

附件 1

数理科学部重大项目指南

2021 年数理科学部共发布 10 个重大项目指南，拟资助 5 个重大项目，项目申请的直接费用预算不得超过 1500 万元/项。

“超大型航天结构空间组装动力学与控制”重大项目指南

尺寸达千米量级的超大型航天器是未来空间资源利用、宇宙奥秘探索、长期在轨居住的重大战略性航天装备。超大型航天器结构重量和尺寸巨大，无法通过单次火箭发射和入轨展开方式构建，需通过结构模块化设计、多次发射和空间组装的方式进行建造；其次，超大型航天结构组装过程中，结构的超大尺度效应和构型变化效应与空间环境效应作用相耦合，将带来极其复杂的耦合动力学现象。这对超大型航天器的动力学设计提出了两方面的要求：一是结构的轻量化设计，以最大程度减少发射次数，降低建设成本；二是结构的可控性设计，以有效抑制组装过程中组合体轨道与姿态漂移、控制结构变形与振动。

瞄准超大型航天结构在轨组装建造的迫切需求，将航天动力学的三大研究对象“轨道”“姿态”和“结构”进一步融合，并与“控制”学科深度交叉，推动航天器耦合动力学与控制研究方向的发展，为超大型空间基础设施的建造奠定理论和技术基础。

一、科学目标

瞄准超大型航天结构的减重设计和空间组装需求，提出满足在轨动力学要求的组装结构轻量化设计新理论；建立空间组装过程的“轨道-姿态-结构”耦合动力学新模型，揭示空间组装过程的耦合动力学演化新规律；提出空间组装过程的“轨道-姿态-结构”一体化稳定控制新理论；探索解决超大型航天结构动力学试验

“天地一致性”问题的新方案。

二、研究内容

（一）超大型航天结构的轻量化和可控性设计。

提出新的超大型航天结构轻量化设计方案、发展满足超大型航天结构在轨动力学特性要求的新型组装模块、建立组装模块结构的可控性设计方法，实现超大型航天结构的大幅减重和结构-控制一体化。

（二）超大型航天结构空间组装过程的动力学演化。

发展超大型航天结构空间组装的“轨道-姿态-结构”耦合动力学建模方法；针对组装过程中的接触碰撞、变形振动、非保守力等问题，提出既能保持系统物理特性，又高效稳定的数值方法；揭示空间环境中超大型航天结构组装过程的动力学行为及演化规律。

（三）空间组装过程轨道-姿态-结构一体化稳定控制。

提出多约束条件下超大型航天结构“轨道-姿态-结构”控制执行机构的配置方法；结合轨道和姿态控制要求，以及组装过程结构拓扑变化、变形和振动特性，发展空间组装过程的“轨道-姿态-结构”一体化稳定控制方法。

（四）空间组装过程动力学与控制的地面模拟试验。

开展新型组装模块的动力学试验、组装过程的动力学响应与验证试验以及稳定控制试验；以地面试验中航天器动力学响应与其在轨响应一致为目标，提出面向超大型航天结构的高可信、高

精度地面动力学模拟试验方法。

三、申请要求

申请书的附注说明选择“超大型航天结构空间组装动力学与控制”。

“材料长效使役性能高通量表征的力学理论与实验方法” 重大项目指南

材料与结构的长效使役性能分析预测是固体力学的关键基础问题，也是保障重大工程装备服役安全的技术核心。但是，固体力学的传统理论与方法难以揭示材料与结构长效行为的演化机制，无法准确预测其使役寿命。材料与结构的长效行为横跨多个时空尺度，蕴含海量数据，对其采集、分析与处理并凝练挖掘内在的力学机理也提出了全新的要求和巨大的挑战。同时，大数据和机器学习的蓬勃发展为解决材料与结构的长效使役性能预测提供了新的契机和思路。

发展基于机理牵引的材料与结构长效使役性能高通量表征的力学理论与实验方法，推动固体力学研究新范式的建立。一方面，基于全场分析设计和指导制备梯度样品，创建和发展相应高通量实验技术，获得高效率、高物理相关度和内蕴力学机理的海量数据；另一方面，基于大数据和机器学习，挖掘材料与结构的长效使役行为与规律，构建短时数据与长效使役性能之间的映射关系，实现对其使役寿命的精准预测。

一、科学目标

建立基于全场分析的梯度材料表征力学理论，发展多重物性宏微观高通量测试技术，通过结构与性能关系的多尺度机理研究和机器学习，构建材料短时数据与长效使役性能之间的映射关

系，实现对其服役寿命的精准预测，应用于具有重要战略意义的高速列车车轴材料和全固态电池材料。

二、研究内容

（一）基于梯度样品全场分析的高通量表征力学理论。

针对宏观与微观层次的力、热、电、化多场耦合响应，开展基于三维连续介质理论的模型选择、改进或简化研究。发展解析、半解析和数值方法高精度、高效率求解对应物理模型的初边值问题，揭示梯度样品在多重多频载荷下力、热、电、化多场耦合响应的全场分布规律。结合海量实验与模拟数据，采用机器学习研究基于全场解的参数或函数时空反演方法。

（二）梯度样品宏观层次高通量表征实验方法。

研发基于第三代同步辐射光源和超声波的多场（力、热、电、化等）原位高通量测试方法与装备，实现梯度样品在多场环境加载下多重物性（力学性能、热学性能和电化学输运性能等）和材料微结构的高通量表征，揭示其短时演化规律，为长效服役性能精准预测提供海量数据支撑。

