

项目编号：2016YFA0400100

密 级：公开

# 国家重点研发计划 项目任务书

项目名称：大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级

所属专项：大科学装置前沿研究

指南方向：LHC 实验探测器升级

推荐单位：中国科学院

专业机构：科学技术部高技术研究发展中心

项目牵头承担单位：中国科学技术大学（公章）

项目负责人：赵治国

执行期限：2016 年 07 月 至 2021 年 06 月

中华人民共和国科学技术部

2016 年 07 月 19 日

0002YF 2016YFA0400100 2016-07-19 15:14:18



## 填写说明

一、任务书甲方即专业机构（项目管理方），乙方即项目牵头承担单位（项目承担方）。

二、任务书通过“国家科技计划管理信息系统公共服务平台”，按照系统提示在线填写。

三、任务书中的单位名称，请按规范全称填写，并与单位公章一致。

四、任务书要求提供乙方与所有参加单位的合作协议，需对原件进行扫描后在线提交。

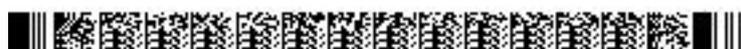
五、任务书中文字须用宋体小四号字填写。

六、凡不填写内容的栏目，请用“无”表示。

七、乙方完成任务书的在线填写，提交甲方审核确认后，用 A4 纸在线打印、装订、签章。一式六份报专业机构签章，其中专业机构留存三份，项目推荐单位、项目牵头承担单位和项目负责人各一份。

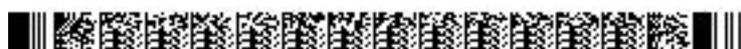
八、涉密项目请在“国家科技计划管理信息系统公共服务平台”下载任务书的电子版模板，按保密要求离线填写、报送。

九、《项目申报书》是本任务书填报的重要依据，任务书填报不得降低考核指标，不得自行对主要研究内容作大的调整。《项目申报书》和本任务书将共同作为项目过程管理、验收和监督评估的重要依据。

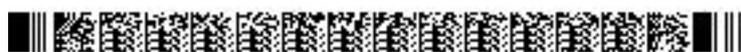


## 项目基本信息表

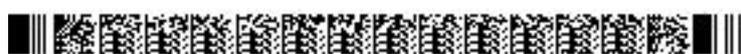
项目名称	大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级					
项目编号	2016YFA0400100					
所属专项	大科学装置前沿研究					
指南方向	LHC 实验探测器升级					
密级	<input checked="" type="checkbox"/> 公开 <input type="checkbox"/> 秘密 <input type="checkbox"/> 机密	单位总数	6	课题数	4	
项目类型	<input checked="" type="checkbox"/> 基础前沿 <input type="checkbox"/> 重大共性关键技术 <input type="checkbox"/> 应用示范研究 <input type="checkbox"/> 其他					
	<input type="checkbox"/> 青年项目					
经费预算	总预算 4500.00 万元，其中中央财政专项经费 4500.00 万元					
项目周期节点	起始时间	2016 年 07 月	结束时间	2021 年 06 月		
	实施周期	共 60 个月	预计中期时间点	2018 年 06 月		
项目牵头承担单位	单位名称	中国科学技术大学		单位性质	大专院校	
	单位所在地	安徽省 合肥市 包河区		组织机构代码	485001086	
	通信地址	合肥市金寨路 96 号		邮政编码	230026	
	银行账号	184203468850		法定代表人姓名	万立骏	
	单位开户名称	中国科学技术大学				
	开户银行（全称）	中国银行股份有限公司合肥南城支行				
推荐单位	单位名称	中国科学院		推荐单位性质	<input checked="" type="checkbox"/> 部门 <input type="checkbox"/> 地方 <input type="checkbox"/> 行业协会 <input type="checkbox"/> 产业技术创新战略联盟 <input type="checkbox"/> 其他	
项目负责人	姓名	赵政国	性别	<input checked="" type="checkbox"/> 男 <input type="checkbox"/> 女	出生日期	1956-12-28
	证件类型	身份证	证件号码	110107195612281519		
	所在单位	中国科学技术大学				
	最高学位	<input checked="" type="checkbox"/> 博士 <input type="checkbox"/> 硕士 <input type="checkbox"/> 学士 <input type="checkbox"/> 其他				



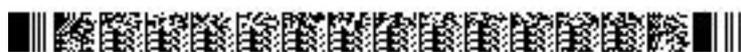
	职 称	■正高级□副高级□中级□初级□其他			职务	无
	电子邮箱	zhaozg@ustc.edu.cn	移动电话		15505510490	
项目 联系 人	姓 名	闵石头	电子邮箱	stm@ustc.edu.cn		
	固定电话	0551-63606546	移动电话	13505510735		
	证件类型	身份证	证件号码	341281198408308370		
项目 财务 负责 人	姓 名	章晨	电子邮箱	zhangchen@ustc.edu.cn		
	固定电话	63606413	移动电话	13500506053		
	证件类型	身份证	证件号码	342521196210150055		
项目 任务 (课题) 分解	序号	任务(课题)名称	任务(课题) 承担单位	任务(课题) 负责人	任务总经 费(万元)	其中中央财政 专项经费 (万元)
	01	ATLAS 实验硅微条 径迹探测器升级	中国科学院高 能物理研究所	朱宏博	1345.00	1345.00
	02	ATLAS 实验缪子探 测器升级	中国科学技术 大学	赵政国	1240.00	1240.00
	03	CMS 端盖缪子探测 器升级	北京大学	班勇	1060.00	1060.00
	04	CMS 量能器和一级 触发升级	中国科学院高 能物理研究所	刘振安	855.00	855.00
其他 参与 单位	序号	单位名称		单位性质	组织机构代码	
	1	中国科学技术大学		大专院校	485001086	
	2	中国科学院高能物理研究所		事业型研究单位	400012211	
	3	山东大学		大专院校	495570303	
	4	北京大学		大专院校	400002259	
	5	清华大学		大专院校	400000624	
	6	上海交通大学		大专院校	42500615X	
项目参 加人数	<u>68</u> 人。其中：		高级职称 <u>25</u> 人，中级职称 <u>3</u> 人，初级职称 <u>0</u> 人，其他 <u>40</u> 人；			
			博士学位 <u>37</u> 人，硕士学位 <u>2</u> 人，学士学位 <u>29</u> 人，其他 <u>0</u> 人。			



<p>项目简介 (限 800 字以内)</p>	<p>大型强子对撞机 (The Large Hadron Collider: LHC) 上的两个大型多用途粒子探测器 ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) 和 CMS (Compact Muon Solenoid) 分别是人类加速器历史上建造的尺寸最大和最重的探测器。两个实验分别都拥有来自世界上 40 多个国家的 3000 多位物理学家参与。作为高能对撞物理当中最前沿的两个实验, ATLAS 和 CMS 的主要物理目标是: 深度理解 QCD 理论、精确验证标准模型、寻找 Higgs 粒子并研究其特性、寻找其他超出标准模型的新物理, 如超对称粒子、宇宙中暗物质候选者、多维空间等。</p> <p>从 2008 年运行至今, LHC 上实验最重要的成果是发现了 Higgs 粒子。此外, LHC 得到大量高精度实验结果对标准模型在新的能量区域进行检验, 也排除了大量的超出标准模型之外的新物理参数空间。</p> <p>为应对 LHC 高束流亮度升级的要求及探测器长期运行带来的老化、效率降低等问题, LHC 将经历两次探测器升级, 一期 (Phase I) 升级计划在 2019 年底完成, 二期 (Phase II) 升级计划在 2026 年完成。ATLAS, CMS 第二阶段的升级实物花费 (core contribution, 不包括人力, 研发和基础建设) 约 32 亿人民币。</p> <p>LHC 实验探测器二期升级的主要目标是: 建造新一代抗辐照、高空间分辨的硅径迹探测器以替换已老化的硅径迹探测器; 建造新一代具有高计数率和高空间分辨率的探测器作为缪子 (<math>\mu</math>) 探测器的触发室 (如微气隙、窄气隙气体探测器)、建造新的电子学读出系统以适应 LHC 改进后的高亮度、提高触发效率、或增加探测器接受度; 建造高粒度量能器以提高能量分辨。针对这些目标, 本项目设立了如下课题: 1: ATLAS 实验硅微条径迹探测器升级; 2: ATLAS 实验 <math>\mu</math> 子探测器升级; 3: CMS 端盖 <math>\mu</math> 子探测器升级; 4: CMS 量能器和一级触发升级。</p> <p>ATLAS 要开展的升级工作主要针对硅径迹探测器和 <math>\mu</math> 子探测器及相关电子学。要解决的关键技术是硅径迹探测器有好的空间分辨 (<math>&lt;25 \mu\text{m}</math>) 和抗强辐照能力 (<math>&gt;1 \times 10^{15} \text{ 1MeV neq/cm}^2</math>); <math>\mu</math> 子探测器读出电子学高集成度、高时间精度 (约 780 ps) TDC ASIC 设计, 实现无硬件触发全数据读出; 窄气隙 RPC <math>\mu</math> 子触发探测器具有高计数率 (<math>&gt;1\text{kHz/cm}^2</math>)、高时间分辨 (<math>&lt;1\text{ns}</math>)、高探测效率 (<math>&gt;95\%</math>) 和位置分辨 (<math>&lt;1\text{mm}</math>); 用微结构气体探测器作为前向 <math>\mu</math> 子探测器的关键问题是同时具有高计数率 (<math>&gt;100\text{kHz/cm}^2</math>)、高时间分辨 (<math>&lt;1\text{ns}</math>)、高探测效率 (<math>&gt;95\%</math>) 以及大面积制作工艺。</p> <p>CMS 要开展的升级工作主要针对端盖 <math>\mu</math> 子探测器、量能器和一级触发。<math>\mu</math> 子探测器前两层将采用 GEM (效率 <math>&gt;97\%</math>, 时间分辨 <math>&lt;10\text{ns}</math>), 后两层拟采用 MRPC (效率 <math>&gt;95\%</math>, 时间分辨 <math>&lt;100\text{ps}</math>, 位置分辨 <math>&lt;2\text{mm}</math>); 高粒度量能器提供三维位置读出和精确的时间分辨 (50ps) 与能量分辨 (<math>25\%/\sqrt{E}</math>) 1%), 关键是抗辐射硅传感器研发和模块组装技术; 硅径迹室子触发系统将研发新的 xTCA 系统架构, 研发识别能力 <math>\geq 32\text{k}</math>/单板的新型 AM 模式识别技术, 以及单路大于 10Gbps、单板大于 400Gbps 传输能力的高速传输技术, 在高亮度时提供径迹联合触发; 闪烁径迹探测器触发项目将研发关键部件性能检测系统及寻迹与准直算法。</p> <p>本研究团队依托“核探测与核电子学国家重点实验室”、“核物理与核技术国家重点实验室”、“粒子技术与辐射成像国家专业实验室”、“粒子物理与粒子辐照教育部重点实验室”, 在国内外粒子物理实验探测器及相关电子学的研发、建造方面发挥了关键作用, 如北京谱仪 (BESIII)、大亚湾中微子探测器、“悟空”暗物质探测器、ATLAS 和 CMS 的 <math>\mu</math> 子探测器、STAR 和 CBM 实验。</p> <p>团队所在实验室有半导体探测器研制与测试平台、极低本底测量装置、MRPC 测试</p>
-----------------------------	---



<p>系统、高精度探测器综合测试平台、先进核电子学测试和组装平台。本项目各子课题的承担单位大都在探测器或电子学领域有多年的研制经验,通过已经承担并完成的 ATLAS 和 CMS 硬件项目在 LHC 实验上建立了很好的信誉,并与国外该领域的研究机构建立了密切合作。这些都为完成本项目提供了保证。</p> <p>项目将完成合作协议规定的 <math>\mu</math> 子探测器、径迹探测器、量能器和一级触发及相关电子学的预研究,确定方案并启动建造和部分完成批量生产。</p>
---



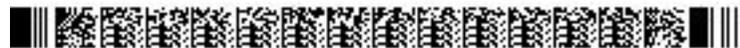
## 一、项目目标及考核指标、评测方式/方法

项目目标、成果与考核指标表

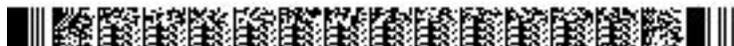
项目目标 <sup>1</sup>	成果名称	成果类型	对应的课题(任务) <sup>2</sup>	考核指标 <sup>3</sup>				考核方式(方法)及评价手段 <sup>5</sup>
				指标名称	立项时已有指标值/状态	中期指标值/状态 <sup>4</sup>	完成时指标值/状态	
1. 研制成功具有高空间分辨、抗辐照的硅微条探测器(包括前端电子学ASIC芯片), 完成至少50个可工作的硅微条探测模块; 完成CMOS硅微条探测器性能	硅微条探测器模块	<input type="checkbox"/> 新理论 <input type="checkbox"/> 新原理 <input type="checkbox"/> 新产品 <input type="checkbox"/> 新技术 <input type="checkbox"/> 新方法 <input type="checkbox"/> 关键部件 <input type="checkbox"/> 数据库 <input type="checkbox"/> 软件 <input type="checkbox"/> 应用解决方案 <input checked="" type="checkbox"/> 实验装置/系统 <input type="checkbox"/> 工程工艺 <input type="checkbox"/> 标准 <input type="checkbox"/> 专利 <input type="checkbox"/> 其他	1: ATLAS 实验硅微条径迹探测器升级	硅微条探测器模块空间分辨率, 抗辐照性能	无	无	25微米 $1.6 \times 10^{15}$ 1MeV $n_{eq}/cm^2$	性能指标通过放射源测试, 由ATLAS合作组安排束流测试。
				CMOS 硅微条探测器模块空间分辨率, 抗辐照性能	无	无	25微米 $1.6 \times 10^{15}$ 1MeV $n_{eq}/cm^2$	性能指标通过放射源测试, 由ATLAS合作组安排束流测试。



研究。 2. 完成研制 ATLAS 二期升级所要求的窄气隙阻性板μ子触发探测器及读出电子学、建造 10 个可直接应用二期升级的 RPC μ子触发探测器；研制满足 ATLAS 二期升级要求的基于多气隙阻性 GEM 探测器的前向μ子触发探测器原型；合作完成高集成度、高精度的 ASIC TDC 设计。	窄气隙 RPC, 大面积 GEM 触发探测器, TDC ASIC 芯片	<input type="checkbox"/> 新理论 <input type="checkbox"/> 新原理 <input type="checkbox"/> 新产品 <input type="checkbox"/> 新技术 <input type="checkbox"/> 新方法 <input type="checkbox"/> 关键部件 <input type="checkbox"/> 数据库 <input type="checkbox"/> 软件 <input type="checkbox"/> 应用解决方案 <input checked="" type="checkbox"/> 实验装置/系统 <input type="checkbox"/> 工程工艺 <input type="checkbox"/> 标准 <input type="checkbox"/> 专利 <input type="checkbox"/> 其他	2: ATLAS 实验 μ子探测器升级	RPC μ子触发探测器的探测效率、计数率、时间分辨、位置分辨	90% <100Hz/cm <sup>2</sup> ~2ns ~1cm	无	95% >1kHz/cm <sup>2</sup> <1ns <1mm	性能指标通过宇宙线测试, 由 ATLAS 合作组安排束流测试。
				前向 μ子探测器的计数率、时间分辨、位置分辨、探测效率	无	无	100kHz/cm <sup>2</sup> <1ns <150 μm >95%	性能指标通过宇宙线测试, 由 ATLAS 合作组安排束流测试。
				MDT TDC ASIC 芯片的通道数、时间精度、触发模式	无	无	24 通道/芯片 ~780ps 无触发模式读出	ATLAS MDT 系统测试
	大面积 GEM, 玻璃 MRPC 触发探测器	<input type="checkbox"/> 新理论 <input type="checkbox"/> 新原理 <input type="checkbox"/> 新产品 <input type="checkbox"/> 新技术 <input type="checkbox"/> 新方法 <input type="checkbox"/> 关键部件 <input type="checkbox"/> 数据库 <input type="checkbox"/> 软件 <input type="checkbox"/> 应用解决方案 <input checked="" type="checkbox"/> 实验装置/系统 <input type="checkbox"/> 工程工艺 <input type="checkbox"/> 标准 <input type="checkbox"/> 专利 <input type="checkbox"/> 其他	3: CMS 端盖 μ子探测器升级	GEM 探测器单室效率, 时间分辨, 计数, φ 方向角分辨, 长期辐射时增益损失	无	无	效率>97%, 时间分辨<10ns, 计数>10kHz/cm <sup>2</sup> , φ方向角分辨<300 μrad, 累积辐射达到 200 mC/cm <sup>2</sup> 时没有增益损失。	性能指标通过放射源、宇宙线测试, 由 CMS 合作组安排束流测试。

