



中国科大首次实现光子的分数量子反常霍尔态



图注：成果示意图

中国科大潘建伟、陆朝阳、陈明城教授等利用基于自主研发的Plasmonium（等离子体跃迁型）超导高非简谐性光学谐振器阵列，实现了光子间的非线性相互作用，并进一步在此系统中构建出作用于光子的等效磁场以构造人工规范场，在国际上首次实现了光子的分数量子反常霍尔态。这是利用“自底而上”的量子模拟方法进行量子物态和量子计算研究的重要进展。相关成果发表于《科学》。

传统的量子霍尔效应实验研究采用“自顶而下”的方式，即在特定材料的基础上，利用该材料已有的结构和性质实现制备量子霍尔态。通常情况下，需要极低温环境、极高的二维材料纯净度和极强的磁场，对实验要求较为苛刻。此外，传统“自顶而下”的方法难以对系统微观量子态进行单点位独立地操控和测量，一定程度上限制了其在量子信息科学中的应用。

与之相对地，人工搭建的量子系统结构清晰，灵活可控，是一种“自底而上”研究复杂量子物态的新范式。此前，国际上已经基于其开展了一些合成拓扑物态、研究拓扑性质的量子模拟工作。然而，由于以往系统中耦合形式和非线性强度的限制，人们一直未能在二维晶格中为光子构建人工规范场。

为解决这一重大挑战，团队在国际上自主研发并命名了一种新型超导量子比特Plasmonium，打破了目前主流的Transmon（传输子型）量子比特相干性与非简谐性之间的制约，用更高的非简谐性提供了光子间更强的排斥作用。进一步，团队通过交流耦合的方式构造出作用于光子的等效磁场，使光子绕晶格的流动可积累Berry（贝里）相位，解决了实现光子分数量子反常霍尔效应的两个关键难题。同时，这样的人造系统具有可寻址、单点位独立控制和读取，以及可编程性强的优势，为实验观测和操纵提供了新的手段。在该项工作中，研究人员观测到了分数量子霍尔态独有的拓扑关联性质，验证了该系统的分数霍尔电导。同时，他们通过引入局域势场的方法，跟踪了准粒子的产生过程，证实了准粒子的不可压缩性质。

《科学》杂志审稿人高度评价这一工作，认为这一工作“是利用相互作用光子进行量子模拟的重大进展”（a significant advance in quantum simulation with interacting photons），“一种新颖的局域单点控制和自底而上的途径”（a novel form of local control and bottom-up approach），“有潜力为实现非阿贝尔拓扑态开辟一条新的途径，这是利用二维电子气材料的传统方法很难探测的”（potentially open new pathways for realizing non-Abelian topological states, which have been extremely challenging to probe in two-dimensional electron gases）。

诺贝尔物理学奖得主Frank Wilczek评价，这种“自底而上”、用人造原子构建哈密顿量的途径是一个“非常有前途的想法”（a very promising idea），这是一个令人印象深刻的实验（a very impressive experiment），为基于任意子的量子信息处理迈出了重要一步（a remarkable step）。沃尔夫奖获得者Peter Zoller评价，“这在科学和技术上都是一项杰出的成就”（a remarkable achievement, both scientifically and technically），“实现这样的目标是多年来全球顶级实验室竞争的量子模拟的圣杯之一”（one of the holy grails of quantum simulation）。

中国科大在《现代物理评论》上发表强关联非常规高温超导电性综述文章

5月23日，中国科大微尺度国家研究中心陈启瑾和美国芝加哥大学的王志强、Shuolong Yang、K. Levin、达特茅斯学院的Rufus Boyack等，应邀在最新一期《现代物理评论》(Reviews of Modern Physics)上发表长篇综述文章，题为“当超导电性实现渡越：从BCS超导到玻色-爱因斯坦凝聚”(When superconductivity crosses over: from BCS to BEC)。该论文系统地阐述了BCS-BEC渡越超导理论，指出含有赝能隙的强配对超导是比著名的巴丁-库珀-希瑞佛(Bardeen-Cooper-Schrieffer, 即BCS)超导理论所涵盖的更广泛的超导形式。这里BEC代指玻色-爱因斯坦凝聚(Bose-Einstein condensation)。近年来，科学家在天然和人工合成材料中发现了一系列新型非常规超导体，包括有机超导体、铁基超导体、魔角石墨烯超导体、门控半导体超导、表面和界面超导体等。文章对这些新的实验发现进行了系统的分析和评述，指出它们属于BCS-BEC渡越型超导，电子配对强度介于BCS和BEC这两端极限的中间过渡区，呈现有明显的赝能隙现象，并给出了相关实验判据。此外，文章讨论了铜氧化物高温超导体属于BCS-BEC渡越型超导的实验证据。

