

基于原子的精密测量物理

1 立项背景及依据

物理定律是否随时间和空间而变？基本物理常数真的是常数吗？是什么机制导致了宇宙中的物质被保留了下来？为了探索这些问题，高能物理通过加速器不断提高能量，天体物理通过望远镜不断加大观测尺度。宇宙的定律应该是普适的，很可能在原子及原子与光相互作用的细微处留下帮助我们回答这些问题的启示。人们正沿着多种路径、向着多个方向探索自然界的新物理。这些方向包括宇宙前沿、高能前沿以及中科院“基于原子的精密测量物理”先导专项所属的精密测量前沿。

基于原子的精密测量物理，就是要通过寻找某个物理量与现有物理框架给出的值之间可能存在的微弱偏差，由此发现由新物理规律导致的痕迹。在历史上，正是一些微弱的偏差，给我们带来了巨大的发现。例如早期对原子分立光谱线系列的观察催生了量子力学；原子光谱的精细结构与兰姆位移的发现分别为相对论、量子力学以及量子电动力学（QED）的诞生奠定了实验基础。

开展基于原子体系的精密测量物理研究，可以对基本物理定律检验、基本物理常数测量以及时频测量前沿探索等重大科学问题进行深入研究，从而检视现有物理框架的适用极限，发现新物理、新科学，为超越标准模型的新物理探索作出实质性贡献，同时扩大我国在基本物理常数测量和原子时频标准制定方面的国际话语权。

2 拟解决的科学问题及研究基础

2.1 总体思路与科学任务

该专项总体研究思路如图 1 所示。利用精密谱、冷原子与物质波干涉等前沿技术与方法，开展基于原子的基本物理定律检验和基本物理常数测量，创新精密测量物理理论研究，探索精密测量物理新概念与新原理，发展精密测量新方法、新技术，构建高稳定性、超低噪声精密测量体系；研制高精度原子光频标，解决更高精度时频基准、精密测量所需标准源的问题；瞄准精密测量应用，建设远程时频传递网，开展时频传递与广域通信融合、高保真远程时频传递与比对研究，解决时频信号长距离、高精度传输与比对的问题。

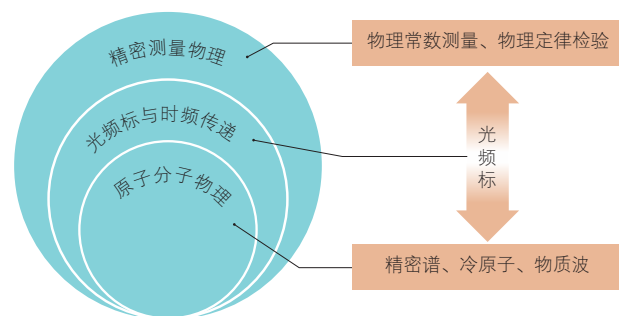


图 1 基于原子的精密测量物理研究思路图

该专项设置基本物理定律检验、基本物理常数测量和时频测量前沿探索共 3 个研究项目，围绕 9 个方向开展研究。

在基本物理定律检验方面（图 2），（1）发展高精度冷原子干涉仪技术，同步对比测量两种不同原子

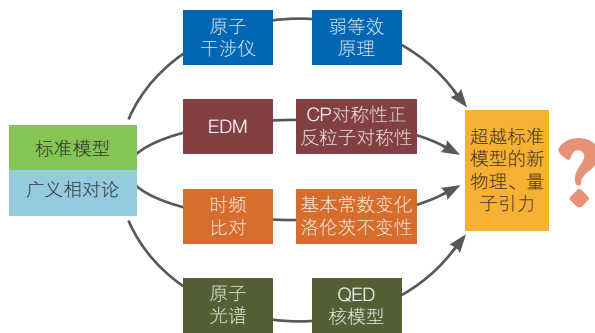


图2 基于原子的基本物理定律检验

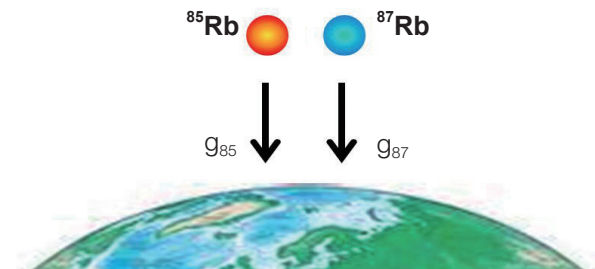


图3 原子比萨斜塔实验示意图

的重力加速度（所谓原子比萨斜塔实验，图3），用原子干涉仪检验弱等效原理即原子体系的自由落体普适性（UFF），从而检验广义相对论的适用范围，更苛刻地约束新物理模型中参数的取值范围，引导新理论发展；