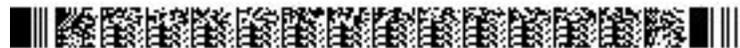


<p>3. 完成研制 CMS 二期升级所要求的基于 GEM 和 MRPC 的端盖 <math>\mu</math> 子触发探测器, 生产 10 个 GE2/1 和 10 个 MEO 探测器, 生产、测试 GE1/1 和 GE2/1 的 8 层前端电子学板共 330 块; 建造 4 个可直接应用二期升级的 RE3/1 <math>\mu</math> 子探测器; 完成 SciFi 探测器关键部件检测系统升级。</p> <p>4. 参与研制高粒度量能</p>				<p>多层玻璃 MRPC 计数率, 时间分辨, 位置分辨, 效率。</p>	<p>小面积 MRPC 计数率超过 <math>10 \text{ kHz/cm}^2</math>, 时间分辨优于 100ps, 位置分辨优于 5mm, 效率优于 95%。</p>	无	<p>计数率高于 <math>10 \text{ kHz/cm}^2</math>, 时间分辨优于 100ps, 位置分辨优于 2mm, 效率高于 95%。</p>	<p>性能指标通过放射源、宇宙线测试, 由 CMS 合作组安排束流测试。</p>
				<p>SciFi 探测器关键部件检测系统</p>	无	无	<p>PACIFIC 芯片全功能检测效率达 80 片/天; 前端板测试效率达 20 片/天。寻迹和准直效率 95%, 相对分辨率达到 0.5-1%</p>	<p>性能指标通过放射源、宇宙线测试, 由 CMS 合作组安排束流测试。</p>
				<p>4: CMS 量能器和一级触发升级</p>	<p>高颗粒度新型量能器样机的时间分辨、能量分辨, 硅传感器 (<math>100 \mu\text{m}</math>) 抗辐照性能</p>	无	无	<p>50ps 25% / <math>\sqrt{E}</math> (E) <math>\oplus 1\%</math> <math>&gt;1 \times 10^{16}</math> <math>1 \text{ MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2</math></p>
	<p>高颗粒度量能器, 新模式识别寻迹方法</p>	<p><input type="checkbox"/>新理论 <input type="checkbox"/>新原理 <input type="checkbox"/>新产品 <input type="checkbox"/>新技术 <input type="checkbox"/>新方法 <input type="checkbox"/>关键部件 <input type="checkbox"/>数据库 <input type="checkbox"/>软件 <input type="checkbox"/>应用解决方案 <input checked="" type="checkbox"/>实验装置/系统 <input type="checkbox"/>工程工艺 <input type="checkbox"/>标准 <input type="checkbox"/>专利 <input type="checkbox"/>其他</p>						

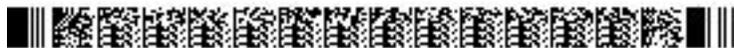


器样机并建造7个硅模块样机，参与硅传感器的性能研究；建立基于 ATCA / xTCA 的开发环境，合作完成开发新型模式识别寻迹技术，开发出智能控制软件，完成研制适用于硅径迹探测器海量数据的触发高速传输与预处理板。				一级径迹触发模式识别能力和海量数据触发高速传输速率	无	无	≥32K/单板) 单路速率 ≥ 10Gbps 单板速率 ≥ 400Gbps	系统联调测试
--	--	--	--	---------------------------	---	---	---	--------

科技报告考核指标	序号	报告类型 <sup>6</sup>	数量	提交时间	公开类别及时限 <sup>7</sup>
	1	年度技术进展报告	3	项目执行年度	延期公开
	2	中期技术进展报告	1	项目中期	延期公开
	3	测试报告	1	2019-2020 年	延期公开
	4	终期科技报告	1	项目结题	延期公开

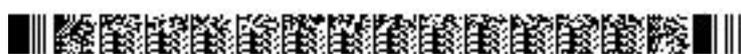


其他目标与考核指标（对于难以采取上述表格细化的项目目标及其考核指标，可在此细化填写，限 1000 字以内。）



备注：

1. **“项目目标”**，应从以下方面明确描述：（1）项目研发主要针对什么问题和需求；（2）将要解决哪些科学问题、突破哪些核心/共性/关键技术；（3）预期成果；（4）成果将以何种方式应用在哪些领域/行业/重大工程等，并拟在科技、经济、社会、环境或国防安全等方面发挥何种的作用和影响。
2. **“对应的课题（任务）”**，指将由项目内哪些课题（任务）支撑取得某项成果。
3. **“考核指标”**，指相应成果的数量指标、技术指标、质量指标、应用指标和产业化指标等，其中，数量指标可以为论文、专利、产品等的数量；技术指标可以为关键技术、产品的性能参数等；质量指标可以为产品的耐震动、高低温、无故障运行时间等；应用指标可以为成果应用的对象、范围和效果等；产业化指标可以为成果产业化的数量、经济效益等。同时，对各项考核指标需填写立项时已有的指标值/状态以及项目完成时要到达的指标值/状态。同时，考核指标也应包括支撑和服务其他重大科研、经济、社会发展、生态环境、科学普及需求等方面的直接和间接效益。如对国家重大工程、社会民生发展等提供了关键技术支撑，成果转化并带动了环境改善、实现了销售收入等。若某项成果属于开创性的成果，立项时已有指标值/状态可填写“无”，若某项成果在立项时已有指标值/状态难以界定，则可填写“/”。
4. **“中期指标”**，各专项根据管理特点，确定是否填写，阶段目标明确的专项项目应填写中期指标。
5. **“考核方式方法”**，应提出符合相关研究成果与指标的具体考核技术方法、测算方法等。
6. **“科技报告类型”**，包括项目验收前撰写的全面描述研究过程和技术内容的最终科技报告、项目年度或中期检查时撰写的描述本年度研究过程和进展的年度技术进展报告以及在项目实施过程中撰写的包含科研活动细节及基础数据的专题科技报告（如实验报告、试验报告、调研报告、技术考察报告、设计报告、测试报告等）。其中，每个项目在验收前应撰写一份最终科技报告；研究期限超过2年（含2年）的项目，应根据管理要求，每年撰写一份年度技术进展报告；每个项目可根据研究内容、期限和经费强度，撰写数量不等的专题科技报告。科技报告应按国家标准规定的格式撰写。
7. **“公开类别及时限”**，公开项目科技报告分为公开或延期公开，内容需要发表论文、申请专利、出版专著或涉及技术诀窍的，可标注为“延期公开”。需要发表论文的，延期公开时限原则上在2年（含2年）以内；需要申请专利、出版专著的，延期公开时限原则上在3年（含3年）以内；涉及技术诀窍的，延期公开时限原则上在5年（含5年）以内。涉密项目科技报告按照有关规定管理。



## 二、项目研究内容、研究方法及技术路线

### (一) 项目的主要研究内容

#### 课题 1: ATLAS 实验硅微条径迹探测器升级

##### (1) 前端读出电子学 ASIC 芯片 (ABC-STAR) 设计

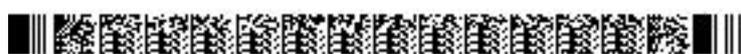
针对 ATLAS 径迹探测器中硬件触发率提升的要求,重新设计硅微探测器前端读出电子学 ASIC 芯片的数字逻辑部分,包括输入寄存、指令流水线、触发缓存、击中簇团寻找和信号输出等复杂功能模块,实现探测器“击中”信息输出。设计上需要满足上、下行高速带宽匹配、短延时等技术指标要求。采用抗辐照电路设计技术,抑制强辐射环境下可能出现的“单粒子”等效应。基于 SystemVerilog 实现芯片设计的高性能验证平台,分步验证功能模块,最终联调实现 ABC-STAR 芯片数字部分的全功能验证。通过流片、测试以验证设计,并实现与前端硅微条传感器联调。

##### (2) 硅微条探测器模块原型的设计和建造

作为硅微条径迹探测器的最基本单元,硅微条探测器模块包含硅微条传感器,读出 ASIC 芯片,模块控制 PCB 板和电源控制等组成部分。在高性能组件的基础上,通过高精度的组装工艺,实现最终性能指标。模块要求实现高空间分辨率(优于 25 微米)以及抗强辐照性能(高于  $1.6 \times 10^{15}$  1MeV  $n_{eq}/cm^2$ )。在预研和预生产阶段,拟改进探测器模块建造所需工装夹具,改进工艺流程(如传感器与 ASIC 读出芯片之间打线连接)、完善技术细节、关键参数等(位置精度控制等)。制作的探测器模块的关键指标(空间分辨率、抗辐照等)将通过实验室放射源以及束流测试等加以确认。

##### (3) CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 探测器性能研究

基于工业标准 CMOS 工艺,设计高性能、低造价的硅探测器是近年硅探测器技术发展的热门方向。CMOS 探测器可以在相同硅基衬底上集成电子学进行信号处理,显著简化后端电子学复杂度及设计难度,结构更为紧凑。针对 ATLAS 硅微条径迹探测器升级,对 CMOS 探测器的抗辐照等主要性能进行深入研究。目前基于高压/高阻 CMOS 工艺的测试结构均体现出较为理想的结果,包含完整传感器设计和完整集成读出电子学的芯片正在优化设计中。强辐照前后的主要性能需要通过实验室放射源及束流测试加以验证。项目最终将完成 CMOS 硅微条探测器替代传统型硅微条探测器可行性研究。



## 课题 2: ATLAS 实验 $\mu$ 子探测器升级

### (1) ATLAS 窄气隙阻性板 $\mu$ 子触发探测器及读出电子学

针对 ATLAS Phase II 升级的对 RPC $\mu$ 子触发探测器更高的计数率能力、时间分辨、位置分辨及抗老化性能的需求,开展 RPC 探测器和电子学的相关性能研究,通过对电极材料的改进、室体结构的优化、读出方法的设计、以及工作条件的研究,结合新型的前端电子学和读出电子学,系统提高 RPC 的各项关键性能,达到 ATLAS Phase II 升级的指标要求;建立专用的探测器性能测试系统;完成探测器设计并实现小批量工程样机试制,建立并完善批量建造的工艺流程、质量控制、性能检测体系,为 Phase II 升级工程建造奠定基础;参与 ATLAS 新型触发电子学系统主要模块的研制,包括 L0 触发的 DCT(Data Collector Transmitter) 和 SL (Sector Logic) 模块,实现在线的零压缩功能以适应 LHC 高计数率环境。

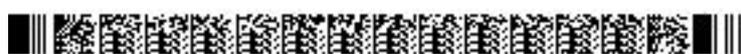
### (2) ATLAS 前向 $\mu$ 子探测器(多层 GEM 室)

针对高计数率环境下进行高精度时间测量的需求,研制一种具有多气隙结构的快时间响应微结构气体探测器。研究重点是提高探测器的计数率和时间分辨性能,同时增强高辐照本底下的可靠性,以满足 ATLAS Phase II 的升级需要。

原初电离的统计涨落是制约微结构气体探测器时间分辨的主要因素,通过采用多气隙结构能有效减小原初电离的影响,从而获得高时间分辨。同时采用阻性井型结构进行气体放大,实现高计数率下稳定的高增益运行。研究内容主要包括:模拟探测器中的各种物理过程,研究气隙厚度和数量、气体放大单元构型、阻性层材料以及不同工作条件对探测器性能的影响;优化和确定探测器设计的关键参数,包括井型结构、阻性电极、读出电极等;建造原理样机并测试其性能:即高计数率下的时间分辨性能,标定探测器性能与各种因素的依赖关系。

### (3) ATLAS $\mu$ 子探测器电子学升级

本项目中将探索基于 ASIC 的高精度 TDC 设计技术,参与完成实际的 TDC 芯片设计。在研究中将基于粗细时间测量相结合的技术进行 ASIC 设计,并探索高速串行数据接口设计技术以实现无触发模式下的全数据读出。



### 课题 3: CMS 端盖 $\mu$ 子探测器升级

CMS-GEM 探测器升级课题主要有 (1) 内圈第一层 GEM 探测器, 目前探测器研制已基本完成, 批量生产即将开始, 将承担部分探测器组装测试及前端电子学生产测试任务; (2) 内圈第二层 GEM 探测器, (3) 是最内圈快时间 ME0 探测器。后两项目目前正在探测器研制阶段; 目标是研发出符合触发和径迹重建要求且比第一层 GEM 更大的第二层 GEM 探测器, 每个探测器模块将有 4 层 GEM 探测室组成, 它将提供更精确的 $\mu$ 子径迹元。另外还要研发狭小空间内的最内圈高时间分辨 ME0 多层探测器。由于空间限制, 原来的 GEM 结构设计不能适合空间要求, 目前正在研究其他类型快时间微结构探测器, 如 FTM 探测器。在研发、掌握探测器技术的同时, 还要完善升级本实验室探测器研制、测试及批量生产设备, 承担并完成部分 CMS-GEM 项目探测器生产任务。

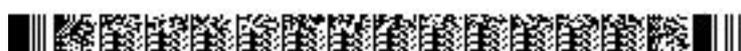
在端部 MRPC 课题中, 根据物理条件要求研制梯形 MRPC, 其长度达 1 米, 上底宽度 45cm, 下底宽度 55cm。由于研制的低电阻玻璃尺寸的限制, 整个探测器将由 6 个小梯形 MRPC 拼接而成, 采用统一的 PCB 读出感应信号。每个 MRPC 包含 5 个气隙, 气隙宽度为 250 微米, 采用条形读出, 读出条平均宽度为 7mm。以满足高的时间和位置分辨要求。需要解决玻璃拼接、阻抗匹配、信号串扰及传输、探测器宇宙射线及粒子束流测试等关键技术问题; 同时还要研究高亮度实验中的气体污染问题, 以保证探测器的长期稳定工作。承担并完成 CMS 端部后两层部分 $\mu$ 子探测器的升级。

### 课题 4: CMS 量能器和一级触发升级

#### (1) CMS 新型量能器

高粒度量能器主要从事以下三个方面的研究: 1) 和欧洲核子中心等单位合作测试不同工艺的硅传感器性能, 反馈给硅传感器生产公司, 设计出符合高粒度量能器抗辐射, 能量和时间分辨要求的硅传感器。2) 和美国加州大学圣巴巴拉分校合作开展规模模块组装的研究, 设计出满足硅模块厚度要求和质量控制的组装方案, 为实验束测试提供硅模块, 为后续量产提供方案。3) 参与实验样机的实验束测试, 通过对高粒度量能器性能的研究, 改进硅传感器的设计, 硅模块的组装, 模拟性能研究等。

#### (2) CMS 一级径迹触发升级



CMS 一级径迹触发升级研究主要开展四方面的研究：（1）开展三种候选寻迹方案的研究。基于模式识别：各种径迹模式存储在联想存储器（Associative Memory），大量径迹模式存储于 ASIC 器件（~100M overall）；基于哈夫转换（Hough transform）：把径迹模式转换为转换空间的簇团，利用 FPGA 器件；基于“Tracklet”：通过双层径迹 stub 外推构成整体径迹，利用 FPGA 器件；（2）与费米实验室等单位合作开展寻迹插件的研究，在北京建立开发系统。项目依赖于 ATCA 架构，有 ATCA 载板和 AMC 子板构成；（3）独立研制高速数据传输汇总插件的研制。该插件要求符合高能所参与制定的 xTCA 新标准，接收硅探测器的海量数据并分发给径迹触发插件；（4）开展基于 xTCA 架构的智能控制软件的开发。