（三）梯度样品微观层次高通量表征实验方法。

发展时序激励多功能扫描探针方法与装备，高通量表征梯度样品局域多重物性定量信息，包括力学性能、热学性能和电化学输运性能等，并将其与材料微观显微结构关联，构建梯度样品多重物性空间分布及时间演化。运用所发展的方法研究机械疲劳样品局域结构性能演化和循环载荷固态电池力-电-化多场耦合性能

演化。

（四）机理驱动的使役行为跨时空尺度映射。

发展不同时空尺度和多场耦合作用下材料使役行为及其微结构演化的多尺度模拟新方法，揭示材料在力、热、电、化等多物理场耦合作用下的微结构演化规律及其对材料长效使役性能的调控机理。基于多时空尺度海量实验和模拟数据，通过机理牵引的机器学习，在微观与宏观、短时与长效多个维度建立材料使役行为的跨时空尺度映射关联，实现对高速列车车轴材料和全固态电池材料使役寿命的精准预测。

三、申请要求

申请书的附注说明选择“材料长效使役性能高通量表征的力学理论与实验方法”。

“活动星系核反馈在星系演化中的作用”重大项目指南

星系的形成与演化是天体物理研究的主要方向之一。近年来观测上陆续发现的一些重要结果，对传统理论提出了严峻挑战。目前的观点普遍认为，最有希望解决上述问题的方案是活动星系核反馈。活动星系核反馈是目前天体物理最热门的研究课题之一，近 20 年来的研究取得不少重要成果。但是，不管是在观测上还是理论上，不少关键科学问题并没有得到解决。

造成上述现状的主要原因是活动星系核反馈涉及的空间和时间尺度跨度非常大，比如从黑洞吸积盘到星系再到星系际介质空间尺度上跨越了 10 个量级，涉及黑洞吸积与活动星系核、星系形成与演化、以及大尺度结构与宇宙学等三个传统研究领域。拟通过这三个领域的深度交叉合作，充分发挥在这些领域积累的优势研究力量，依托国内外多波段观测，结合大规模数值模拟，系统研究活动星系核反馈在星系演化中起的作用，从理论和观测上对这一问题进行联合攻关，争取在若干核心问题上取得重要突破。

一、科学目标

获得不同光度活动星系核风的观测证据、以及风的速度、质量流与活动星系核光度的定量关系；将低红移星系气体的探测深度和中高红移星系的光谱数量提高一个数量级，并结合数值模拟，得到在不同红移处星系以及星系际介质的各种性质，特别是

星系的恒星形成率、气体含量、星系际介质的 X 射线、发射和吸收线，及其与活动星系核反馈的内在关系；发展并完成星系尺度上的高分辨率数值模拟程序，获得不同的反馈模式分别对星系中气体和恒星形成率的影响以及风与辐射各自在反馈中起到的作用；将基于最真实和准确的活动星系核物理，完成一组包含新模型的宇宙学数值模拟，大幅改进目前的宇宙学尺度星系形成与演化研究。

二、研究内容

（一）活动星系核风的观测研究：反馈的内边界条件。

利用从射电到 X 射线等不同波段的观测设备和数据，针对不同光度的活动星系核开展不同元素的蓝移吸收线、连续谱以及发射线等方面的研究，获得风的速度、空间分布、质量流等物理性质与活动星系核参数的关系；利用时域巡天获取一个间隙性活动的超大质量黑洞样本，开展多波段研究，给出黑洞间隙性活动的整体能量输出。

（二）星系尺度上的活动星系核反馈：观测研究。

利用测光数据、光谱数据和空间解析的观测数据，结合星系尺度上的活动星系核反馈数值模拟，研究不同红移的星系性质（如恒星质量、恒星形成率及其面密度分布、气体含量）和活动星系核性质（如瞬时亮度、黑洞的吸积率和质量）之间的相关性；观测中高红移的活动星系核和星系样本，并和低红移做比较，研究活动星系核反馈对星系的影响随红移的变化。

（三）星系尺度上的活动星系核反馈：数值模拟研究。

结合小尺度上活动星系核的观测研究成果，以及星系外大尺度上观测以及数值模拟给出的星系的引力势、星系吸积内流的物理性质（包括运动学以及热力学性质），并从空间维度的扩展、星系引力势、考虑尘埃的效应这几个方面，发展星系尺度上的高分辨率活动星系核反馈数值模拟程序，研究反馈的具体物理过程，得到各种可供观测检验的理论预言并与观测结果比较。

（四）星系外大尺度上的研究：观测约束以及宇宙学数值模拟。

将正确的活动星系核反馈物理加入到数值模拟中，促进宇宙学框架下的星系形成模型；通过大尺度宇宙学模拟得到星系以及星系群、星系团吸积气体的质量流、热力学状态及其演化历史、星系中的引力势及其演化历史，并作为“外边界条件”应用于星系尺度的数值模拟；分析比较大尺度结构中的观测和模拟数据，如星系际介质中的发射和吸收线、X 射线辐射和星系成团性等，以限制反馈模型。

三、申请要求

申请书的附注说明选择“活动星系核反馈在星系演化中的作用”。

“致密天体活动与爆发的宽能段时变与能谱研究”

