

· 研究进展 ·

“精密测量物理”重大研究计划结题综述

姜向伟¹ 刘 强¹ 胡忠坤² 陈宇翱⁴ 易 俗⁵ 倪培根^{1*}
董国轩¹ 尤 力⁶ 潘建伟⁴ 罗 俊^{2,7} 叶朝辉³

1. 国家自然科学基金委员会 数学物理科学部, 北京 100085
2. 华中科技大学, 武汉 430074
3. 中国科学院 精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430071
4. 中国科学技术大学, 合肥 230026
5. 中国科学院 理论物理研究所, 北京 100190
6. 清华大学, 北京 100084
7. 中山大学, 广州 510275

[摘要] 国家自然科学基金“精密测量物理”重大研究计划于2013年立项, 执行期限为2014年1月至2021年12月, 国家自然科学基金委员会于2023年3月对“精密测量物理”重大研究计划进行了结束评估, 评估结果为“优秀”。本文介绍了“精密测量物理”重大研究计划的立项背景、总体科学目标、总体布局、实施思路及总体完成情况, 并概述了该领域下一步发展的建议。

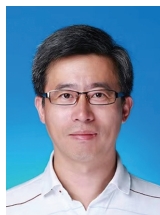
[关键词] 重大研究计划; 精密测量物理; 时频精密测量; 基本常数测量; 基本物理规律检验; 量子精密测量

精密测量是指在现有物理框架下, 采用先进的技术与方法追求更高的实验精度, 而精密测量物理侧重于为了实现更高精度的测量而研究采用新的物理原理, 发展新的技术与方法, 揭示新的物理规律。精密测量物理涵盖利用精密测量技术与仪器设备对物理学基本规律进行可重复可操控的高精度实验检验, 对基本物理常数进行精确测定, 深入研究测量的物理限制与突破测量极限的方法, 并针对最前沿的科学与技术需求研究极端精密的测量技术、测量仪器设备和测量基准。

1 立项实施情况

1.1 立项背景

精密测量物理是物理学前沿, 是科学与工程技术的融合, 是国家重大需求的重要基础, 具有基础性、前沿性、挑战性和战略性。基础性体现在精密测量促进物理学及其他学科的发展; 前沿性体现在依靠新



倪培根 博士, 研究员, 国家自然科学基金委员会数学物理科学部副主任。主要研究方向为光学、科技政策、科研管理。



姜向伟 博士, 研究员, 国家自然科学基金委员会数学物理科学部物理科学一处项目主任。主要研究方向为半导体物理、科研管理。

的原理和方法, 涉及物理学最新研究内容; 挑战性体现在涉及当今科学界关注的重大科学问题和技术问题; 战略性体现在精密测量物理既推动科学发展, 又推动技术进步。

精密测量物理研究是近代科学研究的精髓。物理学的发展与精密测量密不可分, 是在不懈地追求

精密中发展起来的。测量是指基于物理学的基本原理和技术,确定物理量的大小;精密测量是指在现有物理框架下,采用先进的技术与方法追求更高的实验精度;而精密测量物理侧重于为了实现更高精度的测量而研究采用新的物理原理,发展新的技术与方法,揭示新的物理规律。精密测量物理涵盖利用精密测量技术与仪器设备对物理学基本规律进行可重复可操控的高精度实验检验,对基本物理常数进行精确测定,深入研究测量的物理限制与突破测量极限的方法,并针对最前沿的科学与技术需求研究极端精密的测量技术、测量仪器设备和测量基准。

原子、分子、光子系统是当前量子力学可以精确描述的物理系统,它既可以从单个原子、光子作为简单物理系统实现量子操控,也可以从相对复杂的分子系统或很多超冷原子构成的宏观量子气体进行实验研究。大量的精密测量工作都是基于原子分子光子系统而发展起来的,随着对原子分子光子体系操控能力的不断增强,大量的新物理效应和物理思想不断涌现,不断提高基于原子分子光子系统精密测量精度成为科学家孜孜以求的目标。

