



## 编者按

在前不久的国家科学技术奖励大会上，自然科学奖一等奖花落清华大学副校长、中国科学院院士薛其坤领衔的“量子反常霍尔效应的发现”项目。这是国家自然科学基金委员会（以下简称自然科学基金委）“单量子态的探测及相互作用”重大研究计划的代表性科研成果之一。

近年来，随着实验精度和技术控制能力的不断提高，人们可以制备单量子态，对其进行操控并直接探测其物理特性。这些进展还将促进物理与信息、材料、能源和化学等交叉学科的发展，对包括量子计算、量子通信和量子精密测量等量子科学的发展起到重要作用。

2009年，自然科学基金委设立了重大研究计划“单量子态的探测及相互作用”，旨在通过对单量子态及其量子效应的理论和实验研究，对微观及宏观量子态进行高精度的精密探测，理解和掌握量子态的特性和规律，发展新的量子探测手段和量子器件制备技术，提升我国基础研究水平，解决与我国信息和能源重大需求相关的科学问题，并实现该领域的跨越式发展。

该重大研究计划实施9年来，取得了丰硕成果。本期基金版将总结该重大研究计划取得的经验，展示其取得的成绩。

## “单量子态的探测及相互作用”重大研究计划 占领世界量子科学战略制高点

■见习记者 程唯珈 记者甘晓

### 激烈争论“震”出来的新概念

自量子力学诞生以来，人们对微观世界运动规律的认识不断加深，探测光子、电子等微观粒子的运动形式和规律是自然科学研究长期关注的课题。

在普通人的常识中，“观测”是件理所当然的事。比如，当一束光照到桌面的杯子上时，你能看到这个杯子。但是，在微观尺度，这个“理所当然”就不存在了——我们不可能在一束光或者其他粒子束的照射下“看”到一个只有原子尺寸大小的粒子。这是因为，在宏观世界，用以观测物体的粒子束并不会改变宏观物体的状态，正如光线不会改变杯子的性质一样。但在微观世界，用以“观测”的光束、电子束、声波、电磁波等任何手段，都会和作为观测对象的微小粒子发生不能忽略的相互作用，从而改变它的状态。所以，迄今为止，人类的探测手段对微观量子世界的很多情况都“看不清”。

正是因为“看不清”，科学家只能用“统计性”作为一种描述微观粒子状态的权宜之计。迄今为止，人们在实验上观测到的量子态都是多个粒子的长时间的统计或平均效应。物理学家意识到，直接对单个量子态以及宏观量子态的波函数及其随时间演化规律等进行精密的探测，是个极具挑战但异常重要的科学问题。

10年前，“单量子态”这个概念开始在中国科学家的脑海中酝酿。2008年5月，自然科学基金委针对这方面的问题，在天津举办了一次“双清论坛”。会议期间，科学家们对与材料相关

的量子前沿问题做了系统的梳理，并通过反复和激烈的争论，终于凝练出“单量子态”这一新概念，较好地反映了量子调控研究的科学制高点和发展趋势。

该重大研究计划指导专家组成员、中国科学院院士向涛参加了这次会议。“记得我们争论时，正逢汶川地震，我们开会的地方也有地震，房间的吊灯都在晃。”向涛回忆道。这个细节也给许多与会科学家留下了深刻印象，他们称“单量子态”是激烈争论“震”出来的。

“所谓单量子态，就是复杂量子体系经过纯化的单光子、单电子、单原子、单分子、聚集体的准粒子等单量子态，其相互作用与耦合，丰富了微观量子世界的表现形式。”向涛介绍，单量子态研究，就是要制备和纯化单量子态系统，消除多粒子混合和统计涨落的影响，更好地认识微观量子规律。事实上，单量子态已成为21世纪科学前沿的热点研究领域，近年来仅在《科学》上，几乎每隔一期都有这样的工作报道。

2009年，自然科学基金委启动了“单量子态的探测及相互作用”重大研究计划。时隔9年，2018年12月，在项目结题验收会上，向涛报告了项目取得的主要进展和成果。“经过近年来的努力，我国量子科学已逐渐在国际舞台上崭露头角。”他说。

### 从“0”到“1”的原始性创新

作为一项科学探索，“单量子态”研究计划的核心科学问题是单量子态体系的构筑、单量

子态的精密探测和量子态与环境的相互作用。该重大研究计划立项之初就将解决量子调控的基本问题作为其科学目标，强调做从“0”到“1”的原始性创新工作。

向涛告诉《中国科学报》：“我国在量子领域的进展，很多都是基于他国研究上的拓展发现，从事的都是‘1’到‘2’的研究。我们更希望能够取得对该领域发展有更大影响的开创性成果，在量子调控方面实现跨越式发展。”

