

陕西基础科学（数学、物理学）研究院 “陕西数理基础科学研究项目” 2022 年度申报指南

一、项目设立背景

基础研究是整个科学体系的源头，是所有技术问题的总机关。为积极落实国家强化基础研究、加强应用基础研究的要求，结合我省在科教领域的丰富资源与基础研究传统深厚的优势，有效汇聚我省数学、物理学基础研究优势资源，充分发挥基础研究对秦创原科技创新的源头供给和引领作用，促进我国在数学和物理领域基础与应用基础研究、高层次人才培养、国内外学术交流与合作水平不断提升，产出一批具有重大影响的标志性、引领性、原创性成果，解决产业发展遇到的重大基础科学问题和技术瓶颈难题，特依托陕西省教育厅与西安交通大学联合共建陕西基础科学（数学、物理学）研究院（以下简称数理研究院）设立陕西数理基础科学研究项目（以下简称陕西数理项目）。

二、项目类别与资助要点

陕西数理项目瞄准基础研究领域的国家重大需求和新兴前沿，围绕基础数学、大数据分析的统计基础与算法、数学物理与量子场论、物质结构与功能调控、量子科学与先进光

学等 5 个核心方向，设立重点项目、一般项目、青年项目等 3 类基础研究项目，总经费 2000 万，并实行“揭榜挂帅”制度，明确目标责任，强化项目阶段性考核与问责考核，体现“奖优罚劣”、“问责问效”。鼓励各高校之间、高校与其它研究机构联合申报。针对各类项目：若参研单位为数理研究院建设单位，则按陕西数理项目资助额度进行不低于 1:1 的资金匹配；若参研单位为非数理研究院建设单位，则按照项目经费总额度进行不低于 1:1 的资金匹配。项目依托单位和参研单位应确保落实相关项目规定的匹配经费。

（一）重点项目

重点项目主要用于支持学术能力优异、能够承担国家级重大、重点项目或任务，并做出突出贡献、取得重要学术创新的基础研究团队。本类项目围绕数理研究院 5 个核心方向进行部署。项目须统一按照指南所列方向申报，除特殊说明外，同一指南方向下，原则上只支持 1 项，每个项目可设置不超过 3 个子课题，并可由省内多个单位联合申报，参研单位总数不超过 3 家。项目实行首席科学家负责制，经费“包干”，项目中期进行“里程碑”考核，对未完成“里程碑”节点任务的，可中止资助并收回未执行经费、列入负面清单；项目考核优秀的将视具体情况予以奖励或延续支持。

【2022 年度资助计划】

2022 年度拟围绕数理研究院的 5 个核心方向共设立 12 项重点项目，每项 60 万元。其中，30 万元由陕西数理项目资助，30 万元由项目依托单位匹配，实施周期为 2 年，总经费 720 万元。

数学方向 1：偏微分方程的最优正则性理论及其在几何、物理中的应用

研究内容：针对几何、物理中非线性偏微分方程，建立最优正则性理论。最优正则性的研究包含正反两个方面：一是在给定定解条件下，得到偏微分方程解的最佳正则性，包括解的光滑性、能量估计、稳定性以及渐近性等；二是要得到解的相应正则性，给出最弱的定解条件，包括区域的光滑性、几何性态，外源项的光滑性、可积性以及解在无穷远处的要求等。发展边界最优正则性理论，并应用于几何分析中的典型方程，包括 Monge-Ampere 方程、特殊 Lagrange 方程以及极小（极大）曲面方程等；发展最优能量估计，并应用于多分量尖峰孤立子的稳定性和渐近稳定性，正质量物质场的 Einstein 方程解的存在性，以及 Schrodinger 方程（组）正规化解的存在性与稳定性；发展方向齐次化最优正则性理论，并应用于非线性椭圆方程以及 Stokes 方程中，揭示齐次化方向与非齐次化方向正则性的不同以及周期微观结构的宏观表象。

考核指标：在偏微分方程最优正则性理论和方法上有重大突破，取得标志性成果。建立完全非线性椭圆方程解在边界的正则性与区域边界几何性质的最优依赖关系；建立多分量尖峰孤立子的最优稳定性、最优渐近稳定性的理论框架；建立 **Einstein-Klein-Gordon** 引力模型的最优能量衰减估计；建立 **Stokes** 方程中方向齐次化问题的最优 **Lipschitz** 正则性估计；建立稳态 **Schrodinger** 方程（组）正规化解的最优存在性理论。针对最优正则性的研究，提出并发展新的数学方法：与解的边界正则性相适应的尺度迭代方法；与孤立子稳定性相适应的多分量 **Liouville** 变换；与 **Einstein** 方程能量衰减估计相适应的欧几里得-双曲面分页方法；与方向齐次化相适应的紧方法和测度估计等。

数学方向 2：微剂量 CT 成像算法研究及影像质量评估

研究内容：（1）瞄准医疗影像设备国产化重大需求，把握 CT 成像技术国际前沿，聚焦微剂量 CT 成像关键算法研究；（2）研究多参数、自适应的微剂量 CT 智能成像算法，包括从 CT 扫描原始数据矫正正弦图数据的误差建模 CT 去噪深度网络、可学习型 **Radon** 变换新型解析重建算法、模型驱动深度学习 CT 成像快速算法和数据矫正-模型驱动深度学习一体化网络成像算法等；（3）提出微剂量 CT 影像质量定量、定性评估系统化方法和标准；（4）根据微剂量 CT 影像评估