## （二）项目拟采取的研究方法

### 课题 1: ATLAS 实验硅微条径迹探测器升级

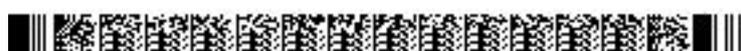
#### （1）前端读出电子学 ASIC 芯片（ABC-STAR）设计

与 CERN 为电子学组合作，按照前端读出电子学 ASIC 指标要求，重新设计数字逻辑模块，主要包括输入寄存、指令流水线、触发缓存、击中簇团寻找和信号输出等，实现探测器“击中”信息输出，仿真结果满足功能和时序要求。再基于 SystemVerilog 设计验证模型，完成各个模块功能验证及组合验证。采用汉明码、三模冗余等方法，强化数字部分抗辐照设计。芯片功能需要通过流片加以充分验证，并实现与前端硅微条传感器联调。

#### （2）硅微条探测器模块原型的设计和建造

与英国卢瑟福实验室（RAL）及德国电子同步加速器研究所（DESY）合作，开展硅微条探测器模块原型的设计和建造。按照预期机械精度要求，改进现有工作夹具，提高组部件的定位精度。改进工艺流程，如用抗辐照紫外凝胶替换常用加银环氧树脂以缩短固化时间等多种手段，使之更适合于批量生产。通过电器测试、实验室放射源测试以及试验线束测试标定探测器模块原型性能。

#### （3）CMOS 探测器性能研究



基于先期研制的 CMOS 硅微条传感器，开展主要性能测试（电荷收集效率、噪声水平、空间分辨率等）。测试结果用于改进传感器设计，并为集成的读出电子学设计提供参考基准。基于 FPGA 开发 CMOS 硅微条传感器的数字读出芯片，实现联调，并构建原理样机，用于综合性能评估。同样需要通过实验室放射源和试验线束完成性能标定。

## 课题 2: ATLAS 实验 $\mu$ 子探测器升级

(1) ATLAS RPC 触发探测器系统急需解决的关键问题是提高 RPC 计数率和工作寿命的方法，并提高 RPC 的时间分辨和位置分辨能力，以保证 HL-LHC 亮度下触发的效率，并提高触发的动量分辨能力。主要研究方法是通过采用更高灵敏度的前端电子学，结合窄气隙 RPC 结构，控制每次雪崩产生的电荷量，有效提高 RPC 的计数率和工作寿命；通过减小 RPC 的气隙宽度并优化室体结构和读出方法，可以提高时间分辨和位置分辨能力；通过大面积原型探测器的试制，掌握批量建造的制作工艺流程和质量控制方法。

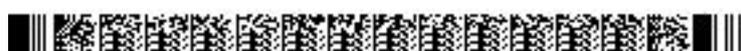
(2) ATLAS 前向 $\mu$ 子探测器需解决的关键问题是如何实现高计数率下高精度时间测量。拟采取的研究方法是采用具有多气隙的多层阻性井型 GEM 结构，在保留高计数率能力的基础上获得高时间分辨。研究方法为模拟先行，技术研究随后，最后研制样机进行原理验证。

### (3) ATLAS $\mu$ 子探测器电子学升级

基于粗细时间测量相结合的构架，使用高精度锁相环电路（PLL）对输入参考时钟进行倍频，再结合高性能的延时锁定环电路（DLL）对倍频后的时钟进行分相，实现二次时间内插，并结合 130 nm 至 180 nm CMOS 工艺展开 ASIC 优化设计。

## 课题 3: CMS 端盖 $\mu$ 子探测器升级

CMS-GEM 探测器的研发中，第二层 GEM 关键是要解决与符合触发和径迹重建要求的探测器结构设计，以及比第一层 GEM 更大的生产、组装测试技术；最内圈 ME0 还要解决狭小空间的多层探测器结构设计、用新微结构探测器技术提高时间分辨等问题。在承担第一层 GEM 生产任务的同时，开展第二层 GEM 及 ME0 探测器研究。我们在 CERN、比利时等单位都有长期留学的博士生，与 CMS-GEM 相关单位有紧密合作。首先我们将按 CMS 标准



建造探测器样机，在国内进行 X 射线测试及宇宙线测试，到 CERN 进行束流测试，掌握升级探测器工作原理及组装测试关键技术。然后建造全尺寸样机，争取关键部件的国产化，开发批量生产技术并完善批量生产测试设备。最后承担并完成部分 CMS-GEM 项目探测器生产任务。

在 MRPC 项目的实施中拟密切与 CMS 实验相关单位合作，研制适合于高亮度实验的 $\mu$ 子探测器系统。将根据 CMS 实验 $\mu$ 子探测器的总体设计要求，立足国内完成梯形高计数率 MRPC 探测器的研制。束流实验拟在 CERN 的高亮度辐照源（GIF）上进行。电子学的研制将与法国粒子物理与核物理实验室（IPNL）紧密合作，研制出应用于 MRPC 的快前放和高时间精度 TDC，以及相应的适用于高亮度下 CMS 触发的包括径迹触发、量能器触发和 $\mu$ 子触发的高效一级触发系统。总体研究方针是国际合作与国内合作并进、理论研究与实验研究相结合。

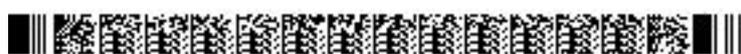
#### 课题 4: CMS 量能器和一级触发升级

##### (1) CMS 新型量能器

硅传感器的抗辐射性能是 CMS 高粒度量能器成功的关键要求之一。减少硅传感器的厚度和在零下 30 摄氏度左右工作，是提高硅传感器抗辐射的有效途径。另外，不同的生产工艺和材料也对硅抗辐射性有着巨大的影响。我们将设计生产的硅传感器，让其经过不同剂量的辐射，测试其性能变化，最终确定合适的硅传感器；在硅模块组装方面主要是尽量减少模块的厚度，从而提高量能器的能量分辨率。

##### (2) CMS 一级径迹触发升级

在硅径迹室触发算法研究方面主要依靠模式识别方案：基本设计利用桶部 6 层和端盖 5 层原片；利用径迹头端（stub）寻找，要求在满足横动量条件  $PT > 2\text{GeV}$  的两层符合，把径迹数据量压缩到  $< 3\%$  of tracks；基于模式识别的寻迹方案：各种径迹模式（Pattern）存储在 ASIC 器件（ $\sim 100\text{M}$  overall），通过一次事例实际各层击中与所有径迹模式比对，确定径迹。硬件设计方面，将围绕 xTCA 新系统架构、基于 AM 存储器的模式识别技术、高速数据传输技术和 xTCA 智能控制技术等关键开展研究，完成原理样机的设计以及量产样机的设计，为量产做好准备并根据项目和经费的安排开展部分量产。



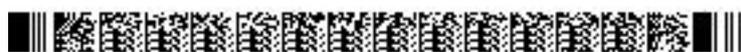
### 三、项目任务(课题)分解方案

#### (一) 项目任务(课题)分解情况

项目任务是 LHC 实验 ATLAS、CMS 探测器的升级。主要目标是对各实验决定将要升级的各个系统和各子探测器的升级方案进行预研, 提供选择方案。对被选定的方案启动批量生产和部分完成所承担的任务。ATLAS 和 CMS 是 LHC 上开展 TeV 物理的两个独立的实验, 所处实验环境和物理目标基本相同。尽管它们设计、建造及升级各自采用了一些不同的方法和技术, 但也采用了一些共同的技术、如硅探测器、GEM 和 ASIC 等, 但各自的要求有所区别。

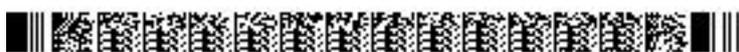
本项目 ATLAS 实验探测器的升级涉及两个子探测器, 即硅微条径迹探测器和 $\mu$ 子探测器升级。它们分别为两个课题, 即课题 1: ATLAS 实验硅微条径迹探测器升级; 课题 2: ATLAS 实验 $\mu$ 子探测器升级。这两个子探测器采用完全不同的方法和技术, 它们所起的作用也不相同。课题 1 属半导体探测器, 主要作用是在对撞区精确测量对碰产生事例的顶点, 同时提供测量带电径迹的信息。硅像素探测器和硅微条探测器一起构成定点探测器。它对通过  $H \rightarrow b\bar{b}$  衰变研究 Higgs 粒子的特性至关重要。此外, 硅顶点探测器的粒子击中的位置信息和其他径迹探测器的粒子击中位置联合使用, 可以提高带电径迹测量的位置分辨。课题 2 是气体型探测器, 主要功能是鉴别 $\mu$ 子并测量其动量。 $\mu$ 子探测器对所有末态含有 $\mu$ 轻子的物理都至关重要, 例如通过  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$  (其中 4 个轻子中含有 $\mu$ 子)。 $\mu$ 子探测器中的 RPC 主要提供桶部 $\mu$ 子探测器事例触发; 而其端盖的 GEM 探测器除提供触发外, 还可提供位置信息。由于 LHC 亮度的提高,  $\mu$ 子探测器的 MDT (Monitoring position chamber), 即提供 $\mu$ 子精确位置测量的漂移管室本身虽不升级, 但其读出电子学必须重新建造以与高亮度相关环境匹配。

对于 CMS 实验探测器的升级, 本项目涉及两个子探测器, 即端盖 $\mu$ 子探测器、量能器和一级触发的升级。为此设立两个课题, 即课题 3: CMS 端盖 $\mu$ 子探测器升级; 课题 4: CMS 量能器和一级触发升级。CMS 端盖 $\mu$ 子探测器的升级主要是为了适应 LHC 升级后的高亮度, 在高计数率的环境下有高的探测效率, 大面积的 GEM 和 RPC 均为 $\mu$ 子事例触发探测器。前者适应高计数环境, 而且还可得出 $\mu$ 子的位置信息, 后者同样起到高计数率环境下的事例触发作用, 但属首次大规模尝试。由两层 GEM 加两层 RPC 构成端盖 $\mu$ 子谱仪的



事例触发探测器。 $\mu$ 子触发探测器与 $\mu$ 子径迹探测器一起构成 $\mu$ 子探测器，用于鉴别 $\mu$ 子并测量其动量，其作用和物理意义在课题 2 中已有描述。新型量能器采用高粒度的方法来提高对电子、光子和 jet（强子束）的能量分辨，它对末态涉及电子、光子和 jet 的物理，尤其是对 b、t 顶夸克物理，对通过  $H \rightarrow bb$  研究 Higgs 粒子特性及通过含 jet 末态寻找新物理均十分重要。一级事例触发是事例触发重要的一环，它主要利用径迹探测器和量能器的信息，通过模式识别来选择感兴趣的事例。端盖量能器，端盖 $\mu$ 子探测器构成是 CMS 探测器的重要子探测器。

ATLAS、CMS 课题涉及升级的子探测器如图 1、图 2、图 3 所示。



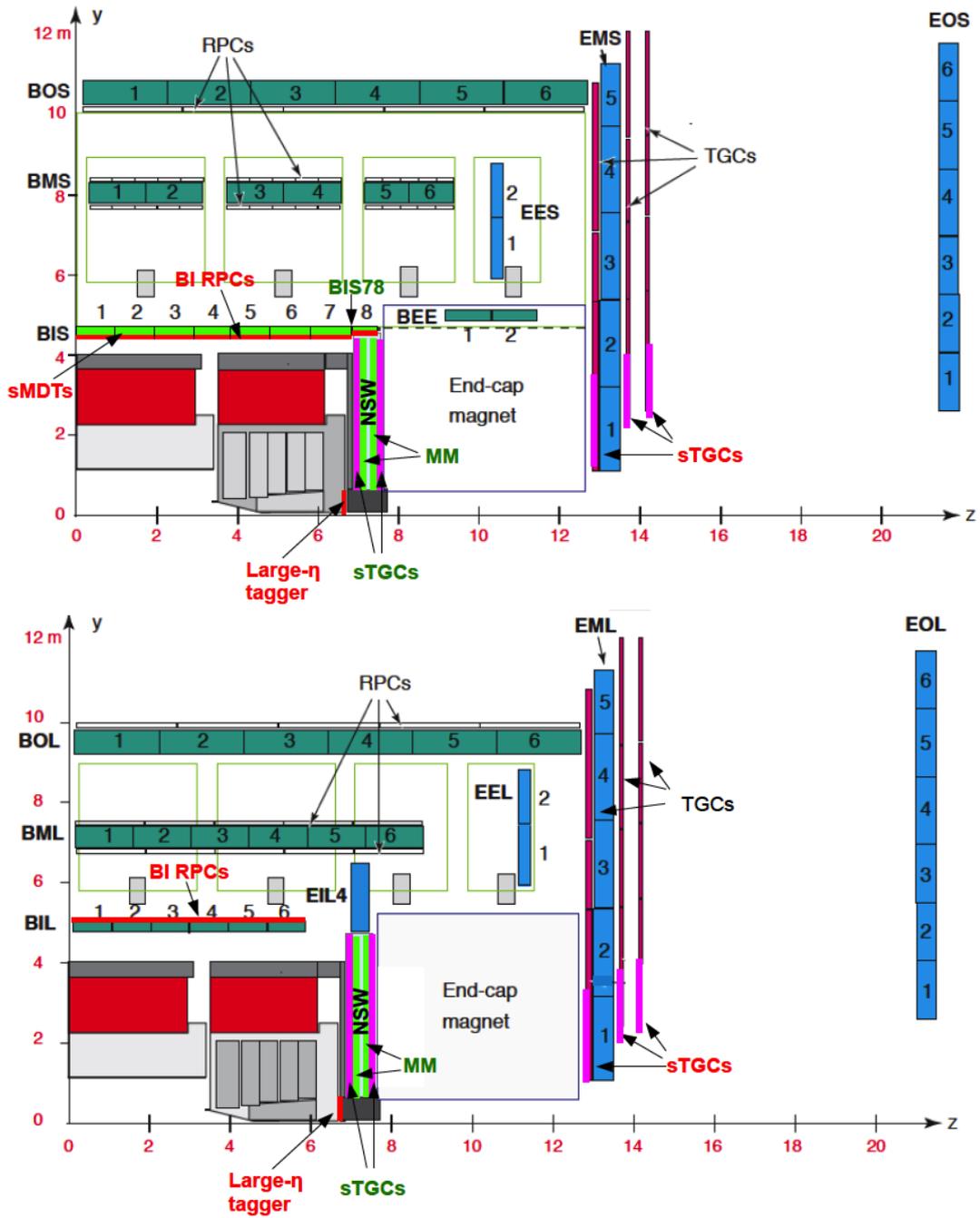
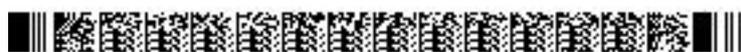


图 1. ATLAS 探测器 1/4 剖面图。图中标示二期升级将建造的 $\mu$ 子谱仪窄气隙 RPC (RPCs)、可能增加的 GEM 探测器(Large- $\eta$  tagger)。