超导电性自1911年被H.K. Onnes等人发现以来，对物理学的发展产生了巨大影响。除凝聚态之外，超导配对理论在基本粒子和核物理等其它领域也有重要应用。1957年，BCS超导理论成功地解释了基于电子-声子相关作用的常规超导电性，认为在临界转变温度 T_c 之下，电子通过有效的吸引相互作用形成库柏对从而实现动量空间的凝聚，并在电子激发谱中形成一个超导能隙。然而，1986年铜氧化物高温超导体的发现，打破了这一理论描述。对于高温超导体，在转变温度 T_c 之上就反常地出现了配对能隙，被称为赝能隙。此后，如何理解高温超导机理及其赝能隙现象成为了一个跨世纪的重大物理难题。在此基础上，由诺贝尔物理学奖获得者A.J. Leggett于1980年提出的BCS-BEC渡越理论引起了人们的高度重视，作为几种主要的高温超导备选理论之一得到了大力发展，并被推广应用于超冷费米原子气体、核物质、夸克胶子等离子体等研究领域。根据这一理论，随着配对相互作用的增强，电子可以在较高的温度下呈现配对关联甚至实现预配对，从而导致在电子激发谱中出现赝能隙。当配对相互作用足够强时，可以在高温区即实现电子的全部配对。这些电子对可以看作是波色子，从而随温度降低实现玻色-爱因斯坦凝聚。新世纪以来，这一基于BCS-BEC渡越的超导理论图像在冷原子费米气体超流中被实验实现，之后获得广泛的认可。近年来，越来越多的新型超导体被制备和发现，因此，如何把人们对BCS型超导电性的理解扩展到这些令人激动的新型超导材料上是物理学界的一个重要课题。部分材料具有明显的BCS-BEC渡越的特征，可以称之为BCS-BEC渡越型超导体。如今直接在大量新超导材料中观测到相关实验证据尤其令人振奋，对于超导电性的研究具有重要意义。

长期以来，中国科学技术大学陈启瑾教授及其合作者们在高温超导领域的理论研究中做出了重要贡献。陈启瑾和K. Levin团体发展了基于BCS-BEC渡越图像的配对涨落理论[Phys. Rev. Lett. 81, 4708 (1998)]，对高温超导中的反常赝能隙现象给出了一种很自然的解释，并成功地解释了包括高温超导相图、超流密度随掺杂浓度变化的准普适行为等一系列超导实验现象，对于反常的抗磁性、Nernst效应以及霍尔系数等现象给出了统一的解释。2004年，随着超冷费米原子气体超流研究的兴起，陈启瑾等人首次把赝能隙概念引入费米原子气体领域，并逐渐被该领域接受。么正费米气体中的赝能隙现象也于去年首次在实验上无可争议地被观测到[Nature 626, 288 (2024)]。基于这一理论，陈启瑾和合作者成功地解释了冷原子费米气体的超流相图、热力学相变[Science 307, 1296 (2005)]、密度分布、射频谱、末太效应、粒子数失配效应、FFLO奇异超流态的稳定性缺失等一系列实验现象，在偶极原子气体、费米-费米混合气体中的配对和超流理论以及低维BKT相变理论等方面取得了一系列重要成果，发现和预言了一系列新奇的量子现象。此外，应邀在Physics Reports上著有费米冷原子气体领域第一篇综述文章。

《现代物理评论》创刊于1922年，涵盖包括基础、应用和交叉方向的各物理学研究方向，是国际物理学界最著名的综述性期刊，每年仅发表约四十篇学术论文。该期刊一般不接受自由投稿，主要是由编辑邀请在各领域卓有建树的物理学家执笔，旨在对当今物理研究的重大热点问题做历史总结、原理阐述、现状分析和趋向预测。论文需经过国际同行的匿名评审方可发表。



