**第一部分 国内外现状及趋势分析**

包括本项目相关国内外总体研究情况和水平、最新进展和发展前景。限2000字以内，并分别简要列出国内、外各代表性的5家从事相关研究的主要机构及典型成果、代表性文献及相关专利、标准，并列出项目在相关方面的5项代表性成果、专利及标准

为研究新发现的希格斯玻色子和寻找新物理，欧洲核子中心的大型强子对撞机（LHC）将升级，以提高亮度并收集超过10 倍的数据，即高亮度LHC。LHC 升级成为高能物理的焦点。因此，研发新探测器技术，发掘LHC 的物理潜力成了重点。高亮度LHC升级将分别在ATLAS实验上每隔25纳秒进行一次质子束团交汇，每次交汇将产生大约200个对撞，形成高度的对撞事例堆积（pile-up）背景，严重地影响信号探测和数据分析。因此，ATLAS实验相应的探测器需要重大的技术升级，以应对更加严苛的辐射环境和更密集的物理事例。

本项目选取几个ATLAS实验升级中最关键的课题开展预研，其中包括研制全新的高颗粒度时间探测器，与升级硅径迹探测器与缪子探测器。

高颗粒度时间探测器是近两年来粒子探测领域的一个崭新的方向。相对于现在ATLAS探测器数纳秒级的时间分辨率，该新探测器的时间分辨率可以把时间分辨率提高两个数量级，可以达到50皮秒。它将像个高速摄像机，高精度地记录粒子到达时间信息，有效地判断粒子径迹来自哪个对撞点，从而有效地降低堆积背景。高颗粒度时间探测器的研制将发展很多种新技术，包括高时间分辨的抗辐照传感器技术、前端电子学超快芯片技术、大面积超快探测器集成技术等，各国都积极研发相关技术。

1. 在抗辐照、高时间分辨率硅传感器方面，日本滨松公司与意大利的FBK研究所曾处于国际领跑地位。在2021年后，本项目组中国科学院高能物理研究所（高能所）与中国科技技术大学（科大）两个团队分别利用国产工艺研制出高时间分辨率抗辐照硅传感器，并且抗辐照性能超越滨松与FBK的传感器。在2023年，高能所与微电子所联合与日本滨松公司与意大利的FBK研究所竞争欧洲核子中心在ATLAS高颗粒度时间探测器上的硅传感器的国际招标，并最终赢得该招标，确立了国产传感器在该技术上的国际领跑地位。
2. 在探测器模块研制方面，高能所与西班牙IFAE研究所主导了传感器与超快芯片的先进封装研制；高能所与科大主导了探测器模块的自动化组装；高能所与法国团队主导了大面积多个探测器模块单元（detector unit）的研制。
3. 超快读出电子学方面，法国IJClab国家实验室、欧洲核子中心主导了该项目超快读出芯片的研发。高能所、南京大学主导了系统级读出电路、与前端读出电路板的设计 ，高能所、山东大学主导了高压电子系统的研制，山东大学还主导了该项目高速传输柔性电缆的研制。

表1 国外代表性的5家从事相关研究的主要机构及典型成果、代表性文献

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 研究机构 | 相关研究内容 | 代表性成果 | 代表性文献 |
| 1. | 欧洲核子研究中心（CERN） | 时间探测器 | 研发了ALIPDE芯片，应用于ALICE实验的内径迹探测器升级 | W.Snoeys, NIMA 924 (2019) 51-58 |
| 2 | IJClab/Omega | 研发超快读出芯片 | 研发出超快读出芯片系列ALTIROC | C.AgapopoulouEt al，（2023）JINST 18 P08019 |
| 3. | 日本滨松公司 | 抗辐照硅传感器研究 | 为ATLAS实验的径迹探测器与径迹探测器二期升级项目提供大部分硅传感器；研发出抗辐照LGAD时间传感器 |  |
| 4 | INFN |  |  |  |
| 5 | LBNL |  |  |  |

表2国内代表性的5家从事相关研究的主要机构及典型成果、代表性文献

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 研究机构 | 相关研究内容 | 代表性成果 | 代表性文献 |
| 1 | 中国科学院高能物理研究所 | 先进半导体粒子探测器 | 研发了IHEP-IME抗辐照LGAD硅传感器，HGTD的模块组装，电子学。  | Mei Zhao et al, NIMA 1033 (2022) 166604 |
| 2 | 中国科学技术大学 | 微结构气体探测器，先进半导体粒子探测器 | 研发了USTC-IME抗辐照LGAD硅传感器，组装 |  |
| 3 | 华中师范大学 | 像素探测器 | 承担并完成LHC上ALiCE实验的径迹探测器模块组装任务；自主研制了 MIC系列 MAPS 像素探测器芯片 |  |
| 4 | 南京大学 | 高速抗辐照读出电路研制 | HGTD探测器外设电路PEB的全功能验证系统(Modular PEB)的研制 | L. Han et al, NIMA 1045 (2023) 167651 |
| 5 | 山东大学 | 用于气体探测器信号读出的抗辐照读出电子学 | 研发了基于VMM芯片的前端抗辐照、低功耗、高通道密度的读出电子学板 | G.Iakovidis, et al, JINST,18, P05012. |

