

## 附件 1

### 数理科学部重大项目指南

2020 年数理科学部共发布 11 个重大项目指南，拟资助 6 个重大项目，项目申请人申请的直接费用预算不得超过 1800 万元/项，资助年限为 5 年。

申请书的附注说明选择相关重大项目名称，例如“不可压 Navier-Stokes 方程解的定性分析”（以上选择不准确或未选择的项目申请不予受理）。

# “不可压 Navier-Stokes 方程解的定性分析”

## 重大项目指南

偏微分方程是物体的运动与演化和客观世界的发展变化的量化表述。物理学、力学等学科的许多基本定律就是通过偏微分方程来描述的。在生命科学和经济学中，偏微分方程也被用来描述复杂系统的行为。对自然界的精确描述往往是通过建立相应的数学模型来实现的，而其中相当多数的数学模型被归纳为偏微分方程，偏微分方程成为了分析数学与应用科学之间最重要的桥梁。这些方程的研究对于自然科学、工程技术和社会科学的发展都起着重要的作用。偏微分方程的理论研究，也大大推动了分析学的发展。毫无疑问，函数空间的理论和泛函分析是由偏微分方程的研究直接推动而产生并完善的。而且，偏微分方程也成为解决基础数学中一些重大问题的有用手段，几何分析就是一个典型例子。许多著名的偏微分方程来源于重要的实际问题。不可压 Navier-Stokes 方程是流体力学中的基本数学模型，它描述气候、海洋环流、机翼附近的空气流动。从数值模拟的结果来看，不可压 Navier-Stokes 方程的解也包括了湍流。湍流是物理学、力学中尚未解决的重要问题之一。在数学理论研究上，Navier-Stokes 方程的难点在分析数学的众多关键困难问题中具有广泛的代表性。不可压 Navier-Stokes 方程解的整体适定性问题是著名的七个千禧年公开数学难题之一，也是偏微分方程理论研究最重要问题之一。对 Navier-Stokes 方程解的深入理解有助于对如湍流、边界层等复杂物理现象背后的客观规律进行解释。基于当前的分析方

法和技巧,不可压 Navier-Stokes 方程解的整体适定性问题的彻底解决仍然有实质性困难。基于国内外学者近期的工作,发现轴对称不可压 Navier-Stokes 方程是临界的,这使得解决轴对称情形不可压 Navier-Stokes 方程光滑解的整体适定性问题成为可能。本项目围绕刘维尔型定理,解的部分正则性,解的先验估计,展开对轴对称不可压 Navier-Stokes 方程解的整体适定性的研究。为解决著名的 Leray 系列公开问题贡献中国科研力量。本研究项目计划的实施,将推动偏微分方程领域在我国的蓬勃发展,为该领域培养更多的优秀青年数学家,形成一支具有国际一流水平的偏微分方程理论研究队伍,加强我国在这一重要领域的国际影响力。

## 一、科学目标

本项目预期取得的科学目标: 围绕轴对称不可压 Navier-Stokes 方程, 建立新型刘维尔型定理和奇性渐近性分析理论, 发展 Caffarelli-Kohn-Nirenberg 部分正则性理论, 提升解的先验估计, 在轴对称不可压 Navier-Stokes 方程解的整体适定性和著名的 Leray 系列公开问题上取得突破性成果。在调和分析、算子谱理论和渐近分析在偏微分方程的研究上形成一些原创性研究思路和方法。培养一批具有国际视野的青年领军人才。

## 二、研究内容

### (一) 轴对称不可压 Navier-Stokes 方程的刘维尔型定理。

已有的研究结果显示轴对称 Navier-Stokes 方程古代解(时间跨度从  $-\infty$  到 0 的解) 在特定的渐近性假设下满足刘维尔型定理, 进而可以证明轴对称 Navier-Stokes 方程不会产生第一型奇异点。因此, 对爆破过程作进一步的分析, 得到方程古代解更为

适用的渐近性估计是至关重要的。

## (二)轴对称不可压 Navier-Stokes 方程解的部分正则性理论。

到目前为止, Caffarelli-Kohn-Nirenberg 理论仍然是描述 Navier-Stokes 方程解的奇点集的最好理论。针对轴对称不可压 Navier-Stokes 方程, 该理论是否可以改进? 若其在轴对称情形可以被改进, 则意味着轴对称情形的 Navier-Stokes 方程拥有其特有的尺度不变性, 这将从根本上改变偏微分方程专家对该问题的认识。

## (三) 轴对称不可压 Navier-Stokes 方程解的先验估计。

$\Gamma$  函数是描述轴对称流体的一个尺度变换不变量, 具有一些好的性质, 如满足极值原理等。基于  $\Gamma$  函数的定性分析是研究轴对称不可压 Navier-Stokes 方程的重要研究思路。解的正则性所需条件与已知的先验估计之间存在巨大鸿沟。证明  $\Gamma$  的连续性意味着方程解的整体正则性, 将显著缩小上述鸿沟。

## (四)轴对称不可压 Navier-Stokes 方程光滑解的整体适定性。

基于现有的研究基础, 一个重要的研究观点是三维 Navier-Stokes 方程是一个超临界的偏微分方程问题, 当前所知的先验估计仅有基本能量不等式, 不能给数学理论分析提供足够的信息, 导致数学处理上的极大困难。如果考虑轴对称 Navier-Stokes 方程, 我们会得到  $\Gamma$  函数及其所满足的额外的先验估计, 且这个  $\Gamma$  函数具有尺度变换不变性。这个先验估计也是临界的, 这使得解决轴对称情形不可压 Navier-Stokes 方程光滑解的整体适定性问题成为可能。



