**项目组单位分工：**

中国科学院高能物理研究所与中国科学技术大学将主导HGTD课题抗辐照超快传感器的研发与超快探测器模块的研制；中国科学院高能物理研究所将主导HGTD课题快速AISC读出芯片的研发；

**研究目标、研究难点、研究方案与研究计划：**

1. **抗辐照超快传感器研制：**

**研究目标**是研发超快、抗辐照的低增益雪崩放大硅传感器（LGAD）并使其时间分辨能达到50皮秒，能承受2.5×1015 neq/cm2的等效中子通量的辐照，以满足ATLAS实验第二期探测器升级的需求。

**研究难点**在于LGAD超快传感器技术是近几年才出现的新技术，要同时满足ATLAS实验物理要求的时间分辨率（50皮秒的时间精度）与超高的抗辐照性能（能承受2.5×1015 neq/cm2的等效中子通量的辐照）是非常困难，世界上并没有现成的成熟产品，必须通过研发逐步实现。

**研究方案**：本课题在ATLAS实验的国际合作框架下与日本滨松公司和西班牙CNM半导体研究所合作，共同开发低增益雪崩放大传感器（LGAD），为ATLAS实验研制时间分辨达到50皮秒的超快LGAD探测器。课题组拟主导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，从而掌握LGAD的原型传感器的核心设计与其性能测试技术。

除了与日本滨松公司，西班牙CNM研究所等单位共同研发的LGAD原型传感器外，本项目组拟自主研发国产LGAD原型传感器，拟利用国内半导体公司的工艺攻关LGAD传感器研制工艺，逐步实现超快硅传感器国产化。

为了进一步提高LGAD传感器的抗辐照性能，项目组拟在半导体工艺与LGAD器件结构设计方面进行研发。具体方案为：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，利用电离辐照对传感器内部的破坏较低的原理来提高LGAD传感器的抗辐照能力；在抗辐照设计方面，针对辐照后LGAD传感器表面漏电流激增，容易形成表面击穿的现象，本项目组提出采用多层保护环（Guard ring）等结构，通过创新的传感器结构设计，减少表面漏电流，增强器件的抗辐照性能。

**研究计划**：

第一年（2020年1月~2020年12月）：项目组拟在ATLAS实验国际合作框架下，与日本滨松公司、西班牙CNM研究所共同合作研发超快、抗辐照的低增益雪崩放大硅传感器（LGAD），测试在不同的雪崩倍增区域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，从而掌握LGAD的原型传感器的核心设计与其性能测试技术，为实现器件国产化打下基础。

第二年（2021年1月~2021年12月）：项目组着重攻关LGAD传感器的抗辐照性能，拟通过创新的传感器工艺与结构设计，增强器件的抗辐照性能。

第三年（2022年1月~2022年12月）：对新工艺与新结构的LGAD传感器的时间性能与抗辐照性能进行测试。通过测试结果与器件仿真结果对比，进一步研究LGAD传感器器件的辐照损伤机制。

第四年（2023年1月~2023年12月）：研制出15×15（或者15×30）的多像素阵列大面积LGAD传感器，并验证其每个像素结构的性能的均匀性。

第五年（2024年1月~2024年12月）：通过束流测试或者放射源测试验证最终版的多像素阵列大面积LGAD超快传感器的时间性能（达到50皮秒）与抗辐照性能达到ATLAS实验的要求（能承受2.5×1015 neq/cm2的等效中子通量的辐照）。

1. **快速读出芯片：**

**研究目标**为参与ATLAS实验HGTD探测器前端读出芯片（ALTIROC芯片）的研制。所研制的ALTIROC芯片具有优于50皮秒的时间分辨率，能承受2MGy（200Mrad）的电离辐照。

**研究难点：**抗辐照超快的读出ASIC芯片的数字电路中研究难点是电离辐照效应对芯片时间数字转换器(Time-to-digital converter)的时间抖动（jitter）与信号过阈时间（time over threshold)的影响，还有如何应对强辐照环境中的单粒子翻转效应。

**研究方案：**

本项目组拟参与在ATLAS合作组中HGTD探测器中高速读出芯片（ALTIROC芯片）的数字电路设计。利用核探测与核电子学国家重点实验室的X射线辐照仪来研究ALTIROC超快芯片的抗辐照性能：研究电离辐照剂量对芯片中时间数字转换器的时间抖动，与信号过阈时间的影响，并探索芯片的单粒子翻转辐照效应对芯片功能的影响。根据芯片抗辐照性能的测试结果改进ALTIROC超快读出芯片的设计。

