“十四五”国家重点研发计划“物态调控”重点专项 2021 年度项目申报指南 (征求意见稿)

“物态调控”重点专项的总体目标是通过重点专项支持，在物理规范、新奇物态、调控方法、探测手段等方面取得重要创新，在拓扑超导、低维材料等前沿方向实现结构设计、材料制备、原型器件的重大突破，催生更多引领国际前沿的重大原创性成果。同时，面向国家战略需求发展基于新物态的新技术，发展新型功能器件，为推动新兴产业发展、践行自主创新奠定基础。

2021 年，本重点专项拟优先支持 22 个研究方向，同一指南方向下，原则上只支持 1 项，仅在申报项目评审结果相近、技术路线明显不同时，可同时支持 2 项，并建立动态调整机制，根据中期评估结果，再择优继续支持。

申报单位根据指南支持方向，面向解决重大科学问题和突破关键技术进行设计。项目应整体申报，须覆盖相应指南方向的全部内容。项目执行期一般为 5 年。一般项目下设课题数原则上不超过 4 个，每个项目所含单位数不超过 6 家。

青年科学家项目支持 35 周岁以下青年科研人员承担国家科研任务，可参考重要支持方向（标*的方向）组织项目申报，

但不受研究内容限制。青年科学家项目不设课题。

1. 电子物态调控

1.1 高温超导材料和新型非常规超导材料*

面向高温超导机理难题,为厘清多种有序态的相互竞争关系,建立非常规超导材料的高压($>200\text{GPa}$)调控和原位电阻、磁化率和比热测量系统,发展极低温和超高分辨的特色谱学测量手段,探索新型高温超导和非常规超导材料体系,揭示决定非常规超导材料奇异物性和超导电性的晶体结构、磁学结构和电子结构,解析超导相互作用谱函数并揭示超导配对机理。

1.2 强配对势超导材料及机理研究

针对强相互作用引起的高临界温度超导现象,研发常压下临界温度超过液氮温度的新关联超导体系,发现强配对势超导体的共性特征,建立描述超导体从弱耦合到强耦合的统一图像,在非中心对称和强自旋轨道耦合体系中探寻超导序参量具有手性特征的新型三维超导体。

1.3 二维材料人工异质结的物态调控*

针对二维人工异质结材料中出现的独特强关联物理现象及其潜在应用,设计和制备多自由度耦合的二维材料体系及其异质结构,探寻其中蕴藏的二维磁性、拓扑特性、界面超导、关联电子态等新奇物态,发展电场、应变、转角、光场等多参量调控手段,结合能量、动量、自旋和时间分辨等多维度电子能谱测量,揭示界面能带调控及耦合关联效应对新奇物态的影响机制。

1.4 凝聚态体系的激发态调控

针对凝聚态体系激发态的探测和调控问题,发展兼有高精度时间和空间分辨的凝聚态体系激发态的理论计算方法和实验探测手段,探索凝聚态体系的新奇激发态,实现对电子态和声子态的激发态调控,通过调控与声子耦合作用的电子激发态实现凝聚态体系的物态转变(如结构相变、电荷序、超导等)。

1.5 窄带体系的新奇物态调控和机制研究

针对窄能带体系中的丰富物态和层展现象,构筑具有新奇物性的窄能带体系,结合电场、磁场、应力、掺杂、压力等多种调控方法,获得物态转变的相图;利用先进的谱学和散射技术揭示轨道、晶格、电荷、自旋等微观自由度的演化规律,理解新奇物性产生的微观机理,并探讨可能的应用。

1.6 量子磁体中的新物态与分数化自旋激发的发现和调控

针对自旋交换阻挫导致的量子自旋液体等新颖量子相及其元激发的物态调控,提出量子自旋液体态判定的新思路;发现基于强自旋轨道耦合的新型 Kitaev 磁性体系及多场调控机制;揭示交换阻挫量子磁体中分数化及马约拉纳自旋激发的动力学性质;发现新型阻挫自旋量子相并探寻其新奇物理特性与调控方案;构建量子磁体的异质结,设计功能自旋电子器件。

