

科技创新 2030——“量子通信与量子计算机” 重大项目公开竞争类项目 2023 年度 项目申报指南

(征求意见稿)

为进一步提升我国量子科技领域的研究水平，依据科技创新 2030——“量子通信与量子计算机”重大项目实施方案，现提出本重大项目 2023 年度公开竞争类项目申报指南。

本重大项目将在量子通信、量子计算与量子精密测量三个领域部属公开竞争类项目，拟支持 13 个研究方向（每个方向原则上支持 1 个项目），实施周期一般为 5 年。同时拟在上述三个领域支持青年科学家项目不超过 15 项，研究内容不受指南方向限制，实施周期一般为 5 年。

1. 量子通信

1.1 高效率、低暗计数超导条带光子探测技术

研究内容：面向远距离量子密钥分发、光量子计算等应用需求，开展超导条带光子探测(SSPD)技术研究，探究 SSPD 器件非理想本征探测效率的抑制机理、光学结构中的光子损失机制、暗计数起源问题与抑制方法，研制高效率、低暗计数 SSPD 器件，形成成熟稳定的工艺流程及规范，提升器件产率；发展多通道 SSPD 电子学模块、小型高效长寿命制冷机、微型便携液氮杜瓦和低温恒温器等实用化配套技术。

考核指标：高效率 SSPD 器件：最优探测效率

≥99%@1550nm; 低暗计数高效率 SSPD 器件: 暗计数率≤1cps 时系统探测效率≥95%@1550nm; 液氮温区 SSPD: 最大系统探测效率≥60%@1550nm&4.2K; SSPD 成品率: 产率 80%@系统探测效率≥80% (2 英寸晶元)。

1.2 空地一体化机动量子网络

研究内容: 构建光纤和无人机移动平台相结合的机动量子网络, 包括: 研制适用于光纤和自由空间一体化量子通信的双色偏振纠缠光源, 建立光纤与低空无人机一体化量子网络, 以光纤为骨干, 通过无人机等移动平台实现量子信息的末端接入, 推动多用户、全连接、可机动组网。

考核指标: 通过多重准相位匹配技术制备光子波长分别为 810nm 和 1550nm 的双色偏振纠缠光源, 纠缠光子对制备速率≥1Mcps, 封装重量≤1kg; 建立 3km 无人机间空空移动量子链路和 3km 无人机与地面端的空地量子链路, 跟瞄系统总重量<1kg, 满足移动用户最高角速度 5°/s、最高速度 500km/h 情况下的接入要求, 实现无人机和光纤网络节点间纠缠光子分发, 全链路距离≥20km, 符合计数率≥1000cps, 保真度≥85%; 开发无人机载多指向跟踪瞄准技术, 单节点同时跟踪目标数≥3, 利用无人机实现两个光纤节点和一个运动用户之间的量子链路建立, 并完成可切换的纠缠光子分发。

1.3 基于量子保密通信网络的光纤振动精密测量和应用

研究内容: 开展基于量子保密通信网络的光纤振动传感技术研究。探究基于瑞利光偏振分集和单光子检测的超高灵

敏光纤城域网振动传感方案；研究基于超远距离双场量子密钥分发系统的、长距离和高分辨的地震波精密解调技术；发展基于现场光纤观测的振动事件监测、定位和地下结构精细成像算法，开展城市地下结构、大型基础设施、大型断裂带和海洋监测等场景演示。

考核指标：构建光纤瑞利光偏振分集和单光子检测的光纤振动传感方案并实验实现，振动测量自噪声水平优于 $5\text{p}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 、空间分辨率 2m；发展远距离双场量子密钥分发系统的光纤地震传感技术，支持现场光纤长度不小于 600km，震源定位精度 200m；建立人工智能地下结构成像方法，实现局部结构分辨率 10m，区域(>500km)成像分辨率优于 200m；利用现有光纤网络和量子通信网络开展不少于 3 个典型场景的演示。

2. 量子计算

2.1 分子电子结构和性质的量子计算研究

研究内容：研究分子电子结构的高精度量子算法，发展有效哈密顿量与变分算法的组合技术；研究分子响应性质的可扩展量子算法，发展降低测量次数和使变分优化有更好鲁棒性的技术；研究多比特分子体系电子和原子核动力学的量子算法，发展自洽的量子经典混合时间演化方案和自适应的变分波函数形式。

考核指标：在可编程量子计算机上，实现化学精度 (1milli-Hartree) 的分子势能面、多量子比特(>10)分子响应性

质和光合作用模型体系中能量转移动力学的量子计算。

2.2 “光-物质”耦合系统以及极化激元的量子技术应用

研究内容：发展光学调制关键技术，实现环状极化激元凝聚，实现单量子比特；发展延长移相时间方法和技术，优化量子比特性能，构建双比特量子门；搭建可运行 Deutsch、Grover 等算法的量子网络；研究自旋极化之间的相互作用，控制相互作用的强弱与方向，实现多相之间的转换，实现 Ising 仿真。

