

附件 1

数学物理学部重大项目指南

2023 年数学物理学部共发布 9 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。

“新一代高速列车转向架轻量化设计中的动力学与可靠性问题”重大项目指南

新一代高速列车的运行速度高达 400-500km/h，必须降低其簧下质量，减小轮轨间动态作用力。复合材料、钛合金等轻质材料的使用对转向架动力学设计和改善高速列车服役性能提出了新的挑战。因此，解决轻量化高速转向架的动力学与控制、服役状态评估及寿命预测问题是新一代高速列车安全可靠运行的迫切需求。

一、科学目标

针对新一代高速列车轻量化设计的关键动力学问题，揭示复杂激励下轻量化转向架非线性振动传递和损伤破坏机理，探索其服役性能演化规律，发展转向架复杂动力学行为状态感知、损伤识别和故障诊断方法，建立以轻量化和智能化为目标的转向架动力学设计与可靠性理论，指导新一代高速列车研发。

二、研究内容

（一）轻量化转向架非线性振动传递机理与动态响应分析。

针对复合材料、钛合金等轻量化转向架构架，建立复杂激励和非完备参数条件下弹性构架的高保真动力学模型；构建考虑基础力学参数长期演变的转向架系统刚柔耦合非线性动力学数值模型；揭示多源激励下的转向架振动传递动态演变规律与机制，提出基于多目标集成优化设计的转向架系统动力学分析方法。

(二)复杂激励下轻量化转向架关键部件的损伤演化机理及可靠性评估。

开展轻质材料在复杂载荷作用下的循环变形实验研究,构建考虑振动载荷时变效应的统一耦合损伤循环本构关系和疲劳寿命预测模型;建立轻质材料构架的多尺度分析模型,揭示轻质转向架关键部件在全服役周期内的性能劣化和损伤演化规律;发展考虑载荷时域动态效应的疲劳评估方法,评估轻量化转向架的可靠性。

(三)轻质材料转向架系统动力学行为感知-识别-诊断及其对动力学设计的影响。

建立轻质材料转向架系统的损伤动力学模型,揭示复杂动力学行为的产生机理及演化规律,建立关键结构和部件的智能感知理论和方法;在非完备信息条件下,突破轻质材料转向架系统的智能识别与诊断关键技术;建立综合考虑非线性动力学、可靠性与服役性能演化的轻量化高速转向架动力学设计理论。

三、申请要求

(一)申请书的附注说明选择“新一代高速列车转向架轻量化设计中的动力学与可靠性问题”,申请代码1选择A07及其下属申请代码。

(二)咨询电话:010-62327178。

“增材制造金属内部缺陷可视化重建与服役性能调控研究”重大项目指南

增材制造金属材料服役寿命的不足严重制约其在重大装备的推广应用，由内部缺陷导致的失效是增材制造金属材料服役安全的核心影响因素之一。精确高效的多维度、多时空尺度内部缺陷可视化重建，为材料内部失效表征和性能优化提供了有力支撑。因此，开展内部缺陷三维表征及其相应动态损伤演化机理的研究，是当前金属增材制造长寿命、高可靠性服役性能提升与工艺优化的基础。

一、科学目标

针对内部缺陷导致增材制造金属抗疲劳性劣化，特别是长寿命服役不足的关键问题，开展内部缺陷的可视化重建、动态损伤演化及其长寿命性能调控研究，建立增材制造工艺设计-缺陷表征-损伤演化-性能评价的多维度长寿命一体化技术，推动增材制造在航空、航天、能源等重大装备中的应用。

二、研究内容

（一）内部缺陷形貌与力学信息三维表征与可视化重建。

基于先进无损表征技术，开展增材制造金属材料内部缺陷的三维表征与可视化重建研究，建立量化缺陷三维形貌及全场分布规律的大数据描述技术，发展服役过程中内部缺陷力学信息的采集与分析方法，构建内部缺陷与力学损伤的跨尺度影响关系。

（二）内部缺陷和微结构形成力学机理与调控。

发展熔融凝固及缺陷/微结构形成的多物理场、多尺度数值计算方法，研究增材制造工艺与内部缺陷/微结构形成的关联机制，探究代表性金属材料的形性协同长寿命增材制造机理，研发基于超声辅助的缺陷/微结构长寿命抗疲劳调控技术。