标准制定胸部、腹部等部位重大疾病筛查标准；(5) 根据 CT 影像评估结果确定微剂量 CT 人体各部位扫描协议。

考核指标：(1) 误差建模 CT 去噪深度网络、可学习型 Radon 变换新型解析重建算法的胸腹部平均成像时间不超过 1.8 分钟；数据矫正-模型驱动深度学习一体化网络成像算法的胸腹部平均成像时间不超过 3 分钟；(2) 微剂量 CT 成像算法 X 射线剂量相比现行常规剂量达到如下水平：胸部 1/7~1/10，腹部 1/4，头部 1/3，并可达到诊断标准，胸部筛查达到常规剂量的 1/12 水平；(3) 微剂量 CT 影像评估的系统化方法和标准得到中华医学会影像技术分会或省级分会认定；(4) 微剂量 CT 成像算法和制定的微剂量 CT 扫描协议取得临床应用；(5) 发表高水平论文，申报发明专利。

数学方向 3：神经系统的复杂动力学与微纳调控

研究内容：在低维神经环路上，建立时变噪声扰动下的随机动力学理论框架，提出新的数值方法解决响应求解问题，研究噪声扰动对神经环路信息传递和处理过程的作用机理；在高维复杂神经系统中，建立时空扰动耦合下的随机动力学理论框架，研究时空扰动对高维神经系统域稳定性的影响规律；在上述理论基础上，研究控制时空扰动以提高神经系统信息传递稳定性与鲁棒性的微纳神经调控策略，探索运用微纳机器人实现病态神经系统恢复的技术路线。

考核指标：建立时变噪声扰动下的低维随机动力学理论框架；提出新的解决响应求解问题的数值方法；建立时空扰动耦合下的随机动力学理论框架；构建基于控制时空扰动的微纳神经调控策略；提出运用微纳机器人实现病态神经系统恢复的方案。

数学方向 4：结构图论中若干核心问题研究

研究内容：围绕结构图论中的哈密尔顿性、图划分、着色子图的存在性、图的拉姆齐数等核心问题，聚焦相关重要猜想，如 Matthews-Summner 猜想、Bermond-Thomassen 猜想、Fujita-Magnant 猜想等，从宏观角度将几个不同但互相关联的核心问题结合在一起开展研究工作，把相关内容和方法交叉融通，以寻找新的思路和方法来攻克这些难题，并设计出有效的算法或近似算法，应用到实际问题中。

考核指标：构建图中哈密尔顿性质的局部化理论与算法，解决着色图划分与有向图划分中若干公开问题。在哈密尔顿性、图划分、着色子图、拉姆齐数等结构图论核心研究方向上达到国际领先水平，在本方向《Journal of Combinatorial Theory, Series B》、《Journal of Graph Theory》、《SIAM Journal on Discrete Mathematics》等高水平期刊发表系列论文。

数学方向 5：分析学理论研究整体微分几何中的若干问题

研究内容：在微分几何和整体微分几何的发展过程中，几何问题代数化是一个重要的解决问题的途径，其中变分结构和微分方程是重要的表现形式。借助偏微分方程，调和分析、非线性泛函分析等分析学理论研究相应的几何问题是重要的一个发展方向。本项目借助分析学理论研究现代几何学中的共形几何领域的曲率问题、流形上极小曲面问题和曲率流问题、凸几何分析中的 Brunn-Minkowski 理论和 Minkowski 问题等前沿学术问题，并利用分析学技巧建立几何不等式和研究相应的偏微分方程解的存在性，唯一性，正则性等问题，揭示其几何本质特征。

考核指标：建立一系列最佳几何不等式，并构建其与分析不等式之间的联系；提出新的观点和方法解决极小曲面 Bernstein 问题，极小曲面问题、曲率流等重要问题；创造一套研究等周型不等式和 Minkowski 问题的新方法，并在几何测度与几何不等式的稳定性问题的研究中得以应用。

数学方向 6：基础数学与生物医药产业链的交叉融合

研究内容：(1) 推进陕西省高校基础数学学科与我省生物医药产业链的交叉创新和深度融合；(2) 发挥陕西高校基础数学学科特色和优势，对标陕西省科技成果产业落地需求和国家的重大战略发展需求，服务地方社会和经济发 展；(3) 组织国际国内专题学术交流研讨，增强陕西省基础数学学科

的辐射范围和学术影响；(4) 推进基础创新的机制改革，组织基础科学研究项目实施，建设“访问学者之家”，打造陕西数理基础科学研究院特色品牌。

考核指标：(1) 推动基础数学与生物医疗领域交叉的国家级重点项目落地；(2) 在秦创原落地相关产学研融合项目；(3) 组织 2 次以上国际和全国性学术会议；(4) 推进陕西数理基础研究项目顺利实施，吸引 2 名以上高水平领军型访问学者进驻研究院。

