# AMS实验和CEPC软硬件开发项目简介

1. **导师及课题组介绍**
2. 导师介绍链接：

<https://people.ucas.edu.cn/~yanqi>

1. 课题组介绍

课题组负责人严琪，于2009年9月至2014年7月在中国科学院高能物理研究所获得粒子物理与原子核物理博士学位，并于2011年至2014年在欧洲核子研究中心进行学习和研究。博士毕业后，于2014年7月至2024年4月在美国麻省理工学院（MIT）任职。期间，先后担任麻省理工学院助理研究员（2014.08-2015.12）、博士后（2016.01-2017.11）、研究科学家（2017.12-2021.03）、首席研究科学家（2021.04-2024.04）。2024年4月起，海外高层次人才计划引入，在中国科学院高能物理研究所担任研究员。

作为高能物理探测器领域和物理分析方面的专家，回国之前的13年主要从事位于国际空间站上的阿尔法磁谱仪（AMS）的实验研究工作。AMS是目前世界上唯一与地面加速器上使用的最先进探测器相类似的精密太空粒子磁谱仪，其造价高达20亿美金。AMS的物理目标包括测量宇宙线中的各种带电粒子和反粒子从而对暗物质、反物质、以及宇宙线的起源进行研究，此外还包括在宇宙线中寻找其他新物理。在麻省理工学院期间，作为AMS国际研究团队的核心成员，AMS探测器软件和物理分析方面的协调人，负责开发了AMS尖端精密的探测器重建算法，成功克服了大型精密粒子磁谱仪在复杂空间环境下的众多技术难题，取得了优异的探测性能（例如：AMS粒子位置测量精度达到约5个微米，时间测量精度达到了48个皮秒），尤其在径迹探测器和飞行时间探测器方面完成了许多创新性的研究工作。所主导开发的探测器算法和软件是AMS实验的基石，为整个实验研究提供了高精度的测量数据。对粒子探测器有独特的理解，擅长实验分析方法的创新。实验分析结果为AMS实验贡献了最多的物理结果（在目前AMS发表的25篇文章中，直接贡献了10篇的分析结果），是领导AMS实验物理分析的关键人物。

2024年4月回国后，除了继续领导AMS的探测器开发以及物理分析工作外，还将在规划的我国下一代大型环形正负电子对撞机（CEPC）项目中发挥关键作用。CEPC项目对我国科学意义重大，将推动我国高能物理研究迈向世界领先水平，并对世界前沿基础物理的研究做出巨大贡献。加入高能所后参与探测器设计和研制，特别是在CEPC探测器关键技术方面，帮助打造CEPC世界级实验平台。此外，还将在AMS实验研究以及未来CEPC实验中，参与推动国际合作。

1. **科创计划项目简介**
2. 项目简介

研究项目涵盖AMS和CEPC两个方向，具体说明如下：

**1.1 AMS方向**

AMS国际合作实验组由来自欧洲、亚洲和美国的60多所大学和研究机构组成。AMS是目前世界上唯一的高精度太空粒子磁谱仪，利用独特的太空环境对宇宙线进行研究。AMS的物理目标包括寻找反物质和暗物质，并对来太空中的各种宇宙线进行精密测量。目前，AMS已经收集了超过2300亿个宇宙线事件，超过以往所有实验的事例数总和，并取得了一系列重要的研究成果。未来，AMS将继续收集和分析更多的宇宙线数据。2021年12月31日，国际空间站的运行被延长至2030年。由诺贝尔奖得主Barry Barish主持的评审会议充分肯定了AMS取得的物理成果，并建议尽快升级AMS，在现有的9层径迹探测器顶部增加1层新的径迹探测器（L0），使其接收度提高300%。AMS的探测器升级工作正在展开中，预计L0的探测器将在2026年初发射并安装。

严琪研究员在MIT工作期间，负责AMS探测器的开发和数据分析工作。回国后，在AMS升级中也承担了关键的任务，此外还负责AMS整体离线软件的开发和维护以及AMS数据分析。入选学生加入后可自由选择以下研究课题：

1. **AMS L0探测器的升级**：有机会外派至CERN参与L0探测器束流测试，亲历AMS探测器的升级。参与工作包括L0探测器的开发、标定和准直。
2. **AMS探测器的重建算法及相关软件的开发**：开发针对AMS任意子探测器的重建算法，包括径迹探测器（测量粒子的位置并判定粒子刚度，刚度为粒子的动量与电荷的比值）、飞行时间探测器（通过时间测量来确定粒子速度）、量能器（测量电子或正电子的能量）、环形成像切伦科夫探测器（测量粒子速度）、穿越辐射探测器（鉴别电子/正电子与强子/原子核）。
3. **宇宙线能谱的精确测量**：AMS已经精确测量了16种不同的宇宙线原子核的能谱。学生可参与AMS尚未发布的12种高电荷重核的能谱测量。
4. **在宇宙线中寻找反物质（反氦核和其他反原子核）和其他新物理现象**。
5. **宇宙线原子核同位素的成分测量**。