（三）超长寿命服役内部失效机理与寿命预测。

研究超长寿命服役内部裂纹萌生及扩展的微纳尺度多场耦合机制，探究残余应力对服役性能及其动态演化规律的影响关系，建立基于机器学习的内部缺陷损伤与超长寿命服役性能的关联规律，发展数据与机理双驱动的增材制造材料服役寿命预测技术。

（四）工艺设计-缺陷表征-损伤演化-性能评价的多维度长寿命一体化。

研究材料宏观服役性能与制造工艺之间的构效关系，建立增材制造工艺-缺陷表征-损伤演化-性能评价的映射规律和多维度跨尺度一体化技术，发展先进增材制造材料/结构的长寿命抗疲劳设计与优化方法，为工艺设计、强度和寿命评价奠定基础。

四、申请要求

（一）申请书的附注说明选择“增材制造金属内部缺陷可视化重建与服役性能调控研究”，申请代码 1 选择 A08 及其下属申请代码。

（二）咨询电话：010-62327178。

“基于 EP 卫星的快速暂现源时域天文研究” 重大项目指南

对暗弱遥远的高能快速暂现源的系统性探测和刻画是多波段、多信使时域天文学的关键问题。由我国主导的爱因斯坦探针 (EP) 卫星将在软 X 射线波段开展快速巡天监测, 以发现各类高能暂现源。利用 EP 的探测灵敏度和定位精度优势, 将获得高能快速暂现源的系统性、大样本的数据, 在高能快速暂现源领域的科学发现和研究方面具备极大潜力。

一、科学目标

利用 EP 卫星系统性开展快速暂现源的时域巡天监测, 获得更加完备的各类快速 X 射线暂现源的观测样本, 并开展多波段深度后随观测研究。增进对几类重要的快速暂现源的族群及物理机制的理解。

二、研究内容

(一) 引力波 X 射线对应体的搜寻与研究。

利用 EP 和 EP-WXT 探路者 LEIA 开展引力波源的 X 射线对应体的搜寻、定位、后随观测和研究, 对并合形成磁星的事件率以及中子星物态方程进行限制。

(二) 伽马射线暴的 X 射线观测研究及高红移伽马射线暴探测。

在软 X 射线波段开展与更高能段设备的协同观测, 针对 X 射线闪、低光度伽玛射线暴、超长伽玛射线暴和伽玛射线暴前兆辐

射等特殊伽玛射线暴及现象开展探测和理论模型研究。开展高红移伽玛暴的搜寻和观测。

（三）新型快速暂现源的发现和研究。

利用 EP 卫星的快速时域巡天数据，发现和研究几类新型快速暂现源，如超新星激波暴、白矮星新星爆发的火球阶段、快速射电暴的 X 射线对应体等，并在更大的灵敏度-采样率参数空间范围尝试发现前所未有的快速暂现天体和现象。

（四）恒星活动性的系统性研究

开展太阳系邻近恒星的 X 射线耀发的全天系统性普查。建立大样本的恒星 X 射线耀发事件，对恒星耀发和活动性开展系统性的分类和演化研究。捕捉极端恒星耀发事件和星冕物质抛射，研究恒星耀发对类地行星可宜居性的影响。

（五）快速暂现源的多波段后随和协同观测研究

建立多波段后随观测网络，开展 EP 暂现源的多波段后随观测及多波段对应体证认。与其它设备协同开展对快速暂现源的 X 射线后随及联合探测。开展海量多波段时域天文数据的融合及针对暂现源的高级数据分析方法研究。

五、申请要求

（一）申请书的附注说明选择“基于 EP 卫星的快速暂现源时域天文研究”，申请代码 1 选择 A14 或 A15 或二者的下属申请代码。

（二）咨询电话：010-62325940。

“基于 2.5 米大视场巡天望远镜 WFST 的致密天体高能爆发研究”重大项目指南

致密天体是天文学和物理学中重要的研究对象。它们产生的高能爆发现象能够揭示致密天体的形成和演化，其多信使辐射也携带了极端条件下物理规律的信息。基于 WFST 开展的多波段测光巡天并结合其他观测设备开展联测，有望在各类高能爆发现象的核心科学问题上取得重要突破。