表3 项目在相关方面的5项代表性成果、专利及标准

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 成果类型（文献、专利、标准） | 名称 | 作者 | 成果明细 |
| 1 | 文献 | Design and testing of LGAD sensor with shallow carbon implantation， NIMA 1048 (2023) 167967 | Kewei Wu et al,  | 研发了抗辐照LGAD硅传感器，赢得CERN的硅传感器的国际招标 |
| 2 | **文献** | Demonstration system of the HGTD peripheral electronics boards for ATLAS phase II upgrade，NIMA 1045 (2023) 167651 | L. Han et al, | 研制了HGTD探测器外设电路PEB的全功能验证系统(Modular PEB) |
| 3 |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |

**第二部分 研究目标及内容**

一、项目目标及考核指标

（一）申报项目与所属指南方向的关联关系

包括项目与所属指南方向的匹配性，对指南方向目标的支撑作用。限1500字以内。

本申报项目“高能量加速器关键技术研究”拟申报“大科学装置前沿研究”重点专项2023年度项目申报指南中的“1.3 ATLAS 探测器升级（共性关键技术）”，覆盖了相应指南方向的全部研究目标及其考核指标。包括ATLAS实验高粒度时间探测器升级，三个主要部分。项目指南方向的匹配性，对指南方向目标的支撑作用说明如下:

课题一“ATLAS实验高粒度时间探测器升级” 研制高粒度、高时间分辨率的探测器，这是ATLAS 升级中的一个全新探测器。本项目将研制硅传感器、前端读出电路板、探测器模块、高压系统等。利用这些新的技术，探测器的时间分辨率将从纳秒级提高到50 皮秒。本课题涵盖指南中的关于“高颗粒度时间探测器”所要求的全部内容，各项技术指标均不低于指南要求。

1. 项目目标及考核指标、考核方式/方法

限2000字以内（不包括表格），并填写下表。

1. **项目目标**

**（1）ATLAS实验高粒度时间探测器升级**

高精度时间探测器是LHC 探测器技术的新前沿。得益于本团队最新进展，具有高时间精度的探测器将集成到高亮度LHC 中。

高粒度高时间分辨探测器是一种由低增益雪崩放大硅传感器（LGAD）组成的新型探测器。本团队设计的传感器具有世界领先的抗辐射性能。围绕这关键技术，本项目拟在国内技术基础上，推进全球领先的LGAD 硅传感器技术研发，提高传感器的一致性与良品率，以用于大面积粒子探测器，其时间分辨率优于50 皮秒；采用自动化系统组装大面积探测器模块；领导抗辐射和快速电子的设计，开发前端读出电路板；开发高压系统，以提高传感器高压偏置的稳定性；本团队将领导该探测器的国际团队在欧洲核子研究中心的集成与安装。

1. **考核指标：** 所研制的LGAD传感器与探测器模块时间分辨优于50皮秒
2. **考核方法：**测试报告、论文报告、同行评审。

（a）利用Sr-90放射源发出的电子测量时间分辨率。让电子穿过两层紧靠在一起的LGAD。然后将放大后的信号进行波形采样，利用前沿定时得到两层LGAD的信号到达时间(TOA)。从时间差分布的宽度得出时间分辨率。

（b）利用CERN SPS的π介子束流或者DESY实验室的电子束流测量探测效率和时间分辨率。将束流的望远镜系统得到的束流粒子径迹外推至LGAD表面，得到预期的击中位置，统计对应的LGAD探测单元有信号的事件比例得到效率。将信号的TOA与系统的参考定时装置对照，得出时间分辨率。

**项目目标、预期成果与考核指标表**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **项目目标** | **预期成果名称** | **预期成果****类型** | **对应的****课题** | **考核指标** | **考核方式（方法）及评价手段** |
| **指标****名称** | **立项时已有指标值/状态** | **中期指标值/状态** | **完成时指标值/状态** |
|  | 1： | □新理论 □新原理 □新产品 □新技术 □新方法 □关键部件 □数据库 □软件 □应用解决方案 □实验装置/系统 □临床指南/规范 □工程工艺 □标准 □论文 □发明专利 □其他  |  | 指标1.1时间分辨率Time resolution | 小面积原型硅传感器时间分辨率好于50皮秒 | 为ATLAS升级研制出正式的硅传感器，时间分辨率好于50皮秒Sensor  | 探测器模块时间分辨率好于50皮秒Module  | 测试报告、同行评审。 |
| …… |  |  |  |  |
| 2： | 同上 |  | 指标2.1 |  |  |  |  |
| …… |  |  |  |  |
| … | 同上 |  | 指标 |  |  |  |  |
| …… |  |  |  |  |
| **科技报告考核指标** | **序号** | **报告类型** | **数量** | **提交时间** | **公开类别及时限** |
| 1. | 硅时间探测器中期测试报告 | 1 | 2026年 | 公开 |
|  | 2. | 硅时间探测器结题测试报告 | 1 | 2028年 | 公开 |
| 其他目标与考核指标完成情况 |

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”**，指将由项目内哪些课题支撑取得某项成果。

**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，数量指标可以为专利、产品等的数量；论文代表作应注重质量，不以数量作为评价标准；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，成果转让并带动了环境改善、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”，**包括项目综合绩效评价（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，每个项目在综合绩效评价（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。

