

## 编者按

十几年前，当数位战略科学家聚首探讨精密测量物理学发展走向时，他们预判中国会一步缩小和国际先进水平的差距，有一天走在国际前沿，甚至引领发展。他们没料到的是，这一天来得如此之快，当然也没料到“卡脖子”同样来得

很快。

当下，世界正经历百年未有之大变局，科研环境也发生了巨大变化。所幸十几年前，在国家自然科学基金等的资助下，我国布局了一批前瞻性、引领性的基础研究。

在国家自然科学基金重大研究计划——“精密测量物理”项目稳定资助下，我国不仅在精密测量领域取得了多项“世界最好”“精度最高”的成就，凝聚、培养了一支队伍，大大增强了在该领域的国际话语权和竞争力，还辐射带动了相关学科发展。

# 精密测量：无尽的追求

## ——记国家自然科学基金重大研究计划“精密测量物理”

“算是对我们10年‘打工’的鼓励吧。”谈及“精密测量物理”重大研究计划的研究成果对相关学科的引领带动作用，中国科学院院士、华中科技大学、中山大学教授罗俊的语调中透着实现“小目标”的轻松。

实际上，这项超前布局的研究计划酝酿谋划就用了5年时间。此后在研10年，“聚队伍、聚智慧、聚重点、聚资源、聚突破”，项目成果全面超越预期目标。

“十几年前，国家自然科学基金支持一批科研人员开展精密测量物理研究确实很有开拓性。”罗俊告诉《中国科学报》，“这项研究计划虽然圆满结束了，但精密测量永无止境，精益求精是无尽追求。”

### 破局，始于“香山科学会议”

2008年7月，第327次香山科学会议（创立地点及会址在北京香山）破例在位于湖北省武汉市的华中科技大学召开。7位院士、50余位物理学家相聚喻家山，参加为期3天的“精密测量物理和方法”主题研讨会。

“在香山科学会议之前，叶老师（中国科学院院士叶朝辉）和几位专家动议提出开展‘精密测量物理’研究，是因为我们遇到了一些问题。”罗俊回忆说，“当时我国很多学科面临怎样向前延伸的困境。一个严峻的现实是，我们的科研仪器基本全靠进口。别人生产的仪器卖给我们之前，实验室里该做的研究都做完了，我们一直跟在后面做，这样很难触及科学最前沿。”

没有自己的仪器，跻身前沿都很难，更别说超越引领。科研仪器如此重要，但问题是，这种高端的科研仪器谁来研制？在此背景下，叶朝辉等人提出了“精密测量物理”的概念。

“我们现在对‘精密测量物理’有很多期待，赋予它很多内涵。但当初的出发点和最基本的想法就是做出一套最先进的仪器给科学家用。”罗



▲华中科技大学研制冷原子重力仪，开展野外重力测量。

◀万有引力常数测量装置。

俊说，“要挺进学科最前沿，验证物理学家的想法，进行实验研究，必须有自己的仪器设备。”

香山科学会议后，叶朝辉、罗俊等人在国家自然科学基金支持下，开始推动重大研究计划立项，在数理科学部的主持下，组织双清论坛进行论证。

2013年，“精密测量物理”重大研究计划获准立项。

### 引领，辐射学科带动人才

按照该重大研究计划最初的设计，研究目标分为三部分。一是精密测量工具仪器研制，以时间频率测量为代表，将光频这些和国际水平差距较大且非常基础的测量仪器“做上去”；二是在更高精度上测量物理基本常数并检验物理基本规律，这是精密测量物理的难点和重点；三是研究精密测量新体系，发展新方法和

新技术，不断突破测量极限，包括突破标准量子极限等。实际上，在该重大研究计划执行的10年中，他们不仅圆满完成了三大目标，还屡屡取得突破性进展，获得多项“世界最好”“精度最高”的成就。