该重大研究计划在尊重学科发展规律的基础上，充分发挥科学家的个人特长，同时也强调顶层设计的作用。项目分为两阶段实施。

第一阶段为启动及重点支持阶段。专家指导组充分发挥领域内专家的作用，推荐并鼓励优秀人才进行申请……在初步取得成果的基础上，进一步遴选做得好、有潜力的团队，初步开始实施项目的集成。

第二阶段为集成升华阶段。主要是进一步凝聚科学问题，尽最大可能发挥已有优势项目的潜力，加强研究成果的集成和升华，提高整体研究水平。

“追求极致”，这是这个重大研究计划对承担项目的所有项目组的基本要求，但也是一个很高的要求。要做到这一点，除了需要极低温、强磁场、超高压等极端实验条件，还需要超高的自旋、轨道、空间、时间分辨能力。只有这样，才能真正做到对单量子态在时间、空间、能量和动量的精准探测和控制。

“做得出、看得见、测得准、说得清”，这是实施这个重大研究计划的一个基本路线图。“这就

必须提高材料的纯度和制备技术，使量子态得以纯化，同时还要有能力对其做精密的实验测量，并从理论上对实验观测到的量子现象和效应作出合理的预测和解释。”向涛介绍。

9年来，这个研究计划取得多项重要成果。例如，发现了拓扑超导体与马约拉纳零模，完成了最大量子纠缠态的确定性制备、发现了量子反常霍尔效应，实现了单分子核磁共振探测、发现了拓扑绝缘体中自旋-轨道的锁定现象、得到了多层铁磁超导体的完整相图、实现了量子分波共振态的探测等。

在该重大研究计划实施的8年间，该项目累计发表SCI论文2300多篇，获授权发明专利70余项，项目参与人员获得国家自然科学奖、国家技术发明奖、未来科学大奖等各类荣誉20余项。在资助的中青年学者中，11人获得自然科学基金委国家杰出青年科学基金，4人获得教育部长江计划，9人成为国家“万人计划”科技创新领军人才等。研究计划实施期间，有7位专家组或参研人员当选中国科学院院士。

“这些成果达到了国际先进水平，部分成果处于国际领先水平，在国际上产生了重要影响，代表了我国在单量子态探测及相互作用研究方面的最高水平，推动了我国量子调控研究的发展。”向涛评价说。

### 重视并强化多学科交叉

该重大研究计划重视学科交叉、重视对交

叉学科领域科学问题的凝练。

专家组认为，单量子态研究需要集成具有各种超高时间、空间、能量、动量分辨能力的精密探测手段，实验探测要在超高真空、极低温、强磁场、超高压等极端条件下完成，必须融合物理、化学、信息、材料、能源等多学科的知识和方法，才能解决其中所涉及的一些核心科学问题。

该重大研究计划重视学科交叉性强的新技术新方法的创新与发展，并通过项目的集成，进一步促进学科的交叉。例如，把飞秒双光子能谱动力学研究方法与表面实验扫描探针显微技术相结合，用于表面光催化动力学研究，就是物理与化学交叉融合的一个典型例子。通过这个项目的研究，澄清了甲醇在二氧化钛表面的单分子吸附态和光催化过程，由此开拓了表面光催化动力学研究的新思路。

该重大研究计划每年都会组织一次由项目全体成员参加的学术交流会以及两三次部分成员参加的专题研讨会。向涛介绍：“每次会议都由从事相关研究的物理、化学、信息、材料等领域的研究人员参加研讨和交流。这些会议不仅促进了项目内成员之间的合作，也促进了和项目外研究人员的交叉合作。”

“本项目在单分子、单光子、拓扑绝缘体和铁基超导研究方面取得了一批成果，同10年前相比上了一个台阶。”向涛表示，该重大研究计划的实施，改变了我国在单量子态实验探测系统建设方面的薄弱局面，使得中国在单量子态研究方面整体走在了国际前列。

## 推动中国量子材料物理走向世界

■本报记者甘晓 实习生霍悦

超导，当物质的电阻降为零时，其科学上的新现象和在实际应用上的巨大潜力吸引着全世界科学家为之着迷。近年来，在国家自然科学基金委员会“单量子态的探测及相互作用”重大研究计划支持下，中国科学家在量子反常霍尔效应、拓扑绝缘体和界面超导等领域取得多项重要突破，在上述领域走到了世界科学前沿。

“量子反常霍尔效应”是在没有外加磁场条件下电子运动绝对无能耗的一种状态。由清华大学和中国科学院物理研究所的科研人员组成联合团队，自2009年起开始围绕实现这一效应进行攻关。