（三）项目预期成果的呈现形式及描述

限1000字以内。

**课题1:ATLAS实验高粒度时间探测器**

1. 研制出ATLAS实验高粒度时间探测器项目研制出全面积的LGAD硅传感器与探测器模块，时间分辨率达到50皮秒，达到项目验收指标，并完成测试报告。测试报告的内容为硅径迹探测器原型机的测试结果，其中包括实验中获得的LGAD硅传感器与探测器模块的时间分辨率等重要参数
2. 培养研究生5名以上，在国际杂志上发表文章5篇以上，国际会议报告10个以上。

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

拟解决的关键科学问题、关键技术问题，针对这些问题拟开展的主要研究内容，限3000字以内。

**课题1:ATLAS实验高粒度时间探测器**

**拟解决的重大科学问题或关键技术问题：**

 解决LHC升级后高亮度对撞带来的对撞点堆积与辐照量增加的问题，本项目通过研发抗辐照、高时间精度的先进探测器，高精度地记录粒子到达时间信息，有效地判断粒子径迹来自哪个对撞点，从而有效地降低堆积背景。高颗粒度时间探测器的研制将发展很多种关键的新技术，包括高时间分辨的抗辐照传感器技术、超快电子学技术、大面积超快探测器集成技术等。

针对这些问题拟开展的主要研究内容

**主要研究内容**

研究目标为拟研制大面积、抗辐照、高时间分辨的粒子探测器，从而解决LHC高亮度升级后带来的大量对撞顶点堆积的技术难题。另外高时间分辨探测器的研制所将发展出的抗辐照传感器、快速读出芯片等技术对未来高能对撞机大装置的发展，以及航天航空和医学成像等高辐照环境下的应用非常重要。

本课题研究内容有如下几部分：

* + - * 1. **抗辐照超快传感器研制**

硅传感器是高时间分辨探测器的眼睛，研究内容是研发一种超快、抗辐照的低增益雪崩放大硅传感器（LGAD），时间分辨能好于50皮秒，能承受2.5×1015 neq/cm2的等效中子通量的辐照，满足ATLAS实验第二期升级的需求。

研究内容为研究并优化低增益雪崩放大硅传感器的半导体器件设计，以提高其抗辐照性能与时间分辨率；通过国际合作研发其器件制作所用的相关半导体工艺，提高全面积LGAD传感器的良品率，优化其雪崩增益大小、噪声、漏电流与功耗和抗辐照性能。

* + - * 1. **超快探测器的模块集成技术**

超快探测器模块集成是探测器的核心。研究目标为探索出超快探测器模块设计方案，在探测器模块系统级别实现好于50皮秒的时间精度。

研究内容为研制高时间分辨探测器探测器模块，攻关超快传感器和读出芯片高密度高速集成的关键技术；研制大面积超快探测器多模块组stave的样机，攻关把数十个探测器模块在stave样机上高精度组装技术，以及多模块近万个读出通道的高精度同步与联调的技术。

* + - * 1. **设计研制外围电子学系统原型。**

HGTD的外围电路连接各个探测单元与探测器外触发和数据获取系统，是HGTD探测器不可或缺的重要组成部分。外围电路位于HGTD探测器外圈，保证探测器数据高速传输。主要研究内容为在几何空间的限制，设计出高抗辐照能力，低功耗，强干扰前端电子学。

**d）柔性电子学尾板**

柔性电子学尾板是连接前端探测器LGAD电子学与外围电子学板的桥梁。主要研究内容是研制具有较低物质量的柔性板方案，以及优化电路设计，降低时间抖动与提高信号质量。

E）**高压电子系统**

高压电子系统需要为LGAD传感器提高一个稳定偏置电压。每个模块都需要该偏置高压。主要研究内容为研制多通道、高精度的高压电子学系统，通过优化电路设计减少纹波，提高精度。其中，研制测量系统，测量漏电流并且精度好于100nA。另外，针对多通道供电可能存在的串扰问题，研制通道间隔离方案与优化接地的方案。

（二）项目拟采取的研究方法

1、针对项目研究拟解决的问题，拟采用的方法、原理、机理、算法、模型等

限2000字以内。

**课题1:ATLAS实验高粒度时间探测器**

针对LHC升级后高亮度对撞带来的对撞点堆积与辐照量增加的问题，拟自主设计并采用国产工艺，研制抗辐照LGAD传感器、探测器模块的先进封装、高速的前端读出电子学系统、高精度高压电源系统等。

在抗辐照超快传感器研制方面，针对LGAD原型硅传感器抗辐照能力的问题，拟在国内微电子所8寸工艺线上，采用高能量离子深注入的方式进行LGAD传感器增益层的p+掺杂；在抗辐照设计方面，优化碳掺杂，保护增益层中晶格上的硼原子，减缓辐照损伤引起的受主移除效应，进一步提高国产LGAD硅传感器的抗辐照能力。通过TCAD等计算机仿真工具，调整LGAD硅传感器制作流程中掺杂等关键工艺，提升其时间分辨率等关键性能。

在探测器模块研制方面，项目组拟基于国内的先进芯片封装工艺，自主研制封装方案，将前端读出超快ASIC芯片与高时间分辨LGAD传感器通过球焊方式高密度集成，研制出高时间分辨率的探测器模块。另外，通过与国内精密控制的单位合作，研制探测器模块自动组装工艺，实现智能化组装。