“这项重大研究计划的特点之一是带动了整个中国精密测量物理学的发展。”中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研究员詹明生说，“也带动了其他一些项目，辐射和延伸到了相关领域，比如影响了中国科学院的先导科技专项，带动基于原子分子的物理研究向精密测量物理延伸。”

中国科学院国家授时中心研究员张首刚认为，该重大研究计划的意义在于10年前就有了明确目标，把精密测量这项前沿基础研究和国家战略需求相结合，从而做出一系列方向性、引领性的研究工作。

“通过国家自然科学基金项目牵引，这些年我国精密测量物理研究队伍不断壮大，并从基础

研究向前沿基础研究推进。”张首刚说，“我们不但超额完成了该重大研究计划的各项指标，还产生了原创性的想法，取得一批‘国际首次’级的成果，并在部分领域领先国际。”

“量子精密测量是精密测量物理的一个前沿方向，很多微弱信号测量，比如引力波探测、量子操控、原子分子和光物理等研究都离不开精密测量。”上海交通大学教授张卫平补充道，“这个项目将我们的学术生涯和国家战略需求完美对接起来，我觉得最大成果之一是凝聚并培养了一支队伍。”

清华大学教授尤力同样认为，这是个高瞻远瞩的研究计划。“过去四五年，国际科研环境发生了巨变，出现了更多的不确定性。我们必须科学上自主、技术上独立。好在进行了预研，建立了这么一支队伍。”

### 求精，追求永无止境

精密测量物理对实验条件要求极高，数千米外的振动、电流波动、地球磁场，甚至空气湿度都会影响测量精度。为避免外界扰动，30多年前，罗俊等人就将实验室建在位于喻家山的一个山洞里。

在罗俊团队的引力常数测量进行到关键时期时，地方政府按规划准备在喻家山下修一条路。“修路会引发两个问题：一是山体稳定性发生变化，这些微小变化会导致实验环境不稳定；二是修路过程中及修好后，车辆经过产生的震动会影响测量精度。”

了解到罗俊的担忧，华中科技大学和武汉市都非常支持实验研究。最后，武汉市调整道路规划，终止了道路修建。

得益于安静的实验环境，罗俊团队测出了世界上测量精度最高的G值（引力常数）。至今，该数值仍保持着世界第一的纪录。

“精密测量物理要测的通常是非常小的数

值，它无限趋近于‘0’，但永远不会达到‘0’。例如，我们进行粒子、量子、多粒子纠缠等前沿研究，背景补偿（抵消环境磁场的影响）做得越好，测量结果就越准。”尤力感慨地说，“我们测一个量，总希望向小数点后再多推一位，但最终要推到什么地方、推到什么程度，没有人知道。所以精密测量物理没有止境，需要长期坚持，也需要长期支持。”

“精密测量的本质是永无止境。”罗俊说，“精密永无止境。这种无限精密、精益求精的特点造就了精密测量物理研究者不断提高精度、不断开发新技术，挑战新极限的信念。”

### 传承，精密测量精神

“我们常说十年磨一剑，从事精密测量物理研究真的需要长期积累。”华中科技大学教授胡志坤说，“它需要10年、20年，甚至更长时间才有可能见到成效，因此研究者要耐得住寂寞，但也需要得到长期稳定的支持。”

“精密测量物理有两个特点：一是高精尖，二是研究周期特别长。”山西大学教授张靖补充说。20世纪90年代初，张靖还在华中科技大学读本科，有时会到位于喻家山山洞的实验室上课。他记得当时山洞两边都是实验室，里面很安静，感觉很神秘。

“精密测量物理研究不是三两个人花两三年时间就能取得成果的。罗老师选择在山洞里做实验，还带出一支队伍，一步步把精度提高再提高，确实很有魄力。”张靖说。

“我们国家的科学研究已经形成了崭新的局面，上了一个历史性的新台阶。现在我们山洞的实验条件是30年前根本无法想象的，每个实验室都‘鸟枪换炮’，不知道好到哪儿去了。”罗俊说，“但当初也没觉得条件多艰苦，因为有兴趣、有追求，希望能精益求精，所以并未在意‘苦’还是‘不苦’。”