重大项目指南

我国第一颗 X 射线天文卫星慧眼 (HXMT) 以及国内外其他空间天文高能卫星的成功发射与运行, 开拓了 X 射线宽能段光变和能谱研究的新窗口。

未来几年, 慧眼 (HXMT) 等高能天文卫星将为黑洞和中子星等致密天体活动与爆发现象的研究进一步提供丰富的观测数据, 存在很好的科学发现机遇。拟充分发挥慧眼 (HXMT) 等高能天文卫星的特色和优势, 在对黑洞和中子星等致密天体活动与爆发开展新的定点、全天监视和银道面巡天观测研究的同时, 也要重视发掘积累的大批存档科学数据, 结合各种多波段和多信使天文观测, 重点关注极端爆发现象、X 射线双星系统吸积演化、黑洞和中子星等致密天体基本性质, 全面深化和拓展对黑洞和中子星以及爆发现象的宽能段时变和能谱研究。

一、科学目标

发现几百个伽马射线暴, 建立 MeV 能区高统计性的伽马暴样本, 理解伽马暴相对论喷流的伽马射线辐射机制; 监测上百例引力波、高能中微子、快速射电暴等爆发现象, 揭示它们的爆发机制以及黑洞、中子星等致密天体的并合物理过程和机制; 系统地获得十余个吸积中子星双星和黑洞双星的高能 X 射线时变和能谱演化特征和分类, 理解黑洞周围的吸积过程、相对论喷流的

产生以及硬 X 射线辐射机制；测量约十个致密星（中子星或者黑洞）的基本参数（质量、磁场、自转），理解致密天体的基本性质；开展银道面巡天，监视约 200 个 X 射线天体的活动，发现致密天体硬 X 射线新的活动并且开展后随观测证认研究。

二、研究内容

（一）极端天体爆发的物理机制。

利用慧眼（HXMT）等空间天文卫星的长期和系统观测，获得一批高品质、覆盖几个 keV 到 GeV 能区的伽马暴光变和能谱，研究伽马暴时变特征和瞬时辐射物理；利用慧眼（HXMT）更多地观测磁星爆发活动，尤其是联合 FAST 进行多波段联测，从而对磁星和快速射电暴的性质和起源进行更深入的研究；利用慧眼（HXMT）卫星监测引力波、高能中微子和快速射电暴等特殊和重要爆发现象，揭示它们的爆发机制以及黑洞、中子星等致密天体的并合物理过程与机制。

（二）黑洞 X 射线双星系统吸积与喷流过程。

系统地观测研究在吸积率发生大动态范围变化时黑洞 X 射线双星的能谱和时变特征，研究最靠近黑洞的吸积盘的结构及其随吸积率的变化，确定吸积盘内半径和黑洞最内稳定轨道的关系；通过研究其高能非热辐射，确定黑洞附近的高温冕的几何以及理解其加热、冷却、辐射和运动学性质；系统寻找吸积黑洞的 X 射线喷流的观测证据，检验黑洞附近是否普遍存在小尺度 X 射线喷流并且理解其产生和演化机制；测量 X 双星中黑洞的自旋，

并且寻找这些系统中的最大和最小质量的黑洞的观测证据。

（三）中子星 X 射线双星系统吸积盘与中子星相互作用。

系统地观测研究在吸积率发生大动态范围变化时中子星 X 射线双星的能谱和时变特征，理解恒星星风、吸积盘与中子星磁场的相互作用，测量中子星的磁场强度；系统研究宽能段 X 射线脉冲的性质，理解中子星极冠区吸积柱的辐射机制；系统理解吸积脉冲星从低光度、到爱定顿光度、到超爱定顿光度的现象的多样性和统一性；通过对 X 射线暴的宽能段研究，理解中子星高温冕的加热和冷却机制以及吸积盘的可能磁重联过程；通过研究靠近中子星的吸积盘与边界层性质，限制中子星的半径。

（四）河内宽能段的巡天监测和后随观测研究。

利用慧眼（HXMT）等高能天文卫星对银道面进行系统的扫描巡天，给出河内硬 X 射线辐射源表及其短时标活动性的统计结果，并且构建银道面的 X 射线弥散辐射天图，建立更加精确的探测器本底模型，争取发现新的硬 X 射线活动天体或者硬 X 射线辐射新现象；对于所发现的暂现源，追溯已有国内外的广角光学巡天数据，寻找可能存在的相应光学对应体，同时利用国际联测网开展后随测光和测谱，进行光学证认并监测其各种时标活动的行为，理解其过程和性质。

三、申请要求

申请书的附注说明选择“致密天体活动与爆发的宽能段时变与能谱研究”。

“基于强太赫兹源的声子调控诱导电子新结构与物性研究”重大项目指南

强场太赫兹光源作为一种新型光源，在电子行为探测、操控、加速等领域具有独特的优势，为人类探索物质世界提供了新的手段。利用强场太赫兹光源，可以实现以往对电子的多场调控跨入通过声子对电子的强调控范畴，将人们对电子调控的认知从电子的准平衡态行为跨越到可控远离平衡态行为，从光与电子和晶格的微扰式相互作用向强非线性相互作用范畴跨越，这对丰富电子物态调控的物理内涵具有重要科学意义。

针对强场太赫兹源操控量子材料这一重大前沿科学问题，围绕高温超导体系、拓扑量子材料体系、催化合成反应等关键功能材料体系，研究满足调控要求的下一代强场太赫兹光源以及相应的超快研究手段，系统研究其声子激发调控机理和声子可控的非平衡态电子特征，揭示非平衡物理和化学过程伴随的电、光、磁、热相互作用机制和物理规律，指明具有突破现有准平衡态电子结构性能限制的调控及合成路径。项目的实施将推动非平衡态物性的探索和操控方法发展，将为信息和能源领域相关方向取得突破提供物理基础。