（2）发展激光控制双电子冷原子（Yb、Ra）技术，通过原子固有电偶极矩（EDM）精密测量检验CP对称性，增进对基本粒子CP对称性破坏的了解和宇宙早期正反粒子不对称性起源的认识，探索能量尺度在10 TeV—100 TeV的新物理；（3）发展双连体干涉仪相关检测方法，用光腔在更高精度上验证洛伦兹不变性并探索可能的对称性破缺；（4）发展氦与类氢原子（离子）激光冷却与囚禁技术、极紫外波段飞秒光学频率梳技术，精密测量He原子/Li⁺离子1S-2S跃迁频率及激发态能级精细结构，结合高精度理论计算，对QED进行高精度检验。

在基本物理常数测量方面，（5）利用自主发展的频率锁定的光腔衰荡光谱技术，结合亚mK级的精确控温技术，测量谱线Doppler展宽，测量 k_B 常数至ppm精度水平；（6）利用协同冷却制备振转基态的HD⁺离子，高精度测量其振转光谱，通过实验与高精度高阶相对论和QED效应计算获得的跃迁频率理论

值对比测定 m_p/m_e ，与CODATA推荐值对比，检验束缚态QED理论。

在时频前沿探索方面，（7）发展囚禁离子或光晶格原子高精度光频标系统，精确控制各种运动和外场效应对光频跃迁的影响，包括黑体辐射、原子碰撞等效应，实现 10^{-18} 精度的原子光频标；通过基于两种不同原子跃迁的光频比对，实验检验基本物理常数是否随时间变化；（8）解决时频信号在长距离传递中的衰减、在传输过程中的失真及与广域通信不兼容的技术难题，实现基于光纤通信网络的远距离时频传递；（9）从理论上搜寻适合于产生高精度原子频标的高离化态离子（HCI）体系，利用电子束离子阱（EBIT）产生HCI，并开展光谱实验测量；利用离子储存环核电子-离子复合光谱技术寻找核光钟跃迁信号；探索超越 10^{-18} 精度的新一代光频标。

2.2 研究基础

参与该专项的研究团队在精密测量物理与技术多方面有长年积累。建成了目前国际上最高（12 m）的喷泉式原子干涉仪（图4），将微观粒子等效原理实验检验的精度从徘徊了十多年的 10^{-7} 提高至 10^{-8} ；在世界上首次对²²⁵Ra进行了EDM测量并得到了其上限，为寻找原



图4 十米喷泉式原子干涉仪（实际高度为12m）

子 EDM 开辟了一条新的路径 (图 5); 搭建了基于激光冷却和单量子态制备与探测的氦原子束光谱探测装置, 测得高精度的 ^4He 原子精细结构分裂 ($2^3\text{P}_1-2^3\text{P}_2$) 值; 在国际上率先对短寿命的丰中子核素原子 ^6He 、 ^8He 的同位素位移进行了测定并由此得到了这两个奇异核素的核电荷半径, 成为利用原子精密光谱测定核结构的一个代表作, 并受邀在 *Reviews of Modern Physics* 上撰写综述论文; 实现了 Li^+ 囚禁及其与 Ca^+ 的协同冷却, 开展了氢分子离子低振转谱相对精度为 10^{-10} 量级的高精度计算; 开展了关于少体原子分子精密谱的理论工作, 在氢分子离子、反质子氦和锂离子等精密谱理论计算上作了系统的研究; 提出了用光腔衰荡光谱对 k_B 的测量方法, 测量的统计不确定度已经进入 10^{-6} ; 开展了囚禁冷却原子和离子光频标的研究, 包括武汉物数所的 Ca^+ 、 Al^+ 离子和 Yb 原子, 国家授时中心的 Sr 原子和上海光机所的 Hg 原子; 建立了国内第一台离子光频标 (图 6); 测量了 Ca^+ 离子的 $4\text{S}_{1/2}-3\text{D}_{5/2}$ 光频跃迁频率, 准确度进入 10^{-15} 量级, 并成为国际时间频率委员会对相应光频的推荐值; 开展了两个光频标的比对, 稳定度和不确定度都进入 10^{-17} 量级; 提出了全光囚禁离子光频标新方案; 开展了基于光纤的高精度时间频率传递研究工作, 时间间隔测量精度达国际先进水平; 实现了时间信号和频率信号的光纤同时传递, 并应用于我国卫星导航系统; 利用自主研发的超窄线宽光纤激光器, 实现了 120 km 实地光纤的光学频率信号传递, 万秒稳定度优于 6×10^{-19} 。在理论探索方面, 团队成员首先提出了基于 HCl 的新型频标的思想, 指出了它的优越性及发展潜力; 关于 Yb 原子光晶格钟的建议已经在世界范围内多个实验室实现; 在原子体系宇称不守恒物理方面做出了极具影响的工作。