1.7 轻元素体系中的新奇量子效应和物态调控研究

面向调控原子核量子态的需求,开发同时对电子量子态和轻原子核量子态敏感的原创实验探测技术和全量子化理论方

法；发展和优化大面积轻元素原子单晶材料生长技术，通过原子精度的材料设计，并结合外场和各种极端条件，调控轻元素体系的全量子化效应；研究核量子效应和非绝热效应对轻元素体系物性的决定性影响，从全量子化角度探索调控其物性的有效途径，力争催生超越电子的全新量子物态。

1.8 低维磁性体系的自旋态调控及其应用

针对将电子自旋应用到存储与逻辑运算等基本信息操作的需求，发展低维（二维、一维、零维）磁性体系的自旋态（包括基态和激发态）的制备和高时空分辨表征方法以及自旋运输的动态空间成像表征方法，研究低维磁性体系相互作用诱导的集体行为、磁性与非磁性界面自旋态及其对自旋注入的影响，探索自旋态与自旋运输的关联及其多场调控方法及物理机理，构筑低维磁性体系的自旋电子器件及系统集成。

2. 拓扑物态调控

2.1 无 He-3 极低温制冷机和非常规量子物态调控技术的研发和应用

针对极低温环境在物态研究中的重要地位，以及当前主流制冷机依赖匮乏资源 He-3 的现状，研制不需要 He-3、可以稳定维持低温环境的新一代制冷机；发展不便于在传统制冷机上实现的极低温物态调控技术；研究二维体系在力学、光学和声学等调控手段下的拓扑物态，结合理论揭示新物态产生的机制，并发展制备二维材料器件的新思路和新途径。

2.2 高维度量子霍尔效应与非线性霍尔效应*

针对在三维材料体系中调控量子霍尔效应的挑战,探索实现三维量子霍尔效应等高维度量子霍尔效应和非线性霍尔效应的新体系(如拓扑半金属、高阶拓扑绝缘体、准晶、拓扑电路、扭角二维范德瓦尔斯材料、磁性拓扑绝缘体等);揭示无序诱导,外力诱导,周期场驱动等新机制;研究非对易几何、多参数空间几何相位、相互作用效应、非线性磁电响应、超低频电流探测等新物理;探索在新物相和对称性标识中的应用。

2.3 磁性拓扑物态及其物性调控研究*

针对发展具有关联效应的磁性拓扑物态的需求,将拓扑理论拓展至磁空间群,探索磁空间群保护的新型拓扑不变量和拓扑分类,开发预测磁结构和拓扑不变量的计算工具,发现磁性高阶拓扑绝缘体、磁性外尔半金属等新材料体系;利用谱学、输运性质研究,绘制电荷和自旋动力学谱,获取准粒子激发的新量子数;利用电荷、自旋和轨道等多自由度耦合效应实现对磁性和拓扑态的有效调控。

2.4 拓扑超导物态探测及调控研究*

针对未来信息技术以及量子器件对拓扑物理的需求,寻找潜在的作为拓扑超导态载体的拓扑材料和超导材料;发展观察拓扑超导物态的实验技术手段,实现拓扑边缘态的成像观察和对拓扑超导物态的观测和调控,发现超导磁通芯中的拓扑物态、异质结和纳米线结构中的拓扑超导态和拓扑分数约瑟夫森效应;理解拓扑超导现象背后的机制,发展预言和设计拓扑超导物态的理论。

3. 人工微结构物态调控

3.1 光子人工带隙材料的物态调控与器件研制

针对高性能关键器件的需求,揭示非厄密和拓扑等效应对光子带隙材料能带及光子态的调控规律,发现特有的新现象和效应;发展非厄密、拓扑和多层次嵌套等新型光子结构的设计、制备和表征技术;研制突破瓶颈的两类新型器件:带宽 $>10:1$ 且剖面高度 $<1/6$ 低频波长的剖面超宽带辐射器件,单一工作频率(0.5-5MHz)且发射/接收端面积比 $>10:1$ 的近场无线传能系统。

3.2 激子极化激元多场调控及应用

发展新型微腔光子与低维半导体激子强耦合,揭示激子极化激元产生与调控的新机制,实现单激子与光学微腔强耦合拉比劈裂超过 $500\mu\text{eV}$,与表面等离激元纳腔超过 100meV ;建立激子极化激元调控与探测的新技术,制备新原型器件,实现单光子水平的非线性效应,以及片上单光子开关与逻辑门,实现超低阈值的激子极化激元激射。