一、科学目标

围绕声子调控诱导电子新结构与新奇物性的研究目标，在研究手段上发展必要的突破现有太赫兹光源性能极限的强场产生

新方法，实现具有宽频（整体频谱范围覆盖 0.1-50 THz）、强场（场强突破 GV/m）、高重复频率、频谱连续可调等优异特征的强场太赫兹光源，并通过人工微结构实现太赫兹近场强光场微区再增强条件；重点开展强场下非平衡态电子的多自由度（电、热、磁、光、谷、轨道）动力学物理过程研究，揭示光子与各量子激发在超强太赫兹光场范畴内的相互作用新机理（如电子、声子及光子复合激发机理）；探索实现声子态调控的远离平衡态的新型量子态（如高温超导相、拓扑量子相、Floquet 量子态等）及化学反应（如合成氨反应）的远离平衡态相干操控新效应。

二、研究内容

（一）强场太赫兹源调控电子行为的理论研究。

建立太赫兹强场作用下声子和电子量子行为描述有效理论框架，建立具有热电子效应的非平衡载流子新量子态物理模型，包括含时多体微扰理论和非微扰理论；从第一性原理计算出发，发展计算量子材料体系 Floquet 准能带和哈密尔顿量演化动力学的普适方法，预言具有重要非平衡态物性的创新性电子材料体系。

（二）超强太赫兹光场构筑及实验方法研究。

在强场激光驱动下，基于电子加速、光学整流、激光差频等技术路线，构筑超强太赫兹光场，将现有太赫兹场强提高 1-2 个数量级，频谱覆盖 0.1-50THz；构筑能够与高重频硬 X 射线自由电子激光结合的高重频强场太赫兹光源，重复频率达到 100kHz，

发展多种泵浦-探测实验手段(包括太赫兹泵浦- X 射线衍射探测手段、太赫兹泵浦-红外/可见光谱探测手段、太赫兹泵浦-超快光电子能谱探测手段、太赫兹泵浦-扫描隧道显微探测手段等);通过微结构探索耦合自由电子新模式,以获得 3-5 个数量级太赫兹波近场增强、重频控制及光参量(偏振、方向、带宽及波前形式)可调谐。

(三) 强场太赫兹源对量子材料相干调控研究。

通过超强太赫兹光场与量子材料相互作用,实现通过声子调控诱导的对多种典型量子材料物态的相干操控研究,如高温超导相、拓扑相、电荷密度波相、金属相、铁磁铁电相;实现对 Floquet 量子态的观测与调控;利用选择性的偏振太赫兹强场激发,构筑电子-光子-声子的强耦合三体极化子并探索其量子新效应,揭示声子调控下的电子新物态形成光电功能结构的新功能;针对重要能源催化反应的快速步骤研究太赫兹脉冲对表面键和催化过程的调控机制,探测并揭示对该表面催化过程起关键作用的特定晶格振动模式,进而发现太赫兹诱导的选择反应新途径。

三、申请要求

申请书的附注说明选择“基于强太赫兹源的声子调控诱导电子新结构与物性研究”。

“基于铌酸锂薄膜的超高速多维光场调控及其应用基础研究”重大项目指南

利用高速高效率人工微结构实现光场多维度精确调控及其相互作用研究是物理科学研究的前沿，在复杂环境信息处理、超高分辨率光学测量、光通信、光学传感等领域具有广阔的应用前景。目前，人工微结构光场维度调控多聚焦于相干光场、线性效应、单一参数或多参数同时调控等，尚缺乏有效的时域上的高速动态调控。基于高品质铌酸锂薄膜人工微结构的电光调制器件，具有极高的调控速率与效率，可实现时域上的有效高速动态调控，是未来发展片上人工微结构光场高速调控的重要方向。

融合铌酸锂高速光调控新原理与人工微结构光场多维联合调控新机制，在新型铌酸锂薄膜上开展超高速多维光场调控技术研究，揭示铌酸锂薄膜复合少层微纳体系时空光场多维联合调控新机理，实现光场相干性快速实时动态调控及其精确测量，发展基于新型微纳复合晶格结构中光场局域和非线性增强的高效光场调控和相位匹配新手段，实现新型高效非线性光频率转换，发现新现象并揭示其物理机理。研究将推动人工微结构多维光场调控芯片在高速光信息、成像、传输等领域中的应用。

一、科学目标

针对片上全域光场快速调控的需求，通过超限制备技术突破铌酸锂薄膜新微纳结构、少层结构加工工艺，利用铌酸锂材料自

身的多重特性，实现对光场以及部分相干光场的多维度超高速调控，实现对光场的强局域与非线性调控；发展基于电光效应的人工微结构光场多维调控新方法，并阐明其物理机理。从基础铌酸锂薄膜材料微纳加工技术开始，到片上集成光子器件，最后到片上光场快速调控，建立不同于现有光场调控的新体系。

二、研究内容

围绕基于铌酸锂薄膜的超高速多维光场调控技术，发展基于电光效应的人工微结构光场多维调控新机理与方法；突破现有微纳加工技术的能力限制，开展铌酸锂薄膜刻蚀机理及微纳芯片制造工艺研究，利用高品质铌酸锂薄膜光场调控芯片实现超高速多维光场调控及其应用。

（一）铌酸锂刻蚀机理及铌酸锂薄膜微纳芯片制造技术。

通过多种微纳加工技术研究铌酸锂薄膜材料的精密刻蚀机理；探讨铌酸锂光子结构表面粗糙度和晶格损伤的影响机制；发展纳米尺度与精度的高效率、大尺寸铌酸锂薄膜材料精密加工工艺。

