

# 中国科大首次实现光子的分数量子反常霍尔态

**本报讯** 我校潘建伟、陆朝阳、陈明城教授等利用基于自主研发的Plasmonium（等离子体共振型）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。相关研究成果于5月3日发表在国际学术期刊《科学》上。



成果示意图：16个非线性“光子盒”阵列囚禁的微波光子强相互作用形成分数量子反常霍尔态（注：“光子盒”的名字最早来自1930年爱因斯坦和波尔争论中提出的思想实验）。

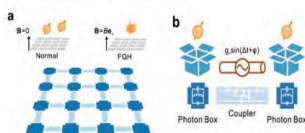
霍尔效应是指当电流通过置于磁场中的材料时，电子受到洛伦兹力的作用，在材料内部产生垂直于电流和磁场方向的电压。这个效应由美国科学家霍尔在1879年发现，并被广泛应用于电磁感测领域。1980年，德国科学家冯·克利钦发现在极低温和强磁场条件下，霍尔效应出现整数量子化的电导率平台。这一新现象超出了经典物理学的描述，被称为整数量子霍尔效应，它为精确测量电阻提供了标准。1981年，美籍华裔科学家崔琦和德国科学家施特默发现了分数量子

霍尔效应。整数和分数量子霍尔效应的发现分别获得1985年和1998年诺贝尔物理学奖。

此后四十余年间，分数量子霍尔效应尤其受到了广泛的关注。由于最低朗道能级简并电子的相互作用，分数量子霍尔态展现出非平庸的多体纠缠，对其研究衍生出的拓扑序、复合费米子等理论成果逐渐成为多体物理学的基本模型。与此同时，分数量子霍尔态可激发出局域的准粒子，这种准粒子具有奇异的分数统计和拓扑保护性质，有望成为拓扑量子计算的载体。

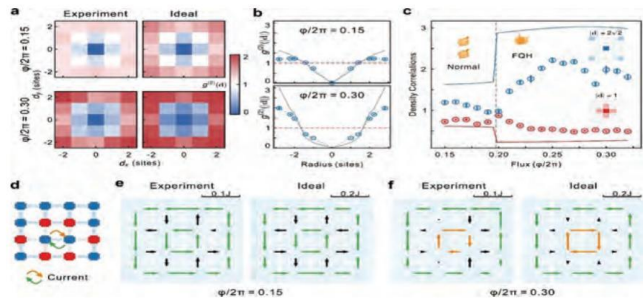
反常霍尔效应是指无需外部磁场的情况下观测到相关效应。2013年，中国研究团队观测到整数量子反常霍尔效应。2023年，美国和中国的研究团队分别独立在双层转角碲化铋中观测到分数量子反常霍尔效应。

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。

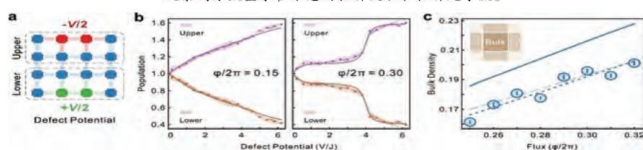


在非线性光子系统中构建人工规范场，实现光子的分数量子霍尔态。

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。其优势包括：无需外磁场，通过变换耦合形式即可构造出等效人工规范场；通过对系统进行高精度可寻址的操控，可实现对高集成度量子系统微观性质的全面测量，并加以进一步可控的利用。这类技术被称为量子模拟，是“第二次量子革命”的重要内容，有望在近期应用于模拟经典计算困难的量子系统并达到“量子计算优越性”。



观察到分数量子霍尔态的拓扑关联和拓扑光子流。



观察到准粒子的不可压缩和分数霍尔电导。

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、单点独立控制和读取，以及可编程性强度的优势，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”“一种新颖的局域单点控制和自底而上的途径”“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方法很难达到的”。

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”，这是一个令人印象深刻的实验，为基于任意子的量子信息处理迈出了重要一步。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”“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”。

本文第一作者为中国科大陈明城、刘丰铭和王黎。

（合肥微尺度物质科学国家研究中心物理学院 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院）

## 中国科大利用固态自旋量子传感器对新奇自旋相互作用开展实验检验

**本报讯** 中国科学技术大学中国科学院微磁共振重点实验室杜江峰、荣星课题组与浙江大学焦曼研究员合作，利用固态自旋量子传感器对两种速度相关的新奇自旋相互作用在小尺度给出了当下最严格的实验限定，相关研究成果于4月30日发表在《物理评论快报》上。

标准模型是粒子物理学中非常成功的理论框架，描述了基本粒子和四种基本相互作用。但是标准模型仍无法解释当前宇宙天文学的一些重要观测事实，例如暗物质和暗能量。因此理论学家提出，存在超越标准模型的新粒子，如轴子、类轴子和Z'玻色子等。这些粒子可能是我们理解宇宙更深层次的关键。理论指出，新粒子可以作为传播子，传递标准模型粒子之间的新相互作用，譬如可以诱导出自旋与自旋之间速度相关的新相互作用。