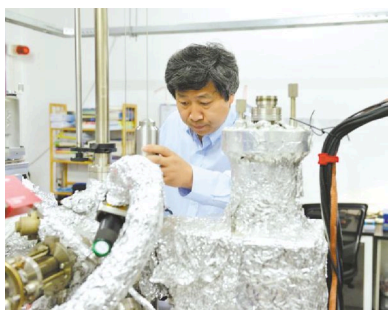
在陆续攻克了均匀的磁性元素掺杂、多元薄膜的组分控制、费米能级的精确调控、铁磁绝缘相的实现等挑战后，科研人员利用分子束外延方法生长出了高质量的铬掺杂碲化铋拓扑绝缘体磁性薄膜，并在极低温输运测量装置上成功地观测到了量子反常霍尔效应。2013年，这项“里程碑式”的成果在《科学》上在线发表。2018年，上述科研团队获国家自然科学基金一等奖。

在拓扑绝缘体领域，找到“马约拉纳费米子”也是科学家梦寐以求的一项成果。在该重大研究计划支持下，2016年，上海交通大学物理与天文系教授贾金锋带领团队，通过一种由拓扑绝缘体材料和超导体材料复合而成的特殊人工薄膜，在实验室里成功捕捉到了物理学家寻找多年的神秘粒子——马约拉纳费米子。

据贾金锋介绍，这是科学家在实验中首次观测到马约拉纳费米子的自旋相关性质，同时也提供了一种用相互作用调控马约拉纳费米子存在的有效方法，还为观察神秘的马约拉纳费米子提供了一个直接测量的办法。

在界面超导领域，2015年，复旦大学物理系教授封东来带领团队对单层铁硒/钛酸锶的配对称性进行了深入研究。他们通过分子束外延生长得到高质量薄膜样品，然后利用扫描隧道显微镜在超高真空、极低温强磁场下对样品的超导电性和配对称性进行了直接观测。

在专家们看来，这项研究有望为实现高温超导奠定基础。此外，在该重大研究计划支持下，封东来和贾金锋带领的两个团队通力合作，对铁基超导宏观量子态进行了全面而系统的研究，覆盖了铁基超导材料的整个相图，获得了丰富和高质量的电子结构数据。



贾金锋在实验中

## 让单量子态“看得见”

■本报记者甘晓 实习生霍悦

自量子力学诞生以来，人们对微观世界运动规律的认识不断加深，极大地推动了现代科学技术的发展。然而，这种认识在很大程度上还带有统计性，对单量子态精密探测和相互作用的研究还较为薄弱。那么，如何对尺度小、结构多样的单量子态进行高分辨探测和识别？如何有效表征信号微弱的光、电、磁？如何调控和利用量子效应呢？

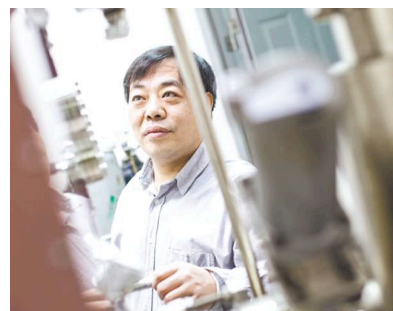
在国家自然科学基金委员会“单量子态的探测及相互作用”重大研究计划的支持下，来自北京大学与中国科学技术大学的课题组，在单分子尺度的量子调控研究中取得代表性研究成果，分别为亚纳米空间分辨的分子光谱成像、水分子的亚分子级分辨成像以及单分子尺度表面催化微机理。

2013年，中国科学技术大学董振超研究组利用拉曼光谱与扫描隧道显微镜融合的针尖增强拉曼光谱技术，在国际上首次实现亚纳米分辨的单分子拉曼光谱成像。项目成果入选2013年度“中国科学十大进展”。

研究人员介绍说，通过巧妙调控纳米针尖下的纳腔等离激元的宽频、局域与增强特性，等离激元共振模式与入射激光、分子光学跃迁三者之间的“双共振”频谱匹配调控，将具有化学识别能力的空间成像分辨率提高到前所未有的0.5纳米，不仅突破了光学成像手段中衍射极限的瓶颈，还对了解世界，特别是微观催化反应机制、分子纳米器件的微观构造，以及包括DNA测序在内的亚分子级分辨的分子成像，具有极其重要的科学意义和实用价值。

“水的结构是什么？”围绕《科学》杂志在创刊125周年时提出的125个最具挑战性的科学问题之一，来自北京大学的王恩哥和江颖团队，利用扫描探针显微镜得到了亚分子级分辨的水分子图像，弥补了十多年来无法对水分子内部自由度成像的遗憾。