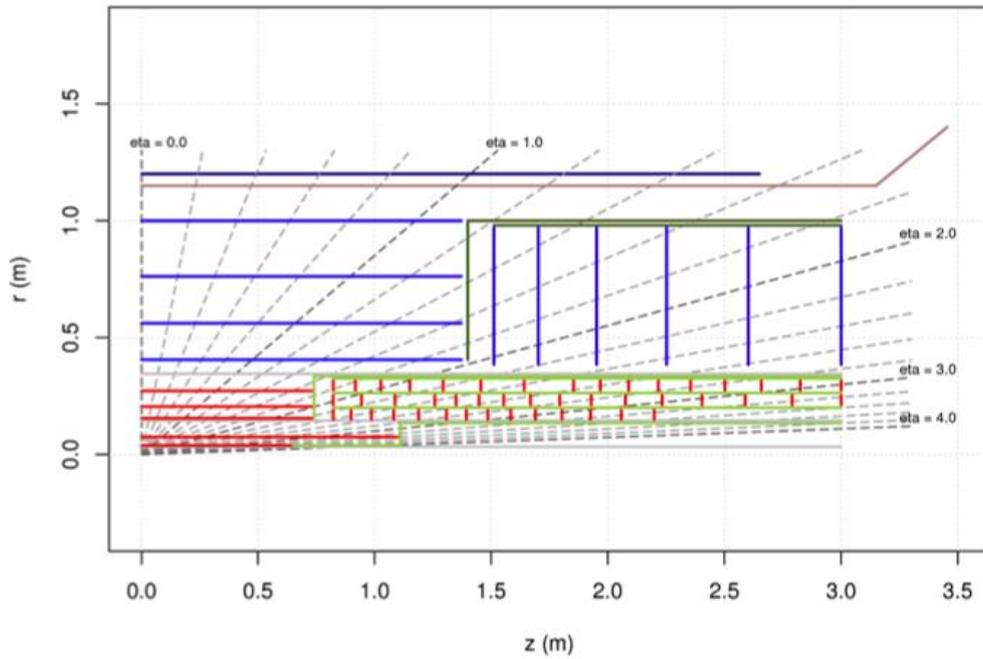


图2. ATLAS径迹探测器1/4剖面图。图中蓝线标示二期升级将建造的硅微条径迹探测器。

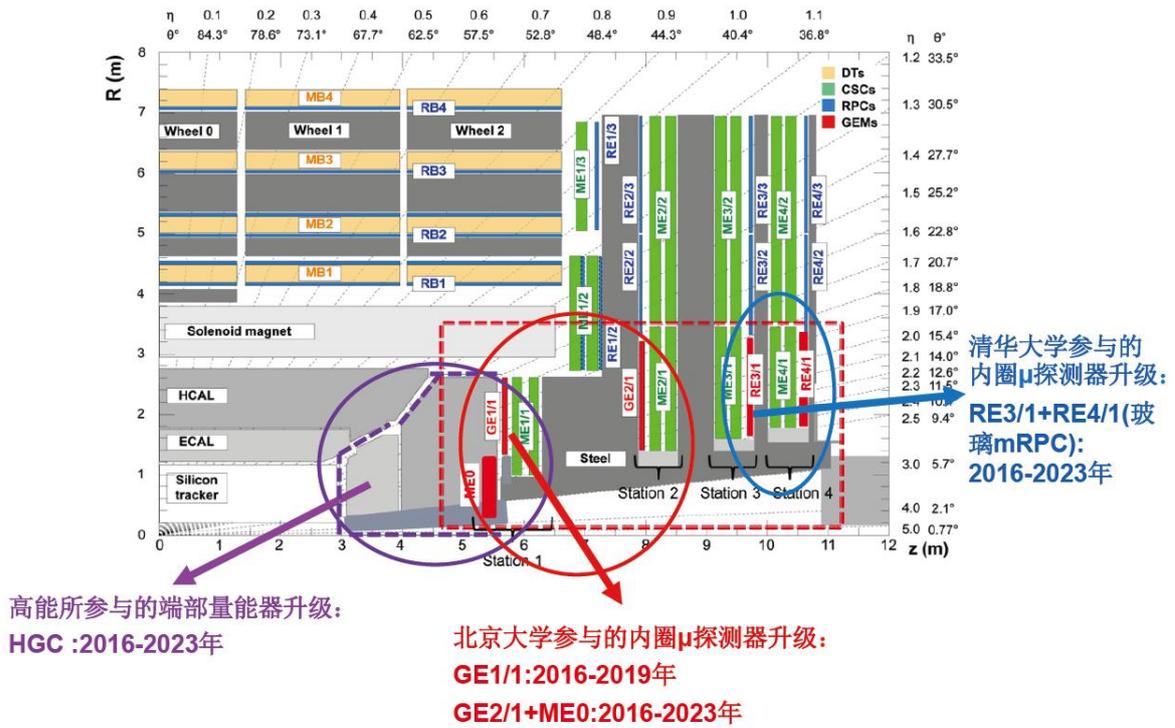
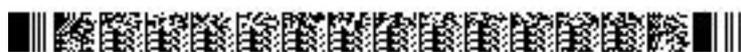


图3. CMS 探测器 1/4 剖面图。图中标注端盖量能器、端盖μ子触发探测器 GEM 和 MRPC。



## （二）项目各任务（课题）内容

### 课题 1: ATLAS 实验硅微条径迹探测器升级

研究目标:

根据 ATLAS 硅微条径迹探测器升级的要求, 完成高空间分辨率(优于 25 微米)以及抗强辐照性能(高于  $1.6 \times 10^{15}$  1MeV  $n_{eq}/cm^2$ )的硅微条探测器模块的原型设计, 并按照最终工艺流程完成至少 50 个可工作的硅微条探测器模块。设计高传输率、抗强辐照的前端读出 ASIC 芯片, 完成新型 CMOS 硅微条探测器性能研究。

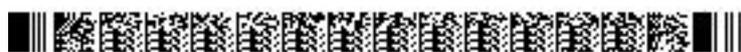
主要研究内容:

#### (1) 前端读出电子学 ASIC 芯片(ABC-STAR)设计

随着 ATLAS 径迹探测器升级中硬件触发(L0)率的提升, 前端读出电子学 ASIC 芯片需要重新设计以适应全新的 STAR 数据流架构。ABC-STAR 芯片为硅微条传感器的基准读出芯片。高能物理研究所与 CERN 共同承担该 ASIC 芯片数字部分的设计工作, 实现与后端的模块控制芯片(HCC)的高速数据传输。数字逻辑主要包括输入寄存、指令流水线、触发缓存、击中簇团寻找和信号输出等复杂功能模块, 实现探测器“击中”信息输出。设计上需要满足上、下行高速带宽匹配、短延时等技术指标要求。设计考虑采用汉明码、三模冗余等方法, 强化数字部分设计, 抑制强辐射环境下可能出现的“单粒子”等效应。在 ATLAS ASIC 芯片设计项目中, 首次引入现代芯片设计验证理念, 基于 SystemVerilog 实现芯片设计的高性能验证平台, 分步验证功能模块, 最终联调实现 ABC-STAR 芯片数字部分的全功能验证。按项目进展要求, 提交流片, 与前端的硅微条传感器联调, 性能达标后提交合作组使用。

#### (2) 硅微条探测器模块原型的设计和建造

硅微条探测器模块作为硅微条径迹探测器的最基本单元, 包含硅微条传感器, 读出 ASIC 芯片, 模块控制 PCB 板和电源控制等组成部分。ASIC 芯片与模块控制 PCB 板通过凝胶粘合, 再通过打线实现电气连接; 模块控制 PCB 板再与传感器粘合, 传感器与 ASIC 打线联通。模块要求实现高空间分辨率(优于 25 微米)以及抗强辐照性能(高于  $1.6 \times 10^{15}$  1MeV  $n_{eq}/cm^2$ )。考虑到探测器运行环境, 需要对机械、热导性能进行研究, 开展老化测试等工



作。目前探测器模块建造所需工装夹具等有待优化使之适合于未来批量生产，工艺流程关键步骤（如传感器与 ASIC 读出芯片之间打线连接）、技术细节、关键参数等（位置精度控制等）将在预研阶段初步确定，预生产阶段不断完善并最终严格定义。探测器模块的关键指标（空间分辨率、抗辐照等）将通过实验室放射源及束流测试等加以确认。

### (3) CMOS 探测器性能研究

CMOS 探测器由于采用工业标准工艺，相对于传统型硅微条传感器可以有效降低造价。更重的是 CMOS 探测器可以在相同硅基衬底上集成电子学进行信号处理，显著简化后端电子学复杂度及设计难度，结构更为紧凑，是硅探测器前沿领域的发展热点。但是 CMOS 探测器的主要性能，特别是 HL-LHC 程度的强辐照后的性能，还有待深入研究。目前基于高压/高阻 CMOS 工艺的测试结构均体现出较为理想的结果，包含完整传感器设计和完整集成读出电子学的芯片正在优化设计中。强辐照前后的主要性能需要通过实验室放射源及束流测试加以验证。继续开展 CMOS 探测器的空间分辨、抗辐照性能研究，完成其替代传统型硅微条探测器可行性研究。

拟解决的重大科学问题或关键技术：

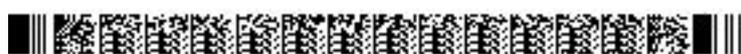
拟解决的关键技术包括高数据率、抗辐照数字电路 ASIC 设计，高性能硅微条探测器模块建造工艺的掌握以及新型 CMOS 探测器性能的系统研究，技术指标满足目前国际最高难度实验的要求。

考核指标及评测手段/方法：

前端读出电子学 ASIC 芯片设计将按照合作组计划，提交符合技术指标要求的芯片，通过与硅微条传感器联调测试；硅微条探测器模块拟完成原型设计，性能通过束流测试标定，按照最终工艺流程标准建造至少 50 个可工作的硅微条探测器模块；系统研究 CMOS 探测器性能，完成其替代传统型硅微条探测器的可行性研究。

参加单位任务分工

中国科学院高能物理研究所与 CERN 等单位共同承担前端读出电子学 ASIC 芯片数字部分的设计工作，按照项目进度要求 2017 年第二季度提交首次流片。根据测试结果，改进



设计，2018 年完成最终版。清华大学与高能所联合参加硅微条探测器模块原型的设计与建造，与国外合作单位共同完成工装夹具改进及工艺流程优化工作，并承担原型样机及部分定型探测器模块的建造任务。同时，还将合作开展 CMOS 硅微条探测器的性能研究。

## 课题 2: ATLAS 实验 $\mu$ 子探测器升级

研究目标:

根据 ATLAS Phase II 升级的需求，本课题针对 ATLAS  $\mu$ 子探测器系统的桶部 RPC 触发探测器、前向 $\mu$ 子探测器和 MDT TDC ASIC 设计三个主要方向开展相关研究工作，探测器和电子学的各项性能指标达到 ATLAS 二期升级的要求。

(1) 提高 RPC 触发探测器的计数率能力、工作寿命、时间分辨和位置分辨性能，并参与新型 $\mu$ 子触发电子学系统的升级；研制性能满足二期升级要求的探测器原型样机；通过试制实际尺寸的探测器工程样机，建立 RPC 批量制作的工艺流程和相关质量控制体系。

(2) 研制满足前向高本底区域 $\mu$ 子触发和径迹测量的抗辐照、高计数率、快时间响应的多气隙 GEM 探测器；

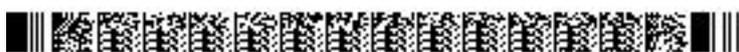
(3) 研制 MDT 探测器升级的高精度、高集成度的 TDC ASIC 芯片，并实现无触发模式下的全数据读出。

主要研究内容:

(1) ATLAS 窄气隙阻性板 $\mu$ 子触发探测器及读出电子学:

1) 提高 RPC 的计数率的方法之一是降低电阻板材料的体电阻率和厚度，通过参与电木板材料的制作工艺改进，研制新型低电阻率薄电木板材料，测试新型材料的体电阻率、表面特性、性能均匀性、抗老化特性等性能，批量制作大面积性能一致质量稳定的电木板材料，是本项研究能够顺利进展并成功用于探测器升级的基础。

2) 通过降低雪崩过程在气隙中产生的电荷量，可以减小通过 RPC 的工作电流，在采用相同电极板材料的情况下，既可以提高 RPC 的计数率能力，同时又能延长探测器的工作寿命。原初电离在气隙中的强电场中按指数规律倍增，汤森系数、气体吸附系数、雪崩发展的距离、空间电荷效应等是影响雪崩电荷量的主要因素，通过 HEED、MAGBOLTZ、



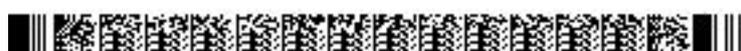
Garfield 等软件包进行模拟研究，结合 Roma 定理和权场理论的计算，可以为探测器的设计、工作条件的设定、工作气体的选择等提供参考和依据。

3) 开展窄气隙 RPC 室体结构和制作工艺研究，通过减小气隙厚度，既可以减小雪崩发展的距离，降低雪崩产生的电荷量，提高计数率和寿命，又可以减小由原初电离位置带来的时间晃动，提高时间分辨性能，是系统提高 RPC 性能的关键技术。

4) 探测器读出单元和读出方法的设计和优化：气隙中雪崩电荷量的降低，相应的会减小感应信号的幅度，因此需要采用低阈值低噪声高放大倍数的前端电子学系统，并改进信号引出、连接方法和探测器抗噪声屏蔽方法，尽量减小信号传输中的损失，提高探测效率等性能；通过对读出单元的改进，针对时间差定位、电荷重心法定位方法，优化读出单元结构，提高 RPC 的位置分辨性能。

5) 工作气体研究：工作在雪崩模式下的 RPC 目前广泛采用以氟利昂 R134a ( $C_2H_2F_4$ ) 为主的工作气体，其全球变暖潜能 (Global warming potential, GWP) 为 1430，是一种具有严重温室效应的气体，长期运行对环境造成的影响不可忽视，因此选用新型环保型气体代替氟利昂势在必行，可能的备选方案包括 HF0-1234yf (GWP=4)、HF0-1234ze (GWP=6) 等，通过模拟研究不同工作气体和配比的工作特性，包括工作电压、流光比例、信号电荷等，并结合探测器的性能进行测试，为未来 RPC 探测器的大面积使用提供可行的解决方案。

6) 原型探测器的研制和测试。结合模拟研究的结果，采用不同电极材料，设计制作不同气隙厚度、读出方法、屏蔽方法的原型探测器，建立专用宇宙线测试装置，结合新型高灵敏度前端电子学，测试原型探测器在不同工作气体、工作条件下的性能，并研究探测器的性能与设计参数、工作条件的关系，改进原型探测器设计；通过束流测试实验，研究原型探测器的计数率性能和抗老化性能；通过原型探测器反复的模拟和实验研究和改进，达到 Phase II 升级性能要求。



7) 工程样机的研制。根据原型探测器的研究结果和 ATLAS 实际需求, 设计制作 ATLAS BI RPC 实际尺寸的工程样机, 并通过对工程的性能测试, 建立和优化批量建造的工艺流程、质量控制和性能检测体系。

8)  $\mu$ 子触发探测器相关的电子学研究。针对 Phase II 升级需要, 研制新的触发电子学系统的主要模块, 包括 L0 触发数据收集用的 DCT (Data Collector Transmitter) 和 SL (Sector Logic), 针对采用 ASIC 或者 PFGA 的不同设计方案进行预研并比较, 实现在线的零压缩功能以适应 LHC 高计数率环境, 优化并选定设计方案; 针对 RPC 探测器研制过程中宇宙线测试系统的需要, 建立小型的 DAQ 系统, 其中前端电子学可以采用 Phase I 阶段完成的模块, 但触发与数据读出部分需要重新设计和优化。

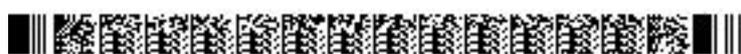
#### (2) ATLAS 前向 $\mu$ 子探测器:

针对高计数率环境下进行高精度时间测量的需求, 研制一种具有多气隙结构的快时间响应微结构气体探测器, 研究重点是提高探测器的计数率和时间分辨性能, 同时增强高辐照本底下的可靠性, 以满足 ATLAS Phase II 的升级需要。

原初电离的统计涨落是制约微结构气体探测器时间分辨的主要因素, 通过采用多气隙结构能有效减小原初电离的影响, 从而获得高时间分辨; 同时采用阻性井型结构进行气体放大, 实现高计数率下稳定的高增益运行。研究工作围绕这两方面开展, 方案如下:

- 1) 模拟探测器中的各种物理过程, 研究气隙厚度和数量、气体放大单元构型、阻性层材料以及不同工作条件对探测器性能的影响。
- 2) 进行探测器的设计和优化, 初步确定探测器的关键参数, 包括井型结构、阻性电极、读出电极等。
- 3) 建造原理样机, 利用各种射线测试并研究样机性能, 重点是高计数率下的时间分辨性能, 标定探测器性能与各种因素的依赖关系, 验证并进一步优化探测器物理设计, 确定探测器主要工作参数。

#### (3) ATLAS $\mu$ 子探测器电子学升级:



相对于基于可编程器件 FPGA 的 TDC 技术, ASIC TDC 要求从晶体管级进行电路设计和优化, 技术起点要求高, 但可以最大化提升资源利用效率, 优化电路参数以提升性能。本项目中将探索基于 ASIC 的高精度 TDC 设计技术, 参与完成实际的 TDC 芯片设计。在研究中将基于粗细时间测量相结合的技术进行 ASIC 构架设计, 使用高精度锁相环电路 (Phase Locked Loop, PLL) 对输入参考时钟进行倍频, 再结合高性能的延时锁定环电路 (Delay Locked Loop, DLL) 对倍频后的时钟进行分相, 实现二次时间内插。粗细时间测量结果再通过编码电路转换成自然二进制码输出。为实现无触发模式下的全数据读出, 还将探索高速串行数据接口设计技术。研究中考考虑使用 130 nm 至 180 nm CMOS 工艺展开具体的 ASIC 优化设计。