**研究计划：**

第一年（2020年1月~2020年12月）：测试第一版ALTIROC1小面积芯片的前端模拟电路性能，芯片时间数字转换器的时间精度，并在X射线辐照仪上测试其抗电离辐照的性能。参与第二版ALTIROC2大面积全功能超快芯片的数字电路设计。

第二年（2021年1月~2021年12月）：测试并验证第二版超快读出芯片（ALTIROC2芯片）的辐照前的数字电路功能逻辑和与芯片的时间数字转换器的时间抖动。

第三年（2022年1月~2022年12月）：在X射线辐照仪上对第二版超快读出芯片（ALTIROC2芯片）进行大剂量电离辐照，测试芯片的时间数字转换器的时间分辨率与辐照剂量的关系。测试和校准超快读出芯片（ALTIROC芯片）的过阈时间。过阈时间校准是提高探测器时间分辨的重要手段。同时对比和研究过阈时间校准在辐照前后的性能差异。

第四年（2023年1月~2023年12月）：根据ALTIROC2芯片的辐照测试结果，来对超快读出芯片的抗辐照电路设计做进一步的优化。

第五年（2024年1月~2024年12月）：测试最终版本的超快读出芯片的时间分辨性能与抗辐照性能。通过在X射线辐照仪上的测试，验证其抗辐照性能达到ATLAS实验的要求。

**c)大面积超快探测器的集成技术研发**

**研究目标**为研制超快探测器模块样机，在实现探测器模块系统级别实现优于50皮秒的时间分辨率。

**研究难点**：

探测器模块中LGAD超快传感器与前端读出ASIC芯片之间高密度地集成是其中一个难点，由于HGTD探测器时间分辨要求很高，连接设计非常关键，处理不好将产生延时，影响时间分辨率。

**研究方案**：研发为高速读出HGTD探测器研究专用的倒装焊技术（bump bonding），即传感器和ASIC芯片之间采用金属微球阵列实现电气和机械连接。LGAD传感器与前端读出芯片的互连是模块制作的关键环节；拟尝试不同倒装焊工艺，研究不同工艺与HGTD探测器成品率、时间分辨率的关系。尽管倒装焊技术在工业届有广泛应用，但模块制作要求尽可能低的工艺温度和超高的成品率。计划与国内的半导体厂家协同开发，摸索一套可靠的倒装焊工艺流程。

探索出一套探测器模块设计方案，最有效地把读出芯片、LGAD传感器、柔性电路板，以及支撑结构组成一个模块，兼顾快速电子学、力学设计，并且做出探测器模块的样机，在探测器模块样机系统级别实现优于50皮秒的时间分辨率。

具体方案为LGAD传感器通过倒装焊连接到两片读出芯片，形成2cm × 4cm的独立模块，再通过粘接和打线固定到专用的柔性电路板上。出于对低物质量、安装和可维护性的考虑，项目组提出通过微型连接器和柔性电路板将数字信号和电源输送到位于外侧的外设板上，计划研制高速、长距离、低物质量的柔性电路板设计，并摸索一套易于安装、稳定可靠的模块组装的工艺流程。

设计低物质量高强度的支撑结构，探索把多个探测器模块集成到大面积低物质量的超模块组结构上，完成超模块组结构的方案设计。

**研究计划：**

第一年（2020年1月~2020年12月）：研发为高速读出HGTD探测器模块研究专用的倒装焊技术（bump bonding）。尝试把小面积的LGAD传感器和ALTIROC1快速读出ASIC芯片以之间的金属微球阵列来实现电气和机械连接，随后研制出小面积验证性的探测器模块，并在束流实验中验证小面积探测器模块可以实现优于50皮秒的时间分辨率。

第二年（2021年1月~2021年12月）：探索出一套探测器模块设计方案，最有效地把读出ASIC芯片、LGAD超快传感器、柔性电路板，以及支撑结构组成一个模块，兼顾快速电子学、力学设计，完成探测器模块的初步设计；通过专用的倒装焊技术，把大面积的LGAD传感器和ALTIROC2大面积快速读出ASIC芯片之间采用金属微球阵列实现电气和机械连接，并验证大面积倒装焊技术的性能。

第三年（2022年1月~2022年12月）：设计并研制探测器模块上的柔性电路板，其功能是将高速数字信号和电源输送到位于外侧的外设板上。计划研制完成高速、长距离、低物质量的柔性电路板设计，并摸索一套易于安装、稳定可靠的模块组装工艺流程。

第四年（2023年1月~2023年12月）：研制出全尺寸的超快探测器模块样机，实现LGAD传感器与超快读出ASIC芯片的高密度集成。

第五年（2024年1月~2024年12月）：通过束流测试或者放射源测试，测试全尺寸超快探测器模块样机的时间分辨性能，验证其性能能达到ATLAS实验第二期升级的物理要求。