物理方向 1：量子传感与微弱信号量子检测关键科学与技术问题

研究内容：(1) 聚焦国家基金委“第二代量子体系的构筑和操控”重大研究计划和国家重点研发计划“量子调控与量子信息”重点专项，结合陕西省未来信息产业发展面临的重大问题，凝练关键科学与技术问题，组织研究队伍，承担量子传感与量子测量重大项目；(2) 建立基于原子系综为量子传感探针的量子测量技术。研究高光学厚度冷原子系综光子高维纠缠态的高效率、高保真度量子存储和操控；原子里德堡态对微弱微波信号振幅和相位的高精密测量，实现 10^{-9}Vcm^{-1} 量级微波信号电场强度测量，测量灵敏度达到 $10^{-7} \text{Vcm}^{-1} \text{Hz}^{-1/2}$ 量级；基于量子资源复分利用的非确定性因果序结构的高精密量子参数估计，实现单参数估计的超海森堡极

限，解决多参数估计精度制衡问题，实现多参数同时最优估计，以及量子参数估计的鲁棒性；构筑纳米磁球、固态自旋、人工微纳器件、光晶格超冷原子气体等混合新型量子体系，研究声、光、电磁量子耦合的新机制，发展高精密度量子测量新原理，聚焦在量子雷达、超高精度量子光学陀螺中的应用；

(3) 组建以陕西省高校与科研院所为主的科研攻关团队，打造量子技术陕西铭牌，为秦创原注入原始创新技术；(4) 产出原创性、标志性科研成果。

考核指标：(1) 承担国家量子精密测量重大科研项目；

(2) 建立基于原子系综的量子传感实验平台，实现制备窄带宽 3 维轨道角动量纠缠态；制备热力学温度 $200\mu\text{K}$ 、光学厚度大于 250 的冷原子系综；实现 3 维轨道角动量纠缠态高于 50% 存储效率和高于 90% 存储保真度；实现超海森堡极限的转角测量，以及多参数同时最优估计； 10^{-9}Vcm^{-1} 量级微波信号电场强度测量，测量灵敏度达到 $10^{-7}\text{Vcm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ 量级；实现光学陀螺仪精度优于 0.001 度/小时；(3) 团队成员入选国家、地方人才项目；(4) 获得专利技术；发表高水平学术论文；获批省部级及以上科研奖励 1 项。

物理方向 2：火星大气风场探测关键科学与技术问题研究

研究内容：(1) 瞄准国家行星探测工程计划与需求，承接火星大气探测国家重点项目；(2) 研究基于光学干涉方法

测量火星大气风场和臭氧分布的探测理论体系、探测模式与技术手段，解决火星大气动力学基本参数的静态、同时及实时探测难题；预研火星大气星载探测先进科学仪器，实现火星大气风场等大气动力学参数的模拟星载探测实验，解决火星大气风速、温度和浓度等大气动力学参数的正演模型和高效、精确的反演算法问题；（3）组建以陕西省高校与科研院所为主的科研攻关团队，服务国家行星探测工程，打造陕西行星探测铭牌，为秦创原注入原始创新技术；（4）产出原创性、标志性科研成果。

考核指标：（1）主持完成国家重点项目任务，参与国家火星或对地探测计划任务；（2）建立火星大气探测理论、方法、技术、载荷设计及探测模式。完成以下技术指标：探测大气高度范围：15~45 km；风速探测范围：0~300 m/s（最大风速接近 300m/s）；风速探测精度： $\pm 5\text{m/s}$ （水平风场）；探测空间分辨率（垂直）：1km（考虑卫星载荷抖动影响，小于 2km）；温度测量精度：3~5K（温度范围：150~250K）；粒子辐射率：白天探测精度（2%），测量误差（10%）；臭氧浓度：白天探测精度（5%），测量误差（10%）；（3）团队成员入选国家、地方人才项目，相关成像探测技术在秦创原转化应用；（4）发表高水平学术论文，获批省部级及以上科研奖励 1 项。

物理方向 3：纳米光学前沿技术与关键科学问题

研究内容：（1）面向国家能源与环境发展的重大需求，聚焦国家重点研发计划“纳米前沿”与“物态调控”重点项目，结合陕西省光伏与能源、环境产业发展需求，组织研究团队，探索解决方案，承担解决光伏与能源、环境等卡脖子问题的重大项目；（2）利用大气辐射窗口以及辐射制冷的被动降温原理，结合微纳加工制作、化工改性等一系列技术手段，开发降温幅度 $>10^{\circ}\text{C}$ ，同时可供生态环境使用的可降解辐射制冷系统；以硅基和薄膜太阳能电池为研发主题，利用微纳材料技术和纳米光学新工艺、开发高转换效率（ $>25\%$ 以上）的新型光伏电池；基于光与物质相互作用的物理机理，探索光子与生物、生态之间的相互作用机制，并同时利用新纳米光学材料，解决交叉学科的卡脖子问题，提供凝水、治污，以及解决土地沙化的可行性方案；（3）对接陕西省太阳能光伏产业链，攻克光伏与能源、环境高效集成的技术瓶颈，拓展光伏交叉技术边界，打造产学研“三位一体”的孵化平台，支撑纳米光学相关的基础学科以及产业技术的快速发展；（4）以科技为载体，技术为出口，产出原创成果，包括高质量论文、期刊、高价值专利、技术等。