## 在清华的实验室，测量和补偿地铁运转磁场

“进行精密测量物理研究，总是想精益求精，把精度提高点，再提高点。”清华大学教授尤力对《中国科学报》说，“进实验室打开仪器，我们就知道北京地铁4号线列车什么时候进站、什么时候出站，地铁运转产生的磁场会严重影响原子能级……”

尽管北京地铁4号线从清华大学、北京大学两所高校旁通过时采取了一系列减震措施，但轻轨列车进站减速、出站加速时电流变化产生的磁场，还是会影响到1.5公里外清华大学的原子分子与物理实验。

磁场变化会引起原子能级移动，给光学测量带来不确定性，使科学家无法判断是否出现了误差。虽然研究人员已经习惯在夜深人静时做实验，但很多扰动仍无法避免。

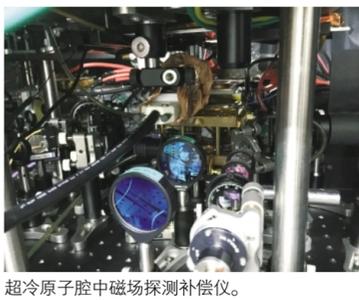
“我们做原子分子与光物理研究时，原子的磁矩就像一块小磁石，它周围的磁场扰动会让原子磁矩抖动，导致测量信号不确定。”尤力说，“环境中各种扰动、噪声、磁场等都会影响测量结果。”

尤力团队曾对实验室环境进行检测，不只地铁4号线列车进出站，包括地球磁场、实验室照明电路，甚至光学实验平台上的金属器件（螺丝钉、钻头）等所带磁性都会影响测量精度。

“这些磁场是‘躲不掉’的，那就想办法把它‘干掉’。”尤力说。在多次测量、分析、计算的基础上，尤力团队创造性地应用了“背景补偿”这样一个解决方案。

简单地说，就是针对一些无法改变的干扰因素，比如地球磁场、实验室电流磁场等，研究人员先测出环境磁场强度，计算出平均值，然后绕制一个通电线圈，使其产生相反的磁场，用“前置反馈”的手段，将环境磁场的磁力抵消。

“用‘前置反馈’补偿（抵消）背景磁场是个亮点。”中国科学院院士、华中科技大学、中山大学教授罗俊说，



超冷原子腔中磁场探测补偿仪。

“虽然‘前置反馈’不是新概念，但要把它做成，需要很好地掌握背景磁场，用它解决问题简单、高效。”

“我们用的物理概念并不新鲜，但它能解决实际问题。”尤力说，“我们用一块电路板就解决了问题，同很多兄弟单位分享了这项技术，能为大家做点事我很高兴。”

在反馈补偿技术的“加持”下，尤力团队取得了一系列重要突破。他们突破了标准量子极限测量非经典态量子体系，解决了双态态确定性制备难题，该体系在原子数、原子数涨落、压缩系数以及相干性等多项重要指标上远超国际同类实验。

团队通过调控量子相变过程，解决了传统动力学制备方法所存在的问题，在国际上首次确定性地制备了大粒子数双态<sup>91</sup>Rb原子玻色爱因斯坦凝聚体。目前，该实验平台能在40秒内确定性地制备约1万个粒子组成的多体纠缠态，从非纠缠的初态到双态态凝聚体的转换效率高达(96±2)%。该双态态的量子噪声的压缩度为(13.3±0.6)dB，是国际同类实验中最好的指标。双态态的相干性更是达到了接近理想值的0.99，远优于此前国际上最好的0.9。由此，实验可以表征的纠缠粒子数也是目前能确定性制备量子纠缠数目的世界纪录。