在电子学方面，项目组拟自主研制高速外围电子读出板，通过设计与优化多层电路板布线与优化，实现复杂功能，其中包括连接数十个探测器模块，整合来自探测器模块测量到的时间和亮度数据，转换为高速的光信号，发送到探测器外的数据获取系统。同时，PEB接收并分发时钟和触发信号给探测器模块，还为其提供传感器的高压和专用集成电路ASCI的低压。另外，还要保证PEB能够满足HGTD探测器安装环境的抗辐照和散热条件。

本课题还自主研制柔性电子学尾板，通过优化电路设计，压低时间抖动，保证信号传输的质量与电源传输的效率；研制高精度的高压电子学系统，为LGAD传感器提高温度的工作电压。

2、项目研究方法（技术路线）的可行性、先进性分析

限2000字以内。

**课题1:ATLAS实验高粒度时间探测器**

高颗粒度时间探测器是近两年来粒子探测领域的一个崭新的方向。相对于现在ATLAS探测器数纳秒级的时间分辨率，该新探测器的时间分辨率可以把时间分辨率提高两个数量级，可以达到50皮秒。高颗粒度时间探测器的研制将发展很多种新技术，包括高时间分辨的抗辐照传感器技术、前端电子学超快芯片技术、大面积超快探测器集成技术等，各国都积极研发相关技术。另外，该技术未来有望用于粒子物理以外的更多领域，其中包括质子治癌中质子CT等医学应用、材料、生物样品研究中的X射线三维成像以及空间站与科学卫星等空间应用。

**可行性分析：**

本项目组高能所与科大两个团队分别利用国产工艺研制出高时间分辨率抗辐照硅传感器。所开发的高时间精度LGAD 硅传感器原型的时间分辨率优于50 皮秒，能够承受LHC 升级后的超高辐照剂量（2.5×1015 neq/cm2的等效中子通量），满足ATLAS实验第二期升级的需求。它是目前同类的LGAD 硅传感器原型中全球性能最优秀的，其性能显著好于国际著名的日本滨松公司与意大利FBK 研究所的LGAD原型传感器。在2023年，高能所与微电子所联合与日本滨松公司与意大利的FBK研究所竞争欧洲核子中心在ATLAS高颗粒度时间探测器上的硅传感器的国际招标，并最终赢得该招标。上述LGAD 硅原型传感器的研制成功，为本项目为ATLAS实验研制正式的全面积LGAD 硅原型传感器，以及基于传感器，进一步研制探测器模块以及配套的电子学系统打下坚实的基础。

三、课题分解方案

（一）课题分解情况

围绕项目目标，根据需要可对项目目标进行任务分解，并简要说明各课题在项目中的具体作用，相互之间的逻辑关系，建议用图表描述。限2000字以内。

（二）各课题内容

逐项分段说明各课题的研究目标、主要研究内容、拟解决的重大科学问题或关键技术、考核指标及评测手段/方法等。每个课题限3000字以内。

**1、课题1：ATLAS实验高粒度时间探测器升级**

**研究目标：**

本项目拟在国内技术基础上，推进全球领先的LGAD 硅传感器技术研发，提高传感器的一致性与良品率，以用于大面积粒子探测器，其时间分辨率优于50 皮秒；采用自动化系统组装大面积探测器模块；领导抗辐射和快速电子的设计，开发前端读出电路板；开发高压系统，以提高传感器高压偏置的稳定性；本团队将领导该探测器的国际团队在欧洲核子研究中心的集成与安装。

主要研究内容：

**LGAD抗辐照硅传感器**

研究内容为研究并优化低增益雪崩放大硅传感器的半导体器件设计，以提高其抗辐照性能与时间分辨率；通过国际合作研发制作所用的相关半导体工艺，并将该工艺国产化。在工艺方面，采用高能量离子深注入的方式进行LGAD传感器增益层的p+掺杂；在抗辐照设计方面，优化碳掺杂，保护增益层中晶格上的硼原子，减缓辐照损伤引起的受主移除效应。课题组参与ATLAS合作组中LGAD超快传感器的抗辐照性能测试，测试不同雪崩倍增区域的掺杂设计下的时间探测精度、电荷收集率，雪崩增益大小、噪声、漏电流与功耗和抗辐照性能等的变化，结合TCAD器件仿真，掌握LGAD的原型传感器的核心设计与其性能测试技术。

**探测器模块：**

课题组拟在探测器模块研制前期基础上进一步主导ATLAS实验大面积超快探测器的研制。项目组拟通过高密度集成的工艺把多探测器模块集成为大面积探测器单元（detector units）。课题组计划将前端读出超快ASIC芯片与高时间分辨LGAD传感器通过球焊方式集成，再在集成柔性电路板成为模块。另外，项目组拟利用可编程的龙门机器系统，把多个探测器模块以数十微米的精度安装在支撑结构上；再高密度的前端外围电路板实现多个模块的高速数据与时钟信号传输与控制信号输入，最终研发出完整的超快探测器探测器单元。

**外围电子学**

研制HGTD探测器的外设读出电路（PEB），完成HGTD项目相关的可靠性测试。在满足HGTD探测器有限的安装空间和强烈粒子辐照的环境下，PEB需实现如下功能：连接数十个探测器模块，整合来自探测器模块测量到的时间和亮度数据，转换为高速的光信号，发送到探测器外的数据获取系统。同时，PEB接收并分发时钟和触发信号给探测器模块，还为其提供传感器的高压和专用集成电路ASCI的低压。另外，还要保证PEB能够满足HGTD探测器安装环境的抗辐照和散热条件。