考核指标：（1）承担国家“纳米前沿”以及“物态调控”等方向的重大科研项目；（2）实现降温幅度 $>10^{\circ}\text{C}$ ，同时可供生态环境使用的可降解辐射制冷系统；获得高转换效率（ $>25\%$ 以上）的新型光伏电池的机理和工艺；提供凝水、治污，以

及解决土地沙化的可行性有效性方案；发表高影响力期刊论文，获取发明专利等成果；（3）1-3 名团队成员入选国家、地方人才项目；（4）获批省部级及以上科研奖励 1 项。

物理方向 4：量子多体系统的严格解及其应用

研究内容：（1）对接国家十四五“物态调控”重点研发计划和需求，承接量子多体严格解求解方法国家重点项目；（2）建立求解包括费米子多分量量子可积系统严格解的系统方法，发展基于严格解的动力学和有限温度的热力学等性质的研究方法，开展量子多体系统激发动力学研究，探索原子器件学中的基本结构及其调控方法；（3）组建以陕西省高校和科研院所为主的科研攻关团队，服务国家量子科技工程，打造陕西量子多体理论严格解理论团队，为秦创原量子科技提供原始创新理论支撑；（4）产出原创性、标志性成果。

考核指标：（1）瞄准国家十四五“物态调控”重点专项和基金委“十四五”规划量子物理发展内容，承接重大、重点项目；（2）建立求解包括费米子多分量量子可积系统严格解的系统方法，基于严格解，在超冷玻色、费米量子气体中设计新的拓扑系统，探测其独特的量子性质，动态操控拓扑量子态；产生并探测量子多体纠缠。为各类量子霍尔态和 Majorana 费米子等新奇量子态在拓扑量子信息与量子计算方面的应用奠定基础；（3）团队成员入选国家、地方人才项

目，建设成为一支具有国际水平的量子多体精确解理论团队；

(4) 发表高水平学术论文，获得省部级以上科研奖励 1 项。

物理方向 5：纳米腔光场调控及其与发光物质相互作用的关键科学与技术问题研究

研究内容：(1) 瞄准光场调控物理及应用国家计划和需求，承接基于微纳结构的光场调控国家重点项目，以及新型光场调控物理及应用重大研究计划；(2) 寻求构建纳米及亚纳米光腔结构、纳米腔与发光物质复合体系的新方法和新途径；研究新型纳米及亚纳米腔结构对振幅、频率、偏振态等近场光信息的调控机制；揭示纳米腔光场对稀土掺杂纳米结构、量子点等发光物质的物态结构、量子产率和辐射速率的调控规律和物理机制，解决稀土掺杂微纳光学体系光量子产率低、辐射寿命难以大幅调控等科学问题，促进相关应用发展；(3) 组建纳米光学相关的科研创新团队，服务国家光场调控物理及应用需求，为秦创原注入纳米光学及纳米光场调控相关原始创新技术；(4) 产出原创性、标志性科学研究和技术创新成果，获批省部级及以上科研奖励。

考核指标：(1) 主持完成国家重点或重大研究计划项目；(2) 纳米及亚纳米光腔结构的等离激元共振波长在 400–1500 纳米、腔尺寸在 0.8–20 纳米精密可调；实现纳米腔结构对近场光 10⁴ 倍以上的场强增强、频率上转换以及左右旋手

性偏振态的精密可调；原位实时调控发光物质的物相和晶型等物质结构性质，实现发光量子产率、荧光辐射速率、发光强度等参数 103 以上的增强，实现稀土掺杂纳米晶体发光量子产率>10%、寿命<50 纳秒；（3）团队成员入选国家、地方人才项目，相关纳米光学及光场调控技术在秦创原转化应用；（4）发表高水平原创论文，申报国际国内专利，获批省部级及以上科研奖励 1 项。

物理方向 6：物理学与医工学科的交叉创新和深度融合

研究内容：（1）推进陕西省高校物理学科基础研究与医学和工学的交叉创新；（2）发挥陕西高校物理学特色和优势，对标陕西省和国家的重大需求，服务地方社会和经济发展；（3）组织国际国内专题学术交流研讨，增强陕西省物理学科的学术繁荣和学术影响；（4）推进机制体制改革，组织基础科学研究项目实施，建设“访问学者之家”，打造陕西数理基础科学研究院特色品牌。

考核指标：（1）推动物理学与医工学交叉的国家级重点项目落地；（2）在秦创原落地物理学相关产学研融合项目，建设校企协同创新联合体；（3）组织 2 次以上国际和全国性学术会议；（4）推进陕西数理基础研究项目顺利实施，吸引 2 名以上高水平领军型访问学者进驻研究院。

（二）一般项目

一般项目主要用于支持预期可以产生原创性科研成果，提升原始创新能力，有望承接国家级重大、重点项目或任务的基础研究团队。本类项目每项经费 20 万元（其中 10 万元由陕西数理项目资助，10 万元由项目依托单位匹配），实施周期为 2 年，项目的主要考察点包括：（1）取得重大原创性学术成果，得到同行认可；（2）显著提升原始创新能力，利用秦创原平台，产生明显经济或社会效益；（3）承接国家级科研项目任务，显著提升基础学科的学术影响力。对于未完成上述任何一项考核指标的，将被列入负面清单；项目考核优秀的将视具体情况予以奖励或升级支持。