该专项依托单位是中科院武汉物数所, 参加单位有中国科大、国家授时中心、中科院上海光机所、中科院物理所、中科院理论所、中科院近物所、中科院安徽光机所等。团队成员来自波谱与原子分子物理国家重点实验室、合肥微尺度物质科学国家实验室 (筹) 和兰州重

离子加速器国家实验室及中科院原子频标、量子光学、时间频率基准等 3 个院重点实验室, 具有开展精密测量物理研究的整体平台优势。

在与在建的国家新平台相衔接方面, 中科院武汉物数所与华中科技大学等单位共同建设的国家重大科技基础设施“精密重力测量研究设施”(PGMF) 已通过可行性论证, 将在 5 年内完成建设; PGMF 将为该先导专项提供精密重力基准与重力环境标定。我国将于 2018 年开始逐步建造空间站, 并搭载包括空间站原子频标系统和空地时频传递链路的“空间站高精度时频系统”实验平台; 最近中科院由上海光机所主持研制的空间冷原子钟已随“天宫二号”进入太空; 这些为在空间开展精密物

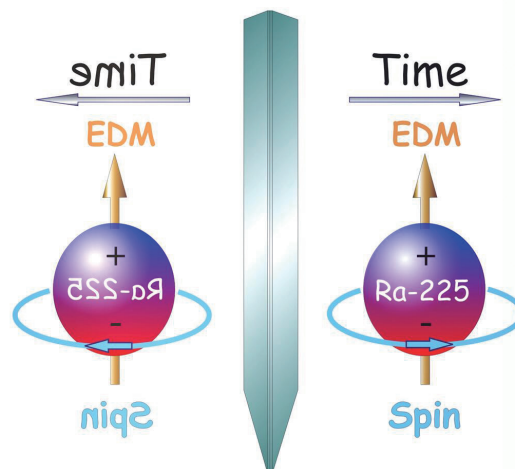


图 5 原子固有的电偶极矩 (EDM) 破坏时间反演对称性

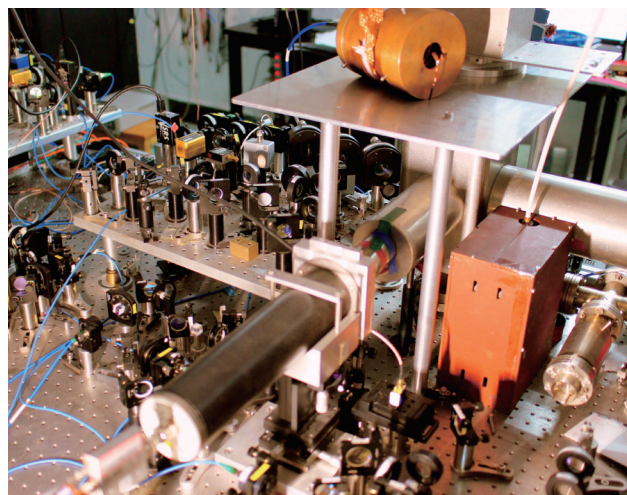


图 6 钙离子光钟

理实验奠定了基础。在国家发改委的支持下，中国科大正在建设连接北京、上海，贯穿济南、合肥等地的量子保密通信骨干线路“京沪干线”，二期“北京—武汉—广州”干线正在规划中。国家授时中心承担着我国标准时间频率产生、保持和发播任务，是国际原子时计算的重要参加单位，运行着国家重大科技基础设施——长短波授时系统和基于通信卫星的区域导航定位试验系统。

3 预期成果及影响

通过该专项的实施，预期将在前所未有的精度上检验已知物理适用范围、探索新物理。或者发现新物理，或者更为苛刻地约束各种新物理模型中所用参数

的取值范围，并引导新理论的发展。增进对基本粒子 CP 对称性破坏的了解和对宇宙早期正反粒子不对称性的起源的认识；基于光谱学方法将测定 k_B 到 ppm 水平，相关结果进入玻尔兹曼常数和温度单位开尔文的新定义。实现 m_p/m_e 等物理常数的精密测量，相关数据被 CODATA 收录。原子光频测量结果进入国际相应光频推荐值，扩大我国在时频标准制定方面的国际话语权。建成与量子通信网融合的具有国际领先水平的远程时频传递网，推动光钟和原子干涉仪在基础物理及其他高精度科学领域的应用。

（依托单位：中科院武汉物理与数学所）