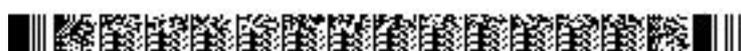
拟解决的重大科学问题或关键技术:

- 1) 窄气隙 RPC  $\mu$ 子触发探测器的关键技术是提高计数率 ( $>1 \text{ kHz/cm}^2$ )、时间分辨 ( $<1 \text{ ns}$ ) 和位置分辨 ( $<1 \text{ mm}$ )、以及探测效率 ( $>95\%$ );
- 2) 采用微结构气体探测器作为前向 $\mu$ 子探测器的关键技术是高计数率 ( $100 \text{ kHz/cm}^2$ ), 高时间分辨 ( $<1 \text{ ns}$ ), 高位置分辨 ( $<150 \text{ }\mu\text{m}$ ) 和探测效率 ( $>95\%$ );
- 3)  $\mu$ 子探测器电子学升级要解决的关键技术是读出电子学高集成度、高精度 TDC ASIC 设计, 时间精度达约 780 ps, 可基于新型的无硬件触发实现全数据读出。

考核指标及评测手段/方法:

研制满足 ATLAS Phase II 升级要求的 RPC $\mu$ 子触发探测器和电子学、前向 $\mu$ 子探测器和 $\mu$ 子 MDT 探测器 TDC ASIC 芯片, 具体指标如下:

- 1) RPC $\mu$ 子触发探测器升级:
  - 计数率:  $>1\text{kHz/cm}^2$
  - 工作寿命: LH-LHC 亮度下工作 10 年
  - 时间分辨:  $<1 \text{ ns}$
  - 位置分辨:  $<1 \text{ mm}$
  - 探测效率:  $>95\%$
- 2) 前向 $\mu$ 子探测器:
  - 计数率:  $100\text{kHz/cm}^2$ ,



- 时间分辨: <1 ns
  - 位置分辨: <150  $\mu\text{m}$
  - 探测效率: >95%
- 3) MDT TDC ASIC 芯片研究:
- 每个 TDC ASIC 集成约 24 个测量通道
  - 时间精度 $\sim$ 780 ps
  - 可以基于新型的无硬件触发实现全数据读出

#### 参加单位任务分工

中国科学技术大学: 全面负责 RPC 的设计, 模型建造、用宇宙线和粒子束流对探测器性能的测试、批量生产流程设计、批量生产质量保障和控制; 负责 GEM 的设计, 模型建造、性能测试; 与美国密歇根大学合作参与读出电子学高集成度、高精度 TDC ASIC 设计。

上海交通大学: 参与 RPC 的设计, 模型建造、用宇宙线和粒子束流对探测器性能的测试, 建立小批量生产条件。参加批量生产。

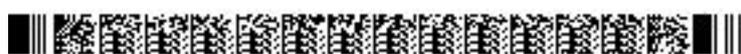
山东大学: 参与 RPC 的设计, 模型建造、用宇宙线和粒子束流对探测器性能的测试。参加批量产生。

### 课题 3: CMS 端盖 $\mu$ 子探测器升级

#### 研究目标:

LHC 对撞机升级后, CMS 内圈的 $\mu$ 子探测器的研究目标是要求在极强辐射环境下正常运行并提供触发及径迹测量功能。目前内圈前两层升级已批准采用 GEM 技术, 同时最内圈还增加一层快时间 ME0 探测器, 也将采用微结构气体探测器技术。内圈后两层技术方案中玻璃 RPC 由于其高计数率及高时间分辨的性能, 相对于新结构电木 RPC 方案具有明显优势。

(1) CMS-GEM 升级项目的研究目标是研制高计数率、高时间和空间分辨、满足 CMS 升级要求的 GEM  $\mu$ 子探测器, 同时通过 CMS-GEM 项目掌握大面积 GEM 及其他微结构探测器研制与批量生产技术, 设立基于 MacroTCA 框架的多通道、快时间前端电子学和数据获取系统; 在国内开发大面积微结构膜批量生产能力, 承担并完成部分 CMS-GEM 项目探测器生产任务。



(2) CMS-MRPC 项目拟采用具有自主知识产权, 国际领先的高计数率、高时间分辨 MRPC 技术研制建造 CMS 端部内圈后两层 $\mu$ 子探测器, 研发大面积多层玻璃 MRPC 的生产技术, 完成 CMS 端部后两层部分 $\mu$ 子探测器的升级。LHCb 触发电子学项目的目标是为闪烁光纤 (SciFi) 径迹探测器关键部件性能和质量检测研发检测系统并改进寻迹和准直算法, 为在线触发系统和离线物理分析提供更为精确的信息。

主要研究内容:

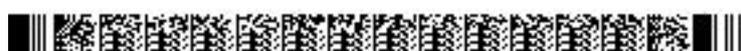
(1) CMS-GEM 升级项目研究内容分成三个部分: 一是 2019 年前完成的内圈第一层 GEM 探测器, 目前探测器研制已完成并即将开始批量生产, 北京大学将承担部分探测器组装测试及前端电子学生产测试任务; 二是第二层 GEM 探测器, 三是最内圈快时间 ME0 探测器。后两项都在 Phase II 阶段完成, 目前正在探测器研制阶段; 目标是研发出符合触发和径迹重建要求、面积更大、4 个探测器组成模块以提供更精确的径迹元的第二层 GEM 探测器; 以及狭小空间内的最内圈高时间分辨 ME0 多层探测器。北京大学在研发、掌握探测器技术的同时, 还要完善升级本实验室探测器研制、测试及批量生产设备, 承担并完成部分 CMS-GEM 项目探测器生产任务。

(2) CMS-MRPC 项目将根据物理条件要求及现场空间的限制研制大面积梯形 MRPC。由于低电阻玻璃尺寸的限制, 整个探测器将由 6 个小梯形 MRPC 拼接而成, 采用统一的 PCB 读出感应信号。每个 MRPC 包含 5 个气隙, 气隙宽度为 250 微米, 采用条形读出, 读出条平均宽度为 7mm。这种结构的优点是能够保证高的时间分辨, 满足位置分辨要求, 同时也能保证探测器的厚度在限定的范围内。需要解决玻璃拼接、阻抗匹配、信号串扰及传输、探测器宇宙射线及粒子束流测试等关键技术问题; 同时还要研究高亮度实验中的气体污染问题, 以保证探测器的长期稳定工作。完成 CMS 端部后两层部分 $\mu$ 子探测器的升级。

(3) LHCb 探测器将全面升级所有子探测系统, 实现超高计数率下的电子学信号读出, 清华大学将为闪烁光纤 (SciFi) 径迹探测器关键部件性能和质量检测研发检测系统, 并改进寻迹和准直算法, 为在线触发系统和离线物理分析提供更为精确的信息。

拟解决的重大科学问题或关键技术问题:

(1) CMS-GEM 探测器项目中, 第二层 GEM 研制的关键技术问题是更大面积 GEM 的



生产、组装测试技术；以及解决满足触发和径迹重建要求的探测器结构设计，新的探测器模块将由 4 个 GEM 探测器组成以提供更精确的径迹元。ME0 探测器研制还要解决狭小空间的多层探测器结构设计、用新微结构探测器技术提高时间分辨等问题。北京大学将在承担第一层 GEM 生产任务的同时，开展第二层 GEM 及 ME0 探测器研究。我们将按 CMS 标准建造探测器样机，在国内进行 X 射线测试及宇宙线测试，到 CERN 进行束流测试，掌握升级探测器工作原理及组装测试关键技术。然后建造全尺寸样机，争取关键部件的国产化，开发批量生产技术并完善批量生产测试设备。最后承担并完成部分 CMS-GEM 项目探测器生产任务。

(2) CMS-MRPC 项目的关键技术问题是制作大面积梯形 MRPC。此前的研制中由于低电阻玻璃尺寸的限制，制作的 MRPC 面积受限；要满足 CMS  $\mu$ 子探测器要求，要解决由小梯形 MRPC 拼接成整个探测器的工艺；同时还要解决阻抗匹配、信号串扰及传输等关键技术问题。探测器研制中将根据 CMS 升级探测器要求，立足国内研制高计数率 MRPC 探测器，束流测试拟在 CERN 的高亮度辐照源上进行。电子学的研制将与法国粒子物理与核物理实验室 (IPNL) 紧密合作。

考核指标及评测手段/方法：

研发出满足 CMS 升级要求的高计数率、高效率、高空间与时间分辨的 GEM 和 MRPC 探测器，并承担生产部分 CMS 端部  $\mu$ 子升级探测器的任务。具体指标如下：

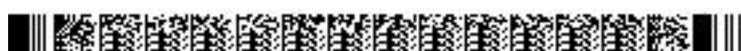
(1) GEM 探测器：单室效率  $>97\%$ ，时间分辨  $<10\text{ns}$ ，计数  $>10\text{kHz}/\text{cm}^2$ ， $\phi$  方向角分辨  $<300\ \mu\text{rad}$ ，累积辐射达到  $200\ \text{mC}/\text{cm}^2$  时没有增益损失。

(2) MRPC 探测器：计数率高于  $10\text{kHz}/\text{cm}^2$ ，时间分辨优于  $100\text{ps}$ ，位置分辨优于  $2\text{mm}$ ，效率高于  $95\%$ 。保证在 LH-LHC 亮度下工作 10 年。

(3) LHCb SciFi 探测器关键部件检测系统指标：PACIFIC 芯片全功能检测效率达 80 片/天；前端板测试效率达 20 片/天。寻迹和准直效率达到  $95\%$ ，相对分辨率达到  $0.5\text{--}1\%$ 。

参加单位任务分工：

北京大学完成 GEM 的研制（子课题 1），清华大学完成玻璃 MRPC 的研制和 SciFi 探测器触发电子学研制。



#### 课题 4: CMS 量能器和一级触发升级

研究目标:

根据 CMS 二期升级的需求, 本课题针对 CMS 对精确鉴别电子、光子、陶子和喷注等的需求, 开展高粒度量能器的研究, 以获得三维簇射位置以及精确的时间分辨, 为最终升级积累经验与组装技术, 争取部分模块的量产, 指标达到 CMS 实验的要求。

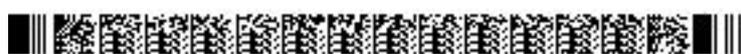
在一级径迹触发升级方面, 主要以硅径迹探测器为主开展技术研究, 积累高能区定点探测器寻迹技术, 并在合作过程中, 利用高能所在高速数据传输与处理以及在 xTCA 新标准方面的领先优势和经验, 承担设计任务, 并在国内实现量产的能力与贡献。通过参加合作掌握高能区定点区域径迹触发技术, 在国内建立基于 xTCA 新型系统架构和 AM 模式识别的触发研究环境, 利用已有的国际先进的高速数据传输预处理技术和 xTCA 新标准制定与开发的经验, 在 CMS 一级触发升级中承担具有特色的设计任务, 并在国内建立量产的平台, 展示国内的设计能力。最终在目前一期承担 CPPF 设计与建造的基础上, 继续参加 CMS 一级触发的二期升级改造, 作出有显示度的贡献, 并积累经验

主要研究内容:

##### (1) CMS 新型量能器

高粒度量能器将对 CMS 端盖部分的物理分析提供精确的电子、光子、 $\tau$  子、喷注的鉴别; 以及他们能量的测量等, 其利用 28 层电磁量能器的读出, 12 层的前部强子量能器以及后部强子量能器, 提供三维簇射位置读出和精确的时间分辨 (50ps) 与能量分辨 ( $25\% / \sqrt{E} \oplus 1\%$ )。三维的簇射位置信息将对粒子鉴别, 能量刻度, 堆积事例, 对撞顶点位置等提供远超传统二维簇射位置的改进方案, 大大改进现有重建算法。我们将合作开展高粒度量能器硬件抗辐射硅传感器 ( $>1 \times 10^{16} \text{ MeV neq/cm}^2$ ) 研发和模块组装技术, 参与实验束测试研究, 并进行部分硅模块的量产。本课题主要从如下几个方面开展研究:

1) 硅传感器的性能研究: 测试不同类型、不同加工方法的硅传感器在不同辐射程度下, 其信号强度、漏电流和电容的变化情况, 将高粒度量能器的需求反馈给硅传感器生产公司, 从而设计出满足高粒度量能器耐辐射性能, 时间和能量分辨率要求的硅传感器。



2) 硅模块组装的研究：高粒度量能器将把前端电子学集成到模块中，平均每个模块有 256 道读出，整个高粒度量能器有 700 多万道读出。为了节省空间，从而提升高粒度量能器的性能，其硅传感器，前端电子学及其电路板必须集成到约 4.5 毫米厚度的狭窄空间中，并且保证良好的散热。这对模块组装方案的设计，组装的质量控制提出很高的挑战。我们计划通过研究模块组装的自动化，来提升模块组装的质量。

3) 实验样机的实验束测试：通过对高粒度量能器性能的研究，改进硅传感器的设计，硅模块的组装，模拟性能研究等

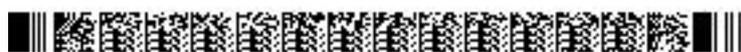
## (2) CMS 一级径迹触发升级

CMS 一级径迹触发升级研究的主要内容有 4 项：

1) 寻迹触发方案的深入研究。寻迹方案主要有三种：a) 基于模式识别：各种径迹模式存储在联想存储器 (Associative Memory)，大量径迹模式存储于 ASIC 器件 (~100M 量级)；b) 基于哈夫转换 (Hough transform)：把径迹模式转换为转换空间的簇团，利用 FPGA 器件；c) 基于“Tracket”：通过双层径迹 stub 外推构成整体径迹，利用 FPGA 器件。在合作组范围内经过分工和比较以后，课题组主要以基于模式识别技术的寻迹触发方案为研究内容，深入开展研究：

- 基本设计利用硅探测器的桶部 6 层和端盖 5 层原片；
- 利用径迹头端 (stub) 进行径迹寻找，要求在满足横动量条件  $PT > 2\text{GeV}$  的两层符合，这样可以把径迹数据量压缩到总径迹的 3% 以内；
- 再通过模式识别的寻迹方案，把各种径迹模式 (Pattern) 存储在 ASIC 器件 (~100M 量级)，通过一次事例实际各层击中与所有径迹模式比对，确定径迹。

2) 寻迹触发的研究平台。寻迹触发的研究平台依赖于费米实验室开发的 AM 芯片，设计为符合 ATCA (xTCA) 标准的 AMC 子板进行径迹查找。另一种模式是依赖 FPGA 的 LUT 径迹寻找，也是 AMC 的子板形式。平台的设计与费米实验室和 INFN 等单位合作开展寻迹插件的研究，并在北京建立开发系统。平台依赖于 ATCA 架构，由 ATCA 载板和 AMC 子板构成，以子板的形式进行模块化设计，然后与母版进行连接，提高可靠性与可维护性。



3) 高速数据传输汇总插件的研制。该插件作为高能所课题组贡献由中国组独立完成研制。要求符合高能所参与制定的 xTCA 新标准,接收硅探测器的海量数据并分发给径迹触发插件。高速数据传输与接收利用 xTCA 新标准提供的后插板技术以及光纤技术进行设计,以便获得单通道大于 10Gbps 速率及整板大于 400Gbps 的数据传输率。完成原理样机的设计和一级量产样机的设计,并根据项目的开展和经费的安排进行部分量产。

#### 4) xTCA 智能控制技术的研究

xTCA 新标准的特点之一是提供高可用性,既可以连续不间断运行。在系统设计时需要开发相应的智能控制方案和技术实现。智能控制技术提供整个系统的板级、机箱级和系统级三级的配置、监测与控制,特别是提供故障自动识别与系统报警、不断电系统维护等功能。本课题也将开展针对 CMS 升级后系统的智能控制软硬件。

拟解决的重大科学问题或关键技术问题:

##### (1) CMS 新型量能器

建造原理样机中的约七层,每层由约 1 立方厘米左右为单元构成。这种高粒度、高精度量能器要能够提供能量、时间和位置的五维测量,结合新型的粒子流重建算法,实现对电子、光子、喷注的精确测量和对堆积事例的去除。