2022 年度拟围绕数理研究院的 5 个核心方向设立 40 个一般项目，总经费 800 万元。

方向 1：基础数学

基础数学的创新研究不断激励着各个相关学科的发展，在纯数学及相关领域诸如密码学、量子信息等科学也带来了广泛的影响，对现实技术瓶颈的突破产生了重大推动。基础数学方面主要支持数论、代数拓扑、偏微分方程等方向研究，在数论基础研究中给出素数性质和分布规律，将有助于突破现代科技中的加密算法、信息安全的核心理论问题。在代数拓扑方向的基础研究中，不动点理论和不动子裙的性质研究

是改方向的国际的研究热点和公开问题。在偏微分方程的基础理论研究中，解的奇异性和正则性理论进展在几何设计、最优控制、反问题等方面有着广泛的应用。

【科学目标】

本方向旨在发展数论方向围绕黎曼猜想、哥德巴赫猜想、孪生素数猜想、费马大定理等核心问题开展特征和与指数和估计、素数分布与编码、以及自守形式与 L 函数等研究。代数拓扑方向开展经典不动点指数的群论新的刻画、以几何群论为工具的流形上尼尔森不动点理论、无球流形的不动点指数有限性等研究。偏微分方程方向开展非线性 **KPZ** 型方程的局部适定性与梯度爆破、最优边界正则性与自由边界正则性、齐次化理论等研究。

【2022 年度拟重点资助的研究方向】

1.1 特征和、指数和估计问题

Dirichlet 特征、指数和是数论中举足轻重的数论函数，与 **Waring** 问题、**Riemann zeta** 函数理论、素数分布、整点问题以及 **Diophantus** 逼近等解析数论问题密切相关，而且估计特征和、指数和是研究这些问题的关键。在很多问题（例如哥德巴赫猜想）的解决过程中发挥着不可替代的作用。对不同形式的特征和、指数和的估计问题都极具理论挑战性，同

时在密码学中的二进制伪随机序列的构造，网络通讯及计算复杂性中 Ramanujan 图的精确构造，某些量化系统的误差估计等领域有着广泛的应用。

1.2 素数分布与编码问题

素数分布问题是数论中的核心问题之一，古希腊时代人们就证明了存在无穷多素数。之后有关素数分布的重要问题层出不穷，其中包括了孪生素数猜想。目前为止，存在无穷多孪生素数（相差为 2 的素数对）问题仍然未能解决。1900 年希尔伯特在国际数学家大会上提出了 23 个最重要的数学问题，孪生素数猜想作为希尔伯特第 8 问题中的一部分，在数论研究中占有重要地位。目前，信息的加密、解密、破译等问题都与数论难题的求解联系在一起，主要涉及数论中的大数分解、素性测试、以及如何利用剩余系及原根等理论来改进现代公开密钥密码系统的保密性。素数性质和分布规律的研究将有助于突破现代科技中的加密算法、信息安全的核心理论问题。

1.3 自守形式与 L 函数

自守形式及其 L 函数是现代数论的重要研究对象，其解析性质和算术性质与 Sato-Tate 猜想、BSD 猜想、Riemann 假设及 Langlands 纲领等核心问题密切相关。通过代数几何、表示论、调和分析、动力系统、概率论等不同分支的方法交

又融合，对自守形式及其 L 函数展开研究，进一步使现代数论的内涵得到了极大的丰富。尤其是对自守形式及其 L 函数的均值、非零性、亚凸界及自守形式的 **Fourier** 系数等展开深入研究，具有重要的理论意义。

1.4 尼尔森不动点理论以及其几何群论

代数拓扑方向围绕低维流形的尼尔森不动点理论以及其几何群论的刻画等核心问题，开展经典不动点指数的群论新的刻画、以几何群论为工具的流形上尼尔森不动点理论、无球流形的不动点指数有限性三个方面的重点研究。这些问题是目前国际的研究热点和公开问题。

1.5 非线性 KPZ 型方程的基础理论研究

偏微分方程方向围绕非线性椭圆与抛物方程解的正则性、奇异性以及渐进性核心问题，开展非线性 **KPZ** 型方程的局部适定性与梯度爆破、最优边界正则性与自由边界正则性、齐次化理论三个方面的重点研究。这些研究属于偏微分方程的基础理论，目标不仅是在解的奇异性 and 正则性理论方面取得若干重要进展，而且所得理论将在几何设计、最优控制、反问题等方面有着广泛的应用。

方向 2：大数据分析的统计基础与核心算法

随着大数据时代的来临，爆炸式增长的复杂数据呈现出

海量性、时变性、异构性、分布性等复杂性质，极大地破坏了传统统计学的理论假设和算法基础，使得经典统计推断方法在处理和析大数据时常常出现严重偏差，甚至完全失效。该研究方向聚焦于构建能够支撑复杂大数据分析的统计基础理论体系，结合统计思想创新人工智能算法，突破大数据技术发展中基础理论和计算方法的瓶颈，面向国家典型行业的大数据分析需求，切实服务国家大数据战略发展。

