

课题编号：2023YFA1605901

密 级：公开

国家重点研发计划 课题任务书

课题名称： ATLAS 实验高粒度时间探测器升级

所属项目： ATLAS 探测器升级

所属专项： 大科学装置前沿研究

项目牵头承担单位： 中国科学院高能物理研究所

课题承担单位： 中国科学院高能物理研究所

课题负责人： 梁志均

执行期限： 2023 年 12 月 至 2027 年 11 月

中华人民共和国科学技术部制

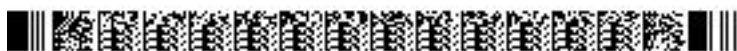
2023 年 12 月 18 日

0003YF 2023YFA1605901 2023-12-18 10:37:48



课题基本信息表

课题名称	ATLAS 实验高粒度时间探测器升级					
课题编号	2023YFA1605901					
所属项目	ATLAS 探测器升级					
所属专项	大科学装置前沿研究					
密级	<input checked="" type="checkbox"/> 公开 <input type="checkbox"/> 秘密 <input type="checkbox"/> 机密	单位总数	4			
课题类型	<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					
课题活动类型	<input checked="" type="checkbox"/> 基础前沿 <input type="checkbox"/> 应用研究 <input type="checkbox"/> 试验发展					
课题研究所属学科	物理学 高能物理学					
课题成果应用的主要国民经济行业	科学研究和技术服务业 研究和试验发展 自然科学研究和试验发展					
课题的社会经济目标	非定向研究 自然科学领域的非定向研究					
经费预算	总需求 1135.00 万元，其中中央财政专项资金需求 1135.00 万元					
课题周期节点	起始时间	2023 年 12 月	结束时间	2027 年 11 月		
	实施周期	共 48 个月	预计中期时间点	2026 年 01 月		
课题承担单位	单位名称	中国科学院高能物理研究所	单位法定代表人姓名	王贻芳		
	单位性质	事业型研究单位	组织机构代码	12100000400012211J		
	单位主管部门	中国科学院	隶属关系	中央		
	单位所属地区	北京市	地市（市、自治州、盟）	北京市 石景山区		
	通信地址	北京石景山区玉泉路 19 号（乙）	邮政编码	100049		
	单位开户名称	中国科学院高能物理研究所				
	开户银行（全称）	中国工商银行股份有限公司北京永定路支行	汇入地点	北京市 北京市		



	银行账号	0200004909014451557		银行机构代码	102100000499	
课题负责人	姓名	梁志均	性别	<input checked="" type="checkbox"/> 男 <input type="checkbox"/> 女	出生日期	1981-10-08
	证件类型	身份证	证件号码	440104198110080013		
	所在单位	中国科学院高能物理研究所				
	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	<input checked="" type="checkbox"/> 正高级 <input type="checkbox"/> 副高级 <input type="checkbox"/> 中级 <input type="checkbox"/> 初级 <input type="checkbox"/> 其他			职务	无
	电子邮箱	liangzj@ihep.ac.cn		移动电话	18514028539	
课题联系人	姓名	张照茹	电子邮箱	zhangzr@ihep.ac.cn		
	固定电话	01088237072	移动电话	15652633536		
	证件类型	身份证	证件号码	370112199002277421		
课题财务负责人	姓名	周亚	电子邮箱	zhouya@ihep.ac.cn		
	固定电话	01088235973	移动电话	18610722811		
	证件类型	身份证	证件号码	620102197703305827		
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	12100000485001086E	
	2	南京大学		大专院校	12100000466007458M	
	3	山东大学		大专院校	12100000495570303U	
课题参加人数	10 人。其中：		高级职称 9 人, 中级职称 1 人, 初级职称 0 人, 其他 0 人;			
			博士学位 9 人, 硕士学位 1 人, 学士学位 0 人, 其他 0 人。			
课题简介 (限 500 字以内)	针对 ATLAS 实验 Phase-II 升级的物理要求, 进行高颗粒度时间探测器的关键技术研究。本课题研发的高颗粒度时间探测器是粒子物理领域最先进的半导体探测器。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、大面积超快探测器集成技术等。通过本项目的执行, 本课题将主导 ATLAS 实验高颗粒度时间探测器的技术研发, 并研制出时间分辨率好于 50 皮秒的硅传感器与探测器模块系统。					