实验技术方面，研究人员通过仔细的论证和探索，将可控的同位素替换实验与全量子化计算模拟相结合，



王兵在实验中

并基于扫描隧道显微镜研发了“针尖增强的非弹性电子隧穿谱”技术，在国际上首次获得了单个水分子的高分辨振动谱。这一成果在定量解答“氢键的量子成分有多大”问题的同时，还澄清了学术界长期争论的氢键的量子本质，为理解水的微观结构和动力学研究提供了全新的思路。

近些年来，二氧化钛材料的光催化性质作为太阳能光电转化的有效途径，在光分解水制氢、人工光合作用等领域都得到广泛的关注。基于自行设计的原位光化学STM系统，中国科学院技术大学王兵课题组系统研究了光解水反应的微观过程，直接观察到溶液空穴可触发水分子分解反应，解决了关于“水分解的第一步反应是如何发生的”长期争论。

研究人员表示，单分子尺度表面催化微机理项目中实验与理论相结合，一方面解决了表面小分子及反应产物识别的难题，实现了分子反应微观过程的原位观察；另一方面准确获得了反应过程中光电转换、电荷转移的微观过程，为表面催化动力学过程的研究提供了可视性的有效方法。

随着实验精度和技术控制能力的不断提高，从亚纳米空间分辨的单分子拉曼光谱成像，到亚分子级分辨的水分子图像，再到单分子尺度表面催化微机理，单分子尺度的量子调控研究实现了更高的空间、时间、化学键或化学元素的分辨，以及化学反应的微观识别、结构和功能控制。

## 攻克多体量子纠缠态制备调控难题

■本报记者甘晓 实习生霍悦

作为量子物理世界中一种极为奇特的现象，量子纠缠因其在量子计算、量子精密测量以及基础物理研究等方面的核心价值受到了物理学家的广泛关注。多粒子纠缠态的制备与操控一直是物理学家孜孜不倦的奋斗目标。

在国家自然科学基金委员会重大研究计划“单量子态的探测及相互作用”支持下，清华大学教授尤力课题组在铷-87原子的玻色爱因斯坦凝聚体(BEC)中诱导量子相变，确定性地制备了一种被称为双数态的多粒子纠缠态。原理上，该工作利用了BEC中原子的不可区分性，以及两个磁矩为0的铷-87原子可以发生自旋交换碰撞产生磁矩相反的纠缠原子对等现象来实现这种多粒子纠缠态。

为此，科学家搭建了新的实验平台，每40秒内确定性地制备一个约含有10000个原子的双数态。BEC从非纠缠的初态到双数态的转化效率达96%左右，其量子相干性达到了理想值的99%，可验证的纠缠原子数至少为910个。

在业内专家们看来，这项工作在国际上首次展示了量子相变可以作为制备多体量子纠缠态的有效手段，中国科学家所制备双数态的转化率、压缩系数、相干性、纠缠深度等指标都处于国际领先水平。

在量子调控和检测方面，科学家瞄准了“里德堡原子”的量子调控难题。里德堡原子间存在强偶极相互作用，这一特性在量子计算和量子信息处理方面有重要应用前景。

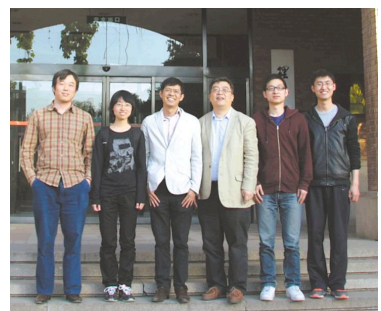
近年来，尤力课题组与中国科学院武汉物理与数学研究所刘红平合作，利用对称性破缺上实现了“偶极里德堡原子”的量子调控。

研究人员介绍，实验采用动力学的方法实现固定方向偶极单量子态里德堡原子的制备与探测。在实验方面，科学家搭建了一套先进的飞行时间质谱仪，并结合成像技术与激光光谱技术开展研究。同时利用大电偶极原子与外场相互作用会直接影响原子在梯度电场中的运动状态特性，发展了高分辨高灵敏度量子态检测技术。

该研究在理论上建立了多能级系统相互作用的态演化量子力学方法，从而提供了一个清晰的里德堡原子量子态动力学演化物理图像。不久前，这一研究结果发表在物理学顶级学术期刊《物理评论快报》上。

专家指出，这为室温下研究偶极阻塞效应奠定了基础，也为偶极阻塞效应开辟新领域夯实了基础。

(本版图片由该重大研究计划项目组提供)



尤力团队合影(左三为尤力)