【科学目标】

本方向旨在发展针对大数据计算的基本计算问题,研发统计学与机器学习相结合的大数据分析基础理论与高效算法;针对分布式数据分析的典型任务,研发高效的大数据分布并行的核心算法基础;针对流数据高效处理和实时分析的需求,研发足以支持百万亿级以上混合数据与流数据应用的基础算法;针对现代科学领域中超高维矩阵数据的复杂运算,研制高精度,低复杂度的矩阵运算方法;针对非独立同分布,超高维、伪相关下的复杂大数据,推导相关统计极限理论和统计推断方法。

【2022 年度拟重点资助的研究方向】

2.1 大数据计算的基础算法与数学理论

面向数据科学与大数据技术中核心理论与计算方法,

深入探索大数据理论与计算方法中的核心难题，并将大数据的方法以创新的方式应用到社会运行核心行业。该方向尤其支持针对大数据计算的基本计算问题，研发可扩展、误差可控、理论上可证明正确的基础算法，为大数据核心算法的研发提供不可或缺的基础，支撑大数据、云计算重点研发中的理论问题。

2.2 大数据分布式基础算法研究

针对能够学习包含数百万至数十亿参数的复杂模型的机器学习系统的新需求，设计和开发高性能的分布式机器学习软件以及通用的机器学习框架。尤其对于大数据分析的典型任务，研发在分布并行环境下高效的大数据分析核心算法，为大数据分析应用开发提供核心算法基础。聚焦深度学习和核方法，支持百万亿级以上混合数据与流数据应用，支撑大数据机器学习算法。

2.3 流数据的实时分析与基础算法

在互联网的应用背景下，数据的采集和数据驱动的应用都要求数据分析系统具有对流式数据的实时处理能力。本方向针对流数据的高效处理和实时分析需求，主要支持大数据查询处理、大数据推理方法及支持大数据计算的数据组织等方面研究，提供流数据的实时分析基础算法等。针对快速增长且不断变化的海量流数据，设计与实现创新的数据表示和

处理方法，特别是要与学习、建模方法相整合，实现针对数据流去识别和检测模型变更。

2.4 大数据的降复杂度运算研究

针对现代科学领域中出现的超高维矩阵数据的复杂运算，研制精度高，计算复杂度低的矩阵数据运算方法，降低传统方法的运算成本，从而达到降低芯片计算资源损耗的目的，同时满足更高数据率和更低时延的需求。同一个问题，算法的质量优劣将影响到算法乃至整个方案的实施效率。该方向研究支持从时间复杂度和空间复杂度等方面进行降复杂度计算方法和算法分析研究，从而促进通信、网络和其他相关领域的发展。

2.5 复杂大数据的统计极限理论

当下人工智能的主流技术是以对大数据的加工处理为基础的，它的模型、分析、计算基础都根植于统计学。为了能将 AI 模型与分析置于坚实的大数据分析框架中，需要对非独立同分布，超高维、伪相关下的复杂大数据重建大数定律、中心极限定理等概率论工具，需要在真实的大数据条件下去建立各种估计的大样本性质，这是建立可信、可解释人工智能的必备条件。该方向尤其支持复杂大数据的统计极限理论、大数据抽样理论、大数据统计推断方法等方向的统计学基础理论创新。

方向 3：数学物理与量子场论

历史上，数学与基础物理的发展一直相辅相成。物理学的每一次变革均伴随着全新数学工具的引入，新的数学理论的发展则构建了物理学的严格科学基础。数学物理作为两门学科的重要交叉，其核心问题将同时对两个领域的发展产生重大推动，并启发新的前进方向。

量子场论是粒子物理标准模型的数学基础和理论框架，被广泛应用于核（天体）物理、引力、宇宙学及凝聚态理论等物理分支。随着大科学装置的建造升级和天文观测的持续推进，一方面新现象的发现需要拓展现有理论的应用，另一方面又需要突破现有理论框架的新理论。量子场论的发展与应用对于探索物质基本相互作用、物质层次结构和演化规律具有巨大的推动作用，并将促进相关交叉学科的发展。

【科学目标】

本方向旨在发展数学物理和量子场论等方面的基础研究，孕育基础理论研究突破，为非线性物理、光纤通信、海洋洋流、引力物理等领域中复杂可积系统提供全新工具；拓展对物质基本相互作用规律的认识，促进粒子物理、核（天体）物理与宇宙学等的交叉研究。

【2022 年度拟重点资助的研究方向】

3.1 高秩代数相关的可积系统

量子多体系统包含超导、超流与量子霍尔效应等多种新奇现象，与之相关的新材料开发和器件制备应用前景广泛。瞄准高秩代数的可积系统，发展非对角代数 **Bethe ansatz** 方法，在重要的高秩对称代数系统实现严格解求解，并推广至相应高秩超导模型，为高温超导和量子霍尔效应的实验研究和器件制备提供基础理论支持。

3.2 非线性系统的可积问题

光纤通信、海洋潮流等非线性现象中广泛存在孤立子现象。高度对称孤立子具有可积性，但其严格求解一直具有极大的挑战性。在动态场景中，非线性演化会导致诸多实际重要的奇异现象，围绕物理系统中的新奇局域波结构、探究如何操控局域波的物理性质、利用严格分析手段具体表征出局域波的物理特性并探究各种激发元的产生机制等三个方面开展研究，为相关通信、光学产业提供创新支撑。