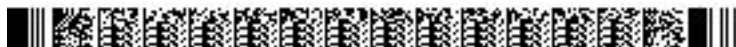


一、目标及考核指标、考核方式/方法

请填写下表。

课题目标、预期成果与考核指标表

课题目标 ¹	预期成果			考核指标 ²			考核方式 (方法)及 评价手段 ⁴		
	预期成果 名称	预期成果类型		指标 名称	立项时已有指 标值/状态	中期指标 值/状态 ³		完成时指标 值/状态	
在高颗粒度 时间探测器 方面,研发硅 传感器、前端 电子学、探测 器模块组装 等,研制出高 时间分辨率 的探测器模 块与前端读 出电路板,其 时间分辨率 好于 50 皮 秒。	主要 成果	1	高精度 时间探测 器	<input type="checkbox"/> 新理论 <input type="checkbox"/> 新原理 <input type="checkbox"/> 新产品 <input checked="" 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 type="checkbox"/> 实验装置/系统 <input type="checkbox"/> 临床指南/规范 <input type="checkbox"/> 工程工艺 <input type="checkbox"/> 标准 <input type="checkbox"/> 论文 <input type="checkbox"/> 发 明专利 <input type="checkbox"/> 其他____	时间分辨率 (关键核心指标)	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 率达到 30- 50 皮秒	探测器模块 时间分辨率 达到 30-50 皮 秒	测试报告、同 行评审。
科技报告考 核指标									
		1	课题年度技术进展报告	1	2024 年 12 月	公开			
		2	课题中期技术进展报告	1	中期检查前	公开			
		3	课题年度技术进展报告	1	2026 年 12 月	公开			
		4	课题年度技术进展报告	1	2027 年 12 月	公开			
		5	课题最终技术进展报告	1	2028 年 12 月	公开			
其他目标与考核指标									



二、课题研究内容、研究方法及技术路线

（一）课题的主要研究内容

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1000字以内。

在科技部和基金委的大力支持下，中国组深度参与了 ATLAS 实验高粒度探测器的研制，并在探测器原型研发阶段做出很多主导性的工作。项目组利用国产工艺研制出高时间分辨率抗辐照原型硅传感器，其抗辐照性能超越日本滨松与 FBK 的传感器。另外，项目组也主导了该项目探测器模块、读出电路板、高压电源、柔性电缆等关键器件的原型研制。

本课题研究目标为在探测器关键部件的原型研究的基础上，拟进一步为 ATLAS 探测器升级研制大面积、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，研究目标是研发一种超快、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 2.5×10^{15} 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。

2) 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探测器单元（detector unit）的样



机，攻关把多个探测器模块在探测器单元上高精度组装技术，以及多模块的高精度同步与联调的技术。

3) 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。

4) 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。

5) 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) 课题采取的研究方法

针对课题研究拟解决的问题，拟采用的方法、原理、机理、算法、模型等限 1000 字以内。

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

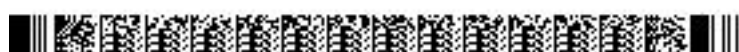


计算机仿真工具，调整 LGAD 硅传感器制作流程中掺杂等关键工艺，提升其时间分辨率等关键性能。

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 ASIC 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。需要考虑探测器模块电路布局和布线的复杂性，该高速外围电子读出板需要研制 22 层板结构的 PCB 电路板，并且保证噪声水平低，是非常有挑战性。

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。



三、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，简述课题的主要创新点。具体内容应包括该项创新的基本形态及其前沿性、时效性等，并说明是否具备方法、理论和知识产权特征。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。

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 (2.5×10^{15} 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。



四、预期经济社会效益

课题的科学、技术、产业预期指标及科学价值、社会、经济、生态效益。限 500 字以内。

本课题研发的高粒度时间探测器是粒子物理领域最先进的半导体探测器。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；项目所研发的硅探测器具有高时间分辨率、高空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。



五、课题年度计划

按每 6 个月制定形成课题的计划进度，应将课题的考核指标分解落实到年度计划中。

1、年度：2023 年 12 月—2024 年 5 月

任务：全尺寸 LGAD 超快硅传感器的预生产研制；研制全尺寸的探测器模块的原型，研制全尺寸的电子学外围电路板的原型，研制柔性电路板尾板原型，研制出高压电源的原型

考核指标：完成 LGAD 超快硅传感器的预生产研制，研制出正式的全尺寸 LGAD 传感器，满足 ATLAS 实验验收要求。

成果形式：LGAD 传感器预生产研制的报告

2、年度：2024 年 6 月—2024 年 11 月

任务：全尺寸 LGAD 超快硅传感器的正式生产研制；探测器模块、柔性电路板尾板的预生产研制；电子学外围电路板的预生产研制；高压电源的预生产研制

考核指标：完成首批电子学外围电路板的预生产研制，满足 ATLAS 实验要求。

成果形式：完成电子学外围电路板的预生产研制的报告

3、2024 年 12 月—2025 年 5 月

任务：全尺寸 LGAD 超快硅传感器的正式生产研制；电子学外围电路板的正式生产研制；探测器模块、柔性电路板尾板的预生产研制；高压电源的正式生产研制

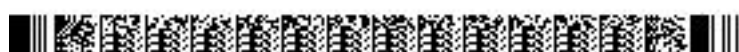
考核指标：完成探测器模块、柔性电路板尾板、高压电源的预生产研制，满足 ATLAS 实验要求。

成果形式：探测器模块的预生产研制的报告

4、2025 年 6 月—2025 年 11 月

任务：全尺寸 LGAD 超快硅传感器的正式生产研制；探测器模块、柔性电路板尾板的正式生产研制；电子学外围电路板的正式生产研制；高压电源的正式生产研制

考核指标：完成全尺寸 LGAD 超快硅传感器的正式生产研制的工作，通过测试满足 ATLAS 实验验收要求，超快硅传感器的时间分辨率达到 **30-50 皮秒**。



