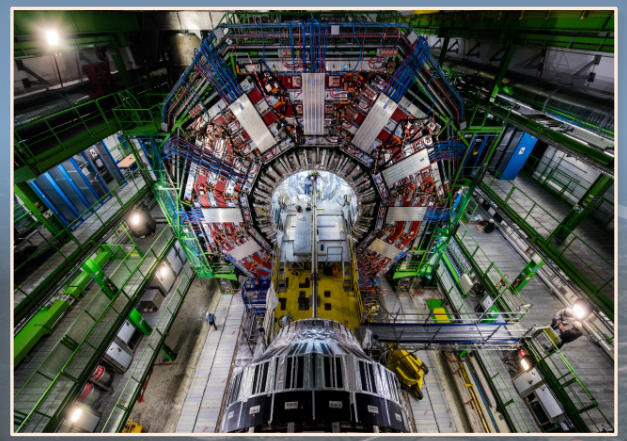
华中师范大学、中国原子能科学研究院、中国科学技术大学、复旦大学、中国地质大学（武汉）、华中科技大学、湖北工业大学

项目背景：CMS / ALICE实验

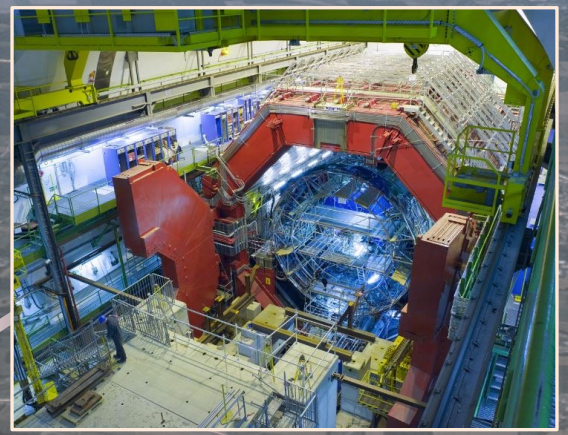
本报告中统计数据均未含港澳台

大型粒子物理国际合作实验：

- 全球多国家、多学科合作，投资巨大，技术最先进
- 最深层物质世界研究，最先进成果



CMS



CMS实验

物理目标：

希格斯粒子性质研究，精确检验标准模型，寻找新物理…

国际合作组：

~40个国家，~200个大学和研究机构，~4000名科学家和工程技术人员

探测器建造费用： 550M 瑞郎

15

ALICE实验

物理目标：

宇宙早期物质形态，夸克胶子等离子体性质…

国际合作组

- 国内科研单位在相关探测器研制方面有多年积累，承担并完成了多个国际合作实验探测器研制项目
- **高亮度LHC**上实验将面对最严酷的实验环境，采用**最尖端粒子探测技术**
- 本项目实施的探测器研制是国际粒子探测技术的最前沿，是该领域相关尖端技术的首次大规模应用

中国组贡献物理成果～10% → 中国组预期贡献：~2.8 %

15

15

进度安排

LHC实验各探测器升级计划总体流程（2012年左右开始）：

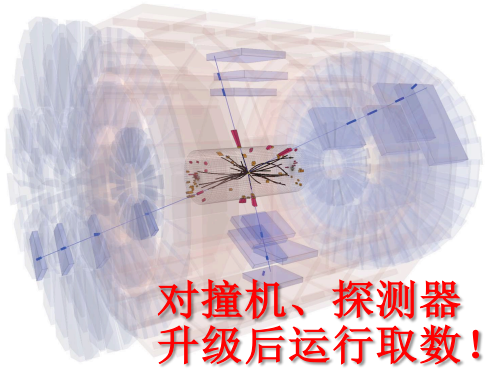
- 合作组确定探测器升级总体方案
- 各合作单位确定具体承担升级任务

- 探测器模块设计、研发；样机生产、测试认证
- 实验室升级，质控软硬件平台设立

- 合作组批准、确认探测器模块设计、生产、批量生产质控方案

- 世界各地各合作单位开始探测器模块批量生产、测试

- 探测器模块运往CERN进行探测器总装、测试
- 对撞机停机，探测器安装、调试



对撞机、探测器升级后运行取数！

项目预期成果

课题一

- 建立高粒度量能器百平米量级硅模块生产工艺，完成160块以上8寸硅模块生产；掌握关键技术
- 完成端盖RPC后端触发电子学设计并完成部分生产；基于触发电子学板开发数据读出及簇查找算法

课题二

- 完成生产40个GEM，研制GEM前端电子学板，掌握大面积GEM关键技术
- 研制时间分辨率优于60皮秒的桶部MTD，批量生产500个桶部传感器模块

课题三

- 研发用于ALICE第三代硅像素探测器的晶圆尺寸硅像素芯片，掌握其研发关键技术
- 完成FoCal探测器硅像素层研制，掌握基于硅像素芯片的高粒度量能器及读出电子学关键技术

风险分析

序号	风险内容	风险类别	风险可能性	涉及课题	应对措施
1	一级触发升级技术方案	技术风险	低	课题一	通过和 CERN 的合作关系在 CERN 进行技术方案芯片采购
2	高速抗辐照电子学芯片	政策风险	中	课题一、三	通过和 CERN 合作获取临时出口许可，已经通过该途径获得部分原型芯片
3	国际合作中断影响部分器件供应	合作风险	低	课题二	承担部分器件研发，在中国国内寻找替代供应商
4	大面积硅像素传感器研发	技术风险	低	课题三	多个备选设计方案在工业界已经得到了应用
5	市场供应链，价格波动	市场风险	中	课题一、二、三	提前备好核心元器件及其可替代元器件产能和价格
6	疫情影响国际合作交流	政策风险	低	课题一、二、三	通过合并合作交流任务，增长单次合作交流时间，减少交流人次；雇佣国际学生/博士后

→ 风险总体可控

项目的组织与管理

项目咨询专家组成员

姓名	职称	单位
朱科军	研究员	高能物理研究所
叶沿林	教授	北京大学
孙向明	教授	华中师范大学
刘建北	教授	中国科学技术大学
吕军光	研究员	高能物理研究所
王建春	研究员	高能物理研究所
冒亚军	教授	北京大学

项目办成员

姓名	职责
徐红娟	项目秘书/财务
王峰	项目科研助理
龚文煊	课题一联系人
孙小虎	课题二联系人
王钰	课题三联系人

项目组成员

姓名	职责
张华桥	项目负责人
赵京周	课题一负责人
班勇	课题二负责人
殷中宝	课题三负责人

项目骨干/博士后/学生/临时人员...

总结

- LHC升级后探测器将运行在高计数率、强辐射环境。本项目所研究的高粒度硅量能器、硅像素探测器、大面积GEM探测器、快时间晶体探测器及高速电子学等是针对严酷运行环境的先进粒子探测技术。在科技部、基金委等前期项目支持下已取得阶段性成果
- 项目技术路线选择合理，课题分配合理，整体风险可控
- 项目总体进度与CMS/ALICE实验二期升级计划完全切合，可望部分完成中国对LHC实验的义务
- 项目团队集中了CMS和ALICE实验探测器升级的主要骨干人才，有多个国家、省部级重点实验室作支撑。承担和完成过国内外大型探测器研发和建造。有信心、有能力完成项目。

谢谢各位专家！