一、科学目标

通过 WFST 及其他观测设备的协同观测，并结合数值模拟及理论分析，揭示各类高能爆发现象的物理机制，理解极端条件下的物理规律和过程，并对进一步限制宇宙学基本参数以及检验物理学基本原理提供全新的研究视角。

二、研究内容

（一）超新星及相关新型暂现源研究。

基于 WFST 巡天发现大量超新星及其他与超新星相关的新型快速暂现源，通过后随跟踪观测获得极早期多波段光变和光谱演化信息，进一步探究超新星和新型暂现源的多样性和起源，构建世界上最均匀完备的低红移 Ia 型超新星标准烛光样本，进一步限制在特定红移范围内的宇宙学参数。

（二）引力波电磁对应体研究。

利用 WFST 开展引力波事件后随观测，寻找可能的电磁对应

体。特别是在 LIGO 等引力波探测器的 O4 和 O5 期间，试图探测大部分位于北天区的低红移双中子星并合、部分中子星-黑洞并合所伴随的光学辐射，并用以限制中子星物态、超铁元素起源、宇宙学参数等重大科学问题。

（三）伽马射线暴和快速射电暴研究。

通过对伽马射线暴开展 WFST 超短时标高精度测光跟踪，并结合空间高能观测数据组成的能谱，为揭示伽马射线暴相对论喷流物理及诊断伽马射线暴辐射机制提供线索。通过与 FAST 开展协同观测和借助 WFST 的海量巡天数据研究快速射电暴的起源问题。

（四）黑洞潮汐瓦解事件研究。

通过 WFST 时域巡天探测黑洞潮汐瓦解事件，结合其他后随跟踪观测进一步理解其光学辐射的物理机制。凭借 WFST 巡天的特色优势试图发现中等质量黑洞和双黑洞潮汐瓦解事件的光学对应体等新型暂现源。

六、申请要求

（一）申请书的附注说明选择“基于 2.5 米大视场巡天望远镜 WFST 的致密天体高能爆发研究”，申请代码 1 选择 A14 或 A15 或二者的下属申请代码。

（二）咨询电话：010-62325940。

“红外光电子器件的子带过程”重大项目指南

红外量子级联激光器(QCL)和量子级联探测器(QCD)是以半导体超晶格能带工程为理论基础的、具有级联特征的、子带过程调控的红外光电子器件。QCL 具有尺寸小、功率大、波长调节范围宽等特点，在智能感知、自由空间通信等领域具有重大需求；QCD 具有功耗低、噪声小等特征，有望为解决深空探测战略发展方向上面临的弱信号红外探测难题提供全新的技术方案。

本项目旨在研究低维半导体结构中电子-光子-声子与界面-应变-组分-结构-外场等的相互作用的物理问题，发展复合结构的超晶格能带工程理论，设计高效的 QCL 和 QCD 器件，突破现有的子带过程调控的电光/光电转化效率极限，为促进我国红外光电子科技创新提供可行的方案。

一、科学目标

本项目针对 7-20 μm 波段高光电转化效率的 QCL 和 QCD 器件，拟重点研究与子带过程相关的能带工程理论和器件验证，发展量子阱/量子点复合(混合维度)结构的能带设计理论，加强对级联结构子带过程及其衍生新现象的系统认识，设计出长波红外量子级联结构，研制出高效率的 QCL 和 QCD 器件。

二、研究内容

(一) 量子级联结构的激发态理论及高效率器件设计。

建立量子级联结构中超越简单电子有效质量近似、可描述原

子尺度缺陷、表面涨落等现象的电子、声子、光子的耦合与动力学模型；揭示量子级联结构子带中电子、光子、声子与微结构相互作用规律以及电子动力学过程；发展可用于 QCL 设计的方法。

（二）量子级联器件相关结构散射机制的光学表征。

发展红外泵浦-探测时间分辨载流子动力学研究技术，揭示量子结构子带过程中载流子的超快演化特征；发展低至 5 波数的光散射技术，研究量子结构子带间跃迁和级联结构声子折叠效应和电子-声子散射；利用红外和调制光谱等技术研究级联器件相关结构的电子能级、子带间跃迁和界面散射等物理过程。