## “动力学中的随机方法”重大项目指南

随机现象在自然界广泛存在。据描述微观尺度物理行为的量子力学的观点,在基础层面上,自然是随机的。因此,自然科学不能忽略随机因素的影响。随机分析是数学的一个重要分支,为处理各种包含随机因素的现实问题提供不可或缺的数学方法和工具。随着随机分析工具、方法、手段的日渐丰富,对随机现象和随机过程的研究也越来越深入、深刻。动力学是数学的另一重要分支,着重于系统路径轨道个体动力学行为的研究。在确定性问题的研究中动力学方法行之有效。当考虑系统含有非线性噪声等随机因素的影响时,就迫切需要发展动力学中的随机方法。另一方面,将动力学研究的思想和方法应用于随机分析的研究,可催生新的数学理论和方法。总之,随机分析与动力学的深度交叉与融合,也正顺应了现代数学“数学内部各分支学科的交叉融合,呈现大统一”的发展趋势,是现代数学研究的前沿和发展方向。因此,开展随机分析和动力学的交叉研究,具有非常重要的理论意义与广泛的应用价值。本项目以动力学中的随机方法为研究主线,通过开展随机系统的稳定性、速度估计和算法,热力学经典测度、动力系统量子化半经典极限、以及系统随机量的动力信息内涵,非时齐随机系统,Kolmogorov 平稳分布极限及速度问题和随机动力学的研究,引入涉及随机因素的动力学概念,发展随机方法与相关的新算法,建立随机分析与动力学的交叉理论,并应用于解决相关重大实际问题。本研究项目计划的实施,将有力地推动随机分析与动力学理论交叉研究在我国的发展,吸引和培养

更多的青年数学家从事这一领域的研究, 形成一支具有国际一流水平的研究队伍, 加强我国在这一重要领域的国际影响力。

## 一、科学目标

本项目研究动力学中的随机方法及应用, 面向随机动力学的学科前沿, 针对动力学方法处理随机系统问题的局限, 通过发展新的随机方法, 建立动力学的随机量化指标, 如稳定性指标的收敛速度估计, 并设计相应的高效算法, 建立随机分析、动力学和几何的交叉理论, 揭示扩散过程运动的复杂性为和流形几何复杂度的内在联系、对非时齐随机系统和 Kolmogorov 平稳分布建立随机极限动力学理论, 并应用于确定性系统的研究, 在解决随机动力学中的若干重大问题方面取得突破。通过本项目的研究, 实现动力学方法和随机方法的深度融合, 推动随机动力学理论的新发展, 显著提升我国随机数学与动力学交叉领域研究的能力和水平。同时, 也为解决实际问题提供新的思想和数学方法。

## 二、研究内容

本项目以动力学中的随机方法为研究主线, 定性研究与定量估计并重。研究内容如下:

### (一) 随机系统的稳定性、速度估计和算法等。

研究量子力学(矩阵力学)的谱算法, 包括可厄米特化(Hermitizable)矩阵和微分算子的谱计算(算法理论和计算程序); 研究华罗庚大范围经济最优化模型的算法, 分析若干具体经济投入产出模型, 并探讨随机情形的相关课题; 建立带孔(hole)随机双曲系统的信息渗出速度估计并探讨随机交互系统的动力学性质; 建立随机和群作用双曲系统的混合速度估计。

(二) 热力学经典测度、动力系统量子化半经典极限、以及系统随机量的动力信息内涵。

深入研究热力学平衡态和非平衡态的动力、随机性质：从平衡态 Gibbs 测度和动力系统 Sinai-Ruelle-Bowen (SRB) 测度等基本测度出发，探讨它们在各类系统的广泛存在性、混合性、极限定理等重要基本性质；从热力学第二定律出发，深入研究开系统的统计物理非平衡态的动力性质。融合随机分析和动力系统的研究观点，并综合运用几何、概率、偏微分方程、调和分析、复分析、数论等各领域的思想方法，尝试从数学上解释傅立叶热传导定律，研究 Ruelle-Pollicott 共振、Ruelle zeta 函数性质、动力系统量子化的半经典极限等相关前沿课题。深刻领会 Lyapunov 指数、熵等重要系统随机量的动力信息内涵，在不同情形探讨和确立它们与系统的几何、基本群、拓扑等不同方面性质的相互联系和相互刻画。

(三) 非时齐随机系统。

给出不同层次的非时齐 Markov 过程极限分布的定义，研究其存在性及性态；探索随机回复运动与非时齐 Markov 过程极限分布的关系及非时齐过程的相变现象；研究非时齐随机系统轨道的长时间行为。

(四) Kolmogorov 平稳分布极限及速度问题。

研究非平衡系统的稳定性速度，并通过 Kolmogorov 平稳分布极限问题的研究，定义动力系统的随机稳定性，并研究其与结构稳定性、Zeeman 稳定性之间的区别与联系，研究与随机流体力学方程相关的高维 Kolmogorov 方程的高效数值解法，从数值



模拟角度探讨系统趋近于平衡态的长时间行为。研究非线性期望下的极限定理的收敛速度以及随机过程及随机偏微分方程解的性质。

#### (五) 随机动力学。

发展和建立与马蹄、熵、稳定集相关的随机混沌理论, 包括正熵随机系统出现不同层次马蹄的机制, 正熵随机系统中非退化稳定集的存在性及维数估计, 随机周期轨道的存在性和分布规律; 并进一步研究随机遍历极值问题, 随机不变锥理论及随机双曲性。发展和建立随机动力系统的不变流形理论、正规型理论及分支理论。系统研究具有重要应用背景的随机偏微分方程, 如流体力学方程、保守率方程、无穷维哈密顿系统等重要方程解的稳定性、正则性、遍历性、遍历收敛速度、复杂性等。研究其随机动力系统性质, 包括随机动力系统吸引子的存在性、及其与遍历性之间的内在联系。并将其推广到在一般退化可乘噪声情形。研究含时随机薛定谔方程及随机薛定谔算子的谱问题。