研究进展



国家研究中心简讯

中国科大在二维铁电挠曲调控 研究中取得进展

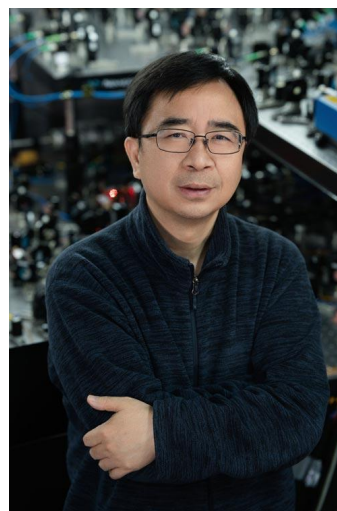
近日，中国科大微尺度国家研究中心曾华凌教授课题组和云南师范大学付召明教授课题组合作在二维铁电挠曲电效应研究中取得新进展，演示了一种任意双向的铁电极化力学调控技术，为二维极限下铁电特性的操控提供了普适手段。研究成果以“Reversible flexoelectric domain engineering at the nanoscale in van der Waals ferroelectrics”为题发表于《自然·通讯》。

曾华凌课题组基于二维材料中天然的机械柔性，以超薄层状铁电 CuInP_2S_6 为模型体系，发展了无损、可逆的纯力学极化调控普适手段。在针尖压印下，二维材料因其良好的柔性，相较于体相材料将在更大区域的上产生形变，其柔性形变区域大于针尖尺寸。这种拓展的柔性形变带来了数十纳米空间尺度上可控的双向应变梯度，所产生的挠曲电场能够打破电偶极矩之间长程库仑相互作用的空间限制，从而实现铁电极化的双向稳定翻转，为可逆调控铁电极化提供了原理基础。

基于以上电极化力学双向调控策略，团队设计了实验方案，在二维 CuInP_2S_6 中基于针尖技术产生了可控的应变梯度并量化其大小，通过使用弹性衬底，实现了无外电场下无损的纯力学铁电极化调控。基于原子力显微镜，这种纳米尺度的挠曲电调控可以反复实施，进而实现高密度铁电纳米畴的纯力学写入和擦除。团队演示了在1平方微米区域内可控生成横向尺寸小至约80纳米的铁电纳米畴，等价实现了相当于31.4 Gbit/inch的存储密度。研究所取得的进展填补了传统铁电极化挠曲调控技术的短板，使得纯力学调控能实现电极化的双向任意操控，同时也实现了纳米尺度下高挠曲场的可控产生，为定量研究二维体系中挠曲场调制电子结构及相关物性提供了基础。

◆潘建伟教授当选英国皇家学会外籍院士

5月16日，英国皇家学会（The Royal Society）公布了新增选的70位院士和22位外籍院士名单，潘建伟教授当选外籍院士，也是本次当选英国皇家学会外籍院士中唯一一位中国科学家。英国皇家学会会长阿德里安·史密斯爵士评价道：“这批新成员已经为我们对世界的理解做出了重大贡献，并继续推动学术研究和工业的可能性界限。”



潘建伟主要从事量子光学、量子信息和量子力学基础问题检验等方面的实验研究，英国皇家学会对其当选的评语是：“潘建伟的开创性贡献将全球范围内的安全量子通信和量子计算优势从梦想变为现实。通过‘墨子号’量子卫星，潘建伟首次实现了洲际量子加密视频会议，这开启了量子互联网从地面到太空的宏大前景。基于多粒子干涉度量学，他构建了能够在解决特定问题上超越经典计算机的量子计算系统。”

英国皇家学会又称“英国皇家科学院”，成立于1660年，是英国最高学术机构，也是世界上历史最悠久而又从未中断过的科学学会。英国皇家学会院士的评选旨在表彰当选者作为各自领域的领导者，对科学研究做出的宝贵贡献，牛顿、法拉第、达尔文、麦克斯韦、爱因斯坦、狄拉克以及DNA双螺旋结构的发现者沃森和克里克等著名科学家都是英国皇家学会院士。