这项工作大大提高了双态态在精密测量中的实用性，首次验证了量子相变可以作为制备多体量子纠缠态的有效手段，为纠缠态的制备提供了新思路。

## 追求极限，刷新“钙帮”世界纪录

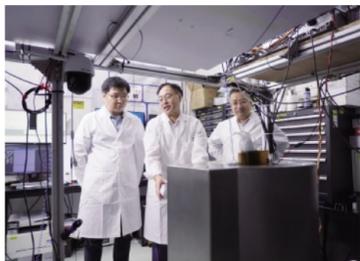
近年来，中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研究员高克林团队研制出不确定度为 $3 \times 10^{-18}$ （相当于105亿年不差1秒）、稳定度为 $6.3 \times 10^{-18}$ @524000s的钙离子光频标，成为第五种不确定度指标达 $10^{-18}$ 水平的光频标、第二种稳定度达 $10^{-18}$ 量级的离子光频标，并研制出目前搬运距离最远的光钟，实现精度达到 $10^{-18}$ 的钙离子光频标的溯源测量。该成果被国际时间频率咨询委员会推荐为次级秒定义。

“钙离子有很多优点，比如其光频跃迁是搭建高精度光频标的理想参考，可有效抑制离子特有的微运动频移。其离子的量子态制备、激光冷却及钟跃迁探测所用的激光均可用商品化的半导体激光器发射，因此极有可能实现广泛应用。”高克林说，“但是钙离子光频标也面临两个世界级难题：一是钙离子对磁场非常敏感；二是钙离子在室温下对黑体辐射效应（环境温度）敏感。”

频率标准研究对外场控制（环境中各种效应，如振动、噪声、磁场和温度等）的要求非常高，国际上许多光频标研究机构已经放弃参考钙离子搭建高精度光频标。目前，国际上仅有铯原子光频标、镱原子光频标、铝离子光频标，以及镱离子光频标的不确定度达到 $10^{-18}$ 量级。

“能否直面这些国际难题，将钙离子光频标推进至更高精度是我们面临的艰巨挑战。”高克林说，“在叶朝辉、罗俊院士领导的精密测量项目专家组与频标科学家王义道、王育竹、李天初等人的关心和支持下，我们一步步解决了这些难题，将钙离子光频标推至国际第一方阵。”

为进一步提高钙离子光频标的性能，研究人员通过改进钟跃迁激光性能，建立了第二台钙离子光频标并进行比对，大幅降低了电四极频移、光频移和微运动频移，实现了不确定度达 $5.5 \times 10^{-17}$ 、稳定度达



高克林（中）和同事开展钙离子光频标实验。

$7 \times 10^{-17}$ 的钙离子光频标。2018年，团队通过“魔幻射频囚禁”抑制了微运动频移，又通过降低黑体辐射频移、改进光频标伺服软件等措施，进一步将钙离子光频标不确定度提升至 $2.2 \times 10^{-17}$ 。2019年，通过对两台钙离子光频标长达31天的频率比对，研究人员测得稳定度达到 $6.3 \times 10^{-18}$ @524000s。

为降低钙离子光频标黑体辐射频移的影响，团队将离子置于液氦低温环境中，使黑体辐射频移对温度的敏感度降低了约两个数量级。与国际上采用的液氮系统相比，液氮系统造价低廉、操作简单。但缺点是使用中液氮会蒸发，系统运行时液氮容积变化易造成离子位置移动，从而导致荧光信号损失。

为解决低温系统问题，研究人员反复迭代和纠错，并采用清华大学教授尤力团队的“前置反馈”技术，大幅降低了背景磁场噪声。最终，该团队在国际上首次实现了液氮低温钙离子光频标，不确定度达到 $3 \times 10^{-18}$ 。

2020年，该团队实现钙离子光频标系统集成、可靠和高精度运行等关键技术突破，研制出一台精度24亿年偏差不到1秒的可搬运钙离子光钟，首次将钙离子光频标精度推进到国际最高水平，并实现从武汉到北京千里级车载搬运。