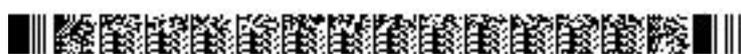
##### (2) CMS 一级径迹触发升级

硅探测器对高能区粒子顶点的判定有很好的效果,但由于数据读出数据量大不能在短时间内给出触发结果,因而在 CMS 触发中没有采用。在 CMS 触发二期升级中将通过高速数据读出与处理,特别是通过 AM 模式识别技术的研究与实现,以及新的系统架构的研究,突破寻迹算法、高速传输与互联、智能控制等相关技术难题,最终确保在高亮度下运行的高效触发系统的建造。

考核指标及评测手段/方法:

##### (1) CMS 新型量能器

合作开展高粒度量能器硬件抗辐射硅传感器 ( $>1 \times 10^{16}$  1MeV  $n_{eq}/cm^2$ ) 研发和模块组装技术,实现三维簇射位置读出和精确的时间分辨(50ps)与能量分辨(25% /  $\sqrt{E}$ )  $\oplus$  1%)。

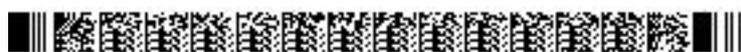


(2) CMS 一级径迹触发升级

- 合作开发新型模式识别寻迹技术（模式识别能力： $\geq 32\text{K}/\text{单板}$ ）
- 独立研制高速数据汇总传输原理样机（单路速率 $\geq 10\text{Gbps}$ ，单板数据传输能力 $\geq 400\text{Gbps}$ ）。
- 在国内实验室建立一级径迹触发开发环境。
- 在国内建立高速数据汇总传输插件的量产能力。

参加单位任务分工

中国科学院高能物理所完成全部课题 4 的工作。



## 四、主要创新点

### 课题 1: ATLAS 实验硅微条径迹探测器

创新点 1: 通过参与领域内最前沿的硅微条探测器研制项目, 掌握大面积、高性能硅微条探测器制作的工艺流程以及硅探测器试验线束性能标定等技术。通过采用新型紫外凝胶及工艺创新实现高精度模块制作。

创新点 2: 基于 CMOS 工艺, 设计高数据传输率的数字 ASIC 芯片, 匹配前后端数据传输带宽; 通过引入三模冗余等多种设计手段, 增强数字电路的抗强辐照性能。

创新点 3: 充分研究新型 CMOS 硅微条探测器电荷收集效率、空间分辨率及抗强辐照等性能, 深入探讨其替代传统硅微条建造径迹探测器的可行性。

### 课题 2: ATLAS 实验 $\mu$ 子探测器升级

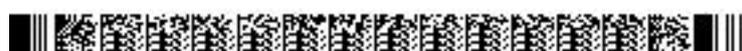
创新点 1: 窄气隙 $\mu$ 子探测器在世界上尚未实现应用于粒子物理实验, 通过窄气隙结构可以有效提升 RPC 的计数率、时间分辨、位置分辨等性能, 具有广泛的潜在应用前景。

创新点 2: 利用微结构气体探测器实现大面积、高辐照本底下高时间和位置分辨的带电径迹探测尚未在高能物理实验中实现, 通过结合 MRPC 中的多气隙结构和微结构探测器中阻性电极技术, 可以同时获得 MRPC 的高时间分辨和微结构探测器的高计数率能力, 从而实现高计数率下的高精度时间测量。

创新点 3: ASIC TDC 的研究是国际上最前沿领域的研究, 除高精度、高集成度的 TDC ASIC 设计方法研究外, 该项研究还将研究基于新型的无硬件触发实现全数据读出。

### 课题 3: CMS 端盖 $\mu$ 子探测器升级

创新点 1: 端部内圈前两层 GEM 探测器是大面积 GEM 探测器技术在国际高能物理实验上首次大规模应用, 它们不仅能提供触发, 且高空间分辨能力可提供 $\mu$ 径迹重建。最内圈 ME0 则把 $\mu$ 径迹重建推展到更高的赝快度区域, 同时将应用新的快时间微结构探测器技术。



创新点 2: 端部内圈后两层 MRPC 将采用具有自主知识产权的国际先进的低电阻玻璃, 研制出国际先进的高计数率、高时间分辨、低噪声的 MRPC 探测器。在大面积玻璃 MRPC 探测器研制中, 首次提出并采用玻璃拼接技术, 解决了玻璃原材料尺寸偏小对探测器的限制。

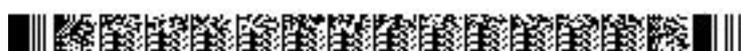
#### **课题 4: CMS 量能器和一级触发升级**

创新点 1: 首个可以精确测量三维位置信息, 能量信息和时间信息的 5D 量能器。可以实现测量簇射的轨迹, 形状。对高亮度 LHC 上的电子, 光子, 喷注,  $\tau$  子精确测量, 以及对堆积事例的去除等。

创新点 2: 世界上首部根据实际需求设计的基于 xTCA 架构的高能物理触发实验系统, 具有先进的智能检测与控制能力。

创新点 3: 世界上首个基于 AM 存储器的 3D 模式识别技术研究与实现, 这是一项开创性的研究。

创新点 4: 世界领先的好于单通道 10Gbps、整体 400Gbps 传输能力的高速数据插件设计。



## 五、预期经济社会效益

### 课题 1: ATLAS 实验硅微条径迹探测器升级

硅微条探测器具有高空间分辨率和抗辐照等优异性能,广泛应用于核与粒子物理实验中带电径迹和事例顶点的测量、同步辐射成像、医疗成像、航空航天探测等重要领域。基于 CMOS 工艺制作的结构紧凑、低功耗的硅探测器可以进一步拓展应用前景。

### 课题 2: ATLAS 实验 $\mu$ 子探测器升级

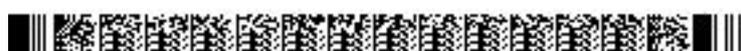
课题中前向 $\mu$ 子探测器研制的多气隙 GEM 探测器,具有高计数率、高时间和空间分辨,无论在基础研究还是在包括医学成像在内的很多应用领域都有极大的应用潜力。结合光转换体,多气隙 GEM 探测器还可以成为优良的光电转化器件。

### 课题 3: CMS 端盖 $\mu$ 子探测器升级

通过本项目掌握高计数率环境下的快时间、高效率、大面积微结构探测器与 MRPC 的制造工艺与批量生产技术,同时这类探测器极高的位置分辨能力也使其能用于工业、医学成像等多个应用领域。

### 课题 4: CMS 量能器和一级触发升级

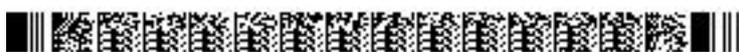
高粒度量能器具有高能量分辨率和抗辐射性能,可以运用到未来对撞机实验新型 xTCA 标准系统在工业界有很好的应用前景。



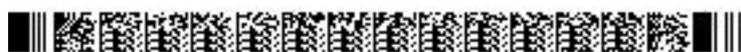
## 六、项目年度计划

按年度制定完成项目的计划进度，应将项目的考核指标分解落实到年度计划中。

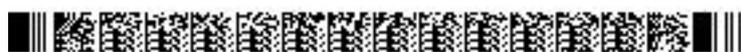
年度	任务	考核指标	成果形式
2016年 7月   2017年 6月	<p>1. ABC-STAR 芯片功能模块设计；硅微条探测器模块原型设计。</p> <p>2. 窄气隙 RPC 材料和设备采购，材料性能测试，RPC 探测器设计；前向 <math>\mu</math> 子探测器设计；<math>\mu</math> 子探测器电子学关键技术调研。</p> <p>3. 参与 CMS GE1/1 探测器组装及测试，完成前端 8 层电子板的生产与测试；研究低电阻玻璃的拼接技术，研制拼接 MRPC 原型探测器，模拟不同形状读出条的传输阻抗。</p> <p>4. 高粒度量能器：开始实验材料和设备的采购；测试硅传感器的性能和耐辐射性能；参与原理性的束流测试；CMS 一级触发升级任务：完成采购一级径迹触发开发系统芯片（费米实验室统一采购），智能控制需求的调研；完成一级径迹触发开发系统载板的组装；落实高速数据传输与处理板的设计需求。</p>	<p>1. 完成 ABC-STAR 芯片主要功能模块设计以及硅微条探测器模块原型设计。</p> <p>2. 完成 RPC 探测器设计和材料性能测试；完成高计数率(100 kHz/cm<sup>2</sup>)多气隙阻性 GEM 探测器原理设计；完成电子学技术调研。</p> <p>3. 开始并部分完成第一层 GEM 探测器 GE1/1 前端 8 层电子板在中国的生产及测试。研制出大面积拼接 MRPC 原理样机。</p> <p>4. 高粒度量能器采购清单；高粒度量能器硅原型机模块组装概念设计流程图；触发任务芯片采购证明；触发智能控制需求表；开发系统的载板照片；高速数据传输与处理版需求表。</p>	<p>1. ABC-STAR ASIC 设计报告；硅微条探测器模块原型设计方案（项目技术设计报告相关章节）。</p> <p>2. RPC 设计报告和材料测试报告；多气隙 GEM 设计报告；电子学调研报告。</p> <p>3. 为 CMS-GEM 升级探测器提供中国生产的合格前端电子学，建立本实验室电子学功能测试标准程序；大面积拼接型 MRPC 进展报告。</p> <p>4. 年度进展报告。</p>



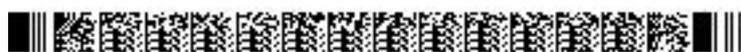
<p>2017 年 7月   2018 年 6月</p>	<p>1. 完整功能 ABC-STAR 芯片设计；硅微条探测器模块原理样机研制；CMOS 硅微条探测器性能研究以及读出电子学开发。</p> <p>2. 完成不同构型 RPC 的原型探测器的制作和测试,优化 RPC 探测器结构,参与 TDR 撰写；前向 <math>\mu</math> 子探测器原型建造和测试；<math>\mu</math> 子探测器电子学关键电路设计。</p> <p>3. 研究 GEM 探测器生产工艺,完善宇宙线测试及数据获取系统；MRPC 探测器性能测试,研究玻璃拼接对探测器性能的影响。</p> <p>4. 高粒度量能器：完成原型 HGC 探测器的制作,参与 TDR 撰写；CMS 一级触发升级任务：搭建完成一级径迹触发开发系统,开始调试寻迹软件；完成编写智能控制框架并调试；设计并完成高速数据传输与处理接口板第一版原理样机。</p>	<p>1. ABC-STAR 芯片联调测试；完成硅微条探测器模块原型样机,空间分辨率：25 微米,抗辐照性能：<math>1.6 \times 10^{15}</math> 1MeV <math>n_{eq}/cm^2</math>；完成 CMOS 硅微条探测器性能研究。</p> <p>2. 完成 <math>40 \times 40 cm^2</math> RPC 原型探测器制作,开展性能研究；完成有效面积达 <math>10cm \times 10cm</math> 的多气隙阻性 GEM 探测器原型的制作；完成缪子探测器电子学关键电路设计。</p> <p>3. 全部完成第一层 GEM 探测器 GE1/1 前端 8 层电子板在中国的生产及测试；掌握小面积 GEM 探测器制造工艺；完成 MRPC 样机的束流测试,完善拼接工艺。</p> <p>4. 高粒度量能器原型机照片；高粒度量能器原型机 MIP 初步测量结果（能看到 MIP 信号）；TDR 草稿；开发系统照片；智能控制软件功能演示；接口板原理样机原理图、PCB 图和实物照片。</p>	<p>1. ABC-STAR 芯片样片；硅微条探测器模块原型样机；CMOS 硅微条探测器性能研究报告。</p> <p>2. RPC 实物原型；GEM 实物原型；MDT TDC 电子学设计报告。</p> <p>3. 完成对 CMS-GEM 升级探测器前端电子学的贡献,完善 GEM 气体探测器宇宙线测试系统；MRPC 性能测试总结。</p> <p>4. 年度进展报告。</p>
<p>2018 年 7月  </p>	<p>1. 前端电子学 ASIC 芯片最终设计、联调；硅微条探测器模块预生产；CMOS 探测器原理样机建造。</p> <p>2. 确定 RPC 探测器构型；</p>	<p>1. ABC-STAR 芯片通过合作组验收；完成 CMOS 硅微条探测器模块原理样机,空间分辨率：25 微米,抗辐照性能：<math>1.6 \times 10^{15}</math> 1MeV <math>n_{eq}/cm^2</math>。</p>	<p>1. ABC-STAR 芯片；CMOS 硅微条探测器模块原理样机。</p> <p>2. RPC 性能测试</p>



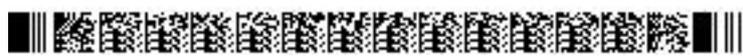
<p>2019年6月</p>	<p>前向 <math>\mu</math> 子探测器原型建造和测试; <math>\mu</math> 子探测器电子学流片制作。</p> <p>3. 制作 GEM 及 FTM 微结构探测器样机并测试; MRPC 探测器设计优化和定型, 准备批量生产。</p> <p>4. 高粒度量能器: 进行原型 HGC 的束流实验, 测试原型探测器的各项性能; CMS 一级触发升级任务: 开始寻迹软件的改进与补充; 根据需要改进智能控制软件; 完成第二版载板样机和数据传输样机; 年底完成第三版载板样机和数据板样机的改版。</p>	<p>2. 完成 RPC 原型探测器性能测试: 探测器效率达到 95%、计数率 <math>&gt;1\text{kHz}/\text{cm}^2</math>、时间分辨 <math>&lt;1\text{ns}</math>、位置分辨 <math>&lt;1\text{mm}</math>; 多气隙阻性 GEM 探测器原型时间时间分辨好于 <math>1\text{ns}</math>; 提交 TDC ASIC 流片设计。</p> <p>3. 掌握大面积 GEM 探测器制造工艺; 优化 MRPC 设计。</p> <p>4. 硅传感器时间分辨性能测试初步结果 (<math>50\text{ps}</math>); 硅传感器抗辐射性能测试初步结果 (<math>100\mu\text{m} @ 1 \times 10^{16} 1\text{MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2</math>); 寻迹软件运行演示; 智能控制软件的改进演示; 载板样机和接口样机的原理图、PCB 图和实物图。单路数据传输速率 <math>10\text{GBPS}</math>, 单板 <math>400\text{GBPS}</math> 数据传输率。</p>	<p>报告; 多气隙 GEM 性能测试报告; MDT 电子学设计报告。</p> <p>3. GEM 探测器样机, 撰写、发表 GEM 及 MRPC 探测器研制论文。</p> <p>4. 中期报告, 样机。</p>
<p>2019年7月   2020年6月</p>	<p>1. 硅微条探测器模块预生产。</p> <p>2. RPC 工程样机的设计和制作; 前向 <math>\mu</math> 子探测器结构优化; <math>\mu</math> 子探测器电子学原型 ASIC 测试。</p> <p>3. 优化 GEM 探测器设计, 制作原尺寸大面积 GEM2/1 及 MEO 探测器样机进行测试, 研究探测器批量生产流程及质量控制标准, 完善探测器批量生产组装机测试设备; MRPC 探测器小批量生产, 研究</p>	<p>1. 硅微条探测器模块空间分辨率: <math>25 \mu\text{m}</math>, 抗辐照性能: <math>1.6 \times 10^{15} 1\text{MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2</math>。</p> <p>2. 完成 <math>80 \times 160\text{cm}^2</math> RPC 工程样机的制作; 多气隙阻性 GEM 探测器原型位置分辨好于 <math>150\mu\text{m}</math>, 效率高于 95%; 开展 TDC ASIC 性能测试。</p> <p>3. GEM 探测器样机达到考核指标: 单室效率 <math>&gt;97\%</math>, 时间分辨 <math>&lt;10\text{ns}</math>, 计数率 <math>&gt;10\text{kHz}/\text{cm}^2</math>, <math>\phi</math> 方向角分辨 <math>&lt;300 \mu\text{rad}</math>, 累积辐射达到 <math>200 \text{mC}/\text{cm}^2</math> 时没有增益损失; 性能指标通过放射源、宇宙线测试, 由 CMS</p>	<p>1. 硅微条探测器模块工程样机。</p> <p>2. RPC 工程样机实物; 多气隙 GEM 测试报告; TDC ASIC 测试报告。</p> <p>3. 掌握大面积 GEM 探测器制造工艺, 完善批量生产技术流程。</p> <p>4. 年度报告, 样机实物。</p>