（二）铌酸锂薄膜莫尔晶格结构中光场局域及片上非线性增强。

研究基于铌酸锂薄膜材料莫尔晶格结构的光局域及其非线性增强机理，建立复合超晶格光子晶体能带结构的新调控方法及手段；产生全布里渊区内的平带并实现自动相位匹配非线性光学过程；利用非线性以及新型局域效应，实现片上光场频率维度的

高效转化和高速电光动态非线性调控。

（三）铌酸锂薄膜少层微纳体系时空光场多维联合调控。

研究铌酸锂薄膜复合少层微纳体系与光场相互作用的内在机制，以及铌酸锂薄膜微纳结构对光场多维联合调控新方案；利用铌酸锂薄膜的高效电光调控特性实现快速光场调控，解决现有光学人工微结构器件动态响应速度慢的核心难题；发展快速三维光谱层析等成像技术。

（四）基于铌酸锂薄膜的光场相干性快速调控及应用。

研究基于铌酸锂薄膜的光场相干性片上调控原理，探索基于片上电光效应的高效率部分相干光场空间相干结构动态实时调控及精确测量的技术方案；揭示新型相干结构部分相干光场在复杂环境中的传输特性；演示片上调控的新型相干结构部分相干光场在复杂环境光通讯与光信息加密、传递与解密中的应用。

三、申请要求

申请书的附注说明选择“基于铌酸锂薄膜的超高速多维光场调控及其应用基础研究”。

“粲夸克衰变中标准模型的精确检验”重大项目指南

高精度地检验粒子物理标准模型理论--描述电弱相互作用的电弱统一理论(EW) 和描述强相互作用的量子色动力学理论(QCD)、寻找超出标准模型的新物理是当前粒子物理研究最重要的前沿课题。粲夸克的质量处于微扰与非微扰 QCD 的过渡区域, 对含粲夸克的粲强子衰变开展高精度的实验测量和系统的理论研究为深入探讨强相互作用色禁闭本质、探索新的电荷共轭-宇称 (CP) 破坏机制、寻找对味结构敏感的超出标准模型的新粒子或新相互作用等提供了重要途径。

我国大科学实验装置北京正负电子对撞机/北京谱仪 (BESII I) 实验在阈值附近采集的海量粲强子数据, 其成对产生和低本底等独特性质为高精度研究粲强子的衰变性质提供了理想的窗口和契机。拟在 BESIII 实验上系统、精密地研究粲强子衰变, 结合系统的理论研究, 深入探讨粲强子弱衰变性质, 检验 EW 理论和 QCD 理论, 寻找超出标准模型的新物理, 同时为重味物理领域 B 介子实验精密测定如 CP 破坏相角等重大研究课题提供关键输入。

一、科学目标

利用 BESIII 采集的海量粲强子样本, 特别是在 3.773 GeV 采集的 20 fb⁻¹ 的数据, 充分发挥近阈粲强子成对产生、背景低和量子关联等独特优势, 开展中性粲介子量子关联特性的研究,

精确测量相关不同末态的平均强相位差和 CP 本征态成分比例，为 CKM 矩阵的 γ/ϕ_3 相角的精确测量提供关键参数；精确测量 CKM 矩阵元 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ ，检验 CKM 矩阵的幺正性，探索新的 CP 破坏来源；精确测量粲强子衰变常数和半轻衰变形状因子，与格点 QCD 理论计算值比较，刻度格点 QCD 计算，探寻超出标准模型新现象；系统地研究粲强子的强子末态衰变，研究强子谱学和末态相互作用，检验夸克味对称性；研究粲强子衰变，高精度检验轻子普适性，寻找稀有或禁戒的衰变过程，精确检验标准模型理论、寻找超出标准模型的新物理；在理论上发展和完善非微扰能区的格点 QCD 计算和有效理论模型，理解粲强子弱衰变的动力学，检验相关的唯象模型，提高对粲强子衰变中 CP 破坏、衰变常数和形状因子等理论预言的精度。

二、研究内容

（一）阈值处中性粲介子量子关联性研究。

利用 BESIII 获取的 $D\bar{D}$ 阈值数据，开展量子关联研究，精确测量 $D \rightarrow K_{S/L}^0 \pi^+ \pi^-$ 、 $D \rightarrow K_{S/L}^0 K^+ K^-$ 和 $D \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ 强相位差参数 $c_i^{(v)}$ 和 $s_i^{(v)}$ ； $D \rightarrow K^- \pi^+$ 、 $D \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0$ 、 $D \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$ 和 $D \rightarrow K_S^0 K^\mp \pi^\pm$ 关联因子和平均强相位差参数； $D \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 和 $D \rightarrow K^+ K^- \pi^0$ 的 CP 本征态成分的比例； $D \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 和 $D K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$ 的 CP 本征态成分的比例并测定强相位差参数 c_i 和 s_i 。通过系统性研究，大幅度提升强相位差参数的实验测量精度，满足未来精确测量 γ/ϕ_3 的精度需求。

（二）粲强子的强子末态衰变机制研究。

高精度测量粲强子衰变到强子末态的绝对分支比，解决实验上粲强子遍举衰变分支比总和不足 80% 的问题；精确测量粲强子参考模式 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ 、 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$ 、 $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ 、 $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$ 和 $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ 的绝对分支比，为实验测量其他衰变过程提供标定值；振幅分析粲强子的多体强子衰变，测量粲介子衰变到 VP、VV、SP 和 AP 末态的分支比（其中 V、P、S 和 A 分别代表矢量、赝标量、标量和轴矢量介子）；精确测量粲介子衰变到多 π 介子末态单举衰变模式的分支比以及相关不变质量谱；精确测量 $D \rightarrow K_{S/L}^0 X$ 中 K_S^0 和 K_L^0 遍举道分支比间的差异；精确测量 Λ_c^+ 衰变到 $B_n V$ 和 $B_D P$ 末态的分支比（其中 B_n 和 B_D 分别代表八重态重子和十重态重子）；检验理论计算非微扰效应的参数化方法和理论唯象模型，检验夸克 SU(2) 同位旋对称性和 SU(3) 味对称性，研究轻强子谱和重子谱，发展和完善基于夸克模型的理论。