3.3 引力场的渐近行为及其相关数学问题

引力场求解通过一组偏微分方程得到，其严格解的条件苛刻，此时考察渐近行为是一种惯用的方法。研究其中涉及偏微分方程技术的数学问题，特别是在一定时空对称性下，偏微分方程的算子理论和解的生成技术。

3.4 孤子分解猜想

孤子分解猜想预言所有的非线性色散方程整体解在时间足够大时会分离成若干个孤立子解与一个散射项。目前该猜想不仅是非线性科学中的重要问题，也是偏微分方程理论著名公开问题。基于孤子分解猜想，开展完全可积和不可积系统孤立子解和多孤立子解存在性、唯一性、轨道稳定性、渐近稳定性的研究。

3.5 夸克胶子等离子体的物态与相变

结合大科学装置重离子碰撞实验中产生的新信号和夸克胶子等离子体相变的问题，开展有限温度有限密度下量子场论的拓展研究和应用，系统分析极端条件下新奇物态的热力学性质、演化规律，揭示输运现象与量子色动力学相变的关系，提供早期宇宙演化的新视野，促进粒子物理、核（天体）物理、宇宙学的交叉研究。

3.6 味物理与重夸克偶素物理

聚焦标准模型中电弱对称性的破缺机制，探讨 Higgs 机制之外的可能破缺模式，分析 Higgs 粒子与各种其它标准模型粒子的耦合，研究味道混合的不同方案。探讨微扰 QCD 在重夸克偶素产生和衰变中的唯像学应用，检验不同因子化方案的有效性，以及确定因子化过程中的相关参数，推进对粒子物理标准模型的理解，探寻超出标准模型的新物理。

方向 4：物质结构及功能调控

微观、介观和宏观等跨尺度物质结构与性能之间的构效关系是催生变革性关键技术，研发新型功能材料，以及开发信息器件和特异性药物的物理基础。建立跨尺度物质结构设计与精准构筑策略，开发超高时空分辨物性表征新方法，理解其结构与功能调控机制，可为实现跨尺度结构下的功能材料设计与物性和物相调控提供基础，并为探索其在量子科技、能源催化、信息器件、精密测量与传感和医学诊断与治疗等领域的潜在应用提供指导，为氢能和太阳能等绿色能源、先进功能材料、廉价高效催化剂创制、多功能信息器件构建、人民生命健康和药物研发等具有重要战略性的新兴产业的发展具有重要的引领和支撑作用。

【科学目标】

本方向旨在发展基于量子力学和经典力学的结构设计理念与理论方法，开发新奇结构与物性的探测技术及其调控方法，阐明纳米团簇、二维材料、生物分子及其复合结构等具有原子级精度的结构的制备与调控方案、构效演变规律、功能机理等，揭示光子、电子、原子和分子在物质表界面及物质中的输运、转化及相互作用的物理化学机制。

【2022 年度拟重点资助的研究方向】

4.1 跨尺度物质结构设计与精准构筑

建立跨尺度物质结构的定向设计与精准构筑策略、高效与宏量制备方案，认识和理解跨尺度物质结构的稳定性机制，揭示跨尺度物质的设计原理与调控规律。理解跨尺度物质结构内部与表界面的电子转移、原子之间相互作用、多尺度物质与环境及外场，如电场、磁场、光场等物理场及耦合场之间的相互作用规律，揭示跨尺度物质结构的演变规律与构效关系，实现功能复合。

4.2 跨尺度物质的物性表征与电子结构及演变规律

发展超高时空分辨的实验探测技术与跨尺度物质的电子结构理论，开发适于跨尺度物质体系的计算方法和软件，探索宏观、介观和微观等跨尺度结构对其物理性质如磁学、电学和光学等、化学性质如电子结构、电荷转移规律等的影响规律。发展先进的跨尺度物质结构制备技术，开发跨尺度物质的物理化学性质表征新方法，揭示跨尺度物质的生成机制、生长演化规律及其动力学性质等。

4.3 跨尺度物质与性质的调控机制

聚焦跨尺度物质的精准设计、制备及其性能突破，基于新型物相状态和微尺度相变，调控功能组成基元的有序分布和组织结构，研究功能基元之间的相互作用机制，探索功能

基元与广义缺陷、多物理场（力、热、光、声、电、磁等）的耦合作用机制，建立阐明“物相构筑—序构调控—作用机制—优越性能”几者之间的依赖关系，发展以物相构筑和序构调控为基础的跨尺度物质的设计新原理、新方法与人工作调控，实现跨尺度物质的高性能化与多功能化调控。

4.4 跨尺度物质的功能与应用

聚焦国家战略领域，面向双碳目标和人民生命健康，探究氢能和太阳能等绿色能源的产生和高效转换及其长效机制、高能量密度和高功率密度存储与输运、高功率低能耗的光电信息器件等领域的关键科学问题，支撑新能源和信息技术开发及大规模应用中的重大原理与技术突破，引领能源和信息领域的变革性研究。同时，发展高时空分辨原位谱学、成像与图像重构技术，探索生物分子如蛋白组装体的结构及其演变规律、以及周围环境如生物体体液的溶剂化效应等，阐明生物分子结构与功能之间的决定因素，厘清生物体系变化的物理特征和规律。进一步，探究人类重大疾病如神经退行性疾病、高血压、高血栓和烈性传染病的分子机理，为设计或筛选靶向小分子、广谱抗体和多肽药物等特异性药物提供实验和理论参考。