（三）量子级联器件的结构-效能协同调控。

发展高时空分辨的纳米分析技术，建立 QCL/QCD 性能与微结构、界面特征、载流子分布、能态变化、量子隧穿效率的对应关系；研究结构演变、外场调控等对器件性能的影响规律；研究电、光、应力、热等多物理场耦合作用对器件性能协同调控作用，确定器件的宏观性能最佳窗口。

（四）高效量子级联器件性能预测及验证。

发展多重应变 QCL/QCD 材料制备技术和原子级尺度可控制备；构建高电光转换效率的、具有本征 TE 和 TM 模式的量子点 QCL，在 7-20 μm 波段 QCL 的电光转化效率峰值 $>12\%$ ；构建正入射响应、可室温工作的双色量子点 QCD，甚长波 QCD 峰值探测率 $>1\times 10^{12} \text{ cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，工作温度 77 K@20 μm 。

三、申请要求

(一)申请书的附注说明选择“红外光电子器件的子带过程”，
申请代码 1 选择 A20 及其下属申请代码。

(二)咨询电话：010-62325055。

“少电子原子分子精密谱”重大项目指南

量子电动力学 (QED) 是原子分子精密谱的理论基础。少电子原子分子体系是检验束缚态 QED 理论的独特平台。当代激光技术和冷原子物理的诞生与发展, 导致原子分子光谱精密测量的开拓和深入。开展少电子原子分子体系精密光谱研究, 可以高精度确定基本物理常数, 检验物理学基本定律, 探测原子核效应。

本项目旨在发展少电子原子分子体系精密谱测量方法和束缚态 QED 理论, 高精度检验 QED, 高精度测定相关的基本物理常数以及核参数, 进一步将核参数相关的实验和理论有机结合, 初步建立原子核结构参数精密测量平台。

一、科学目标

制备高度可控的少电子原子分子量子态; 发展相关原子分子同位素位移、(超)精细结构劈裂或振转跃迁光谱测量技术; 发展少电子原子分子光谱的束缚态 QED 理论; 研究类氦离子精细结构劈裂高阶 QED 效应随原子序数 Z 变化的规律, 高精度测定精细结构常数; 测定相关原子核的电磁极矩、核电荷分布半径与核电磁分布半径 (Zemach 半径) 等核结构参数。

二、研究内容

(一) 少电子原子分子精密谱理论。

发展氦原子及低 Z 类氦离子体系的高阶相对论和辐射修正理论和计算方法; 获得高阶 QED 效应随 Z 变化的规律; 发展 $Z \sim 20$

类氦离子体系的全关联相对论原子结构的全阶计算方法；发展氢分子及其离子的振转跃迁谱相应的高阶相对论和辐射修正理论。

（二）氦原子精细结构与核半径测量。

发展氦原子光谱精密测量方法，在优于百赫兹水平上检验 QED；根据 ^3He 超精细结构劈裂及 $^3,^4\text{He}$ 同位素位移的测量，分别定出 ^3He 原子核的 Zemach 半径，精度优于 5%，以及氦 $^3,^4\text{He}$ 电荷分布半径均方差，精度优于 0.1%；检验核结构模型。

（三）锂原子精细结构与核半径测量。

发展极紫外波段光梳技术和直接光梳光谱方法，测量锂离子和锂原子的同位素位移和（超）精细结构劈裂，精度优于 10 kHz；基于超精细结构劈裂测定锂原子核的 Zemach 半径，精度优于 1%；测定锂原子核的电荷分布半径均方差，精度优于 1%。

（四）类氦和类锂重离子精密谱测量。

发展精密谱绝对定标技术和电子离子复合共振技术，实现光谱测量相对精度优于 10^{-5} ，复合谱精度优于 10 meV；高精度获取类氦、类锂等少电子重离子体系能级跃迁频率，研究相对论效应、QED 效应、电子关联效应和原子核效应，提取原子核结构参数。

（五）氢分子（离子）振转跃迁频率测量。

实现对氢分子及其离子体系振转态的激发和探测；获得相对精度在 10^{-11} 量级的振转跃迁频率，并高精度测定跃迁强度、体系的极化率、超精细结构劈裂等物理量；探索在分子体系中检验 QED、测定基本物理常数、获取核参数的新方案。

