

课题编号：2023YFA1605902

密 级：公开

国家重点研发计划 课题任务书

课题名称： ATLAS 实验内径迹探测器升级

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： 史欣

执行期限： 2023 年 12 月 至 2028 年 11 月

中华人民共和国科学技术部制

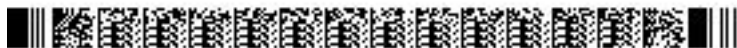
2023 年 12 月 18 日

0003YF 2023YFA1605902 2023-12-18 11:01:30

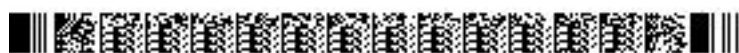


课题基本信息表

课题名称	ATLAS 实验内径迹探测器升级					
课题编号	2023YFA1605902					
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	3			
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 600.00 万元，其中中央财政专项资金需求 600.00 万元					
课题周期节点	起始时间	2023 年 12 月	结束时间	2028 年 11 月		
	实施周期	共 60 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	史欣	性别	<input checked="" type="checkbox"/> 男 <input type="checkbox"/> 女	出生日期	1979-02-02
	证件类型	身份证	证件号码	142601197902021913		
	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 type="checkbox"/> 正高级 <input checked="" 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	shixin@ihep.ac.cn		移动电话	15811395956	
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	清华大学		大专院校	12100000400000624D	
课题参加人数	<u>6</u> 人。其中：		高级职称 <u>5</u> 人, 中级职称 <u>1</u> 人, 初级职称 <u>0</u> 人, 其他 <u>0</u> 人;			
			博士学位 <u>5</u> 人, 硕士学位 <u>1</u> 人, 学士学位 <u>0</u> 人, 其他 <u>0</u> 人。			
课题简介 (限500字以内)	<p>针对高亮度 LHC (HL-LHC) 升级, ATLAS 实验目前的径迹探测器无法承受其高计数率, 需要在第二期升级中研制一个新的全硅基径迹探测器。其新一代的硅微条探测器将比现有的硅微条探测器的探测面积与读出通道数都提高一个数量级, 而且还将提高硅传感器抗辐照性能。本课题子任务一拟为 ATLAS 实验第二期探测器升级研制空间分辨率优于 25 微米的径迹探测器模块, 完成组装成径迹探测器系统集成并参与运行, 发展包括抗辐照硅微条传感器与快读出电子学、高精度高稳定性硅微条探测器模块组装、大面积硅径迹探测器系统集成等关键技术, 为未来此类复杂硅探测器系统的自主设计奠定基础。</p> <p>在像素探测器方面, ATLAS 实验第二期升级主要侧重于位置精度与抗辐照能力提高, 而时间分辨大多只有数纳秒级的水平。本项目子课题二研发时间分辨率</p>					



在 100 皮秒以下的抗辐照传感器及前端电子学设计。团队将致力于研发像素型的低增益雪崩传感器以及具有时间测量功能硅像素探测器的前端读出电路关键技术。相关探测器技术可以在一个探测器上同时实现高空间分辨率与高时间分辨率，用于未来 4 维径迹拟合，将为下一代对撞机大科学装置的关键技术储备。



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	硅径迹探测器模块	<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"/> 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	硅微条径迹探测器空间分辨率 (关键核心指标)	原型模块 25 微米	预生产模块 25 微米	径迹探测器 25 微米	测试报告、同行评审。
		2	有时间信息的硅像素探测器	<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"/> 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	硅像素探测器时间分辨率 (关键核心指标)	好于 10ns	好于 1ns	好于 100ps	仿真验证和实验室测试，测试报告
科技报告考核指标	序号		报告类型 ⁵	数量	提交时间		公开类别及时限 ⁶		
	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。

任务 1:硅微条径迹探测器

拟解决 LHC 高亮度升级后，将近十倍的积分亮度要求内径迹探测器具备高颗粒度、大覆盖面积以及快速数据获的能力。在科技部和基金委的大力支持下，中国组深度参与了 ATLAS 实验硅微条径迹探测器的研制，并在研制原型探测器模块方面积累了经验。在这个基础上，本课题通过研发全新的硅微条径迹探测器，对带电粒子在空间分辨上达到 25 微米的测量精度，将发展包括抗辐照硅微条传感器与快读出电子学、高精度高稳定性硅微条探测器模块组装、大面积硅径迹探测器系统集成等关键技术。

任务 2: 新一代有时间信息硅像素探测器研发

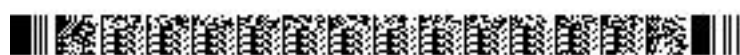
针对新一代有时间信息硅像素探测器的研发，本课题将展开抗辐照传感器及前端电子学的设计。在传感器方面，团队将致力于研发像素型的低增益雪崩传感器，并开展辐照前后器件的时间分辨性能研究。在前端读出电子学方面，团队将通过国际合作研究具有时间测量功能硅像素探测器的前端读出电路关键技术，并着重针对含有时间信息的击中数据的高效缓存和快速读出展开研究，且还将完成数据汇总、配置命令解析等功能。