精密测量物理研究是物理学前沿。物理学前沿科学问题的解决依赖精密测量,精密测量物理开拓着物理学的研究对象,使物理学在实验研究的不断精密化中逐步完善与发展。基于原子分子光子的精密测量是精密测量物理的重要组成部分。对时空基本问题、物理定律的时空有效极限、物理常数是否随时间变化等问题的回答,无不基于原子分子光子精密测量来提供实验的依据。基于原子分子光子精密测量对物理学的发展有重大促进作用:精密测量的有效数字每提高一位,往往预示着新的物理效应或自然规律的发现。现代物理学就是在不懈地追求精密中发展起来的。在过去的几十年中,精密测量理论和实验方法得到很好的发展,取得了一系列重要突破,拓展了人类对客观物质世界的认识。

精密测量物理研究是科学与技术的融合。精密测量物理是物理学与计量学、信息科学、地球科学等各学科内部不同方向交叉、融合发展的前沿领域。它提供了新的测试手段和新的研究方法,揭示了一些新的物理现象和规律,推动着新的精密测量器件、测量系统和测量概念的产生,推动着学科前沿的快速发展。在重大科学问题的牵引下,精密测量技术的进步是形成新型科学仪器的源泉,进而促进相关产业的发展。技术和产业的发展又反过来为科学研究提供更为先进的仪器,从而形成一个科学—仪器

技术—产业—科学的良性循环。

精密测量物理研究是国家重大需求的重要基础。基于原子分子光子精密测量研究的结果能服务于国家的重大需求。典型的例子就是当代的全球定位系统。高精度 GPS(Global Positioning System)系统以及相应的时间频率系统广泛地应用于科学研究、工程技术和国防建设等领域。高精度频标的研制将改进和发展新一代时间频率系统,提升我国时间频率系统结构和性能,为重大科学技术设施提供高精度时间频率信号和技术支撑。高精度时间频率系统的应用范围从基础研究渗透到了信息传递、电力输配、导航定位、地震监测预报和地质矿产勘探等工程技术应用领域,关系着国计民生的交通运输、金融证券、邮电通信、能源环境等诸多部门的各个方面,关系着国家和社会的安全稳定。高精度惯性传感器不仅是开展空间引力实验检验的关键载荷之一,也是地球重力场测量、地球资源分布勘探、海洋环流和两极冰层覆盖等地球环境检测与研究的关键技术。

由于精密测量物理在探索科学问题方面的重要意义和解决应用需求方向的战略价值,国内外相关研究机构围绕如何突破标准量子极限量子体系的原理、方法与技术;如何突破现有原子频标精度水平的新原理与方法;如何突破原子分子冷却的机理与技术;以及采用原子分子光子技术手段开展基础物理等方面开展了大量研究工作并取得了重要进展。我国精密测量物理在相关部门的持续支持和科研人员的长期努力下取得了突出进展,局部领域跻身国际先进行列。但同发达国家相比,立项初期我国在精密测量物理方面还存在明显的差距,这在很大程度上制约了新物理和新技术的研究进程。物理、信息等领域的基础研究要实现集成升华、跨越发展,选择精密测量物理作为重大研究计划资助,加强精密测量技术的发展,在新的方向上有更大的突破,不仅能做出原始创新型的系列工作,而且能培养一批精于实验科学的优秀青年学者,为我国在关键高新技术领域占更大的知识产权份额奠定人才基础。

1.2 总体科学目标

本重大研究计划根据国内外研究现状和发展趋势以及国家高新技术发展的战略需求,围绕精密测量物理这一核心,以关键技术的开拓为驱动力,集中我国该领域的优势学科力量,联合攻关,在以下几方面取得突破:发展超高精度频率、相位、时间等精密测量的新方法;在现有的物理框架下,获得几个基本

物理常数的极端精密测量的新结果;探索相关物理定律适用范围的极限和新物理^{①②}。

该重大研究计划旨在探索精密测量新原理,发展更高精度的测量方法与技术,构建高稳定度精密测量体系,提高基本物理学常数的测量精度,在更高精度上检验基本物理定律的适用范围,主要目标包括:(1)学科地位:进一步提升我国在精密测量领域的研究能力,促进精密测量物理领域的发展,增强精密测量物理学整体在国际上的影响力,其中某些方面达到国际领先水平,扩大基本物理常数测量和基本物理量测定的国际话语权;(2)国家需求:在导航定位、守时授时、资源勘探、国防安全等国家需求方面提供关键概念、方法、技术基础;(3)人才培养:在精密测量领域,为国家发展的需求造就一支高水平的研究队伍。