目前国际上对自旋与自旋之间速度相关

的新相互作用的实验研究比较欠缺，特别是在力程相对较小的范围内，实验检验几乎没有。这是因为小力程实验搜寻的挑战在于需要在微米尺度同时实现相干调控自旋量子态、高精度磁探测以及空间位置精密调制。

针对这一挑战，研究团队精心设计了装配有两块金刚石的实验装置。每块金刚石表面都通过化学气相沉积法制备了高品质的氮-空位(NV)色心。其中一块NV色心的电子自旋作为自旋传感器，而另一块则作为自旋源。团队通过相干操控两块金刚石NV色心的自旋量子态及其相对速度，从而在微米尺度搜寻了电子自旋之间速度相关的新相互作用效应。首先利用自旋传感器表征其与自旋源之间的磁偶极相互作用作为标尺，然后通过调制自旋源振荡，并进行锁相探测和相位正交分析来测量速度相关的自旋-自旋新相互作用。对于两种新相互作用，该团队分别在小于1厘米和小于1千米的力程范围内实现了国际上首次实验探测，获取了宝贵的实验搜寻数据。

中国科学院微磁共振重点实验室研究生黄越和梁毅为该文共同第一作者，杜江峰院士、荣星教授、焦曼研究员为该文的共同通讯作者。

（中国科学院微磁共振重点实验室 物理学院 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院）

## 中国科大-华为“复杂系统科学与创新应用研讨会”在合肥举办



**本报讯** 为促进跨领域、跨学科协同创新，推进复杂系统科学的发展，深化高校与企业在解决重大科学和产业问题中的合作，4月27日，由华为2012实验室理论部上海研究所、中国科学技术大学网络安全学院、合肥综合性国家科学中心数据空间研究院联合主办的“复杂系统科学与创新应用研讨会”在合肥举办。中国科学院院士、中国科学技术大学校长包信和作开幕致辞，中国科学院副院长、院士吴曼青等嘉宾做主旨报告，中国科学技术大学党委书记、副校长吴枫，中国科学院量子信息与量子科技创新研究院院长俞海海出席会议。

本次会议旨在围绕复杂系统科学的基础理论、算法技术及其创新应用进行充分探讨，为学术界和产业界同仁提供一个探讨前

沿议题，交流最新研究进展和应用成果的平台。与会嘉宾包括来自中国工程院、中国科学院、中国科技大学、北京师范大学、复旦大学、北京大学、深圳大学、苏州大学、合肥工业大学、哈尔滨工业大学等院校、科研机构的学者，以及来自华为的企业专家。

会上，吴曼青院士以“发展网络科学，建设数据空间”为题作大会报告，提出应用复杂网络的方法建模分析数据要素及其关系的新思路，阐明了研发基于复杂网络的数据空间创新基础设施的必要性，以及其对于国家网络安全建设重要意义。北京师范大学狄增如教授、复旦大学林俊教授、华为公司计算架构与设计部首席架构师杜云飞研究员等学者、业内专家围绕复杂系统科学的前沿问题进行精彩报告，为复杂系统科学与创新应用提供了新的思路。

最后，经海报交流环节，与会专家评选出了孟瑶、杨永晖和任金虎三位同学获得此次研讨会最佳海报奖（Best Poster Award），并由我校网络安全空间安全学院教授、合肥综合性国家科学中心数据空间研究院首席科学家吕琳媛为获奖者颁奖。

此次研讨会在合肥成功举办，进一步促进了复杂系统科学相关领域的交叉融合应用，助力“网络强国”和“数字中国”建设背景下，复杂系统科学的高质量发展。（网络安全空间安全学院）

### 科研简讯

● 我校孙海澄教授iGaN Lab课题组与武汉大学刘胜院士团队合作，在国际上首次提出了新型三电极光电PN结二极管结构，通过在P型区域引入“第三电极”，构筑载流子调制新方法，实现了第三端口外加电场对二极管光电特性的有效调控。此外，团队还

基于该新型光电二极管构建了光通信系统和可重构光电逻辑门系统，为开发下一代光电集成芯片提供了一种全新的器件架构和系统解决方案。相关研究成果于4月25日发表于《自然·电子学》，并被杂志主编推选为封面论文发布。

● 我校郭光灿院士团队在量子隐形传态研究中取得重要进展。该团队李传锋、刘盟地等人于芬兰图尔库大学理论研究所合

作，利用多体混合纠缠成功克服了环境噪声，实现了高保真度的量子隐形传态。相关研究成果于5月1日发表在《科学·进展》上。本次研究成果提供了一种区别于动力学解耦（Dynamical Decoupling）和无退相干子空间（Decoherence-Free Subspaces）的克服环境噪声的新方法，并对深入理解量子非局域性有重要意义。

● 我校俞书宏院士团队基于应力诱导轴

向有序化，并结合可控的化学后转化过程，发展了一种可控合成一维分段异质纳米结构的普适方法，并通过连续相场模型追踪了应力和应变在周期性有序结构演化过程中的变化规律。相关研究成果近日发表在《自然·通讯》上。这一工作不仅丰富了一维分段异质纳米结构的材料库，还为精准制备功能导向的纳米材料以及探索异质纳米结构的有序重构提供了新途径。