三、申请要求

(一) 申请书的附注说明选择“少电子原子分子精密谱”，申请代码 1 选择 A21 及其下属申请代码。

(二) 咨询电话：010-62325055。

“面向下一代 EUV 光刻的光与物质相互作用若干重要前沿问题”重大项目指南

人工智能、云计算、移动通信、物联网等的快速发展对高端芯片需求极其强烈，其制造能力以先进制程节点为标志。当前国际上研发的下一代 EUV 光刻机有望在 2025 年开始应用，对应的先进制程将进入 2nm 节点时代。下一代 EUV 光刻采用高数值孔径（NA）曝光光学系统，分辨率小于 10nm，对光刻胶和掩模制备检测都提出了极高的要求。

本项目瞄准下一代 EUV 光刻的关键材料需求，探索建立超高分辨率 EUV 曝光实验研究平台，开展 EUV 光源与物质相互作用中的关键科学问题研究，揭示超高分辨率、高灵敏度光刻胶曝光作用机理，为我国下一代 EUV 光刻技术的研发提供科学支撑。

一、科学目标

探索面向下一代 EUV 光刻的光与物质相互作用前沿科学问题，通过实验和理论研究 EUV 光刻胶曝光机理，获得 EUV 光刻胶材料性能关键数据；通过分子结构调节设计发现合适的 EUV 光刻胶材料；发展新型超高分辨掩模缺陷检测方案，基于多种技术路径设计掩模并对光源调控，实现掩模 3D 效应抑制；发展针对高 NA EUV 光刻技术的曝光模拟技术，研究超高分辨率的曝光实验装置，为我国下一代 EUV 光刻技术的研发提供原理和方法支撑。

二、研究内容

（一）高 NA EUV 光刻条件下超薄光刻胶性能研究。

研究膜厚 $<20\text{nm}$ 光刻胶线边缘粗糙度（LER）和缺陷产生的机理，阐明光刻胶分子结构对 LER 的影响机制；研究图形剥离以及塌陷等问题，基于多尺度计算方法，建立反应机理模型，为高 NA EUV 光刻条件下超薄光刻胶研制提供理论支撑。

（二）高 NA EUV 光刻条件下掩模检测和 3D 效应抑制。

探索通过新吸收材料掩模研制、可调堆栈设计、光源整形和亚分辨辅助结构设计等抑制掩模 3D 效应的新策略，解决光子以更大的角度撞击掩模导致严重的掩模 3D 效应问题，保护膜透过率超过 70%，形成尺寸 $\leq 14\text{nm}$ 的掩模缺陷识别检测方案。

（三）高 NA EUV 光刻条件下曝光机理研究。

研究光刻胶分子在吸附二次电子或者被电离后化学键断裂后产酸的物理机制；利用人工智能技术预测并设计新型光刻胶材料，探索新型光刻胶如 EUV 金属氧化物团簇光刻胶工作机理，并基于实验数据和理论分析构建 EUV 光刻胶材料性能数据库。

（四）面向高 NA EUV 光刻的曝光实验平台。

发展曝光模拟技术，建立小于 10nm 超高分辨率 EUV 曝光实验平台，光刻胶靶面曝光功率达到 mW 级；探索高分辨率、高灵敏度的光刻胶性能表征和动力学探测方案，分析光源参数对超高分辨率 EUV 光刻的影响，促进光刻材料和光刻工艺的研发。

三、申请要求

（一）申请书的附注说明选择“面向下一代 EUV 光刻的光与

物质相互作用若干重要前沿问题”，申请代码 1 选择 A22 及其下属申请代码。

(二) 咨询电话：010-62325055。

“利用高海拔宇宙线观测站研究宇宙线起源问题”

重大项目指南

基于高海拔宇宙线观测站（LHAASO）开展超高能伽马射线天文学研究，已经成为伽马天文研究领域的主要方向之一。LHAASO 发现超高能伽马射线源广泛存在于银河系，经过连续几年的稳定运行观测，与超高能伽马射线源相关的新现象爆发式涌现。基于 LHAASO 深入开展伽马源的观测与相关粒子天体物理分析研究，寻找和认证宇宙线加速源，将有助于破解宇宙线起源这一世纪科学难题。