通过重大研究计划的实施,在若干重点领域和重要方向实现“迎头赶上、适时超越、引领未来”的跨越发展,形成一批精密测量物理研究领域的创新概念、理论与方法,提升我国在精密测量物理研究领域的创新能力,推动我国精密测量领域高新技术的发展。

1.3 总体布局和实施思路

重大研究计划组织实施遵循“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的总体思路,针对精密测量物理的特征,以实验技术研究为主、理论研究为先导、理论与实验相结合,围绕原子分子光子精密测量核心科学问题和国家需求技术难题开展前瞻性和先导性的基础研究。加强顶层设计,根据项目总体发展情况不断深化研究计划的科学目标和预期成果指标。通过年度项目指南,引导和细化各项具体技术指标和研究布局。采取顶层组织与自由申请相结合,高强度支持和跟踪管理相结合的方式,推动重大研究计划的实施。

根据项目的科学目标,重大研究计划按三阶段实施。

(1)启动阶段(2013—2014年):酝酿与选择重点研究方向,组织优势队伍,适度展开研究内容。着重精密测量物理体系研究,从基本常数测量和物理定律检验的顶层设计需求,探索合适的精密测量体系的新技术与方法和相关支撑基础。

(2)重点支持阶段(2014—2018年):重点布局,全面展开研究内容,研究成果将成为集成与升华阶

段的支撑和基础。设计和发展基于原子分子光子的精密测量技术,高精度测量原子分子光子的本征参数,开展原子分子光子新方法新技术的精密测量物理研究,精确测量基本引力、电磁定律中的基本耦合常数,在更高精度上检验基本物理定律。

(3)集成升华阶段(2019—2021年):适度调整研究内容,推动研究成果集成,提升研究计划的整体水平。通过本计划实施,为新一代的精密测量技术提供新的原理和方法。

重大研究计划执行过程中遵循如下实施原则:(1)把握该重大研究计划基础性、前瞻性、创新性和战略性强的特征,既要重视关键技术和方法的研究,也要突出前沿科学问题研究;既要解决国家重大需求中的关键基础问题,也要充分发挥学科的引领作用。(2)实行专家学术指导与动态跟踪相结合的管理模式,对于高强度资助项目落实专家重点跟踪。(3)顶层设计的目标导向与科学家自由探索相结合,遴选新项目与强化资助前期优势项目相结合。

为了落实和推动本研究计划研究工作的开展,成立指导专家组和管理专家组,同时结合本重大研究计划特色,聘请知名国内外专家组成咨询专家组。针对精密测量物理研究具有“高、新、尖”的特点,结合我国研究现状,在精密测量物理重大研究计划项目执行过程中,形成重进展、重突破、重实效的“三重”评价机制,采取聚队伍、聚智慧、聚重点、聚资源、聚突破的“五聚”对策,全面完成了项目科学目标,推动了精密测量物理学研究的深入和精密测量物理学的发展。

2 总体完成情况

该重大研究计划从2013至2021年实施期间,共资助项目96项,其中战略研究项目4项,重点支持项目28项,集成项目6项,培育项目58项。

该重大研究计划瞄准精密测量物理研究领域的前沿动态和发展趋势,面向科学前沿和国家需求。自启动以来,在探索精密测量物理新原理,发展更高精度的测量新方法技术,构建高稳定度精密测量新体系,提高基本物理学常数的测量精度,以及对基本物理定律的高精度检验等方面,开展了系统和深入的研究。该重大研究计划全面完成既定的研究任务,圆满实现预定的科学目标,取得以下主要成果:

① 国家自然科学基金委员会数学物理科学部,“精密测量物理”重大研究计划实施规划书(内部报告)。

② 国家自然科学基金委员会数学物理科学部,“精密测量物理”重大研究计划总结报告、成果报告、战略研究报告(内部报告)。

(1) 在科学前沿创新方面取得多项重大突破。高精度光频标研究取得重大突破, Ca^+ 光频标达到了 10^{-18} 的国际领先水平, 测量结果被国际时间频率咨询委员会 (Consultative Committee for Time and Frequency, CCTF) 采纳, 使得 Ca^+ 首次入选国际次级秒定义的候选光频标; 采用 Rb 钟控制的光梳实现高精度光学分频, 达到 10^{-21} 的国际领先水平; 采用两种方法将万有引力常数 G 的测量精度提升到国际最高水平, 测量结果被国际科技数据委员会 (Committee on Data for Science and Technology, CODATA) 高权重收录; 在亚毫米范围上对反平方定律进行了检验, 拓展其适用范围, 获得了国际领先的精度; 实现高品质单光子光源、强度压缩完美单光子源, 综合指标保持国际记录; 实现了超冷原子双数态的确定性制备, 压缩度处于国际领先; 提出并实现了光与原子混合新型干涉仪, 方法与技术国际领先。

(2) 在精密测量核心技术支撑国家重大需求方面做出实质性贡献。自主研制了高精度超窄线宽稳频激光、可搬运光钟、原子重力仪、超导重力仪、高精度大型测地陀螺仪、空间惯性传感器等精密测量专用仪器装备, 提升了国产高端精密测量仪器研发能力, 支撑了精密重力测量、高精度地基授时系统、空地一体量子精密测量实验设施等国家重大科技基础设施和国产时空精密测量原子干涉实验研究平台国家科教基础设施的建设, 支撑了科技创新 2030 量子精密测量专项、空间站冷原子科学实验和空间引力波探测等重大科研计划的实施。

(3) 在学科发展和人才队伍建设方面卓有成效。多所高校和研究所自主设置精密测量物理二级学科, 创建了初具规模的精密测量物理学科。在重大研究计划实施期间, 项目承担人中有 8 人获得国家杰出青年科学基金项目资助, 10 人获得国家自然科学基金优秀青年科学基金项目资助, 3 人获“长江学者奖励计划”特聘教授, 4 人获国家“万人计划”科技创新领军人才, 1 人获国际纯粹与应用物理学会青年科学家奖, 1 人获欧洲物理学会菲涅尔奖。该重大研究计划的实施为我国精密测量物理研究领域创新能力的全面提升和可持续发展提供了重要的人才保证。

在重大研究计划资助下, 已在国际专业学术期刊上发表 SCI 论文 1 256 篇, 其中 *Science* 3 篇、*Nature* 2 篇、*Science* 子刊 4 篇、*Nature* 子刊 16 篇、*Physical Review Letters* 77 篇、*National Science Review* 7 篇。获批授权国内发明专利 57 项, 授权国

际专利 3 项。重大研究计划自实施以来, 研究成果获得国家技术发明奖二等奖 1 项、教育部自然科学奖二等奖 2 项、军队科技进步奖二等奖 1 项、求是杰出青年学者奖 1 项、中国青年五四奖章 1 项、科学探索奖 1 项。

重大研究计划从精密测量物理的物理体系、物理机制、方法技术和科学应用方面入手, 在时间频率测量, 基本物理常数测量和基本物理规律检验, 以及量子精密测量等方面均取得重要进展, 获得一批创新性成果。

2.1 时间频率测量

对时间频率的精确测量, 每一次改进都会带来科学探索和发现的新前景。随着精密测量技术的发展, 目前人们已经在时间频率测量方面获得了前所未有的测量精度。例如, 光学波段的原子钟 (以下简称“光钟”) 对时间频率测量的不确定度和长期稳定度均已经进入 10^{-19} 量级。