	<p>工艺流程和质量保证体系。</p> <p>4. 高粒度量能器：改进之后再次进行束流测试，确定 HGC 工程设计，参与 EDR 撰写；CMS 一级触发升级任务：完成数据传输板工程样机的研制。</p>	<p>合作组安排束流测试。MRPC 探测器样机达到考核指标：计数率高于 <math>10\text{kHz}/\text{cm}^2</math>，时间分辨优于 <math>100\text{ps}</math>，位置分辨优于 <math>2\text{mm}</math>，效率高于 <math>95\%</math>；性能指标通过宇宙线、放射源测试，由 CMS 合作组安排束流测试。</p> <p>4. 高粒度量能器原型机的能量分辨率的初步测试结果 (<math>25\% / \sqrt{E} \oplus 1\%</math>)；高粒度量能器硅模块组装流程图；数据传输板工程样机照片、单路 <math>10\text{GBPS}</math> 和单板 <math>400\text{GBS}</math> 的测试指标。</p>	
<p>2020 年 7 月   2021 年 6 月</p>	<p>1. 硅微条探测器模块批量生产。</p> <p>2. RPC 工程样机测试，制作工艺优化，建立批量制作的工艺流程和质量控制体系；前向 <math>\mu</math> 子探测器结构优化；<math>\mu</math> 子探测器电子学 ASIC 设计优化。</p> <p>3. GEM 探测器批量生产，安装调试；MRPC 探测器批量生产和批量测试，现场安装调试。</p> <p>4. 高粒度量能器：优化工程样机制作工艺，建立批量制作的工艺流程和质量控制体系，准备开始工程建造；CMS 一级触发升级任务：准备量产的厂家考察，制定量产计划，</p>	<p>1. 硅微条探测器模块达到合作组探测器升级项目指标要求。</p> <p>2. 完成大面积 RPC 性能测试，建立批量制作工艺体系；多气隙阻性 GEM 探测器原型计数率达到 <math>100\text{kHz}/\text{cm}^2</math>；电子学 ASIC 优化设计。</p> <p>3. 完善批量生产流程，生产所承担的合格的 GEM 及 MRPC 探测器。</p> <p>4. 高粒度量能器的时间分辨率的初步测量结果 (<math>50\text{ps}</math>)；高粒度量能器硅模块组装和质量控制流程图；高粒度量能器 EDR 报告草稿；量产厂家考察报告、量产计划书；试量产测试结果，照片。</p>	<p>1. 至少 50 个可工作的硅微条探测器模块。</p> <p>2. 缪子探测器和电子学的研制报告；发表文章。</p> <p>3. 完成对 CMS 内圈缪子探测器升级的贡献，撰写、发表探测器研制论文。</p> <p>4. 结题报告；论文和文章；EDR 报告，预量产实物。</p>



	开始数据板的试量产。		
--	------------	--	--



## 七、项目组织实施机制及保障措施

1、项目及各任务（课题）的内部组织管理方式、协调机制等，限 1000 字以内。

项目的管理和协调模式如图 9 所示。项目实行首席负责制。设立咨询小组对首席提供保障项目实施的建议。项目分 ATLAS、CMS 实验两部分，每部分设 2 个课题。课题 1 和课题 2 属 ATLAS 实验的两个子探测器的升级，即内部径迹室的硅微条探测器和 $\mu$ 子谱仪的触发探测器；课题 3 和课题 4 属 CMS 实验的两个子探测器的升级。LHCb 中国组承担的任务非常明确且花费相对较少，即闪烁径迹探测器触发电子学的升级。为管理方便，将其列入课题 2 中。项目设课题组组长，他们在项目首席直接领导下负责课题的实施。

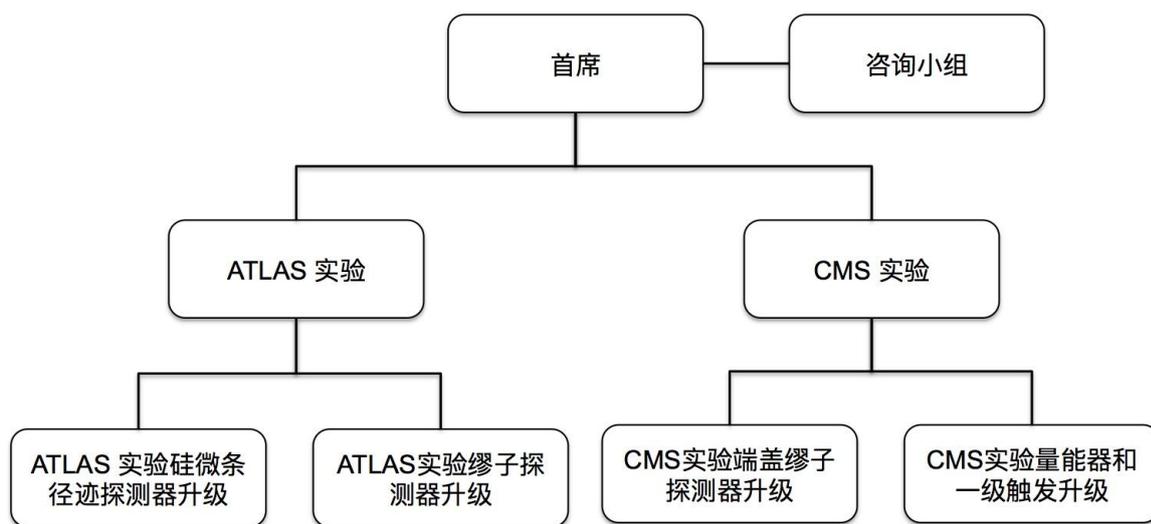
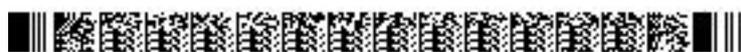


图 9：项目组织管理结构示意图。

2、项目实施的相关政策，已有的组织、技术基础，支撑保障条件，限 1000 字以内。

由于 LHC 实验均为大型国际合作。必须保证项目在各合作组的合作协议框架下进行。项目具有很大的预研成分。应根据各实验的情况及时协调可选方案。此外，不同实验之间有些技术和方法具有一定共性，如 ATLAS 和 CMS 端盖 $\mu$ 子谱仪的触发探测器均使用大面



积 GEM; 升级探测器的读出电子学均可能应用新一代 ASIC 技术等。因此各课题之间需有良好的交流。

项目将严格执行国家和科技部对“国家重点研究计划”的政策要求，项目各参加单位及各参与单位所在的国家、教育部重点实验室将在研究人员、支撑人员和研究生等人力资源、实验室场地和相关条件上给予支持，以保障项目顺利实施，达到目标。

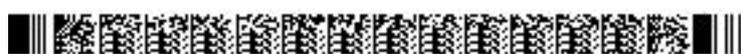
项目组依托“核探测与核电子学国家重点实验室”，“核物理与核技术国家重点实验室”“教育部粒子物理与粒子辐照重点实验室”，“山东省高能物理重点实验室”，“上海市粒子物理和宇宙学重点实验室”，有国内最完善的粒子探测器建造、测试和组装的实验室，相关平台和专家队伍。它对课题的实施在实验室、相关设备和专业人才上提供了坚实的保障。

3、对实现专项总目标的支撑作用，及与专项内其他相关项目的协同机制，限 1000 字以内。

本项目各子课题承担的任务和要达到的指标是由 LHC 实验根据物理需要决定的。LHC 上的各实验均有规范的合作形式和管理机制及时间表，它集中了该领域的专家、技术方法及实验资源，（本项目只占 ATLAS、CMS 升级所需总费用的约 1%）。

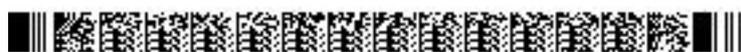
各课题所在单位均有相关国家、省部级重点实验室，相关专业技术人才和研究平台，这些都是项目实施的关键支撑。

项目中课题一、二为 ATLAS 实验，三、四为 CMS 实验，因为各课题研究内容相对为独立的子探测器或系统，项目协同基于 ATLAS 实验和 CMS 实验，并最终基于实验组的总体决策和机制。项目中有些预研选项在约两年后会有明确选择，因此在中期会有课题任务的调整，以将经费用于可计算我国贡献的部分（core contribution）。



## 八、知识产权对策、成果管理及合作权益分配

项目的成果主要以文章发表、会议报告、专利申请的形式。它们必须严格遵守科技部相关政策 and 条例、以及各国际合作实验的政策和协议。



## 九、需要约定的其他内容

### 项目任务书补充条款

第一条 根据《科技部 财政部关于改革过渡期国家重点研发计划组织管理有关事项的通知》（国科发资【2015】423号）的要求及相关管理规定，甲方作为重点专项的项目管理责任方，以项目任务书为依据，组织开展重点专项项目实施的过程管理工作。

第二条 乙方是专项项目执行和资金管理使用的责任主体，按照项目承担单位法人责任制的要求，对项目任务的具体实施、经费使用及保障条件负责。乙方应组织协调课题单位共同完成任务书确定的项目目标。

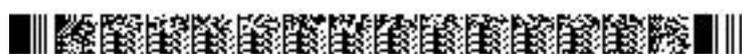
第三条 乙方及全部参加单位均须建立健全科研和财务管理等内部控制制度。

第四条 在项目实施过程中，甲方根据项目特点和管理工作的要求，根据不同类型项目，将采取同行评议、第三方评估、用户测评等方式，组织开展检查、抽查和评测活动，评测结果以适当的形式、在适当范围公布。

第五条 乙方须配合甲方做好项目检查、验收等过程管理工作，并按照管理要求按时提交各类项目报告，包括年度报告、检查报告、验收报告、科技报告等。

第六条 项目实行动态调整机制。当出现影响到项目总体目标实现的重大事项时，将对项目予以调整或者终止。

第七条 当国家重点研发计划的相关管理办法发生变化与调整时，甲乙双方按照新的要求执行。



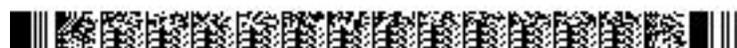
## 十、项目参加人员基本情况表

**填表说明：** 1、职称分类：A、正高级 B、副高级 C、中级 D、初级 E、其他；  
 2、投入本项目的全时工作时间（人月）是指在项目实施期间该人总共为项目工作的满月度工作量；累计是指项目组所有人员投入人月之和。  
 3、项目固定研究人员需填写人员明细；  
 4、是否有工资性收入：Y、是 N、否；  
 5、人员分类代码：A、项目负责人 B、任务（课题）负责人 C、项目骨干 D、其他研究人员；  
 6、工作单位：填写单位全称，其中高校要具体填写到所在院系。

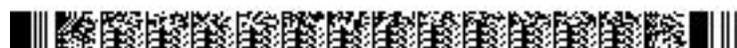
序号	姓名	性别	出生日期	身份证号码 (军官证、护照)	技术 职称	职务	学位	专业	投入本项目的 全时工作时间 (人月)	人员 分类	所属任务 (课题)	是否有 工资性 收入	工作单位	参加人员 签字
1	赵政国	男	1956-12-28	110107195612281519	正高级	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	40	项目负责人	ATLAS 实验缪 子探测器升级	是	中国科学技术大学物理学院	
2	朱宏博	男	1982-04-21	320681198204214812	副高级	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	30	任务(课题) 负责人	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	是	中国科学院高能物理研究所	
3	班勇	男	1963-09-05	110108196309051834	正高级	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	30	任务(课题) 负责人	CMS 端盖缪子 探测器升级	是	北京大学物理学院	
4	刘振安	男	1962-03-25	110107196203251276	正高级	无	博士	核技术及	30	任务(课题) 负责人	CMS 量能器和 一级触发升级	是	中国科学院高能物理研究所	



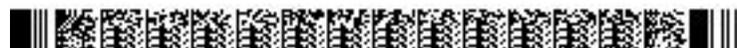
								应用						
5	陈新	男	1977-11-20	410703197711204030	副高级	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	30	项目骨干	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	是	清华大学物理系	
6	史欣	男	1979-02-02	142601197902021913	副高级	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	30	项目骨干	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	是	中国科学院高能物理研究所	
7	张颖	女	1983-05-26	150424198305260025	副高级	无	博士	核技术及 应用	45	项目骨干	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	是	中国科学院高能物理研究所	
8	王科	男	1977-10-18	510202197710185915	副高级	无	博士	核技术及 应用	30	项目骨干	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	是	中国科学院高能物理研究所	
9	陆卫国	男	1982-03-16	320326198203162730	副高级	无	博士	核技术及 应用	45	项目骨干	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	是	中国科学院高能物理研究所	
10	董明义	男	1977-09-17	412924197709172214	副高级	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	40	项目骨干	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	是	中国科学院高能物理研究所	
11	方亚泉	男	1974-09-14	51010719740914001X	正高级	无	博士	粒子物理	30	项目骨干	ATLAS 实验硅 微条径迹探测	是	中国科学院高能物理研究所	



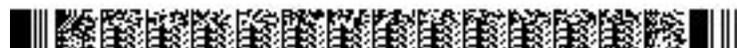
								与原子核 物理			器升级			
12	孙勇杰	男	1976-06-16	370622197606160014	中级	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	30	项目骨干	ATLAS 实验缪 子探测器升级	是	中国科学技术大学物理学院	
13	刘衍文	男	1980-03-27	340104198003272016	正高级	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	30	项目骨干	ATLAS 实验缪 子探测器升级	是	中国科学技术大学物理学院	
14	梁昊	男	1970-05-05	340104197005052071	副高级	无	博士	核电子学	30	项目骨干	ATLAS 实验缪 子探测器升级	是	中国科学技术大学物理学院	
15	周意	男	1980-08-23	432325198008230030	副高级	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	30	项目骨干	ATLAS 实验缪 子探测器升级	是	中国科学技术大学物理学院	
16	郭军	男	1979-04-02	340102197904020513	正高级	无	博士	粒子物理	30	项目骨干	ATLAS 实验缪 子探测器升级	是	上海交通大学物理与天文系	
17	冯存峰	男	1968-12-19	370102196812192933	正高级	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	30	项目骨干	ATLAS 实验缪 子探测器升级	是	山东大学物理学院	
18	薛志华	男	1966-12-06	110108196612061859	中级	无	学士	核电子学	30	项目骨干	CMS 端盖缪子 探测器升级	是	北京大学物理学院	



19	王义	男	1967-07-27	110108196707271410	正高级	无	博士	核技术及应用	30	项目骨干	CMS 端盖缪子探测器升级	是	清华大学工程物理系	
20	韩冬	女	1973-12-22	230604197312220225	副高级	无	博士	核技术及应用	40	项目骨干	CMS 端盖缪子探测器升级	是	清华大学工程物理系	
21	杨振伟	男	1976-03-20	370631197603203038	副高级	无	博士	粒子物理与原子核物理	30	项目骨干	CMS 端盖缪子探测器升级	是	清华大学工程物理系	
22	蔡建新	男	1945-03-27	110108194503271452	正高级	无	博士	核电子学	30	项目骨干	CMS 端盖缪子探测器升级	是	北京大学物理学院	
23	赵京周	男	1986-03-29	130130198603292452	副高级	无	博士	核技术及应用	35	项目骨干	CMS 量能器和一级触发升级	是	中国科学院高能物理研究所	
24	张华桥	男	1980-09-07	429001198009071294	副高级	无	博士	粒子物理与原子核物理	30	项目骨干	CMS 量能器和一级触发升级	是	中国科学院高能物理研究所	
25	廖红波	男	1975-09-17	420111197509177031	副高级	无	博士	粒子物理与原子核物理	30	项目骨干	CMS 量能器和一级触发升级	是	中国科学院高能物理研究所	
26	王征	男	1972-04-18	420500197204180056	副高级	无	博士	粒子物理	30	项目骨干	CMS 量能器和一级触发升级	是	中国科学院高能物理研究所	



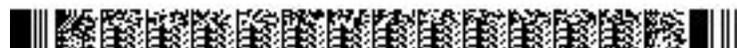
								与原子核 物理						
27	宫文煊	女	1978-01-09	110108197801095446	副高级	无	硕士	核技术及 应用	30	项目骨干	CMS 量能器和 一级触发升级	是	中国科学院高能物理研究所	
28	王娜	女	1982-06-09	22038119820609704X	中级	无	博士	核技术及 应用	30	项目骨干	CMS 量能器和 一级触发升级	是	中国科学院高能物理研究所	
29	修青磊	男	1985-11-10	370682198511101119	其他	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	45	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	中国科学院高能物理研究所	
30	刘义	男	1987-07-19	330302198707196513	其他	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	45	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	中国科学院高能物理研究所	
31	Jason Mansour	男	1984-11-09	499183635	其他	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	45	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	中国科学院高能物理研究所	
32	孙小虎	男	1986-02-15	37070219860215261X	其他	无	博士	粒子物理 与原子核	45	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	中国科学院高能物理研究所	