一、科学目标

基于 LHAASO 长期稳定的观测数据，对超高能伽马射线源开展高灵敏度巡天普查，精确测量其辐射能谱、分布形态和时变特性；结合多波段观测资料分析，建立辐射模型，研究粒子在天体源内部的加速机制；测量源区附近伽马射线强度分布，研究宇宙线向星际空间的注入机制；测量银盘上弥散伽马射线强度分布，探索宇宙线在银河系内的分布和传播规律。通过对宇宙线的产生源、加速机制以及星际传播等全面的研究，向破解宇宙线起源难题发起冲击。

二、研究内容

（一）超高能伽马射线源的搜寻与测量。

基于LHAASO观测数据，搜寻新的 10^{14}eV 以上超高能伽马射

线源，为寻找和认证 10^{15}eV 以上宇宙线加速源研究提供重要候选体；精确测量各类型超高能伽马射线辐射天体源的能谱、分布形态和时变特性，为揭示加速机制和辐射机制提供重要观测证据。

（二）伽马射线源多波段多信使研究。

基于LHAASO观测数据，研究超高能伽马射线源的多波段、多信使特性，发现区分不同辐射机制的关键证据；构建并发展唯象理论模型，确定超高能伽马射线源的主导辐射机制；探寻宇宙线起源和加速的关键证据。

（三）伽马射线源临近区域粒子输运过程研究。

利用LHAASO极佳的伽马射线探测灵敏度，深度探索伽马射线源及其临近区域辐射特征；结合数值模拟，研究宇宙线粒子从加速源区注入星际空间的逃逸、扩散特性以及随能量的演化规律。

（四）星际介质中弥散伽马射线相关物理研究。

基于LHAASO观测数据，精确测量银河系弥散伽马射线的空间分布和能谱；结合星际介质各成分的空间分布信息，研究宇宙线在银河系内的大尺度分布；结合宇宙线加速源的空间分布和天体源种类，探寻宇宙线传播规律。

三、申请要求

（一）申请书的附注说明选择“利用高海拔宇宙线观测站研究宇宙线起源问题”，申请代码1选择A2606。

（二）咨询电话：010-62325069。

“利用多核子转移拓展重质量和超重区核素版图”

重大项目指南

登陆超重稳定岛是自然科学领域亟待解决的重大前沿问题。拓展丰中子重质量和超重区核素版图是解决该科学问题的前提，多核子转移反应被认为是最有潜力的产生该区域核素的有效方法。本项目坚持理论和实验结合，结构与反应协同，系统研究原子核间基于多核子关联的大质量转移机制，拓展重质量和超重区核素版图，为在我国重大科技基础设施 HIAF 上登陆超重稳定岛奠定基础。

一、科学目标

在理论研究方面，建立包含多核子关联的核结构模型和包含集团转移的重离子反应模型，突破现有理论难以描述大质量转移的局限。在实验技术方面，研究重质量区原子核性质和多核子转移机制，发展重质量和超重区新核素鉴别技术，合成若干重质量新核素。提出登陆超重稳定岛可行路径。

二、研究内容

（一）重质量区核结构的微观理论研究。

针对重质量和超重区原子核，构建包含多核子关联的模型组态空间和有效相互作用；预言重质量区原子核结构演化的特点和规律。

（二）多核子转移反应的理论研究。

发展包含多核子关联的微观输运等核反应模型，研究大质量转移反应机制；建议合成重质量和超重区新核素的实验方案；提出通往超重稳定岛的可行途径。

（三）重质量、超重核结构的实验研究。

研究中子幻数 126 附近原子核的结构和衰变特性；研究质子幻数 82 以上的质子壳层结构演化；探索下一个质子幻数及超重稳定岛的位置。

（四）多核子转移反应机制的实验研究。

建立反应产物质量和能态的识别技术；结合初末态核结构信息，研究大质量转移反应机制；通过不同弹靶组合和反应能量扫描等手段，提出重质量和超重区丰中子核的产生方法。

（五）重质量和超重区新核素的合成与研究。

建立基于多次反射飞行时间质谱技术的核素鉴别方法；通过多核子转移反应产生并鉴别若干种重质量和超重区新核素，拓展核素版图；研究与重核结构演化相关的原子核性质。

三、申请要求

（一）申请书的附注说明选择“利用多核子转移拓展重质量和超重区核素版图”，申请代码 1 选择 A27 及其下属申请代码。

（二）咨询电话：010-62325069。