中国科学院精密测量科学与技术创新研究院团队通过魔幻射频囚禁场抑制微运动频移^[1]和构建液氮低温环境抑制黑体辐射频移, 将 Ca^+ 光频标的不确定度推进到 3×10^{-18} ^[2], 相当于 105 亿年偏差不到 1 秒, 为国际第五种此量级的光频标。实现了可搬运 Ca^+ 光钟^[3], 测量的 Ca^+ 绝对频率结果被 CCTF 多次采纳, 并于 2021 年被 CCTF 推荐为新增的次级秒定义, 提升了我国在国际时间频率领域的话语权。同时, 华东师范大学和中国科学院国家授时中心团队在高精度光钟频率比对和时间频率传递方面取得突破。其中, 华东师范大学在光频比值测量方面取得突破: 实现了 10^{-22} 水平的光频比值测量^[4]以及可溯源于 Yb 原子光钟的光学频率合成^[5]; 研制了宽波段、高稳定的可搬运高精度光钟频率比对系统并搬运至中国计量科学院, 正在开展 Sr、Yb、 Ca^+ 、 Al^+ 等不同光钟间频率比值测量研究。中国科学院国家授时中心基于被动光频传递在 972 km 光纤上实现传递稳定度 $10^{-19}/4\,000\text{ s}$ ^[6]; 提出高精度光纤时间传递, 在 1 085 km 实地光纤上实现了时间传递稳定度 5.4 ps@40 000 s; 建立了 50 km 光纤双向量子时间同步系统, 时间同步稳定度 54.6 fs^[7]。

2.2 基本物理常数测量和基本物理规律检验

基本物理常数的精密测量和基本物理规律的高精度检验是精密测量物理研究的主要内容和目标。物理学常数的准确值增加一位, 就有可能发现物理学中前所未有的矛盾, 或获得解决目前所存在的

某个矛盾的线索；基本物理学常数可以定义和复现基本单位。

在重大研究技术支持下，基本物理学常数测量和基本物理规律检验方向取得了系列具有国际影响的创新成果。华中科技大学团队^[8]采用周期法和角加速度法测得迄今为止国际最好水平 G 值，相对不确定度均达到 11.6 ppm，且在 3σ 范围内吻合。该成果获得 2018 年“中国科学十大进展”，2019 年被编入高中物理教科书（人教版），2021 年入选国家“十三五”科技创新成就展，提升我国在 CODATA 推荐 G 值中的所占权重，彰显了我国精密测量方法和技术在基础科学研究的科技力量。该技术引领了空间加速度计和原子重力仪等一批高尖端仪器和装备的自主研发，打破了国际封锁和垄断。系列技术突破推动了精密重力测量国家重大科技基础设施以及天琴空间引力波探测计划的提出与实施。华中科技大学团队^[9, 10]完成了基于密度调制法近距离牛顿反平方定律的实验检验，给出了对 Yukawa 破缺的最强限制，在 $160 \mu\text{m}$ 处将当前国际最好水平提高 2 倍，是目前国际上亚毫米范围检验精度最高的实验之一，为额外维等理论模型给出了新的约束条件。中国科学院精密测量科学与技术创新研究院和华中科技大学团队在冷原子干涉法检验等效原理检验方面取得突破，提出不同自旋取向原子是否同时落地的原创科学问题^[11]，Rb85-Rb87 双组分原子干涉仪等效原理检验精度达到 1.4×10^{-10} ^[12]、不同内态的原子自由落体普适性检验精度达到 2.7×10^{-10} ^[13]，均达到国际先进水平。

2.3 量子精密测量

充分利用光子、原子体系的量子资源，探索突破标准量子极限的测量新原理与新方法，是精密测量物理研究的重要方向。利用量子资源和量子调控带来的量子计量给精密测量带来了新的发展契机，带来了新的内涵，带来了新原理新体系新方法与新技术，是精密测量物理重要发展趋势。

在重大研究计划支持下，精密测量新原理新体系新方法与新技术方面都取得了显著进展，呈现出良好的发展态势，取得了系列具有国际影响的创新成果。清华大学研究团队实现了突破标准量子极限测量非经典双数态新体系，在原子数、原子数涨落、压缩系数以及相干性等多项重要指标上都远超国际上的同类实验，极大地提高了双数态在精密测量中的实用性，并为纠缠态的制备提供了新思路。在 Rb87 原子凝聚体中确定性地制备由约 10 000 个原