考核指标：单量子比特的退相干时间与操作时间之比 > 100 ，保真度高于 90%；双量子比特门保真度高于 80%；实现 100 个空间分布的玻色爱因斯坦凝聚体的相干耦合；控制二维自旋极化网络，实时观测铁磁、自旋玻璃、反铁磁相之间的转换。

2.3 基于中性单原子阵列的量子计算网络研究

研究内容：研究基于中性原子的通用量子计算机和量子网络关键技术，包括基于异核中性原子阵列的量子计算；基于强耦合腔 QED 的多比特量子节点；基于光纤 FP 腔的高效光子比特存储；多比特量子纠缠的产生和表征。

考核指标：实现 100 个以上异核量子比特的原子阵列量子寄存器，每个量子比特的相干时间都达到 500ms 以上；实现高保真度的异核量子逻辑门，保真度达到 99%；在异核原子阵列中演示量子纠错；实现基于二维单原子阵列与光学腔强耦合的多比特量子网络节点，耦合阵列原子数 > 10 ，单原

子与光学腔耦合协同系数 >1.5 ；在量子网络节点中实现单光子量子比特的可控存储与读取，存储时间 $>200\text{ms}$ ；实现基于强耦合腔 QED 系统的单原子-单光子量子逻辑门和单光子-单原子纠缠态，保真度 $>90\%$ 。

2.4 拓扑量子计算器件中局域电子态的空间分辨研究

研究内容：针对马约拉纳零能模等关键拓扑电子态制备成功率的微观机制问题，基于低维材料面外和面内异质结的超高真空生长技术，设计原位制备拓扑超导器件；发展可在同一个器件中进行宏观的电输运表征和原子级精度的扫描探针谱学表征的技术；厘清影响器件中局域电子态拓扑性质的微观因素；探索适合超高真空原位制备的拓扑量子比特实现方案。

考核指标：实现器件核心异质结的超高真空原位外延生长，实现原子级尖锐界面；在同一个器件中实现电输运与扫描探针谱学表征手段的结合；表征的空间分辨率优于 0.1nm ，能量分辨率优于 0.05meV ；通过外加电场、磁场、变温、尺寸效应等手段，研究局域电子态的调控，变温范围 $30\text{mK}\sim 77\text{K}$ ，尺寸效应涵盖微观到介观尺度；在以上研究的基础上，提出兼容超高真空原位制备技术的拓扑量子比特的设计方案并制备原型器件。

3. 量子精密测量

3.1 纳米磁性金刚石量子传感研究

研究内容：发展基于纳米金刚石中氮-空位（NV）色心

自旋量子控制和量子测量理论与技术；研究纳米磁性颗粒的热力学；研究纳米磁性颗粒在临界温度附近的磁性涨落；确定纳米磁性临界涨落的热力学性质对纳米颗粒尺寸、形状、组分等因素的依赖关系；研究自旋比特量子弱测量的高阶关联和量子环境中的多体关联。

考核指标：基于金刚石 NV 色心自旋的超灵敏温度测量技术，最佳灵敏度可达 $10\mu\text{K}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级、适用温度范围覆盖 4K 至 1300K、空间分辨率优于 300nm；实现对相变、自发对称破缺、热剩磁等现象在单纳米颗粒上的直接观测和定量测量；实现对顺磁、超顺磁、铁磁共振涨落的刻画和区分，动力学时间尺度跨度至少 12 个数量级(纳秒至千秒)、温度控制稳定性及温度测量精度达到 mK 量级；探测量子多体关联，关联阶数不低于四阶、频率分辨率达到 Hz 量级。

3.2 基于量子传感与压缩感知的高时间分辨动力学精密光谱测量技术

研究内容：从理论和实验上发展基于压缩感知的动力学时间分辨二维光谱技术；系统研究量子光场在时间分辨光谱测量中的优势，设计并实现相应的量子光谱学方案；理论探索特殊应用场景中新型关联光谱的实验方案。

考核指标：实现时间分辨动力学过程的压缩感知二维光谱探测技术，扫描时间精度 $<10\text{fs}$ ，扫描时间跨度 $>5\text{ps}$ ，在 1kHz 重复频率的激光器系统中实现 10s 内采集单个二维光谱；发展和实现以量子光场为探测手段的时间分辨光谱测量

技术，实现 5 通道以上纠缠压缩光线性吸收光谱探测，实现 10ps 时间尺度的纠缠光泵浦-探测光谱测量；建立无需标准样品的区分手性分子的二维光谱理论方案，实现基于二维光谱的手性分子丰度测量实验，误差低于 1%；建立强激光场中的二维光子-电子关联光谱的动力学测量方案。