## “医学影像精准分析的数学理论与技术”重大项目指南

智能诊疗是实现健康中国的重大需求。医学影像精准分析是智能诊疗的基础，也是准确预测识别疾病、科学规划医治方案、实施手术导航和量化评估疗效的基础。医学影像由特定成像设备生成而且针对各种各样的人体器官和病变组织，对其精准分析与应用面临不完备/强噪声下的像源控制、多模态/大变形/多序列影像解译、小样本/无标签/多样性应用等重大挑战。本项目从数学理论与数学技术角度展开对这些重大挑战问题的研究。重点研究与医学像源控制相关的强不适定性反问题、与影像解译相关的高维数据统计约束下泛函极小和最优传输问题、基于医学影像精准分析的智能诊疗算法等，以期形成医学影像精准分析的创新数学理论与技术，并利用这些技术，对肝癌/肺癌等疾病的精准诊断建立一套基于医学影像精准分析的智能辅助诊断系统。本项目实施期望实质性推动数学与人工智能技术在医疗领域的落地，并带动一批数学家投身于医学数学技术与人工智能的研究。

### 一、科学目标

聚焦医学影像精准分析的重大挑战和传统分析方法局限，发展创新的数学理论与技术，在医学图像像源质量控制、高精度解译、可解释性应用、实用系统研发等方面取得突破性进展；形成微剂量 CT、超快 MRI 等医学影像新技术，提出医学影像高精度配准、分割、识别的高效算法，建立生理结构约束下的最优传输理论并用于弹性图像分析，提出可解释的小样本深度学习方法，研发出基于 CT 的异常检测系统和肝癌、肺癌等重大疾病智能辅

助诊断系统。通过本项目的研究，突破传统医学影像分析的若干瓶颈，实现面向医学影像精准分析的数学理论与技术的新发展，显著提升我国在该领域的研究能力和研究水平。同时也为解决临床诊疗从经验到理论、从定性到定量提供普适性的科学方法论与核心技术。

## 二、研究内容

### （一）强不适定性数学反问题与医学成像新原理。

针对医学影像像源控制问题，研究强不适定反问题的可解性、正则性与快速求解方法；建立微剂量 CT、超快 MRI 等医学成像新原理与新技术；为我国分布式医学影像设备研发提供关键技术支撑。

### （二）医学影像精准分析的泛函极小化方法。

围绕医学影像精准分析这一重大需求，研究相应的高维数据统计约束下的泛函极小化问题，建立快速求解的数学理论与方法；从理论和方法两个方面，突破大形变、非刚性、多模态/多序列等医学影像精准分析的技术瓶颈，建立医学影像高效精准的分割、配准/融合与识别的数学理论和方法，为医学影像精准分析提供核心数学技术。

### （三）医学影像精准分析的几何方法。

发展医学影像精准分析中的几何方法，提出新的数学理论与快速求解算法；研究基于流形表示与保解剖结构的最优传输问题，以及医学图像合成与跨模态迁移问题的数学理论与求解算法；围绕肠癌、胃癌非侵入检查这一重大临床需求，研究 CT 影像精准诊断的几何分析方法与快速求解技术。

#### (四) 基于医学影像精准分析的智能诊断方法。

提出并发展基于医学影像精准分析的智能诊断技术, 研究基于医学影像精准分析的具有可解释性且真实世界数据可迁移的小样本深度学习理论与方法, 并用于研发‘基于 CT 的疾病筛查系统’。

#### (五) 肝癌、肺癌智能辅助诊断系统。

针对肝癌、肺癌的 CT 影像精准诊断, 建立一套基于医学影像精准分析的智能辅助诊断系统。系统考核指标: 筛查检出率不低于 90%, 良恶性准确率不低于三甲医院专家门诊平均水平, 并在 5 家基层医院及 5 家三甲医院落地应用, 纳入病例不少于 3 千例。

## “高温热防护材料可靠性分析和调控的力化学耦合理论与方法”重大项目指南

在高超声速飞行器发展中, 高温热防护材料开发和应用是核心技术和难点之一。高温服役环境对热防护材料的化学环境耐受能力及高温承载能力提出了严峻挑战。更高的飞行速度和可重复使用对高温热防护材料提出了两方面的要求, 一是要求材料的性能指标继续提高, 包括更高的强韧性、更高的高温承载能力、更宽温域的抗氧化性能; 二是要求材料可修复和性能可调控。由此产生两个问题: 一是如何通过微结构设计来提高材料性能指标的问题, 二是如何提高这类材料的可靠性。这两个问题的核心是揭示热防护材料服役性能演化规律及与氧化耦合作用机制。

本项目应发挥力学研究的特色, 突出力学与化学交叉研究的结合点, 发展力化学耦合本构模型和新方法, 揭示新机理, 设计微结构, 获得优异的力学、热与抗氧化特性; 利用所建立的新理论、新方法以及失效准则等力学评估手段和指标来进一步指导新材料体系的设计探索, 发展应变和组分等力学、化学因素对高温热防护材料服役性能的调控方法, 改善材料性能, 提高其可靠性。本项目研究应为高温热防护材料承载抗氧化一体化设计提供理论和方法支撑, 推动力学前沿交叉方向发展。

### 一、科学目标

瞄准可重复使用高温热防护材料性能的提升和调控, 发展非平衡态大变形力化学耦合本构理论和测试表征方法, 揭示服役性能及微结构动态演化规律和力化学耦合机制, 表征力-热-化学耦

合作用下材料宏观性能与微结构之间构效关系，建立力-热-化学耦合强度理论和性能调控方法，提高其可靠性，为高温热防护材料承载抗氧化一体化设计提供理论和方法支撑。

## 二、研究内容

### (一) 热防护材料力-热-化学耦合本构关系与测试表征方法。

建立考虑化学反应、非局部效应的非平衡态大变形力-热-化学耦合本构理论，克服传统理论应对构型不对应、应力不对称的困难，准确表征高温极端条件下物理化学过程。发展高温多尺度多场耦合原位测试技术，实现氧化开貌演化的实时在线观测和新理论中材料参数的协同测量及分析。