**柔性电子学尾板**

柔性电子学尾板是连接前端探测器LGAD电子学与外围电子学板的桥梁，采用具有较低物质量的柔性设计方案。在研发过程中，需要（1）严格控制信号走线的阻抗，降低反射，提高信号传输的质量；（2）控制柔性板的均匀度，压低信号跳变沿在传输中的jitter抖动；（3）严格控制电源平面和地平面的阻抗，以保证电源传输的效率。用于信号传输的柔性电子学板一般以2层板和4层板居多。根据以上要求，需要研究在2层板和4层板的设计下，信号传输线的阻抗、信号晃动、压降等性能参数，确定最优化的设计。在HGTD升级项目中，预计需要7500余块柔性电子学尾板。我国ATLAS实验团队将承担1/3的生产和测试任务。研究自动化的测试平台，将大大降低人力成本的支出。根据平面阻抗、信号晃动、压降等性能的测试需求，搭建适用于柔性电子学尾板的测试平台，对最后量产的柔性电子学尾板进行质量控制（QC）和质量保证（QA）。同时，建立柔性电子学尾板的测试数据库，以方便快速查找比对，发现后续测试中的问题。

**高压电子系统**

LGAD传感器需要一个偏置电压，每个模块都需要该偏置高压，电压范围为0至-900V，单通道电流最大3mA，一共需要8032个通道。高压电源需要放置在19’标准的机柜中，通过屏蔽电缆（约80–100 m长）连接到端盖 PP-EC区域的低通滤波器单元。滤波后的高压通过约15米长的屏蔽电缆传输到HGTD上的连接器，再传输到PEB上，通过PEB将高压加到LGAD传感器上。高压系统的布局如图所示。



国内的中国科学院高能物理所与山东大学共同负责其中的高压电源部分，该高压电源属于有特殊要求的定制产品，需要根据HGTD项目的需求，在国内调研合适的厂家负责生产1560通道的高压电源设备。

高压电源的主要技术指标：

|  |  |
| --- | --- |
| **参数** | **数值** |
| **输出** |  |
| 极性 | 反向 |
| 电压范围 | 0 to -900 V |
| 电压精度 | Better than 1V |
| 电流 | ≥3 mA/channel |
| 电流监控分辨率 | 好于100nA |
| 加高压速度 | 1V/s to 10 V/s可调 |
| 降高压速度 | 1V/s to 50 V/s 可调 |
| 电源纹波 | <100mV; |
| 效率 | >75%  |

中国科学院高能物理所与山东大学将各自负责780个通道的购置及测试工作，经测试达到既定指标（如纹波、精度等）后将交付CERN投入使用。

**拟解决的重大科学问题或关键技术问题：**

 解决LHC升级后高亮度对撞带来的对撞点堆积与辐照量增加的问题，本项目通过研发抗辐照、高时间精度的先进探测器，高精度地记录粒子到达时间信息，有效地判断粒子径迹来自哪个对撞点，从而有效地降低堆积背景。高颗粒度时间探测器的研制将发展很多种关键的新技术，包括高时间分辨的抗辐照传感器技术、超快电子学技术、大面积超快探测器集成技术等。

**考核指标及评测手段/方法：**

**考核指标：**所研制的LGAD传感器与探测器模块时间分辨优于50皮秒

**考核方法：**测试报告、论文报告、同行评审。

（a）利用Sr-90放射源发出的电子测量时间分辨率。让电子穿过两层紧靠在一起的LGAD。然后将放大后的信号进行波形采样，利用前沿定时得到两层LGAD的信号到达时间(TOA)。从时间差分布的宽度得出时间分辨率。

（b）利用CERN SPS的π介子束流或者DESY实验室的电子束流测量探测效率和时间分辨率。将束流的望远镜系统得到的束流粒子径迹外推至LGAD表面，得到预期的击中位置，统计对应的LGAD探测单元有信号的事件比例得到效率。将信号的TOA与系统的参考定时装置对照，得出时间分辨率。

**参加单位任务分工**

中国科学院高能物理研究所负责LGAD硅传感器研制与模块组装，外围读出电路研制与高压电子学系统

中国科学技术大学负责LGAD硅传感器研制与模块组装

南京大学负责本项目外围读出电路研制

山东大学负责柔性电子学尾板与高压电子学系统的研制

四、主要创新点

围绕基础前沿、共性关键技术或应用示范等层面，简述项目的主要创新点。每项创新点的描述限500字以内。

创新点1：本项目将研发ATLAS 实验高颗粒度和高时间分辨率探测器。**它是第一个用于粒子物理对撞机实验的大规模硅基高精度时间探测器。**相对于现在ATLAS探测器数纳秒级的时间分辨率，该新探测器的时间分辨率可以把时间分辨率提高两个数量级以上，可以达到50皮秒。它可以高精度地记录粒子到达时间信息，有效地判断粒子径迹来自哪个对撞点，从而有效地降低堆积背景。高颗粒度时间探测器的研制将发展很多种新技术，包括高时间分辨的抗辐照传感器技术、前端电子学超快芯片技术、大面积超快探测器集成技术等，各国都积极研发相关技术。时间分辨率将取决于该项目中将开发的所有精密器件，包括高精度硅传感器、高速读出电子学等。