（三）精确测量 CKM 矩阵元和粲介子衰变常数。

系统研究 $D_{(s)}^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 、 $D_{(s)}^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ ，寻找 $D_{(s)}^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ ，测量衰变常数 f_{D^+} 和 $f_{D_s^+}$ ，抽取矩阵元 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ ，提高衰变常数和矩阵元的测量精度，验证 CKM 矩阵幺正性和轻子普适性，精确检验标准模型，为 B 物理计算提供重要输入参数。提升格点 QCD 对粲介子衰变常数的计算精度，并与高精度实验结果比较，探索可能的物理新迹象。

（四）精确测量粲介子半轻衰变形状因子和检验轻子普适性。

在实验上，系统性研究粲介子的末态含赝标、标量、矢量和轴矢量介子等各类型电子半轻衰变，精确测量其衰变分支比，研究其微分跃迁率随 q^2 的依赖关系，抽取半轻衰变形状因子。测量 CKM 矩阵元 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ ，为高精度约束 CKM 矩阵的么正性提供重要补充约束，精确检验和深入探讨当前实验纯轻和半轻方法测得的 $|V_{cs}|$ 值之间 2 倍以上标准偏差的偏离现象。系统测量粲介子遍举缪子半轻衰变，高精度检验轻子味道普适性，检验当前实验测量和标准模型预期之间存在的 1.5-2.0 倍标准偏差。在理论上，开展格点 QCD 计算若干半轻衰变形状因子工作，与实验结果比较，检验是否存在显著偏差。

（五）粲强子衰变中探索新粒子和新相互作用。

系统地寻找 $c \rightarrow ull$ 的如 $D_{(s)} \rightarrow hl^+l^-$ 、 $D_{(s)} \rightarrow hhl^+l^-$ 和 $D_{(s)} \rightarrow hv\bar{\nu}$ 等包含味改变中性流过程的稀有衰变，研究这些过程中的长程和短程效应，对可能的物理模型进行有效的限制；寻找如 $D_{(s)} \rightarrow h(h)l^+l^+$ 、 $D_{(s)} \rightarrow h(h)l^+l'^-$ 、 $D_{(s)} \rightarrow \bar{n}(\bar{p})l^+$ 、 $D_{(s)}^+ \rightarrow \bar{\Lambda}l^+$ 等轻子数、轻子味、重子数破坏等标准模型禁戒过程；系统地寻找 $c \rightarrow \gamma u$ 反应粲介子到矢量或轴矢量介子的辐射衰变过程，测量其分支比及 CP 对称性，检验标准模型；寻找如 $D_{(s)}^+ \rightarrow \gamma l^+\nu_l$ 等稀有辐射衰变、 $D_{(s)}^+ \rightarrow l^+l^+l^-\nu_l$ 和 $D^0 \rightarrow l^+l^-l'^+l'^-$ 等多轻子末态纯轻衰变、以及如 $D_{(s)} \rightarrow invisible$ 、 $D_{(s)}^+ \rightarrow D^0 e^+\nu_e$ 等稀有衰变过程，扩展新物理探索的范围。

三、申请要求

申请书的附注说明选择“粲夸克衰变中标准模型的精确检验”。

“基于 LHAASO 实验的粒子天体物理前沿问题研究” 重大项目指南

宇宙线是来自宇宙空间的高能粒子，最高能量是人类最大粒子加速器所能加速粒子能量的千万倍，是联系无穷小粒子和无穷大宇宙的桥梁，与宇宙天体中的极端物理过程相联系。宇宙线的起源问题是粒子天体物理领域长期以来的核心科学问题，能量在 10^{15}eV 附近及以下的宇宙线起源于银河系内天体源，寻找和证明明确的宇宙线加速源是解决银河系内宇宙线起源的关键。 10^{15}eV 以上宇宙线在加速源区会与周围介质作用产生能量大于 10^{14}eV 的超高能伽马射线，超高能伽马射线是目前寻找宇宙线源的最佳手段。

基于 LHAASO 实验对超高能伽马射线测量的高灵敏度优势，将超高能伽马射线天文学带入一个新的时代，迎接观测中不断出现的新发现，基于 LHAASO 数据对宇宙线起源、加速和传播等前沿问题开展研究，寻找 10^{15}eV 及以上宇宙线的起源证据，冲击宇宙线起源这一重大科学问题，并对天体源内部的粒子加速和辐射过程开展深入的理论研究。

一、科学目标

瞄准银河系内 10^{15}eV 宇宙线起源这一重大问题，基于 LHAASO 实验数据精确测量每个超高能伽马射线源的辐射能谱、空间分布和时变，联合国内外射电、光学、X 射线等设备数据完成相

应天体源的多波段观测和分析，建立和优化多波段辐射模型，研究带电粒子在天体中的加速过程与辐射特征，寻找宇宙线起源和加速证据，同时基于 LHAASO 数据完成银盘弥散伽马射线、膝区宇宙线成分能谱和宇宙线大尺度各向异性测量，建立宇宙线在银河系内的起源、加速和传播的整体图像。