（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。

任务 1:硅微条径迹探测器：

在硅微条传感器和读出电子学方面，拟采用高能质子束方法分别对硅微条传感器和读出电子学专用芯片进行辐照，测试辐照后硅微条传感器的电流电压特性、电荷收集效率的变化；读出芯片在的辐照下的单粒子效应、异常逻辑状态的及时恢复等性能。



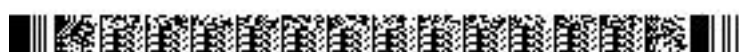
在高精度探测器模块组装与测试方面，拟通过研制高精度工装夹具、使用高精度激光位置测量仪、高灵敏天平等，严格控制探测器模块组件的位置精度与胶水重量；通过联合开发自动化高低温冷却环境测试箱的固件、软件等实时监控硅微条探测器模块在-35 摄氏度到+40 摄氏度的 10 个循环里能够正常运行，模拟未来 ATLAS 运行的环境

在径迹探测器系统方面，拟通过高精度的龙门吊将 28 个硅微条探测器模块安装在碳纤维板条上组装成硅微条探测器桶板，并进行高低温环境下的电子学测试；通过机械精准定位将桶板集成到径迹探测器的支撑结构上，实现系统供电、冷却、数据传输，并进行系统联调测试。

任务 2：新一代有时间信息的硅像素探测器：

传感器部分：传感器的研究包括仿真设计、工艺制备、时间性能研究及辐照性能测试。通过 TCAD 仿真研究器件结构及关键参数，优化工艺流程，实现器件内部像素化。在此基础上通过改变衬底材料、优化结构参数等方法提高器件的抗辐照性能，特别是辐照后器件的电荷收集与时间分辨性能。

电子学部分：像素探测器的前端读出电路主要包括模拟处理单元电路和数据缓存读出电路，为了获取传感器输出信号的时间信息，模拟处理单元电路将采用放大甄别结合高精度时间数字变换的技术设计实现；数字电路部分需要解决的问题是含有时间信息的击中数据的高效缓存和快速读出，首先通过建模仿真确定电路基本架构，进而配合时序分析、流水线处理等高速数字电路设计方法完成数据缓存和读出电路的逻辑实现，进而利用 FPGA 完成数字电路部分的硬件验证。



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。

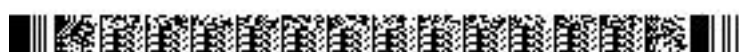
ATLAS 硅径迹探测器将是运行在高能量、高亮度前沿的大型带电粒子径迹探测系统，在保持极低的物质质量的条件下，具有高效的模式识别能力与优异的径迹重建效率。其抗辐照性能、模块组装的数量和系统整合的复杂程度代表此类大科学装置技术的最前沿。



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。

本课题研发的内层径迹探测器是粒子物理领域最先进的半导体探测器。内层径迹探测器研发涵盖了多项关键技术及应用，比如高位置分辨硅微条传感器、抗辐射集成电路设计和辐射效应评估、高精度模块组装及可靠性控制。课题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。

硅微条：中期预生产模块 25 微米，完成时径迹探测器 25 微米，测试报告，同行评审

硅像素时间：中期好于 1ns，完成好于 100ps，仿真验证和实验测试，测试报告

1、年度：2023 年 12 月—2024 年 5 月

任务：测试硅微条传感器关键性能，掌握模块生产全部流程。开展时间像素探测器文献调研，分析明确设计需求。

考核指标：通过硅微条模块站点考核。确定时间像素探测器技术路线。

成果形式：硅微条探测器国际合作组内部评审报告，时间像素探测器内部报告。

2、年度：2024 年 6 月—2024 年 11 月

任务：测试读出芯片关键性能，开始制备长硅微条模块，在卢瑟福实验室完成多桶板小系统联调测试，在 CERN 搭建桶板接收测试系统。完成时间像素探测器传感器与前端电子学整体架构设计和功能模块划分。