2. 创新点2：本项目开发的高时间精度LGAD 硅传感器原型的时间分辨率优于50 皮秒，能够承受LHC 升级后的超高辐照剂量（2.5×1015 neq/cm2的等效中子通量），满足ATLAS实验第二期升级的需求。它是目前同类的LGAD 硅传感器原型中全球性能最优秀的，其性能显著好于国际著名的日本滨松公司与意大利FBK 研究所的LGAD传感器原型。

五、预期经济社会效益

项目的科学、技术、产业预期指标及科学价值、社会、经济、生态效益。限1500字以内。

研发项目中拟研制的抗辐照、高时间分辨率的探测器具有高时间分辨率和抗辐照等优异性能，可以广泛应用于核物理实验与粒子物理实验、同步辐射成像与X射线成像、医疗成像、航空航天探测等重要领域。其中的新技术的研究成果未来将可以转化到相关的医疗仪器与同步辐射成像与X射线探测仪器的企业，并使其产品在高辐照环境下使用寿命更高或者得到更高的时间测量精度，从而带来可观的经济效益。另外，抗辐照硅探测器技术有望在将来应该在我国空间站与科学卫星项目中，成为其中关键技术。通过研制国产硅传感器，使更多的年轻科学工作者参与先进半导体探测器工艺研究，促进国内相关厂家掌握关键技术

本项目的研制将解决大型强子对撞机上的关键技术问题，解决高亮度LHC对撞带来的对撞点堆积，为精确测量希格斯粒子耦合常数（特别是与夸克、轻子的耦合常数）与电弱作用关键参数与提高对新物理灵敏度打下基础。

**第三部分 申报单位及参与单位研究基础**

一、申报单位的已有工作基础、研究成果、研究队伍等

（一）项目、课题牵头单位在该研究方向的前期任务承担及综合绩效评价（验收）情况、相关研究成果

限1000字以内。

本团队在建造升级探测器与物理分析，一直积极推动国际合作且做出了显著成果。高粒度时间探测器团队正在领导ATLAS 实验高时间分辨率探测器（HGTD）项目。本项目负责人担任HGTD 项目负责人，多名项目成员担任HGTD 重要管理职位。本团队开发了具有世界领先性能的硅传感器原型，性能优于日本滨松公司与意大利FBK 的传感器。本团队的传感器已被ATLAS 实验选用，本团队将负责提供88%的传感器。这为国产硅传感器在本项目中的进一步研发与大规模应用奠定了基础。另外，团队开发了探测器单元模块原型，柔性电路尾板原型、外围读出电路板的原型，高压电子系统原型。

（二）项目及课题负责人的科研水平及主要成果

限2000字以内。

每人补充5篇文章/科研奖励

项目负责人Joao Guimarães da Costa 于里斯本科技大学和约翰霍普金斯大学获得硕士学位，2000 年获得密西根大学博士学位，在哈佛大学从事博士后工作。2006-2015 年，他作为助理教授和副教授在哈佛大学从事粒子物理研究和教学工作。2015 年他被聘为中科院高能所研究员，2016 年获得国家“千人计划”高层次外国专家长期项目资助。他一直积极参与高能量粒子物理实验的探测器设计和物理研究。他曾在CERN 的重离子对撞实验（NA38），美国费米实验室的质子对撞机实验（CDF），以及LHC ATLAS 实验上作出贡献。他参与了CDF 径迹探测器及ATLAS 缪子探测器的设计和建造，领导了端部安装调试和NSW 探测器触发升级工作。他带领团队获得了ATLAS 第一个电弱物理测量结果，为希格斯玻色子寻找及质量测量和希格斯耦合作出重要贡献。他曾任哈佛大学ATLAS 组组长，ATLAS 缪子探测器指导组成员，ATLAS 标准模型物理组和希格斯WW 物理组召集人。他目前是中科院高能所ATLAS 组组长，ATLAS 像素、ITk 和HGTD 探测器研究所董事会成员。2021 年他当选ATLAS HGTD 项目负责人并连任至今，曾是HGTD 资源经理和副项目负责人。他自2021 年起成为ATLAS 执行委员会成员。他2016 年起担任CEPC 物理和探测器工作组召集人，是2018 年发布的物理和探测器概念设计报告主编辑。他曾担任CEPC 科技部国家重点研发计划项目负责人。

梁志均担任课题一《ATLAS实验高粒度时间探测器升级》的课题负责人。他是中国科学院高能物理研究所的研究员，担任高能所ATLAS组的副组长。他在ATLAS实验和CEPC中从事电弱物理和硅探测器开发的工作。2010年至2014年，他在牛津大学担任博士后研究助理。2012年和2013年，他被任命为ATLAS电弱物理小组和LHC电弱物理小组的共同召集人。他在电弱过程的精密测量中发挥了重要作用。2014年至2016年，他作为加州大学圣克鲁兹分校的博士后学者开发了抗辐射硅探测器。2016年，他获得中国科学院的“百人计划”的支持回国，在高能所工作。从2019年至今，他被任命为ATLAS高精度定时探测器（HGTD）升级项目的模块和探测器单元组Level-2共同召集人。他在研制基于低增益雪崩二极管（LGADs）的国产IHEP-IME抗辐射LGAD传感器的开发中起到了重要作用。IHEP开发的LGAD传感器目前是所有LGAD原型中最抗辐射的。CERN在采购ATLAS 实验HGTD传感器的过程中选择了高能所团队开发的LGAD传感器。在2022年至2024年期间，他担任ATLAS合作组织的出版委员会成员。另外，他一直在为CEPC进行硅顶点探测器的研发工作。他领导了一个全尺寸顶点探测器原型的组装，并在DESY的测试束实验中研究了探测器的空间分辨率好于5微米，达到世界先进水平。