二、研究内容

（一）超高能伽马射线源的搜寻与测量。

能量大于 10^{14}eV 的超高能伽马射线天体源是寻找和认证 10^{15}eV 以上宇宙线加速源的重要候选体，需要基于 LHAASO 数据开展超高能伽马射线源巡天扫描，发现一批超高能伽马射线源，然后对其辐射进行深入测量。基于伽马射线寻找宇宙线源的关键是寻找辐射起源于强子辐射证据。因为辐射机制和冷却时标的不同，轻子源和强子源的辐射能谱和形态随能量变化行为不同，通过测量宽能量范围的辐射能谱和不同能量的伽马射线扩展度可以为寻找强子起源提供关键证据。

（二）伽马射线源多波段多信使研究。

起源于轻子辐射的伽马射线源，会同时通过同步辐射在低能波段产生射电至硬 X 射线的辐射；对于强子源，预期的同步辐射流量则会比较低。强子辐射的效率依赖于源内或周边气体的密度，后者则可以通过测量氢 α 线（光学波段）、CO 分子发射线（毫米波）、氢原子的 21 cm 谱线等来确定。强子起源的伽马射线会伴随同等能量的中微子产生。因此多波段、多信使的观测对于理

解超高能伽马源的物理性质、源区物理过程以及寻找宇宙线起源具有至关重要的作用。

（三）伽马射线源内的粒子加速、辐射与输运过程的研究。

银河系内重要的超高能伽马射线辐射源，是探寻超高能粒子加速器的有效观测手段，包括脉冲星及其风云、年轻大质量星团和超新星遗迹等天体。针对 LHAASO 及多波观测结果，利用 PIC 和 MHD 的数值方法，仔细研究不同天体环境下粒子的加速和辐射的过程，分析和总结其物理规律和可能的新物理；构建多波段非热辐射含时演化模型，合理解释观测结果。

（四）星际介质中弥散伽马射线相关物理研究。

基于 LHAASO 数据对银河系弥散伽马射线的分布、能谱进行测量，结合分子原子谱线观测得到的星际介质各成分的分布信息，研究宇宙线在银河系内的大尺度分布；对宇宙线在源附近的扩散与辐射进行数值模拟，研究天体源附近星际湍动磁场的性质，进而研究银河系内不同位置宇宙线的传播和起源的信息。

（五）基于宇宙线的能谱和各向异性测量研究其起源和传播。

宇宙线不同成分的能谱和大尺度各向异性中蕴含着其起源和传播的关键信息，虽然在传播过程中失去其方向信息。基于 LHAASO 对“膝”区宇宙线主要成分的能谱和大尺度各向异性进行精确测量，对宇宙线的成分、起源、传播问题、“膝”的成因问题以及太阳系附近湍动磁场的性质等问题开展深入研究。

三、申请要求

申请书的附注说明选择“基于 LHAASO 实验的粒子天体物理前沿问题研究”。

“先进核能系统中材料的若干协同损伤作用机理研究” 重大项目指南

在聚变堆等先进核能系统中，材料既遭受高能强流中子辐照，产生大量的离位损伤，又经受着高热负荷、强粒子流轰击及嬗变气体等的共同作用。中子辐照与多种因素的协同作用对材料造成的损伤及材料性能的退化比单因素独立作用下更为严重，这将对服役于先进核能系统中的材料提出更为严峻的挑战。因此，必须同时考虑中子辐照及相伴发生的多种因素对材料的协同损伤作用。

鉴于聚变能等先进核能对最终解决人类社会能源问题的重要性，我国及欧美等国家先后提出了在本世纪中叶实现聚变能发电的宏伟目标。然而，到目前为止，世界上还没有可用于材料辐照测评考验的高通量聚变中子源或聚变堆。国际学术界对高能中子等多因素共同作用下的材料协同损伤效应仅形成了初步的认识，亟需在其损伤机理及计算与实验模拟方法等基础研究方面开展深入研究。以多因素协同损伤作用的物理过程为基础，依托数学部和工材学部，发挥学科交叉优势，从协同作用的原初过程、协同损伤效应机理、大尺度计算模拟方法、多离子束实验模拟方法等多个方面，重点攻克聚变堆等先进核能系统中高能中子-氢-氦及中子辐照-粒子流-热负荷两类协同损伤作用机理的难题，从而为聚变堆等先进核能系统的材料筛选及测评奠定坚实的基础。

一、科学目标

瞄准服役于聚变能等先进核能的典型材料，充分利用国内大型托克马克、高热负荷测试和多束离子辐照等装置，厘清高能中子-嬗变氢氦、中子辐照-粒子流-热负荷两类协同损伤作用的耦合机制；阐明多种因素作用下材料遭受的协同损伤效应的机理；建立能够模拟上述协同损伤作用的实验与计算模拟方法；基于计算和实验模拟，实现在聚变堆等综合服役环境下国产低活化钢、氧化物弥散强化（ODS）钢、钨基合金等关键材料的筛选及性能评估。

二、研究内容

（一）高能中子辐照的离位损伤与氢、氦对材料的协同损伤作用机制研究。

针对聚变堆等先进核能系统不同空间位置氢、氦来源及方式等的差异，明确材料中离位缺陷和氢、氦的时空关联，阐明氢、氦在与离位缺陷协同损伤中的作用；实验测量并模拟计算在高能中子辐照下，氢-氦-空位等各类缺陷之间的耦合强度及对材料的协同损伤程度，揭示离位缺陷-氢-氦协同损伤作用的演化规律。