								物理						
33	Adrian Buzatu	男	1982-11-04	052903697	其他	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	30	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	清华大学物理系	
34	夏力钢	男	1988-01-09	420702198801096838	其他	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	30	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	清华大学物理系	
35	张刚	男	1994-08-24	340802199408240813	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	45	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	清华大学物理系	
36	丁伟	男	1993-03-02	421022199303020315	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	45	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	清华大学物理系	
37	陈列建	男	1991-07-01	430408199107010510	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	45	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	中国科学院高能物理研究所	
38	韩雨亭	女	1994-04-22	610526199404221949	其他	无	学士	核技术及	45	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测	否	中国科学院高能物理研究所	



								应用			器升级			
39	周茂森	男	1992-08-27	500223199208272078	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	45	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	中国科学院高能物理研究所	
40	李奇	男	1990-11-02	362528199011023530	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	45	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	中国科学院高能物理研究所	
41	程华杰	男	1990-05-08	350881199005081659	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	40	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	中国科学院高能物理研究所	
42	任欢	男	1989-02-15	321027198902154511	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	40	其他研究人 员	ATLAS 实验硅 微条径迹探测 器升级	否	中国科学院高能物理研究所	
43	耿聪	男	1986-03-28	340405198603280215	其他	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	是	中国科学技术大学物理学院	
44	李冰	男	1987-10-20	410101198710202032	其他	无	博士	粒子物理	50	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	否	中国科学技术大学物理学院	



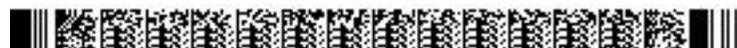
								与原子核 物理						
45	宋维民	男	1988-05-21	220724198805213430	其他	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	30	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	否	山东大学物理学院	
46	Marc Cano Bret	男	1987-09-12	AAJ286354	其他	无	博士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	否	上海交通大学物理与天文系	
47	王融坤	男	1992-12-17	35010219921217191X	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	否	中国科学技术大学物理学院	
48	李昌樵	男	1989-11-04	410105198911040071	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	否	中国科学技术大学物理学院	
49	祝鹤龄	女	1993-08-11	350721199308110021	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	否	中国科学技术大学物理学院	



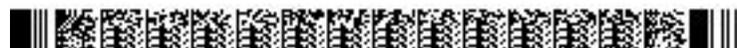
50	王文骁	男	1990-10-22	130981199010221016	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	否	中国科学技术大学物理学院	
51	汪晨亮	男	1993-11-15	330523199311150014	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	否	上海交通大学物理与天文系	
52	王子瑞	男	1992-02-18	620102199202181116	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	否	上海交通大学物理与天文系	
53	郝永亮	男	1987-01-20	371326198701203793	其他	无	硕士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	否	上海交通大学物理与天文系	
54	章瑞麒	男	1991-12-24	34240119911224531X	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	ATLAS 实验缪 子探测器升级	否	中国科学技术大学物理学院	
55	陈耿	男	1993-05-16	500240199305166353	其他	无	学士	粒子物理 与原子核	50	其他研究人 员	CMS 端盖缪子 探测器升级	否	北京大学物理学院	



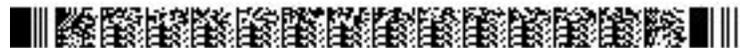
								物理						
56	黄璜	男	1991-08-27	32012319910827005X	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	CMS 端盖缪子 探测器升级	否	北京大学物理学院	
57	张冯望东	男	1990-07-21	610111199007210035	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	CMS 端盖缪子 探测器升级	否	北京大学物理学院	
58	王群	男	1990-06-11	370686199006111324	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	CMS 端盖缪子 探测器升级	否	北京大学物理学院	
59	黄迁明	男	1992-04-20	510503199204200010	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	CMS 端盖缪子 探测器升级	否	北京大学物理学院	
60	何少坤	男	1992-07-18	130634199207181918	其他	无	学士	粒子物理 与原子核 物理	50	其他研究人 员	CMS 端盖缪子 探测器升级	否	北京大学物理学院	
61	黄欣杰	男	1990-03-16	350802199003161510	其他	无	学士	核技术及	50	其他研究人 员	CMS 端盖缪子 探测器升级	否	清华大学工程物理系	



								应用						
62	吕鹏飞	男	1992-02-15	371202199202150832	其他	无	学士	核技术及应用	50	其他研究人员	CMS 端盖缪子探测器升级	否	清华大学工程物理系	
63	王扶月	女	1993-01-11	610111199301113025	其他	无	学士	核技术及应用	50	其他研究人员	CMS 端盖缪子探测器升级	否	清华大学工程物理系	
64	俞彦成	男	1994-01-29	530322199401290053	其他	无	学士	核技术及应用	50	其他研究人员	CMS 端盖缪子探测器升级	否	清华大学工程物理系	
65	王峰	男	1986-04-24	152601198604240612	其他	无	博士	粒子物理与原子核物理	50	其他研究人员	CMS 量能器和一级触发升级	否	中国科学院高能物理研究所	
66	曹鹏程	男	1990-02-16	412727199002161658	其他	无	学士	核技术及应用	50	其他研究人员	CMS 量能器和一级触发升级	否	中国科学院高能物理研究所	
67	程立波	男	1990-09-16	362525199009164554	其他	无	学士	核技术及应用	50	其他研究人员	CMS 量能器和一级触发升级	否	中国科学院高能物理研究所	
68	李秉桓	男	1992-03-18	420103199203182830	其他	无	学士	粒子物理与原子核物理	50	其他研究人员	CMS 量能器和一级触发升级	否	中国科学院高能物理研究所	



		固定研究人员合计	2775	/	/	/	/
		流动人员或临时聘用人员合计	1670	/	/	/	/
		累计	4445	/	/	/	/

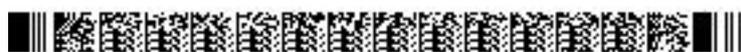


## 十一、经费预算

### 项目牵头承担单位基本情况表

表A1

填表说明：1. 组织机构代码指企事业单位国家标准代码，单位若已三证合一请填写单位社会信用代码，无组织机构代码的单位填写“000000000”； 2. 单位公章名称必须与单位名称一致； 3. 单位开户名称应与单位名称一致，如有开户名称不一致等特殊情况，必须提供证明文件。						
项目 牵 头 承 担 单 位	单位名称	中国科学技术大学				
	单位性质	大专院校				
	单位主管部门	中国科学院	隶属关系	中央		
	单位组织机构代码	485001086				
	单位法定代表人姓名	万立骏				
	单位开户名称	中国科学技术大学				
	开户银行（全称）	中国银行股份有限公司 合肥南城支行	汇入地点	安徽省 合肥市		
	银行账号	184203468850	银行机构代码	104361003246		
	单位所属地区	安徽省	合肥市	包河区		
	电子邮箱	wangfeng@ustc.edu.cn				
	通信地址	合肥市金寨路96号				
邮政编码	230026					
相 关 责 任 人	项目 负 责 人	姓名	赵政国			
		身份证号码	110107195612281519			
		工作单位	中国科学技术大学			
		电话号码	0551-63603445	手机号码	15505510490	
		电子邮箱	zhaozg@ustc.edu.cn	邮政编码	230026	
		通信地址	安徽省合肥市金寨路96号中国科技大学			
	项目 联 系 人	姓名	闵石头			
		电话号码	0551-63606546	手机号码	13505510735	
		传真号码	0551-63606456			
		电子邮箱	stm@ustc.edu.cn			
	项目 经 费 预 算 联 系 人	姓名	董娟			
		身份证号码	130102197809011820			
		电话号码	0551-63603432	手机号码	15555120309	
		电子邮箱	dongjuan@ustc.edu.cn			



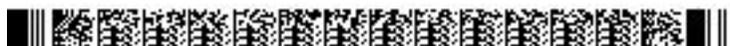
## 项目预算表

表A2 项目编号: 2016YFA0400100

项目名称: 大型强子对撞机(LHC)实验探测器升级

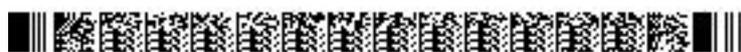
金额单位: 万元

课题编号	课题名称	课题承担单位	课题负责人	课题预算										
				经费来源						经费支出				
				专项经费	自筹经费				合计	专项经费			自筹经费	合计
					地方财政拨款	单位自有资金	其他资金	小计		直接费用	间接费用	小计		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
2016YFA0400103	CMS 端盖缪子探测器升级	北京大学	班勇	1060.00				0.00	1060.00	918.55	141.45	1060.00	0.00	1060.00
2016YFA0400102	ATLAS 实验缪子探测器升级	中国科学技术大学	赵政国	1240.00				0.00	1240.00	1071.00	169.00	1240.00	0.00	1240.00
2016YFA0400101	ATLAS 实验硅微条径迹探测器升级	中国科学院高能物理研究所	朱宏博	1345.00				0.00	1345.00	1168.00	177.00	1345.00	0.00	1345.00
2016YFA0400104	CMS 量能器和一级触发升级	中国科学院高能物理研究所	刘振安	855.00				0.00	855.00	739.50	115.50	855.00	0.00	855.00
累计				4500.00				0.00	4500.00	3897.05	602.95	4500.00	0.00	4500.00



## 十二、相关附件

1. 乙方与参加单位有关项目组织实施的协议（须加盖乙方与参加单位公章、法人签字签章；协议文件须扫描上传。如无参加单位，则不填）；



## “大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级”

### 项目组织实施协议

由中国科学技术大学牵头，联合中国科学院高能物理研究所、山东大学、北京大学、清华大学和上海交通大学5家单位共同申请的国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项“大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级（项目编号：2016YFA0400100）”项目已获得立项资助，于2016年7月开始实施。

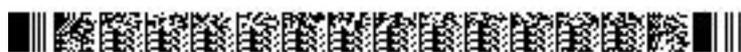
各单位均承诺提供充分的人力、物力参与本项任务实施工作；在项目执行过程中，精心组织、密切协作，按任务书要求完成任务目标；执行国家专项管理办法和经费管理办法，按照任务相关性、政策相符性、经济合理性原则合理使用经费。

项目牵头承担单位（公章）：中国科学技术大学

法定代表人（签字）：



2016年6月30日



## “大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级”

### 项目组织实施协议

由中国科学技术大学牵头，联合中国科学院高能物理研究所、山东大学、北京大学、清华大学和上海交通大学5家单位共同申请的国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项“大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级（项目编号：2016YFA0400100）”项目已获得立项资助，于2016年7月开始实施。

各单位均承诺提供充分的人力、物力参与本项任务实施工作；在项目执行过程中，精心组织、密切协作，按任务书要求完成任务目标；执行国家专项管理办法和经费管理办法，按照任务相关性、政策相符性、经济合理性原则合理使用经费。

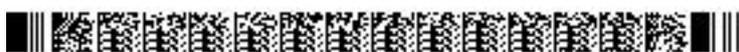
项目参加单位（公章）：山东大学

项目牵头单位（公章）：

法定代表人（签字）：

法定代表人（签字）：

2016年6月30日

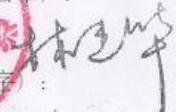


## “大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级”

### 项目组织实施协议

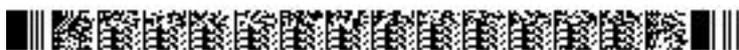
由中国科学技术大学牵头，联合中国科学院高能物理研究所、山东大学、北京大学清华大学和上海交通大学5家单位共同申请的国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项“大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级（项目编号：2016YFA0400100）”项目已获得立项资助，于2016年7月开始实施。

各单位均承诺提供充分的人力、物力参与本项任务实施工作；在项目执行过程中，精心组织、密切协作，按任务书要求完成任务目标；执行国家专项管理办法和经费管理办法，按照任务相关性、政策相符性、经济合理性原则合理使用经费。

项目参加单位（公章）：  
法定代表人（签字）：

项目牵头单位（公章）：  
法定代表人（签字）：

2016年6月30日



## “大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级”

### 项目组织实施协议

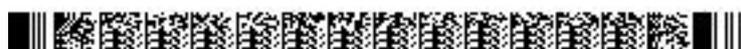
由中国科学技术大学牵头，联合中国科学院高能物理研究所、山东大学、北京大学、清华大学和上海交通大学5家单位共同申请的国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项“大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级（项目编号：2016YFA0400100）”项目已获得立项资助，于2016年7月开始实施。

各单位均承诺提供充分的人力、物力参与本项任务实施工作；在项目执行过程中，精心组织、密切协作，按任务书要求完成任务目标；执行国家专项管理办法和经费管理办法，按照任务相关性、政策相符性、经济合理性原则合理使用经费。

项目参加单位（公章）：  
法定代表人（签字）：  
  
（科研）

项目牵头单位（公章）：  
法定代表人（签字）：  
  


2016年6月30日



## “大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级”

### 项目组织实施协议

由中国科学技术大学牵头，联合中国科学院高能物理研究所、山东大学、北京大学、清华大学和上海交通大学5家单位共同申请的国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项“大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级（项目编号：2016YFA0400100）”项目已获得立项资助，于2016年7月开始实施。

各单位均承诺提供充分的人力、物力参与本项任务实施工作；在项目执行过程中，精心组织、密切协作，按任务书要求完成任务目标；执行国家专项管理办法和经费管理办法，按照任务相关性、政策相符性、经济合理性原则合理使用经费。

项目参加单位（公章）：

法定代表人（签字）：



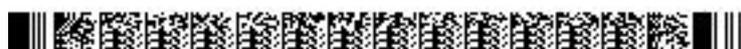
王贻芳

项目牵头单位（公章）：

法定代表人（签字）：



2016年6月30日



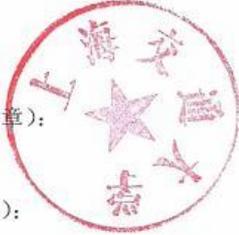
## “大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级”

### 项目组织实施协议

由中国科学技术大学牵头，联合中国科学院高能物理研究所、山东大学、北京大学、清华大学和上海交通大学5家单位共同申请的国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项“大型强子对撞机（LHC）实验探测器升级（项目编号：2016YFA0400100）”项目已获得立项资助，于2016年7月开始实施。

各单位均承诺提供充分的人力、物力参与本项任务实施工作；在项目执行过程中，精心组织、密切协作，按任务书要求完成任务目标；执行国家专项管理办法和经费管理办法，按照任务相关性、政策相符性、经济合理性原则合理使用经费。

项目参加单位（公章）：



法定代表人（签字）：

项目牵头单位（公章）：



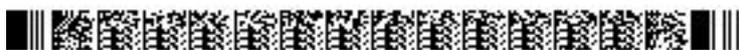
法定代表人（签字）：



2016年6月30日

2. 申报指南规定的其他附件；

无



## 任务书签署

甲乙双方根据《国务院关于改进加强中央财政科研项目和资金管理的若干意见》(国发[2014]11号)、《国务院印发关于深化中央财政科技计划(专项、基金)管理改革方案的通知》(国发[2014]64号)、《科技部财政部关于改革过渡期国家重点研发计划组织管理有关问题的通知》(国科发资[2015]423号)、《科技部财政部关于印发〈中央财政科技计划(专项、基金等)监督工作暂行规定〉的通知》(国科发政[2015]471号)、《财政部科技部关于中央财政科技计划管理改革过渡期资金管理有关问题的通知》(财教[2015]154号)等有关文件规定,以及有关法律、政策和管理要求,依据项目立项通知,签署本任务书。

专业机构(甲方):

法定代表人签字(签章):

(公章)

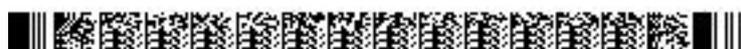
年 月 日

项目牵头承担单位(乙方):

法定代表人签字(签章):

(公章)

年 月 日



项目负责人签字（签章）：

年 月 日

推荐单位（盖章）

年 月 日