（三）项目、课题牵头单位相关科研条件支撑状况

包括国家（重点）实验室、国家工程（技术）中心、国家重大科研基础设施（含大型仪器设备）等情况，限1000字以内。

项目组依托“核探测与核电子学国家重点实验室”、“粒子物理与粒子辐照教育部重点实验室”等国家、省部级实验室，设计、建造和升级了ATLAS 实验、北京谱仪等大科学装置项目。本团队在探测器和电子领域有多年经验，并与欧洲核子研究中心、德国DESY等国外单位建立了密切合作关系。 团队建有半导体和气体探测器洁净间、RPC 测试实验室、先进核电子学测试组装平台，并有引线键合机等关键探测器研究设备。

（四）项目牵头企业运行状况（项目牵头单位不是企业的，不需填写）

填写下表，并在附件中提供该单位须提供近2年经会计师事务所审计的财务报告（包括资产负债表、损益表、现金流量表）。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目牵头企业概况 | 企业名称 |  |
| 行业/领域 |  |
| 经济性质 | □国有企业 □集体企业 □私营企业 □有限责任公司□股份有限公司 □其它企业 | 企业特性 | □经认定的高新技术企业 □国家创新型企业 □其他：  |
| 上市情况 | □深交所 □上交所 □新加坡 □香港 □创业板 □新三板□纳斯达克□纽约交易所□其它：  | 上级主管单位 | □大专院校 □中科院科研院所 □其他部委科研院所 □地方科研院所 □军队系统 □政府职能部门 □企业 □无主管 □其他： |
| 公司注册地址 |  | 注册资本（万元） |  |
| 成立时间（年、月） |  | 人员规模 |  |
| 主营方向 |  |
| 经营概况 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 主要产品（列前3种产品） | 近三年年均销售额（万元） |
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |
| 上年度工业生产总值（万元） |  |
|  | 年 | 年 |
| 近2年主营业务收入（万元） |  |  |
| 近2年利润（万元） |  |   |
| 近2年资产负债率（%） |  |   |
| 近2年实收资本收益率（%） |  |   |
| 近2年现金流量（万元） |  |  |

 |
| 研发概况 | 研发人员数量 |  | 上年度研究开发经费投入（万元） |  |
| 上年度研究开发经费投入与主营业务收入的比（投入强度，%） |  |
|

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 获得发明专利数量（项） |  | 获得国际发明专利数量（项） |  | 软件著作权（项） |  |

 |
| 制定国内标准（项） |  | 制定国际标准（项） |  |

二、参与单位、团队的选择原因及其优势

限1000字以内

科大目前拥有先进大面积气体探测器研制平台、先进闪烁探测器研究平台、半导体探测器研制与测试平台、低温探测器研究平台、高精度探测器性能综合测试平台、先进核电子学测试与组装平台、物理实验专用集成电路芯片（ASIC）研究平台、高速数据传输测试平台、中子应用技术研究平台、学科交叉应用慢正电子束平台等。通过参与国家重大项目，在中科院、学校两级的支持下，实验室不断完善实验装备，提高技术水平，积淀雄厚的研发实力，逐步建设成为国内核探测与核电子学领域的科研与技术中心。科大所研制的LGAD原型样机性能达到世界领先水平，满足HGTD项目需求。

南京大学是ATLAS 实验中国组的发起单位之一，参加并出色完成了ATLAS 探测器的LAr 量能器的部分建造任务。2006 年至今参加了多期国家基金委和科技部ATLAS实验相关的国家重大科研项目，其中2019年参与了“国际(地区)合作与交流项目”项目《ATLAS实验探测器Phase 2升级》，负责了HGTD探测器外设电路PEB的预研。

山东大学参与人员所在的粒子科学技术研究中心依托“粒子物理与粒子辐照”教育部重点实验室承担了国际上多个大科学装置（ATLAS、NICA、HERD、BESIII、STCF等）的建造和实验分析工作。曾出色完成了ATLAS探测器TGC的建造任务，以及ATLAS第一阶段升级中sTGC探测器的批量生产任务，与ATLAS国际团队保持着长久的合作关系。

三、相关的国际合作与交流

说明申报团队现有的国际科技合作交流基础和渠道、主要合作对象、合作领域、合作方式和合作成果等内容，限1000字以内。

在ATLAS 实验第二阶段探测器升级的国际合作框架下，项目组与欧洲核子中心 （CERN） 、卢瑟福实验室、利物浦大学、牛津大学、法国IJClab和Omega实验室，西班牙IFAE研究所等已有较多深入合作，并有多个合作成果。其中，项目组与CERN、法国IJClab和Omega实验室与西班牙IFAE研究所合作研制出ATLAS实验高粒度时间探测器的原型模块，并在CERN的束流实验中初步研制其性能。