“研究钙离子的人称自己为‘钙帮’。”高克林说，“在实验关键时期，大家加班加点的故事很多，但没人觉得辛苦，因为热爱，所以乐在其中。”

## 在精密测量领域实现量子优势

前不久，中国科学院院士、中国科学技术大学教授潘建伟、中国科学技术大学教授陆朝阳等基于“九章二号”中自主设计的受激双模量子压缩光源，结合非线性干涉仪，提出并演示了一种新方案来实现可扩展的、无条件的、鲁棒的量子精密测量优势。相关成果发表于《物理评论快报》。

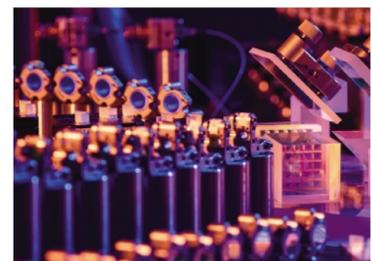
“实际上，该成果是在‘精密测量物理’重大研究计划前期工作的基础上衍生出的一项新成果。”陆朝阳告诉《中国科学报》。

“精密测量物理”重大研究计划有几个研究方向，其中中国科学技术大学团队的目标更具探索性质，主要是基于单光子和纠缠光子探索精密测量的新原理、新方法。在研期间，团队基于高品质单光子和多光子纠缠突破超越标准量子极限，在国际上首次同时解决了单光子源的三个关键问题，实现国际上综合性能最优秀的单光子源。

“制备单光子源是这个重大研究计划中的一项代表性工作。”陆朝阳解释，“进行量子精密测量或量子计算时，有用的单光子源。这就像幼儿园小朋友‘排排坐’，如果有100个小朋友，每个小朋友坐一条板凳是理想状态。但自然界的光源（灯光或阳光）是热光源，它们衰减之后只有约8%是单光子（相当于一个小朋友坐一条板凳），约90%是‘空板凳’，另有2%是两个或多个光子（一条板凳上坐多个人）。在量子技术中，‘空板凳’无法用于测量，而一条板凳坐多个人会引起测量误差。因此，科学家要在实验室通过主动量子调控制造一种非经典的量子光源。”

精密物理测量往往会受一些在原理上都无法避免的“散粒噪声”的影响。因此，任何测量都存在精度极限。不过，量子光源可以打破这种物理极限。

中国科学技术大学团队用制备出的新光源进行测量，发现它比之前用激光光源测量的精度提高了0.6dB，而



“九章二号”受激辐射量子光源实验装置。

且首次实现了强度压缩。此后，该团队又研发出“九章”系列光子计算原型机。在“九章二号”的相关研究中，团队受到激光的启发，发明了一种受激辐射放大光子光源的新方法。在调节这种新光源的位相时，他们意外发现数据对相位特别敏感。

“我们当时灵机一动，想利用这个现象做量子精密测量。”陆朝阳说。

抱着试试看的想法，研究人员基于“九章二号”中自主设计的受激双模量子压缩光源，结合非线性干涉仪，提出了一种新方案来达到海森堡极限。该方案同时具有可扩展性、无条件优势、对外部光子损失鲁棒等优点。在未扣除任何实验噪声的情形下，在相位测量实验中直接观察到的单光子信息量（用于衡量测量的精度），达到了目前国际最高水平。

精密物理测量领域有一个共识：如果把精度向前推进一个数量级（10倍），就有可能发现新物理、新规律。这一次，中国科学技术大学团队基于量子受激光源发展出新的量子精密测量技术，将测量精度极限提高了5.8倍。

“学术界将量子计算在特定问题上的能力超越经典的超级计算机的里程碑称为‘量子计算优越性’。现在，类似的，我们又首次实现了‘量子精密测量优越性’。”陆朝阳说，“这有点像立体农业中塘中养鱼、塘泥肥田，在国家的整体布局下，量子信息的基础研究不仅开花结果，还可催生肥田。”

（本版内容由本报记者张双虎采访，图片均由研究团队提供）