### (二) 高温热防护材料微结构演化与构效关系。

发展数据与机理分析相结合的复杂演化过程建模技术，解决Stefan问题。建立力化学耦合跨尺度理论与分析方法，探寻非平衡不可逆系统的守恒律，揭示微结构演化规律，建立材料组分、氧化物、微裂纹、界面等微结构与强度、韧性、抗氧化性能的跨尺度关联，给出热防护材料温度相关的构效关系。

### (三) 服役环境下力化学耦合机制与性能调控。

考虑微结构类型及分布的不确定性，分析应力、应力梯度对扩散和氧化的调控作用以及氧化对应力水平的影响，揭示材料微结构演化的力化学耦合调控机制。发展力化学调控材料表面和微结构的方法，设计变开和扩散路径，调控化学反应及速率和缺陷愈合，实现材料强韧化、自愈合和宽温域抗氧化协同。

### (四) 热防护材料力-热-化学耦合失效机理与断裂准则。

研究微缺陷发展成宏观裂纹的能量释放率变化规律,揭示力-热-化学耦合效应下微缺陷萌生、扩展及失效机理,提出材料在力-热-化学耦合作用下的损伤、破坏评价参量。发展非均质热防护材料大变形力-热-化学耦合强度理论及分析、测试方法,建立相关的多裂纹开裂判据和扩展准则。

## “大尺度跨度高时空分辨率三维变形测量及结构相关力学分析与评估”重大项目指南

位移与变形测量分析是实验固体力学的基本任务之一，是研究材料/结构力学行为与失效评估最基础的参数。超常规大尺度跨度(测量范围/距离与测量精度之间跨 5--7 个数量级)下的结构表面三维形貌/变形的高精度测量，结构件动力学特征的高时空分辨率信息获取，以及内部缺陷损伤的分析与演化等难点问题严重制约了我国重大装备、大型工程建设和高端制造业的发展。近年来，实验力学中的精密图像测量和激光多普勒测振技术、应用光学中的新型激光测距技术、机器视觉中的高适应性图像匹配技术等发展，为突破上述瓶颈提供了可能。本项目建立大尺度跨度下的变形测量和高时空分辨率的结构动力学特征提取方法，并建立结构相关力学特性分析评估理论，为实现重大装备、大型工程和高端制造中复杂部件的力学性能评价与失效预警，以及推进产业发展奠定理论技术基础。

### 一、科学目标

本项目聚焦大尺度跨度下的结构三维形貌/变形精密测量、高时空分辨率的结构高动态三维变形测量、基于表面三维精密变形信息的结构力学分析评估等三个基础性力学问题，研究揭示测量范围/距离与测量精度之间、测量时间分辨率与空间分辨率之间的矛盾机理，以及结构内部力学特性与表面变形之间的关联关系，并融合相关学科先进测量理论和优势技术，建立相应的形貌变形测量和力学特性分析的理论方法，取得创新技术成果，促进



力学等相关学科基础理论与实验测试手段的进步。

## 二、研究内容

### (一) 大尺度跨度变形测量理论与方法。

研究揭示大测量范围与高测量精度之间、高动态测量时间分辨率与空间分辨率之间的矛盾机理；论证和融合先进测量技术理论，优化设计大尺度跨度和高时空分辨率结构三维形貌/变形精密测量的技术路线；分析论证误差传播机理、性能指标等。

### (二) 大型结构变形测量原理与多信息融合。

针对远距离大型工程大尺度跨度三维形貌/变形测量，研究包括先进影像、现代激光等信息融合的测量机制；研究外场环境因素对精密测量的影响机理并建立校正方法；研究新型激光测距等原理在远场高精度测距中的应用技术。

### (三) 复杂部件高精度加工变形测量方法。

针对大尺度跨度复杂装备部件的三维形貌/变形测量，研究米级视场微米级精度的全场密集点扫描方法及变形测量原理；针对精密加工零部件，研究适用于无纹理、弱纹理和高光洁度等低特征表面的高精度形貌/变形测量方法。

### (四) 高时空分辨率振动模态测量与分析。

针对航天航空重大装备等领域的关键三维振动回转构件高频模态分析等问题，研究时空多维度同步优化采集与数据融合方法和振动模态测试分析技术，探索测量全场振动模态与工作变形的新方法。

### (五) 典型结构力学性能评价与失效预警。

针对桥梁、压力容器等典型大尺度结构和三维振动回转构件，

研究结构表面变形数据与内部缺陷演化和结构力学失效机理的关联性; 研究并验证基于表面变形观测数据的结构内部有关力学特性分析评价方法。

## “大数据时代恒星物理重大问题研究”重大项目指南

随着 Ia 型超新星测距发现暗能量的存在和成功捕获恒星级双黑洞并合产生的引力波信号这两个在天文学和物理学均具有划时代意义的事件, 以及大型地面和空间观测设备的成功运行, 恒星物理变得更加重要, 并在宇宙学危机等重大科学问题中扮演关键角色。

恒星物理目前仍有一些重大问题没有解决, 包括恒星形成定律、恒星内部结构与脉动性质、双星族的基本性质、元素核合成等。这些问题的解决将极大地推动恒星物理学的发展, 并对星系 (包括银河系) 结构与演化、宇宙学、暗能量等研究产生巨大影响。我国自主研制的大天区面积多目标光纤光谱望远镜 (LAMOST) 的光谱巡天项目, 结合 Gaia 卫星高精度自行和距离参数, 以及 Kepler 和 TESS 卫星大样本、高精度、高连续性的测光数据, 为研究和解决这些恒星物理学的重大问题带来了巨大机遇。

基于 LAMOST 中分辨率光谱巡天数据, 可以在恒星和恒星系统重大问题研究上获得突破, 包括建立亚星系尺度上的恒星形成律; 认清脉动变星周光关系弥散的物理本质; 得到双星族的基本性质, 准确给出恒星级双黑洞、双中子星等引力波源的形成、演化及引力波辐射性质; 对元素核合成中的关键过程进行观测限制等。基于大数据的恒星物理重大问题研究将打破恒星物理发展的瓶颈, 使恒星物理学科的发展踏上一个新台阶。