3.3 自旋物态调控及其原型器件*

针对未来信息应用需求的爆发式增长,变革自旋物态调控的方法和手段,探索以自旋为信息载体的新原理信息器件。研究自旋物态在电、光、磁等多手段调控下的新现象,特别是探索垂直磁性材料中自旋物态的全电学调控新方法,并阐述内在的物理机制;实现低维半导体中的高效自旋注入、输运和探测(自旋注入效率 $>60\%$);设计并研制新型低维磁性/半导体(超

导)等异质结构,探索相关物理机理和器件新效应(磁电阻效应 $>200\%$)。

3.4 微波腔强耦合体系的物态调控*

开展微波腔与人工原子和固体元激发强耦合体系的物态调控研究,实现微波腔与超导人工原子的深强耦合,发现反旋波相互作用导致的新效应和现象,发展基于宇称对称破缺的探测深强耦合系统量子真空的方法;实现可调控的非厄密物理系统,揭示其对微波强隐身的新机理;实现高性能的表面等离激元与腔的强耦合,探寻在量子极限下的表面等离激元调控。

3.5 基于固态微腔光电子芯片

针对多功能高性能固态微腔光电子芯片需求,探索片上多微腔集成的原理和技术;自主研发针对量子光源优化的生长技术,实现量子点精细结构劈裂 $<5\mu\text{eV}$,线宽 $<95\%$ 傅里叶变换极限且效率 $>90\%$ 片上量子光源;实现与硅基光电子器件集成的固态量子芯片,构建基于纳腔的室温量子强耦合系统和室温量子逻辑门器件,并演示片上高灵敏量子探测。

3.6 低维超冷原子气体的物态、表征与输运特性研究*

针对低维超冷原子物态制备和表征中的关键科学问题,通过引入新型盒子势,无序势、人工规范势和相互作用等精确调控手段,实现均匀量子气体、摩尔晶格中的超流、量子磁性以及液滴态等;发展时间分辨率为微秒的相互作用调控以及空间分辨率为单格点的自旋、密度、相位调控和测量技术,高精度表征低维体系的相变、演化和输运性质。

3.7 超冷原子气体的多体关联物态与动力学调控*

超冷原子气体是研究新型多体关联物态和非平衡态动力学的一个重要平台。发展新型光晶格中自旋和高轨道自由度的精确调控技术,实现自旋和高轨道系统关联和多体激发态拓扑相;实现自旋-轨道角动量耦合,揭示非平衡态动力学中标度不变和对称性破缺等具有普适性的物态性质;探索非平衡体系动力学行为的普适性规律、拓扑和动力学物相;建立表征动力学相的新的基本概念和普适理论。

3.8 基于冷里德堡原子的新奇物态调控*

针对里德堡态原子集合物态特性及在复杂系统演化中的应用问题,利用数目可控、长相干时间、强相互作用的单原子阵列和冷原子气体,实现里德堡极化子、里德堡超原子、里德堡原子多体激发态和拓扑态等新奇物态;研究物态之间的相变规律;探索新物态在复杂系统稳态结构与相干控制演化、能量相干传输、电磁场灵敏测量等方面的应用。

3.9 面向下一代通信技术的人工微结构物态调控及智能器件*

针对下一代通信技术在大视场、高精度、小型化天线技术方面的需求,突破传统材料性能和器件架构限制,探索多原子体系与新奇分子物态、多场耦合的人工带隙结构、半导体人工微结构材料及其物态调控技术,发展集纳米光源、信息编码、智能检测、逻辑计算于一体小型化器件,为下一代超高带宽、超低能耗通信技术提供关键器件支撑。

3.10 超低温离子晶体物态高精度测量与调控及应用*

针对精密物理测量与高精度时频应用中超低温离子云及离子晶体物态调控问题,发展高精度谱学测量方法,开展相变和动力学研究。基于深度冷却的离子体系,实现高精度时间频率标准及其远距离比对并探索在航天测控中的应用;基于协同冷却的分子离子体系,实现高精度光谱测量并结合理论计算获得质子-电子质量比。