子组成的多体纠缠态，从非纠缠的初态到双数态凝聚体的转换效率高达 $(96 \pm 2)\%$ ，量子噪声的压缩度为 (13.3 ± 0.6) dB，相干性达到了接近理想值的 0.99^[14]。利用 Rb87 原子旋量凝聚体系统实现了一个不需进行逆演化调控的、深度纠缠的非线性干涉仪，并在实验上实现了一个超越 26 500 个原子标准量子极限 5 dB 的相位测量精度^[15]，其探测精度比同类型系统提高了两个数量级。中国科学技术大学研究团队^[16]利用其研发的高品质单光子源，通过对共振荧光的直接测量，得到了 0.59 dB 的强度压缩，修正后在第一物镜处的压缩量高达 3.29 dB，创造了新的记录，这是国际上首次获得在单一器件上同时结合高纯度、高不可分辨、高效率 and 强度压缩的高品质单光子源，为基于单光子源的无条件超越经典极限的精密测量奠定了科学基础。华东师范大学团队^[17]突破传统的非相敏方案，实现了利用相位敏感型四波混频过程内在的非线性干涉效应来增强量子态量子关联度的方案，并使量子关联度突破 10 dB，在提高测量的精度、灵敏度和分辨率等方面具有重要的应用价值。中国科学技术大学研究团队^[18]在固态单自旋体系中成功实现了突破标准量子极限的高精密磁场测量，在真实噪声环境下，利用双量子比特和三量子比特对相位的测量，其灵敏度分别突破了标准量子极限 1.79 dB 和 2.77 dB，利用双量子比特对真实磁场的测量，其灵敏度突破了标准量子极限 0.87 dB。

总之，本重大研究计划的实施总体效果可以概括为实现了三个提升、三个体现、三个支撑。提升了精密测量实测能力、支撑国家战略需求能力、创新引领能力等三种能力。实现了增强国际话语权、提升国际竞争力、引领学科发展等三个体现。形成了研究平台建设、学科整体发展、高端人才培养等方面的三个支撑。重大研究计划的顺利实施极大提高了我国在精密测量领域的研究水平和能力，实现了精密测量物理领域“迎头赶上、局部超越、支撑未来”的战略目标。

3 下一步发展建议

“精密测量物理”重大研究计划充分发挥了基础研究的引领作用，在科学前沿创新方面取得多项重大突破，在精密测量核心技术支撑国家重大需求方面做出实质性贡献，在学科发展和人才队伍建设方面卓有成效。根据重大研究计划的实施经验总结，下一步发展建议如下：

(1) 团结全国力量,依托若干重大科研平台和全国广大科研单位的共同协作,前沿自由探索和重点攻关并行推进精密测量物理研究。围绕精密测量物理研究,我国布局了系列国家重大科技基础设施、重点实验室和研究基地,为精密测量带来了非常好的发展机遇,针对精密测量物理需要长期稳定积累的特点,建议进行长期的资金投入,组织力量进行针对核心问题的潜心攻关式的研究,以解决重要科学问题或发展关键技术为目标,引导敢于且善于解决相关领域中的关键问题和难题,从而在该领域形成自己的学术观点和研究风格。

(2) 加强以探索科学前沿问题为导向的基本物理规律检验和基本物理常数的精密测量研究,持续加强以时间频率精密测量为代表的各物理量精密测量,布局以突破测量极限水平的量子精密测量新技术,进一步提升我国在精密测量领域的国际影响力和国际话语权,以及服务国家战略需求的能力。

(3) 长期重点支持实验技术和理论方法的协调发展,建立面向国家重大需求为主要目标的引导机制,引导实验技术和理论方法方面的研究,在以后的部署和实施中牢牢树立“工欲善其事、必先利其器”的观念。统筹精密测量技术发展所涉及的相关产业链条进行整体布局、推进关键设备器件国产化进程,包括材料、器件、组件、仪器乃至系统,实现科技发展的独立自主。

(4) 通过机制体制创新,建立科学研究和人才培养共融的机制。如通过项目的执行和评估情况,建立推荐各种人才计划的通道,侧重扶持年轻人,提供宽松的、潜心研究的科研环境。