### 一、科学目标

基于 LAMOST 中分辨率巡天数据, 本项目将通过恒星光谱、星震学、恒星演化模型等精确确定大批量恒星的基本参数, 围绕恒星形成、结构与演化的关键物理过程, 建立并检验亚星系尺度上的恒星形成律; 揭示大质量恒星形成关键阶段 (光学) 图像; 寻找脉动变星周光关系弥散起源, 显著提高测距精度; 给出双星族的基本性质, 发展普适的双星星族合成方法; 搜寻和发现一批元素丰度特殊恒星, 限定核合成的关键过程; 在星团尺度上深入理解恒星形成历史和恒星演化过程。同时, 本项目将获得千万条中分辨率恒星和星云光谱, 实现天区覆盖、巡天体积、采样密度及统计完备性方面的重大突破; 构建世界上首个时序中分辨率恒星视向速度数据库; 构建首个疏散星团高完备率成员星运动学和化学丰度数据库。这些数据将提供给全球天文学家进行深度挖掘, 进一步对恒星物理产生深远影响。

## 二、研究内容

### (一) 恒星形成的关键过程及恒星形成定律。

基于 LAMOST 中分辨率银河星云巡天数据, 发布银河星云巡天星表; 搜索并发现行星状星云、超新星遗迹、HII 区和 HH 天体, 给出它们的三维运动学结构特性, 揭示恒星形成、超新星爆发的物理机制和演化过程; 研究银河系尺度上的恒星形成定律, 给出恒星演化、超新星爆发等对周围介质的关键影响; 给出大质量恒星形成光学波段的基本物理特性。

### (二) 恒星脉动性质与恒星结构及主序展宽机制。

基于 LAMOST-MRS-K/O 巡天数据, 结合 Kepler 和 TESS 卫星的测光观测, 以及 Gaia 的位置和自行信息, 精确确定大批

量恒星的基本参数,可靠判定疏散星团的成员星;通过大样本脉动恒星的系统分析,建立恒星脉动性质与恒星磁场、转动等之间的关系;研究不同星族造父变星周光关系弥散的性质和起源,使测距精度提高 1 倍以上;厘清疏散星团主序展宽起源,在星团尺度上深入理解恒星形成历史和恒星演化过程。

### (三) 双星族的基本性质和双星关键物理过程。

通过 LAMOST-MRS-B 巡天大样本数据,对双星族的基本性质及其对恒星光谱型和金属丰度的依赖进行系统性统计分析,为星族合成研究提供准确的、关键的物理输入;搜寻并构建处在双星重要演化阶段(包括大质量双星、非相互作用黑洞/中子星双星、热亚矮星等)的观测样本,研究双星物质交流和公共包层抛射两个关键物理过程;建立普适的双星星族合成模型,研究致密双星的形成、演化和引力波辐射性质。

### (四) 元素丰度特殊恒星的搜寻和起源。

基于 LAMOST-MRS 巡天数据,搜寻富中子俘获过程元素恒星,确定其丰度分布模式和运动学特征,研究它们的起源和演化,深入理解恒星内部核合成、超新星爆炸核合成、双中子星并合核合成过程;确定百万颗恒星的锂元素丰度,探索锂元素的形成和演化过程,为宇宙大爆炸核合成提供关键线索;对大样本演化晚期的恒星进行元素丰度分析,限制和约束恒星对流、挖掘、扩散等基本物理过程。

## “太阳系边际探测基础理论与关键机理研究”

### 重大项目指南

太阳系边际探测蕴含了重要的科学意义,代表了人类对未知领域的不断探索,开展太阳系边际探测基础理论与关键机理研究,具有重要的理论意义与应用价值。在天文学与空间科学方面,可重点围绕行星际和恒星际空间环境、太阳系起源与演化、外太阳系天体轨道分布与物理特征、太阳风与星际介质的相互作用机理的探索与发现,实施对主带彗星、长周期彗星、柯伊伯带、奥尔特云、外来天体、终止激波、空间射线、宇宙尘埃、黄道云等的探测,同时,可沿途实现巨行星、小天体等外太阳系天体的顺访。在空间技术方面,能够牵引带动超远距离深空测控通信、先进高效能源与推进、复杂引力环境飞行轨道优化与控制等尖端技术的跨越式发展,从而大幅提升我国空间科学、空间技术和空间应用水平,为人类拓展活动疆域和开展恒星际探索奠定基础。

本项目通过开展太阳系边际时空结构与动力学过程模拟、太阳系小天体探测、太阳系形成与物质分布演化模拟、复杂引力场星际飞行轨道优化与控制、以及超远距离探测器长期在轨自主运行与测控通信理论与方法等研究,将为实现四维太阳系体系构建、太阳系起源和演化等重大科学问题的突破奠定理论基础,为完成我国空间探索的重大跨越提供理论支撑。同时,随着本研究项目计划的实施,将极大地推动该领域在我国的发展,培养一批致力于行星科学、空间物理以及深空探测研究的人才队伍,形成一支具有国际一流水平的研究队伍,加强我国在这一重要领域的国际影响力。

## 一、科学目标

本项目研究太阳系边际探测前沿关键科学问题,揭示太阳风日球层动力学演化及与星际介质相互作用机制,明晰太阳系演化理论与外太阳系天体分布特征,开展复杂引力场多目标探测轨道动力学、优化及控制等理论和方法的研究,并在超远距离极端环境探测器自主长期运行与测控通信等方面取得突破。通过本项目的研究,对太阳风与边际物质的作用机理、外太阳系天体轨道与物理特征、复杂引力场飞行动力学、探测器自主运行与超远程测控通信等前沿交叉学科领域的基础理论和关键科学开展研究,从系统指标体系构建、任务顶层规划、载荷顶层设计等方面为国家实施太阳系边际探测重大航天工程提供有力的科技支撑。