基于中国科学院与德国亥姆霍茨联合会的资助，高能物理研究所与德国DESY 研究所在硅探测器模块设计、束流测试等方面建立广泛合作关系，定期人员交流等，合作成果包括束流望远镜EUDAQ 的数据获取系统。

**第四部分 进度安排**

包括项目主要研究任务的研发进度、年度及重点节点（“里程碑”）安排、中期目标等。鼓励重大共性关键技术和应用示范研究类项目，采用甘特图等图表细化描述，限2000字以内。

第一年（2024年）：

完成抗辐照LGAD硅传感器的预生产的研制任务，开始进行大面积辐照LGAD硅传感器的正式生产研制。完成探测器模块原型，外围电子学、高压电子系统与柔性电路尾板的研发，通过ATLAS合作组的（Final design review，FDR）评审，进入预生产研制。

第二年 （2025）：

 完成大面积抗辐照LGAD硅传感器的研制任务，通过实验验证其时间分辨率达到50皮秒，完成项目中期的测试报告。探测器模块，外围电子学、高压电子系统与柔性电路尾板通过预生产，并通过欧洲核子中心与ATLAS合作组的评审，进入正式生产的研制阶段。年底前，完成外围读出电路板与柔性电路尾板的正式生产的研制任务。

第三年 （2026）：

完成探测器高压电子系统和探测器模块的正式生产的研制任务。

第四年（2027）：

完成多个探测器模块探测器单元（detector unit）的正式生产任务。所研制的探测器在CERN进行最后组装和调试。

第五年（2028）：

 通过实验验证所研发的探测器模块的时间分辨率达到50皮秒，完成项目的测试报告。

**第五部分 项目组织实施、保障措施及风险分析**

一、项目组织实施机制

包括项目及课题的内部组织管理方式、协调机制等，限1000字以内。

项目负责人全面负责项目实施，成立“咨询委员会”对课题研究中关键技术及问题提供指导和建议，计划每个季度召开“项目进度汇报”。 项目负责人与各子课题负责人建立定期的项目进度与协调会，对各课题给予指导、协助课题负责人解决课题进行中遇到的重要问题， 确保课题顺利、如期开展。由于ATLAS实验均为大型国际合作。必须保证项目在合作组的合作协议框架下进行。不同课题间有些技术和方法具有一定共性，因此各课题之间需有良好的交流。

在项目执行的每一年的年末，召开项目年度总结的会议，邀请所有项目参与者、“咨询委员会”的专家和科技部的领导参加。会上讨论项目经费执行情况、研发进展情况与成果产出，讨论结果将会形成书面报告，经内部审核后提交给科技部。

课题负责人负责本课题的研究活动安排，一般情况需要每两周开一次例会，开展课题组内部的学术交流，按项目计划进度安排研究工作。项目将会建立专门的宣传网页和会议网页。对外，项目的进展和成功会即使在网页上宣传；对内，各种会议报告和其它材料会整理存档，在项目内部实现信息共享。

二、保障措施

项目实施的政策、组织和资源支撑条件，限1000字以内。

本项目的骨干成员多数是国内外大型高能物理合作组的成员，如北京谱仪、大亚湾实验、欧洲强子对撞机ATLAS实验等。在各合作组项目研制过程中，有非常丰富的协同合作研究基础和经验。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， 各参与单位依托的国家级和省部级重点实验室，将在研究人员、支撑人员、研究生、实验室场地、实验室设备和相关配套设施上给予大力支持，以保障项目顺利实施，达到预期目标。

项目将严格执行国家和科技部对“国家重点研究”的政策要求，项目各参加单位及各参与单位所在国家、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。

三、知识产权对策、成果管理及合作权益分配

限1000字以内。

项目的成果主要是论文发表，设计报告，测试报告，与探测器和加速器的原型机。我们将严格遵守科技部相关政策和条例、以及高能物理国际合作实验的政策和协议。本项目获得的资源、材料、信息，各协作单位有权共享和用于开展与其项目相关的研究：在项目执行期限内，独立完成的成果和形式的知识产权归完成单位拥有；由双方协同完成的成果和形成的知识产权由双方共同享有，并以主要完成单位为主：因使用双方提供的材料，专利形成的成果，知识产权归属另有规定的，以双方具体协议为准。

四、风险分析及对策

从技术风险、市场风险、政策风险等几个方面分析项目实施可能面临的风险并提出对策。

**表5 项目执行可能面临的风险**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 风险类别 | 风险内容 | 风险发生可能性 | 涉及的研发任务 | 预防风险或减少风险损失的措施 |
| 1 | □技术风险□市场风险■政策风险□其他 | 抗辐照读出芯片禁运 | □高■中□低 | 课题1：ATLAS实验高粒度时间探测器升级 | 充分利用国际合作，依托ATLAS合作组解决禁运问题； |
| 2 | ■技术风险□市场风险□政策风险□其他 | 所研制的传感器与探测器吗模块模块的良率低 | □高□中■低 | 课题1：ATLAS实验高粒度时间探测器升级 | 在研发阶段，充分研究模块组装与传感器研制的技术，制定备案。在正式研制阶段，制定详尽计划实时监控LGAD传感器与探测器模块的质量，确保为ATLAS实验提供的探测器都是有优秀的性能。 |