致谢 该重大研究计划实施9年过程中成果显著,特在此向所有对该计划做出贡献的参研人员表示衷心的感谢和最诚挚的敬意! 指导专家组、管理工作组和秘书组在重大研究计划实施过程中付出了辛勤的工作,再次表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] Huang Y, Guan H, Liu P, et al. Frequency comparison of two $^{40}\text{Ca}^+$ optical clocks with an uncertainty at the 10^{-17} level. *Physical Review Letters*, 2016, 116(1): 013001.
- [2] Huang Y, Zhang Bl, Zeng My, et al. Liquid-Nitrogen-Cooled Ca^+ optical clock with systematic uncertainty of 3×10^{-18} . *Physical Review Applied*, 2022, 17(3): 034041.
- [3] Huang Y, Zhang HQ, Zhang BL, et al. Geopotential measurement with a robust, transportable Ca^+ optical clock. *Physical Review A*, 2020, 102(5): 050802.
- [4] Shi H, Jiang Y, Yao Y, et al. Optical frequency divider: capable of measuring optical frequency ratio in 22 digits. *APL Photonics*, 2023, 8(10): 100802.
- [5] Yao Y, Li B, Yang G, et al. Optical frequency synthesizer referenced to an ytterbium optical clock. *Photonics Research*, 2021, 9(2): 98.
- [6] Deng X, Zhang X, Zang Q, et al. Coherent optical frequency transfer via 972 km fiber link. *Chinese Physics B*, 2023(33): 020602.
- [7] Hong HB, Quan RN, Xiang X, et al. Demonstration of 50 km fiber-optic two-way quantum clock synchronization. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(12): 3723–3728.
- [8] Li Q, Xue C, Liu JP, et al. Measurements of the gravitational constant using two independent methods. *Nature*, 2018, 560: 582–588.
- [9] Tan WH, Du AB, Dong WC, et al. Improvement for testing the gravitational inverse-square law at the submillimeter range. *Physical Review Letters*, 2020, 124(5): 051301.
- [10] Shao CG, Chen YF, Tan YJ, et al. Combined search for a lorentz-violating force in short-range gravity varying as the inverse sixth power of distance. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 011102.
- [11] Duan XC, Deng XB, Zhou MK, et al. Test of the universality of free fall with atoms in different spin orientations. *Physical Review Letters*, 2016, 117(2): 023001.
- [12] Zhou L, He C, Yan ST, et al. Joint mass-and-energy test of the equivalence principle at the 10^{-10} level using atoms with specified mass and internal energy. *Physical Review A*, 2021, 104(2): 022822.
- [13] Zhang K, Zhou MK, Cheng Y, et al. Testing the universality of free fall by comparing the atoms in different hyperfine states with Bragg diffraction. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(4): 043701.
- [14] Luo XY, Zou YQ, Wu LN, et al. Deterministic entanglement generation from driving through quantum phase transitions. *Science*, 2017, 355(6325): 620–623.
- [15] Liu Q, Wu LN, Cao JH, et al. Nonlinear interferometry beyond classical limit enabled by cyclic dynamics. *Nature Physics*, 2022, 18(2): 167–171.
- [16] Wang H, Qin J, Chen S, et al. Observation of intensity squeezing in resonance fluorescence from a solid-state device. *Physical Review Letters*, 2020, 125(15): 153601.
- [17] Liu S, Lou Y, Jing J. Interference-induced quantum squeezing enhancement in a two-beam phase-sensitive amplifier. *Physical Review Letters*, 2019, 123(11): 113602.
- [18] Xie TY, Zhao ZY, Kong X, et al. Beating the standard quantum limit under ambient conditions with solid-state spins. *Science Advances*, 2021, 7(32): eabg9204.

Review of Major Research Plan on “Precision Measurement Physics”

Xiangwei Jiang¹ Qiang Liu¹ Zhongkun Hu² Yu-Ao Chen⁴ Su Yi⁵ Peigen Ni^{1*}
Guoxuan Dong¹ Li You⁶ Jianwei Pan⁴ Jun Luo^{2,7} Chaohui Ye³

1. *Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*
2. *Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*
3. *Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071*
4. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026*
5. *Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190*
6. *Tsinghua University, Beijing 100085*
7. *Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275*

Abstract In this paper, the background, scientific objectives, layout, implementation and academic management, as well as the overall outcome of the Major Research Plan “Precision Measurement Physics” are reviewed. The suggestions of future development in the relative fields are provided.

Keywords major research plan; precision measurement physics; time and frequency measurement; fundamental physical constant measurements; test of fundamental physical laws; quantum precision measurement

(责任编辑 刘敏 张强)

* Corresponding Author, Email: nipg@nsfc.gov.cn