3.3 多物理场跨尺度极微弱目标量子探测技术

研究内容：针对跨尺度极微弱目标探测和成像的难题，开展基于量子技术的多物理场信息获取理论与方法研究，突破多维信息增益量子成像、极微弱信号超灵敏解译与感知、室温固态微波激射等关键技术，实现可见、红外至微波大跨度电磁波量子探测成像，提升在亚微米级显微成像至大场景远距离遥感的应用能力。

考核指标：实现光量子成像多维度信息增益，空间分辨增益 ≥ 4 ，信息量增益 ≥ 8 ，动态范围增益 ≥ 50 ；实现场景特定区域的自适应光子调制与目标增强，调制不均匀度 > 50 ；建立低信噪比光子信号超灵敏解译方法，完成低信噪比目标感知技术验证实验，信噪比增益 ≥ 3 ，检测概率 $\geq 90\%$ @信噪比 < 1 ，荧光强度 ≤ 0.02 光子/激光脉冲；最小可探测微波信号功率 $\leq -100\text{dBm}$ ，室温下噪声温度 $\leq 30\text{K}$ ，增益 $> 10\text{dB}$ ，增益带宽 $> 2\text{MHz}$ ，测磁灵敏度达到 $1\text{pT/Hz}^{1/2}$ ，空间分辨率达到亚微米级别。围绕以上考核指标，实现极暗、极弱、极小目标的超灵敏量子探测与识别，解决电磁频谱对抗、深空探测、生物威胁应对等领域的战略亟需。

3.4 芯片集成的窄线宽激光器和光频梳

研究内容：自主研发异质集成光芯片 CMOS 工艺，制造基于 CMOS 芯片技术的高品质因数光学微腔，开发激光器与光学微腔的混合和异质集成技术，探索集成光学微腔中的亮孤子生成和演化的动力学过程，实现芯片集成窄线宽激光器和光频梳。

考核指标：基于 6 英寸以上硅衬底的 CMOS 工艺全流程自主可控，制造光波导损耗 $<0.7\text{dB/m}$ 光程，光学微腔本征品质因数大于 40×10^6 ，自由光谱范围 $<40\text{GHz}$ ；窄线宽激光器本征线宽 $<50\text{Hz}$ ，输出功率 $>5\text{mW}$ ；锁模光频梳的宽度 $>10\text{nm}$ （-3dB），输出功率 $>2\text{mW}$ 。封装后的窄线宽激光器和光频梳模块体积均 $<250\text{cm}^3$ 。

3.5 基于原子纠缠态的高灵敏度量子精密测量

研究内容：研究千亿个原子大自旋任意操控的方法；制备稳定和确定性的原子自旋压缩态；发展可连续进行传感测量、突破标准量子极限的新型精密测量技术；发展基于里德堡阻塞的原子系综自旋压缩态、猫态等量子纠缠态实现的新方法；基于光或原子的纠缠态实现量子增强的场强灵敏测量，达到微波测量的量子极限；发展基于“原子气-微纳结构光纤”的量子态调控技术和新型全光纤原子传感器。

考核指标：实现稳态下的大原子系综自旋压缩，压缩度 $>3\text{dB}$ ；微波测量电场灵敏度优于 $10\text{nV/cm/Hz}^{1/2}$ ，空间分辨率优于 $10\mu\text{m}$ ；实现突破光的散粒噪声或原子投影噪声限制

的量子增强的微波测量；实现全光纤原子磁力计。

3.6 原子钟精度分子指纹谱精密测量技术

研究内容：发展超宽带红外高精度与高稳定的光频梳光源，形成突破分子多普勒极限的超宽带红外多维非线性光梳光谱方法，融合光声光谱、光力光谱、多光梳变频光学取样等技术，解决宽带红外超灵敏探测、分子指纹谱及分子相互作用精密测量等问题；发展分子宽带红外光谱超高速捕获方法，实现瞬态分子指纹谱与大分子指纹图谱精密测量以及大视场超灵敏红外光谱成像；推进原子钟精度的分子指纹谱数据库建设。

考核指标：高精度光梳频谱覆盖中远红外 2-14 μm ，梳齿频率线宽 $<100\text{Hz}$ ；光梳光声光谱、光梳光力光谱、多维变频光梳光谱对气体组分含量的测量灵敏度优于 1ppb，单次测谱时间 $<1\text{ms}$ ，红外分子谱线频率测量精度优于 10kHz；高维动态分子指纹谱图单次成谱时间优于 5ns，谱图刷新率高于 100MHz，宽谱带相干拉曼光谱成像刷新率高于 1MHz；红外光谱成像的谱分辨率优于 0.01nm，红外成像灵敏度优于 1 光子/像素，红外单光子成像速率高于 1000 帧/秒，视场范围 $>5\times 5\text{cm}^2$ 。