考核指标：研制出合格的长硅微条探测器模块，完成时间像素探测器技术设计报告。

成果形式：长硅微条探测器模块合作组内测试报告，时间像素探测器技术设计报告。

3、年度：2024 年 12 月—2025 年 5 月

任务：测试传感器、芯片在不同辐照条件下的性能表现，制备长硅微条模块。时间像素探测器完成传感器增益层设计与第一版原型验证电路功能层级设计。

考核指标：完善长硅微条探测器模块研制流程，完成时间像素传感器增益层与验证电路功能层设计验证。

成果形式：长硅微条探测器完整流程优化合作组内报告，时间像素探测器初步设计验证报告。

4、年度：2025 年 6 月—2025 年 11 月

任务：参与硅微条传感器批量生产阶段可靠性测试，持续生产长硅微条模块，接收、测试运往 CERN 的首批桶板。研制时间像素传感器光刻板、设计原型验证电路寄存器转



换级功能。

考核指标：批量生产合格长硅微条探测器模块，完成时间像素第一版传感器与电子学原型验证电路设计。

成果形式：长硅微条探测器批量生产合作组报告，时间像素探测器第一版设计报告。

5、年度：2025 年 12 月—2026 年 5 月

任务：制作长硅微条模块，加载中国组生产的硅探测器模块到英国卢瑟福实验室桶板。进行时间像素传感器第一版流片，编写原型验证电路性能仿真主体程序。

考核指标：长硅微条模块空间分辨率达到 25 微米，时间像素传感器第一版流片返回，原型验证电路性能仿真主体程序稳定运行。

成果形式：长硅微条探测器空间分辨测试报告，时间像素传感器第一版流片初步接收报告，验证电路性能仿真程序运行报告。

6、年度：2026 年 6 月—2026 年 11 月

任务：开始制作短微条模块，在英国卢瑟福完成测试后运往 CERN 安装点。通过接收测试后，加载桶板集成到桶部探测器。时间像素：测试第一版传感器，仿真验证第一版原型验证电路性能。

考核指标：研制出合格的短硅微条探测器模块，时间像素探测器时间分辨好于 1ns。

成果形式：短硅微条探测器完整流程优化合作组内报告，时间像素探测器传感器与原型验证电路性能仿真验证报告。

7、年度：2026 年 12 月—2027 年 5 月

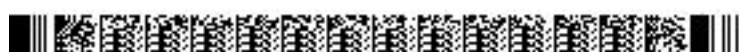
任务：制作短硅微条模块，封闭桶部探测器。评估时间像素传感器第一版性能，测试电子学第一版原型电路性能。

考核指标：完善短硅微条探测器模块研制流程，时间像素探测器第一版时间分辨好于 1ns。

成果形式：短硅微条探测器完整流程优化合作组内报告，时间像素探测器第一版性能测试报告。

8、年度：2027 年 6 月—2027 年 11 月

任务：制作短硅微条模块，参与 CERN 的径迹探测器联调测试。时间像素探测器第二



版传感器设计与电路设计与仿真。

考核指标：短硅微条模块空间分辨率达到 25 微米

成果形式：短硅微条模块空间分辨测试报告，时间像素探测器第二版设计报告。

9、年度：2028 年 1 月—2028 年 6 月

任务：联调测试径迹探测器，参与系统早期运行。测试时间像素传感器与电子学性能。

考核指标：径迹探测器联调达到 ATLAS 实验要求，时间像素探测器时达到测试要求。

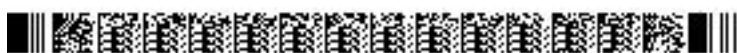
成果形式：径迹探测器空间分辨测试报告，时间像素探测器时间分辨测试报告。

10、年度：2028 年 7 月—2028 年 11 月

任务：撰写技术设计文档，总结经验。

考核指标：径迹探测器空间分辨率达到 25 微米，时间像素探测器时间分辨率达到 100ps

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、清华大学和中国科学技术大学3家单位参与。研究内容包括 ATLAS 实验内径迹探测器硅径迹探测器模块研制、探测器整体安装调试以及新一代有时间信息的时间像素探测器的研发。

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，讨论课题实施中遇到的技术等相关问题；每年召开两次课题组研讨会，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。清华大学与中国科学与技术大学为参与单位。清华大学最早参加 ATLAS 硅微条内径迹探测升级项目，协助建设了高能所的半导体探测器实验室，提供了光学测量仪等重要仪器设备，并持续在人员方面参与了硅微条探测器模块预生产、硅微条传感器抗辐照测试、读出电子学芯片的抗辐照实验等重要任务。中科大依托“核探测与核电子学国家重点实验室”，建有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。



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。

本课题任务一针对高亮度 HL-LHC 条件下的 ATLAS 实验目前的径迹探测器无法承受高计数率的问题，将研发新一代硅微条探测器，它比现有的硅微条探测器的探测面积与读出通道数都提高一个数量级，而且还将提高硅传感器抗辐照性能，其空间分辨率将达到 25 微米。升级后的硅径迹探测器将是运行在高能量、高亮度前沿的大型带电粒子径迹探测系统，在保持极低的物质质量的条件下，具有高效的模式识别能力与优异的径迹重建效率，从而提升 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。任务二针对指南中“新一代有时间信息的硅像素探测器”的研发任务，将研究具有好于 100 皮秒以下时间分辨率的抗辐照传感器和前端电子学关键技术，为 ATLAS 实验更为长远的升级打下基础。这些探测器模块研制与快时间探测技术也将用于课题 1 高颗粒度探测器升级的研究。



七、知识产权对策、成果管理及合作权益分配

限 500 字以内。

课题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。