## 二、研究内容

### (一) 太阳风日球层动力学演化及与星际介质相互作用机制。

建立数据驱动的内/外日球层一体化三维多元太阳风动力学演化模型并模拟背景环境,为载荷配置和精度要求提供科学参考;通过等离子体、磁场和中性原子数据,研究太阳风边际结构及动态特性、太阳风湍流的结构组成与演化,太阳风暴等大尺度结构的动力学演化,星际介质对太阳风的侵入作用;根据超热粒子和宇宙线数据,研究太阳风超热粒子及异常宇宙线的起源、加速和演化,银河宇宙线在太阳系边际的调制传输机制。

### (二) 太阳系演化理论与外太阳系天体分布特征。

利用国内外观测数据开展外太阳系(长周期彗星、柯伊伯带天体、奥尔特云天体等)轨道分布和物理特性统计,通过数值模拟再现太阳系早期演化历史;对外太阳系未知天体轨道特征进行约束并提出搜寻方法与载荷需求;系统模拟太阳系大行星及卫星

系统形成、组分与动力学；建立进入太阳系的恒星际小天体的形状、光谱特征模型。

### （三）多体与连续推力结合的轨道动力学、优化及控制。

考虑太阳系多天体和连续推力作用，研究多任务模式和多约束下的多天体借力飞行序列及深空机动辅助优选，多天体引力与连续推力结合的特殊动力学结构及飞行轨道优化设计方法，构建连续-离散混杂系统的组合优化理论与方法，为任务顶层设计提供理论与方案支撑；研究复杂深空环境下高精度融合的轨道确定方法与定轨精度评估，轨道误差的不确定性传播特性及基于此特性的轨道优化控制，为深远空间的超远距离轨道确定和控制提供理论支撑。

### （四）超远距离探测器自主长期运行与测控通信研究。

针对百 AU 量级深远空间探测任务约束，提出适应深空复杂未知环境的自主导航方法；开展多维约束空间内的自主任务规划、自主故障诊断与恢复研究；开展超远距离高效测控通信理论研究，突破复杂空间环境与电磁信号的耦合作用机理，提出太阳系边际探测高精度测控与高置信度评估方法；提出微弱无线电测量数据的反演方法，发展基于数据融合的超远距离高精度测定轨方法。同时，形成相对完备的系统指标体系分析方法，并完成太阳系边际探测系统总体可行性研究。



# “二维极化材料中的奇异物性与器件基础研究”

## 重大项目指南

对称性破缺导致的自发极化现象是凝聚态乃至整个物理学中的重要研究内容，由此形成的铁磁体、铁电体和铁谷体等自发极化材料在传感、能量转换和信息处理等多个领域都具有极其重要的应用。探索低维体系中的极化现象，研究其中自旋、电荷、能谷的自发极化形成机制和外场调控，对于突破当前电子器件面临的尺寸效应和物理极限瓶颈，开发下一代高速、低耗、非易失性存储器件具有重要的理论意义和应用价值。本项目以二维极化材料体系为核心，以合成和构筑二维极化材料及其异质结构为基础，开展二维极化现象的基础理论和器件制备的关键技术研究，发展极限尺度下的物性表征方法，揭示体系微观结构和多种自发极化性质之间的物理关联，并通过多场手段对其电、磁、光、谷等特性进行量子调控，探索新的物理现象，突破传统原理局限，推动二维极化材料在未来信息领域的实际应用，形成一支具有国际重要影响力的研究团队。

### 一、科学目标

发展制备高质量、高性能二维极化材料及相关异质结构的关键技术；通过对二维极化材料的微结构、能带及极化关联物性的理论计算和实验表征，揭示其中电荷、自旋及能谷自发极化形成的物理机制；发现室温下的新型二维极化及多铁材料，建立多重铁性之间的耦合理论；实现对二维极化材料及相关异质结构的电、磁、光、谷等特性的多场量子调控；设计、制备基于二维极化材

料体系的原型器件，探索其在下一代信息处理领域的应用；形成关于低维体系极化产生、控制和应用的系统性研究链条和理论框架。

## 二、研究内容

### (1) 二维材料中自发极化的形成及耦合机理研究。

制备出高质量二维极化材料单晶和薄膜，采用多维度（能量、动量、自旋、时间）分辨角分辨光电子能谱、多场调控非线性光学响应探测、自旋极化扫描隧道显微镜、高空间（时间、能量）分辨双球差校正透射电子显微镜、多场调控高精度微区铁电极化性能表征、第一性原理及相场模拟等多种先进的理论和实验研究手段，对二维极化材料的微结构、能带及极化关联物性进行计算、分析和表征，探索其自发极化形成的物理机制和多重铁性之间的耦合机制，预测并制备出可在室温工作的二维极化和多铁材料。

### (2) 二维极化材料及异质结的多场调控。

研究在电、磁、光、应力等外场作用下，二维极化材料体系中自旋极化、电极化、谷极化以及贝里曲率分布的变化，实现多场耦合调控的电荷-自旋、电荷-能谷、自旋-能谷的极化转换；在二维极化材料及其异质结中，利用铁性耦合、近邻效应、离子插层调控等，实现电极化、自旋和谷极化的反转；在基于二维扭角体系中，通过研究魔角和极化的关联效应，结合外场调控，探索研究非常规电极化、磁极化、谷极化、手性反常等效应，发现新的物理现象。

### (3) 基于二维极化材料体系原型器件的研究。

研究和开发大面积、高质量二维极化材料晶体的解离工艺，

探索高质量二维极化材料的转移和异质结制备技术; 利用二维极化材料及异质结中的新奇物理效应, 设计、制备基于自旋 (赝自旋)、电极化、谷极化、手征等状态变量的新原理信息器件, 探索基于二维非易失存储器件的存算一体信息处理技术及相关器件。