（二）高能中子辐照离位损伤与热负荷、粒子流对聚变堆第一壁协同损伤的作用机制研究。

针对聚变堆面向等离子体材料的服役环境，通过偏滤器靶板同量级高束流密度等离子体辐照与高热负荷实验，并结合多尺度计算模拟，揭示在强粒子流和高热负荷条件下，聚变堆中子辐照损伤对钨基第一壁表面侵蚀及气泡形成的增强作用和不同温度下钨基合金中辐照缺陷对氢同位素的捕获机制，以及中子辐照-

热负荷-粒子流协同损伤下钨基第一壁的力学和热学性能演化规律。

（三）多因素协同损伤效应的长时大尺度计算模拟方法建立。

发展多种损伤因素在时间和空间上耦合的计算模拟、不同损伤产生率下离位缺陷-氢-氦协同作用的大尺度计算模拟、协同损伤下典型材料宏观力学与热学性能演化的多尺度模拟等技术，建立模拟聚变堆等先进核能系统材料的高能中子-氢-氦与中子辐照-粒子流-热负荷等的协同损伤效应的计算模拟方法，并与实验模拟结果相验证。

（四）聚变中子-氢-氦协同效应的多离子束模拟实验方法建立。

发展重离子、氢、氦两束和三束离子同时精确辐照及在线观测技术，实现两个数量级以上调整优化辐照离位损伤率及氢、氦产生率的实验方法，并结合计算模拟结果，建立在微观尺度上模拟材料在聚变堆等服役环境下离位缺陷与氢/氦协同作用的多离子束辐照实验方法；实现在协同损伤作用下国产低活化钢、ODS钢等关键候选材料的性能评估。

三、申请要求

申请书的附注说明选择“先进核能系统中材料的若干协同损伤作用机理研究”。

“高精度 X 射线反射镜的关键科学与技术问题”

重大项目指南

同步辐射光源具备高亮度、高相干、高准直和光谱覆盖广的优势，能够在原子分子层次探索物质内部结构及演化规律，催生了一系列推动科学和技术发展重大研究成果。随着新一代同步辐射和 X 射线自由电子激光大科学装置的快速发展，基于超高亮度相干 X 射线光源开展纳米分辨的结构和谱学观测已经变得越来越迫切，这对于 X 射线光子的传输和调控提出了更严格的要求：一是解决反射镜表面形貌对相干 X 射线波前传输的影响问题，二是如何实现对相干 X 射线的超高精度操控和波前自适应补偿。

拟通过系统研究大尺寸单晶硅材料表面原子级形貌构建规律，突破 X 射线反射镜加工、形貌检测和光机集成等关键技术，形成具有自主知识产权的 X 射线高精度反射镜的全链条创新技术体系，在严峻的国际大环境下，保障我国光源大科学装置的建设实施，支撑前沿科学研究取得原始创新突破。

一、科学目标

基于超高精度反射镜表面形貌对相干 X 射线波前传输的影响，研究单晶硅纳米形貌的原子级构建规律，揭示超强 X 射线辐照下单晶硅材料和薄膜的损伤机理及力热变形机制；建立跨尺度全频谱纳米表面形貌的在线和离线高精度表征方法，发展大尺寸超高精度反射镜的复合加工技术和集成技术，实现相干 X 射线波

前的在线实时操控和自适应主动补偿；形成具有自主知识产权的 X 射线高精度反射镜的全链条创新技术体系。

二、研究内容

（一）大尺寸复杂轮廓单晶硅纳米精度表面形貌构造规律研究。

建立相干 X 射线波前反射传输及受形貌结构影响的理论分析方法，从原子尺度认识单晶硅宏微形貌各自的构建规律；基于不同加工方法，揭示包括低频轮廓、中频面形、高频粗糙度的全频谱形貌在纳米胶体颗粒、离子溅射和原子沉积等作用下的演化规律，阐明影响单晶硅表面纳米形貌形成的弛豫平滑或粗糙化等物理机制；发展基于化学机械抛光、离子束精修和轮廓镀膜等方法的超高精度大尺寸单晶硅的复合加工技术。

（二）全频谱纳米形貌的综合检测评估方法研究。

基于激光干涉和探针扫描等技术，结合功率谱密度理论，发展表面形貌精密拼接测量方法，获取全频谱跨尺度的纳米精度形貌信息；基于同步辐射光源，建立 X 射线波前在线检测的相关计算理论和方法，实现 X 射线波前的快速精准测量，溯源重建工作状态下反射表面的真实形貌。

（三）高亮度相干 X 射线与材料表面相互作用机制。

针对超高亮度相干 X 射线辐照，建立从飞秒到微秒不同时间尺度下 X 射线光子与薄膜材料内部电子、晶格等的吸收、激发、传导多物理场模型，揭示极端光场下材料与 X 射线的相互作用机

制；探索薄膜材料新结构，在保证 X 射线高效反射的同时提高抗损伤性能，并发展大尺寸高均匀性镀制技术，将薄膜的结构一致性提升至亚纳米水平。

（四）光机集成系统中跨尺度表面形貌的多物理场影响规律研究。

建立超高亮度 X 射线辐照下单晶硅反射表面热负载产生和分布的理论模型，阐明冷却导热和夹持接触方式对反射表面纳米尺度形貌和 X 射线波前的影响机制。面向元件工作时热负载、装配加持和重力变形等问题，发展高精度集成加工技术，研制具有超低形变特性的光机一体化结构；面向 X 射线衍射极限聚焦需求，发展相干 X 射线完美波前的在线实时操控和自适应主动补偿技术。

三、申请要求

申请书的附注说明选择“高精度 X 射线反射镜的关键科学与技术问题”。