**1.2 CEPC方向**

高能对撞机实验不仅具有巨大的科学价值，还拥有其他类型实验无法替代的综合平台功能。随着北京正负电子对撞机BEPCII/北京谱仪BESIII实验将在未来10年内退役，我国下一代大型（100公里）环形正负电子对撞机CEPC项目的规划、设计和建造变得尤为紧迫。CEPC的建设目标是实现最大240GeV的电子-正电子质心能量。其物理主要目标包括探索希格斯玻色子的性质，并寻找超越标准模型的新物理现象。一旦CEPC建成，将推动我国高能物理研究迈向世界领先水平，并对世界前沿基础物理的研究做出巨大贡献。CEPC项目是我国目前最复杂的高能物理实验，集成了众多尖端技术，因此对高技术的实验物理研究、工程技术领域的硬件和软件的开发都提出了新的要求。

课题组开展CEPC探测器设计、探测器算法和软件的开发研究，创新探测器的设计以实现最优的探测器性能并与实验物理目标相匹配。同时，参与探测器硬件的研制，为新探测器和新技术的开发做贡献，力争提升探测器的设计和软硬件能力。对CEPC感兴趣的学生也欢迎加入CEPC探测器的开发，课题包括：

1. **CEPC探测器软件开发**：搭建探测器仿真模拟和先进的事例重建框架，创新探测器的设计并指导探测器硬件的开发。
2. **CEPC探测器硬件开发**：在CEPC子探测器做开发研究，如采用新技术的径迹探测器或量能器；CEPC电子学读出开发：如对基于RISC-V指令集做探测器读出芯片的开发。
3. 使用的实验方法、仪器设备、数据软件等

**2.1 AMS方向**

1. **AMS L0探测器的升级**：

束流测试的重要目的是测量AMS L0探测器内部各子模块的相对位置（精度要求在微米量级）。由于L0的结构在测试中不是一个完整的独立探测器系统，因此需要结合外部的小型径迹探测模块，精确测量L0探测器内部各模块间的相对位置。基于严琪研究员开发的AMS独有的探测器准直算法，利用质子束流数据，进一步开发针对特殊的束流测试条件的探测器准直算法，对L0探测器内部各模块的位置进行精确定位。

1. **AMS探测器的重建算法及相关软件的开发**:

核心探测器算法的开发涉及实验物理、数学、以及计算机科学的交叉前沿，要求高的创新性。优秀的探测器算法不仅服务于探测器的设计和运行，还能从根本上重新定义探测器的性能。AMS是一个综合的磁谱仪，包括多种类型的子探测器，具有丰富的探测器算法。在AMS之前，尚没有先前的经验可以在极端的太空环境中使用精密磁谱仪进行粒子物理研究。探测器的工作条件会因其在发射入轨过程中所受的严重应力以及在轨道上连续变化的热环境而发生变化。特别是AMS最精密的径迹探测器组件在短时间内由于热胀冷缩导致的位置变化甚至可以达到几百个微米，而发生亚微米级的相对偏移将会严重影响高能宇宙线的测量结果。对探测器的理解和性能开发是实验物理的生命线，对实验结果至关重要。对物理数学感兴趣的学生可以参与此方面的训练。成熟优秀的工作将帮助AMS拓展探测能力，所开发的探测器算法及相关软件将被应用于整个AMS国际合作组。

1. **宇宙线能谱的精确测量**：

目前，AMS已对16种不同电荷的宇宙线原子核能谱进行了精确测量，覆盖了电荷数1≤Z≤14，Z=16和Z=26的原子核。未来，AMS将致力于对至少28种不同电荷的宇宙线能谱进行最为精确的测量，其中包括12种AMS尚未发表的高带电重原子核（电荷数分别为Z=15，17≤Z≤25，Z=28和Z=30）。这些宇宙线能谱的精确测量将为核合成过程、宇宙线的起源以及传播机制的研究提供重要的科学依据。这些研究中，需要对分析中的“事例本底”进行细致处理。事例本底来源包括有限的电荷分辨以及更高带电原子核与探测器相互作用的碎裂。此外，在探测器触发和数据采集效率的确定上，还要进行许多的研究。该实验研究基于严琪研究员主导开发的AMS软件和数据分析工具，对物理分析和物理测量感兴趣的学生可选择该课题。

1. **在宇宙线中寻找反物质（反氦核和其他反原子核）和其他新物理现象**:

过去半个世纪以来，物理学的一个主要研究是寻找解释宇宙中重反物质缺失的原因，也被称为重子生成的研究。重子生成需要强的CP对称性破缺和有限的质子寿命。迄今为止，尽管进行了多方实验努力，但未发现强的CP对称性破缺或质子衰变的证据。因此，观察到重反物质具有极其重要的意义。AMS作为唯一的精密磁谱仪，具有大接收度和长曝光时间，能够以比之前实验更高的灵敏度来研究太空中的反物质（反氦核和其他反原子核）。反氦核的搜索需要好于十亿分之一的本底抑制率，因此需对探测器有非常深入的理解。该实验研究基于严琪研究员主导开发的AMS软件和数据分析工具，对该物理课题感兴趣的学生可接受相关训练。