# “生命系统中非平衡统计物理和动力学的若干重大问题”

## 重大项目指南

非平衡统计物理和随机热力学的发展以及各种新兴生物物理实验手段的进步为建立非平衡统计物理生物学的普适理论和定量方法提供了新的机遇。本项目聚焦数理科学和生命科学前沿交叉的若干具有深远影响的关键科学问题, 针对人类健康、生物医药和人工智能等方面的重大需求, 以发展非平衡统计物理生物学新框架为目的, 系统深入地研究非平衡统计物理和随机热力学等新物理原理和方法在定量生物学中的拓展; 发展新的实验方法和技术手段, 从单分子到系统水平解决物理与生命科学交叉前沿的若干瓶颈问题; 力争形成以我国科学家为首、引领世界相关领域研究的新学派和新思潮, 并力图在影响国民经济的核心技术开发中起到关键作用。

### 一、科学目标

从单分子、单颗粒到多细胞、组织器官和个体水平, 跨尺度研究生命系统的定量规律; 发展适用于描述生命系统复杂动力学行为的非平衡统计物理和定量分析方法, 建立非平衡统计物理生物学新框架; 发展相关的实验、分析和计算技术, 在定量生物学实验研究领域取得突破; 取得具有国际影响力的颠覆性成果, 为交叉科学、生物医学、药物研发和公共健康科学提供新的物理学理论方法和定量研究手段, 为类脑计算等新兴人工智能技术提供理论支撑和技术依据。

## 二、研究内容

### (1) 非平衡统计物理生物学的普适理论和定量方法。

针对生命系统的复杂性和集群特征, 发展非平衡统计物理生物学的普适理论和定量方法, 发展相应的非线性动力学和复杂系统理论, 研究生命系统的非平衡物理特性、随机热力学和动力学基本规律, 并在多个典型的模式生物研究体系中得到实验验证。

### (2) 生物大分子非平衡统计物理、动力学和功能再造。

通过发展并集成冷冻电镜、单分子技术、多元复杂体系理论分析及多尺度分子动力学模拟, 研究生物大分子动力学, 研究多组分生物大分子凝聚态的非平衡结构、动态演变、基元协同、相变分离和功能演化, 发展生物分子功能再造和从头设计新途径, 为新药研发提供基础理论支撑和技术依据。

### (3) 细胞网络调控的非平衡统计物理与动力学合成。

发展并应用细胞网络调控的非平衡统计物理和复杂系统动力学, 结合多种生物物理和生物化学实验手段, 定量研究细胞对物理化学等环境因素的响应机制、命运决策、功能演变及其非平衡效应; 探索细胞网络拓扑学、动力学和功能特性及其相互制约关系; 发展新兴的动力学合成方法, 重新编程细胞调控网络, 探索其在新型合成生物学技术发展中的应用。

### (4) 细胞和器官发育、衰老和癌变的非平衡统计物理模型。

发展跨分子、细胞、组织等层次的非平衡统计物理模型, 研究细胞和器官发育、衰老、癌变和干细胞分化的分子调控网络的非平衡结构、动态学及其内在功能机制; 发展新兴的类器官物理生物学技术, 研究改造具有抗癌效能的人体细胞的定量理论和类

器官实验模型, 为发展抑制和治疗癌症的新技术提供基础理论支撑。

(5) 神经网络的统计物理、大脑意识形成原理及其在人工智能中的应用。

发展生物神经网络和大脑的非平衡统计物理原理和模型, 研究神经元网络结构、动力学和功能之间的定量关系; 研究哺乳动物大脑编码、加工感觉信号和形成知觉意识的基本原理, 并以此为基础发展新型人工神经网络、人工智能架构和类脑计算新范式。

# “基于 PandaX-4T 液氙实验的暗物质和中微子研究” 重大项目指南

宇宙中暗物质的本质是什么？当前宇宙中为何几乎没有反物质？针对“极大”与“极小”的联系，很多超出标准模型的理论预言了一类“弱相互作用重粒子”作为暗物质的候选者；如果中微子是马约拉纳费米子，则可能成为揭开宇宙反物质消失之谜的关键。在过去的几十年中，在深地实验室里搜寻暗物质和马约拉纳中微子导致的无中微子双贝塔衰变成为了两大前沿方向。近年来，基于氙靶的探测器成为国际上搜寻暗物质和无中微子双贝塔衰变（利用氙 136 同位素）最前沿的探测手段。

位于四川省凉山州的中国锦屏实验室是世界上最大埋深的地下实验室，基于液氙的 PandaX 实验也已经在这里开展研究 10 余年。2019 年，锦屏地下实验室二期建设通过“十三五”国家重大科技基础设施建设项目正式立项，新一代 4 吨级的 PandaX-4T 的建设已经开始，预期 2020 年底开始取数。本项目拟利用 PandaX-4T 实验开展国际最前沿的暗物质和马约拉纳中微子的探索，并发挥低本底、低阈值的优势开展天体中微子的研究。

## 一、科学目标

本项目基于 PandaX-4T 实验数据，充分发挥其极低本底水平和在 keV-10MeV 的全能区覆盖能力，针对粒子天体物理领域的若干重大科学问题，开展前沿探索。系统性地对多种暗物质候选粒子开展高灵敏度搜寻；利用氙 136 和氙 124 天然丰度对马约拉纳中微子开展高灵敏度的搜寻，为马约拉纳中微子质量提供限制；

测量天体中微子, 针对太阳、超新星爆发等恒时和瞬时中微子信号开展研究, 检验天体物理和新物理模型; 理论和实验紧密结合, 开展创新性的暗物质和中微子唯象学研究。通过本项目的实施, 在粒子天体物理领域形成一支实验和理论高度结合、具有国际一流水平的研究队伍, 显著提升我国在该领域的科学技术水平和创新能力。

## 二、研究内容

### (一) 暗物质粒子的实验研究。

深入理解 PandaX-4T 探测器的响应和本底, 并利用数据寻找多种暗物质候选粒子。对探测器开展细致的刻度, 了解和优化探测器性能; 理解并降低探测器中各种本底事件; 通过多种性质的散射事件, 全面扫描暗物质可能存在的信号区间; 搜寻同电子有耦合的轻暗物质候选粒子, 包括轴子、类轴子或是暗光子等。