方向 5：量子科学和先进光学

相对论和量子力学是现代物理学的两大支柱。量子科技发展具有重大科学意义和战略价值，是一项对传统技术体系产生冲击、进行重构的重大颠覆性创新，将引领新一轮科技革命和产业变革方向。加快发展量子科技，对促进高质量发展、保障国家安全等具有非常重要的作用。随着先进激光技术、光源技术、加速器技术和材料技术等飞速发展和相关领域国家大科学装置的启动与建设，现代光学正在不断向超快、超强、超短、超分辨等极端方向推进。量子科学和先进光学的结合必将带来变革性的创新。

【科学目标】

本方向旨在充分结合量子科学和先进光学，开展基础科学研究，孕育重大科学技术突破，催生一批新的重要科学思想和科学理论。

【2022 年度拟重点资助的研究方向】

5.1 高能量密度物理与超快反应动力学

高能量密度物理与超快反应动力学是科技强国在国防安全、天体物理及聚变科学等基础领域竞相追逐的研究前沿，也是神光系列激光聚变装置、“十二五”重大基础科研设施强流重离子加速装置、大型 Z 箍缩装置、超短超强 PW 激光、“阿秒光源”等现有、在建和筹建的国家大科学装置的主要科学技术目标。项目鼓励在高能量密度物理和超快反应动力学前沿研究方面形成特色、取得世界一流的学术成果，与此

同时积极推动激光与粒子束技术及其在医疗、核能、材料、环境等领域的技术突破和创新应用。

5.2 量子多体相干调控研究

以精准操控光子、电子和原子等量子系统为突破口，针对量子信息、量子计算、超越经典物理极限的高精密测量及量子特性器件研发是当前量子科技亟待解决的关键科学问题。项目着眼于构建普适量子相干系统和关键量子功能的新机制，探索量子通信、量子计算、量子精密测量的新机理与新方法，突破现有信息与测量技术中由于物理极限造成的瓶颈，实现基于量子力学原理的信息处理新技术。计划在相干原子介质、固态量子系统、超冷原子气体、光与原子相互作用系统等体系开展深入探索，鼓励在量子多体相干调控研究，如费米型多体拓扑物态等上，构建和发展新型信息、通讯和探测技术与方法，为量子计算、量子信息提供新原理和新技术，并对光电器件制造、精密加工、新材料产业等领域的发展起到重要引领作用。

5.3 新型光场调控及其与物质相互作用

光场的时域、频域与空间调控是世界科技前沿，为研究超快、强场和热稠密环境中原子分子动力学行为提供了新的解决手段，进而为先进光源技术、先进成像技术、智能控制与制造、新型功能光学器件发展与革新提供了强力支撑。开

展微纳尺度的极端光聚焦、表征与操控，以及光子-光电器件耦合与操控和等离激元的产生及传输等研究，阐明微纳结构中光子与电子、声子等相互作用新机制。开展多维多尺度探测成像机理研究，解决目标信息获取、处理、融合与应用问题，提高复杂环境下的动态感知和处理能力。项目倡导利用特殊光场的聚焦和传输特性，解决当前空间分辨率受物理衍射极限制约导致的光学系统分辨率低等问题，为分子水平亚细胞结构动态精细观测提供新手段。构建大气二氧化碳辐射超光谱探测、推演理论和系统，为光学遥感、军事侦查、天文观测、深空探测及双碳目标提供科学基础。

5.4 新型辐射制冷量子机制

近代纳米光学基于热辐射经典原理，利用宇宙空间的极寒温度（3K）和地球大气光学窗口，通过设计材料及其结构特征与宏观光学特性，成功实现了辐射制冷/热传导。利用光辐射制冷技术研制的新科技产品，在未来生态环保领域的科技应用与产业布局中具有不可估量的经济效应。但进一步的广泛应用依然面临众多挑战和难题。其中，主要的难题是：传统辐射制冷技术受理想黑体辐射理论的制约，自发辐射制冷的制冷功率仍然较弱，因此目前在许多场景中难以替代主动制冷方式。另一方面，作为辅助制冷/热传导系统，探寻主动制冷的集成条件和原理，实现主/被动一体化也是当下辐射

制冷技术大规模应用需要突破的瓶颈问题。

（三）青年项目

主要用于支持面向基础科学前沿展开探索研究，有望在原始创新方面取得突破和重要学术创新的基础研究青年科研人员。本类项目每项经费 10 万元（其中 5 万元由陕西数理项目资助,5 万元由项目依托单位匹配），实施周期为 2 年。项目的主要考察点包括：（1）取得重要学术创新；（2）取得重要原创突破；（3）取得重要学术影响。对于未完成上述任何一项考核指标的，且未取得任何其他突出业绩，将列入负面清单；项目考核优秀的将视具体情况予以奖励或升级支持。

2022 年度拟围绕数理研究院的 5 个核心方向设立 48 个青年项目，总经费 480 万元。