成果形式：正式生产的 LGAD 超快硅传感器的测试报告

5、2025 年 12 月—2026 年 5 月

任务：探测器模块、柔性电路板尾板的正式生产研制；电子学外围电路板的测试；高压电源的正式生产研制

考核指标：完成电子学外围电路板、柔性电路板尾板的正式生产研制与测试工作

成果形式：电子学外围电路板的测试报告

6、2026 年 6 月—2026 年 11 月

任务：探测器模块正式生产研制；电子学外围电路板在欧洲核子中心开始总体组装；高压电源的正式生产研制

考核指标：基本完成探测器模块正式生产组装工作

成果形式：探测器性能测试报告。

7、2026 年 12 月—2027 年 5 月

任务：完成多个探测器模块的探测器单元的正式生产研制；电子学外围电路板在欧洲核子中心总体组装；完成高压电源的正式生产研制；完成首个的高颗粒度探测器的 disk 在欧洲核子中心的总体安装。

考核指标：完成多个探测器模块的探测器单元的正式生产研制；通过实验，测试探测器模块时间分辨率达到 30-50 皮秒。

成果形式：探测器性能测试报告。

8、2027 年 6 月—2027 年 11 月

任务：完成所有的高颗粒度探测器的在欧洲核子中心的总体安装，开始整体探测器整体联调

考核指标：完成所有的高颗粒度探测器的在欧洲核子中心的总体安装

成果形式：探测器性能测试报告。

9、2027 年 12 月—2028 年 5 月

任务：进行高颗粒度探测器的在欧洲核子中心的探测器整体联调



考核指标：探测器整体联调达到 ATLAS 实验的要求

成果形式：探测器性能测试报告。

10、2028 年 6 月—2028 年 11 月

任务：完成高颗粒度探测器的在欧洲核子中心的探测器整体联调，完成项目结题报告

考核指标：探测器整体联调达到 ATLAS 实验的要求，测试探测器模块时间分辨率达到 30-50 皮秒。

成果形式：课题结题报告。



六、课题组织实施机制及保障措施

1、课题的内部组织管理方式、协调机制等，限 500 字以内。

本课题由中国科学院高能物理研究所、中国科学技术大学、山东大学和南京大学 4 家单位参与。研究内容包括为 ATLAS 实验高颗粒度时间探测器研制 LGAD 硅传感器，探测器模块、电子学外围电路板、高压电源、柔性电路尾板，并进行探测器整体安装调试。

本课题实行课题负责人全面负责制。课题负责人组织和协调课题各项研究工作的开展和实施。课题负责人根据课题研究内容指定各方面的具体负责人，他们与课题负责人、保持密切的沟通和交流，在课题负责人的领导下开展各项研究工作。课题将定期组织课题组例会，进行课题内部的工作交流，讨论和解决各种技术问题；每年召开二次课题组研讨会，针对课题实施过程中存在的重要问题进行专题讨论；每年召开一次年终总结会，检查课题进度，安排一下年度的具体工作。课题负责人与项目负责人定期保持密切的沟通和交流，确保项目整体进度。

2、课题实施的相关政策，已有的组织、技术基础，支撑保障条件，限 500 字以内。

课题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，课题各参加单位及各参加单位所在的国家、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。

中国科学院高能物理研究所是本课题牵头单位，高能所依托“北京正负电子对撞机国家实验室”，“核探测与核电子学国家重点实验室”，主持设计与建造北京谱仪 III、大亚湾中微子实验、江门地下中微子实验（JUNO）等大科学装置项目。高能所有国内最完善的粒子探测器建造、测试和组装的实验室和相关平台。中国科学与技术大学、山东大学、南京大学为参与单位。中科大依托“核探测与核电子学国家重点实验室”，建有恒温恒湿洁净间、先进核电子学测试和组装平台等，为本课题研究工作提供了优质的硬件设施基础；山东大学依托“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；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。



3、对实现项目总目标的支撑作用，及与项目内其他课题的协同机制，限 500 字以内。

本课题针对高亮度HL-LHC条件下的运行需求，研制高粒度时间探测器。为了处理大型强子对撞机第二期升级后的堆积背景问题，ATLAS 实验提出了高粒度时间探测器。它是ATLAS 实验一个全新的探测器，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，提高测量的精度。另外，高精度的时间信息将对径迹重建、底夸克识别（tagging）等产生重大影响，将大大提升ATLAS 探测器物理潜力。该探测器还可以精确测量对撞亮度，为精确测量各种物理过程的产生截面打下基础。该探测器的时间信息还将对长寿命粒子的寻找带来重大影响，将大大提升ATLAS 实验对新物理的灵敏度，对ATLAS整体的实验目标有重要支撑作用。高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。这些技术也将用于课题2径迹探测器升级的研究。



七、知识产权对策、成果管理及合作权益分配

限 500 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。