### (二) 马约拉纳中微子的实验研究。

通过 PandaX-4T 中的天然液氙有效靶, 细致研究 MeV 能区的本底构成和能谱, 并研究本底抑制手段; 通过基态和激发态衰变测量氙 136 (8.9%天然丰度) 的双贝塔衰变, 搜寻马约拉纳中微子导致的无中微子双贝塔衰变, 对马约拉纳中微子质量做出限制; 寻找氙 124 (0.1%天然丰度) 双中微子和无中微子双电子俘获信号。

### (三) 系统性的探测和研究多种天体中微子。

利用 PandaX-4T 探测器的电子反冲信号, 测量低能 pp 太阳中微子, 检验太阳标准模型, 并对中微子磁矩做出高灵敏度测量; 针对暗物质探测的“中微子地板”, 细致研究太阳硼 8 中微子和氙



原子核的相干散射；利用中微子-氦核相干散射，开发天体爆发中微子的实时触发系统，加入全球超新星爆发中微子预警联盟，开展富有特色的多信使天文学研究。

#### （四）暗物质和中微子的唯象学研究。

深入开展非标准冷暗物质的探测策略、暗物质直接-间接探测相结合的唯象学、惰性中微子、马约拉纳中微子和中微子非标准相互作用等新物理方面的研究。

## “重味粒子弱衰变与间接新物理探测”重大项目指南

精确检验标准模型理论、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。以重味物理为研究目标的 Belle II 和 LHCb 实验正在积累海量的 B 介子衰变事例，通过对比高精度的实验测量和理论预言结果，可以探索两个重要的基本问题：是否存在新的电荷共轭-宇称(CP)破坏机制；是否存在对味结构敏感的超出标准模型的新粒子或新相互作用。

本项目拟在 Belle II 和 LHCb 实验上开展高精度实验测量，结合发展理论模型和提升理论预言能力，检验轻子普适性，探索宇宙中物质和反物质不对称性的起源，寻找超出标准模型的新物理。本项目的开展将推动我国重味物理研究领域的发展，形成一支具有国际一流水平的研究队伍，力争作出开创性的基础研究工作。

### 一、科学目标

利用 Belle II 和 LHCb 实验上获取的海量 B 介子衰变事例，结合 Belle II 和 LHCb 实验各自优势，通过研究 B 介子纯轻、半轻与非轻衰变，大幅度提高 CKM 矩阵元、相角及一些黄金衰变道的 CP 不对称量的测量精度，从而高精度检验粒子物理标准模型，理解宇宙中物质和反物质不对称性的起源；对轻子味道普适性进行检验、对味改变中性流过程进行细致分析，间接寻找超出标准模型的新物理；提高 B 介子弱衰变矩阵元的理论计算精度，针对与标准模型预言不相符的实验测量，构建新物理模型。

### 二、研究内容

### (一) 精确测量 CKM 矩阵元和相角。

测量单举及遍举半轻  $B \rightarrow X_u l \nu$  和  $B \rightarrow X_c l \nu$  衰变, 抽取矩阵元  $|V_{cb}|$  和  $|V_{ub}|$ , 确认两类测量实验值的差别是否存在。在  $B_s$  和  $\Lambda_b$  衰变中独立测量  $|V_{cb}|$  和  $|V_{ub}|$ , 进一步提高测量精度。通过多种底强子衰变过程如  $B^+ \rightarrow DK^+$ 、 $B^0 \rightarrow \pi\pi$ 、 $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$  等, 大幅提高么正三角形的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  相角测量精度, 验证 CKM 矩阵么正性。利用  $B_S^0 \rightarrow J/\psi\phi$ 、 $J/\psi\pi\pi$ 、 $\phi\phi$  等过程测量相角  $\phi_S$ , 检验标准模型。

### (二) 测量 B 介子弱衰变过程中的 CP 破坏。

通过  $B/B_s \rightarrow K\pi$  衰变来研究和解决  $K\pi$  CP 疑难; 通过不含粲粒子末态的三体 B 介子衰变来理解非共振态和共振态对 CP 破坏的贡献, 以及末态相互作用的大小, 寻找新物理和新 CP 破坏来源。

### (三) 测量 $B/B_s$ 半轻与纯轻衰变。

针对  $\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \tau^- \bar{\nu}_\tau$  半轻衰变的疑难问题, 检查其它类似  $B/B_s$  介子的半轻衰变, 精确测量这些过程的分支比、分支比随  $q^2$  的分布以及轻子的极化。根据实验测量结果分析可能存在的新物理贡献。精确测量  $B^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ , 确认测量结果和标准模型预言的偏差是否存在, 并对类似衰变道进行测量, 寻找新物理。

测量 B 介子遍举衰变过程  $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$  和单举衰变过程  $B \rightarrow X_s l^+ l^-$  的衰变分支比和角分布变量  $P_i^{(\prime)}$  随  $q^2$  的分布, 对 CP 破坏、 $A_{FB}$  进行检验, 测量不同代轻子在低  $q^2$  区间和高  $q^2$  区间末态衰变分支比的比例, 检验轻子味普适性。

### (四) B 介子弱衰变矩阵元的高精度理论计算。

利用 Belle II 与 LHCb 实验的高精度测量数据, 限制和抽取理论中的非微扰参数, 在因子化辅助的拓扑图等方法下, 提高 B 介子弱衰变矩阵元的理论计算精度。在软胶子和共线胶子有效理论、QCD 理论方法中, 提高格点量子色动力学计算精度; 在软和共线有效理论、QCD 光锥求和规则、微扰 QCD 因子化等框架下, 计算高阶辐射修正与幂次修正, 逐步提高理论精确度。针对与标准模型预言不相符的实验测量, 寻找超出标准模型的新物理信号, 在此基础上构建新物理模型。