1. **宇宙线原子核同位素的成分测量**：

开展宇宙线原子核同位素成分测量，主要涉及到锂同位素（6Li、7Li）、铍同位素（7Be、9Be、10Be）、硼同位素（10B、11B）、以及氮同位素（14N、15N）等。这些同位素的差异在于粒子的质量，通过结合径迹探测器的刚度测量和飞行时间探测器或环形成像切伦科夫探测器的速度测量进行区分。同位素测量具有丰富的物理，例如，放射性同位硼同位素（9Be、10Be）的成份测量可用于估计宇宙线的“寿命”；氮同位素（14N、15N）可以帮助确定宇宙线中氮的初级成份（来自恒星核合成）和次级成份（由初级宇宙线在传播过程中与星际介质碰撞碎裂形成）；锂同位素（6Li、7Li）和硼同位素（10B、11B）则可以用于限定宇宙线的传播模型。该实验研究基于严琪研究员主导开发的AMS软件和数据分析工具，开展此课题的可使学生对粒子探测器技术和分析方法上有深入的认识。

* 1. **CEPC方向**

1. **CEPC探测器软件开发**：

探测器的设计直接关系到未来实验的成功。探测器的设计和优化必须通过探测器仿真模拟和事例重建来验证。探测器模拟用于描述粒子与探测器物质的相互作用（主要基于Geant4程序开发），同时模拟电子学和数据采集过程，生成探测器响应。而事例重建则用于将从探测器中获取的原始数据转化为物理事例信息，这个过程涉及许多复杂的算法和技术，旨在还原被探测到的粒子的性质，例如位置、动量、能量、种类等。通过结合探测器模拟和事例重建，并将其结果与物理目标进行比对，不仅服务于探测器的设计，还能够有效地确定探测器的性能指标要求，并指导探测器硬件技术的发展。CEPC的物理目标对于探测性能提出了极高的要求。课题组致力于将独特的粒子探测器理解、理念、经验和想象力融入到CEPC实验中，不断审视、优化、改进探测器的设计，为CEPC带来更多新元素。在探测器算法和软件方面，力争将前沿的数学物理思想、专业化的开发技能、创新的探索模式和国际化的管理理念引入CEPC。对CEPC探测器软件开发有兴趣的学生欢迎选择该课题。

1. **CEPC探测器硬件开发**：

对于探测器硬件研发，目前CEPC采用的绝大部份技术相对成熟和通用。在探测器底层研究和新的探测方法方面，CEPC还需要更多的原创性。CEPC是展示我国基础物理发展的重要窗口，不仅要立足当下，还要展望未来，才能为现在和未来的高能物理留下宝贵财富。RISC-V在高能物理中的应用是一个新兴方向，全球高能物理对该领域的研究甚少。RISC-V是一种开放精简指令集构架，应用潜力广泛，涵盖从嵌入式系统到高性能计算的各种场景。在计算机处理器领域，RISC-V有望与主流的构架x86与ARM构架并驾齐驱。对于小型、快速、低功耗应用，RISC-V是最为理想的选择。在高能物理实验中，RISC-V的一个非常有吸引力的应用方向是替代传统的专用集成电路（ASIC）。RISC-V可以显著降低电子学读出芯片的开发成本和门槛，尤其在高能物理芯片需求量不高的情况下。此外，RISC-V在灵活性和快速迭代方面具有独特优势，能够更好地满足高能物理实验的各种需求。这是课题组未来重点的研究方向，对先进探测硬件技术感兴趣的学生欢迎参与该课题。

1. 对学生专业知识背景等方面的要求

对申请者之前的研究背景没有严格要求，但需对粒子物理感兴趣并具备上进心。入选后，组内将进行系统的集中培训。

1. 项目预期目标、成果和收获

通过参与本项目，学生将对粒子探测技术和实验物理有较为清晰的了解。进入后学生将有机会接触世界级的实验团队，拥有广阔的视野和平台进行科学研究。期待入选的学生在创新方面对AMS国际实验组或CEPC项目作出贡献。优秀的候选者将有机会发表创新性的探测技术类文章，并有机会留在组内进行研究生学习，或被推荐至国际知名学术机构进行学习，例如麻省理工学院等。

1. **其他说明**

完成一个实验结果相对容易，但做好一个实验并不简单。很多时候，实验中的错误和关键的突破口在于基础层面。而发现这些问题找到突破口，往往来自于对专业基础的专研和兴趣。

希望入选学生能扎实地培养综合的科学素质和严谨的学术作风，瞄准国际前沿和成为世界级科学家的目标，并始终保持对基础物理的热情和激情。项目不仅着眼于当前的科研目标，更注重学生的全面成长和长远发展。欢迎更多优秀、有潜力、有志向的学生加入，也期待学生能够在未来的科研道路上取得卓越的成就。