

我国在量子纠错领域达到关键里程碑

中国科大教授潘建伟、朱晓波、彭承志和陈福升副教授等，基于超导量子处理器“祖冲之3.2号”在码距为7的表面码上实现了低于纠错阈值的量子纠错，演示了逻辑错误率随码距增加而显著下降。这一成果使得我国达到了“低于阈值，越纠越好”的关键里程碑，同时也开辟了一条较美国谷歌公司更为高效的“全微波控制”新路径，为未来大规模容错量子计算奠定关键技术基础。12月22日，该成果以封面论文和“编辑推荐”的形式发表于《物理评论快报》，美国物理学会《物理》栏目进行专题报道。

实现容错通用量子计算机的必要条件是通过量子纠错抑制量子比特的错误率以满足大规模集成的要求。表面码是目前最成熟的量子纠错方案之一。通过表面码将多个物理量子比特编码成一个逻辑量子比特，原理上随着物理比特数目的增加，逻辑比特的错误率能够不断降低。

然而，量子纠错需要引入大量额外的量子比特和量子门操作，导致更多的噪声源和错误通道。如果物理量子比特的原始错误率过高，增大纠错码距带来的额外错误反而会淹没纠错带来的收益，导致“越纠越错”。在所有错误类型中，“泄漏错误”尤为致命——量子比特会脱离预定的计算能级，进入无法通过表面码直接纠正的无效状态。随着系统规模的扩大，

泄漏错误的累积效应将成为阻碍纠错性能提升的主要瓶颈。

因此，全球量子纠错研究的焦点在于不断降低物理比特的各类错误水平，特别是抑制泄漏错误，使系统的整体操控精度突破一个严苛的“纠错阈值”。只有跨越这一阈值，量子纠错才能产生正向净收益，实现“越纠越好”的理想效果。实现“低于阈值”的量子纠错，因而成为衡量量子计算系统能否从实验室原型走向实用化的关键分水岭。

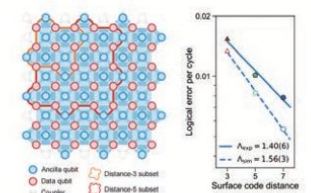


图1：(a) 随着码距从3（橙色框内比特）增大到5（红色框内比特）再到7（所有彩色标注比特），(b) 逻辑错误率指数下降。

中国科大超导量子计算研究团队在国际上较早布局表面码量子纠错研究。2022年，研究团队基于“祖冲之2号”超导量子处理器率先

实现了码距为3的表面码逻辑量子比特，首次验证了表面码方案的可行性。2023年，谷歌实现了码距为5的表面码纠错。受限于当时较高的物理量子比特各类错误水平，以上工作都未能真正突破纠错阈值。

2025年2月，谷歌团队利用其“垂柳”处理器，开发了一种基于直流脉冲的量子态泄漏抑制方法，在码距为7的表面码上实现了低于阈值的逻辑比特。然而，该技术路线对量子处理器的芯片架构（如比特间连接方式）施加了较多约束。同时，随着量子比特数扩展，这种方案在极低温环境下需要复杂的布线，硬件资源开销极大。

2025年底，中国科大团队基于107比特“祖冲之3.2号”量子处理器，提出并成功实践了一种全新的“全微波量子态泄漏抑制架构”。在“祖冲之3.2号”处理器本身具备的高精度双比特门操作、长相干时间等优异性能基础上，研究团队结合全微波量子态泄漏抑制架构，实现了码距为7的表面码逻辑比特。实验结果显示，逻辑错误率随码距增加显著下降，错误抑制因子达到1.4，证明了系统已在纠错阈值之下，成功达到了“越纠越好”的目标。同时，全微波量子态泄漏抑制架构具有天然的频分复用特性，在硬件效率和扩展性上较谷歌的技术路线具有显著优势，为未来构建百万比特级量子计算机提供了一种更具优势的解决方案。

（原载于央广网客户端 2025年12月23日 记者 鲍玉祥）

中国科大教授王亚和北京师范大学副教授王评合作，在量子多体系统探测上取得重要进展。研究团队提出一种名为“多维关联压缩”的全新方法，成功将难以直接观测的高阶量子关联信息“编码”至一个局域量子探针的噪声信号中，从而实现了对复杂量子系统内部关联的间接高精度探测。相关成果日前在线发表于《物理评论快报》。

理解量子多体系统的非平衡动力学是现代物理学的核心前沿。其中的关键在于探测系统内部粒子间的高阶关联，尤其是量子纠缠。但对于缺乏单粒子独立操控能力的复杂系统的探测，一直是亟待解决的难题。

此次研究团队开发的“多维关联压缩”技术，其核心思想是将一个无法直接测量的复杂多体系统与一个高度敏感的局域量子探针耦合。多体系统的复杂关联会作为独特的“印记”，“压缩”在探针相对容易读取的时间涨落频谱上。通过解读这些频谱“密码”，便能反推出系统内部的多体关联特性。在实验验证中，研究团队利用空间分辨率达纳米级的金刚石氮空位色心量子探针，首次成功重构了其周围核自旋环境的三阶关联。通过分析关联累积的谱结构，该方法还能够直接可视化量子纠缠的建立过程，为探测纠缠这一奇特的量子资源提供了新途径。

这项研究为表征缺乏个体寻址能力的量子多体系统开辟了一条具有通用潜力的实验路径。它不仅适用于基础物理研究，未来还有望应用于新型量子材料的表征，以及对日益复杂的量子模拟器的有效验证，从而推动量子科技的发展。

（原载于《科技日报》2025年12月19日 记者 吴长锋）

中国科大揭示相同晶体结构中不同拓扑陈数的物理起源

本报讯 近日，中国科大郭光灿院士团队何力新研究组在单层二维磁性材料的量子反常霍尔效应研究领域取得重要进展。研究团队阐明，在晶体结构完全相同的 M_2X_2 单层体系中，为何能够形成呈现 $C=1$ 与 $C=2$ 等不同拓扑陈数态。通过系统分析其能带拓扑演化规律，团队构建了一个统一描述不同陈数拓扑形成机制的理论框架，揭示了高陈数态产生的物理起源。这一发现为未来寻找和设计高陈数的二维

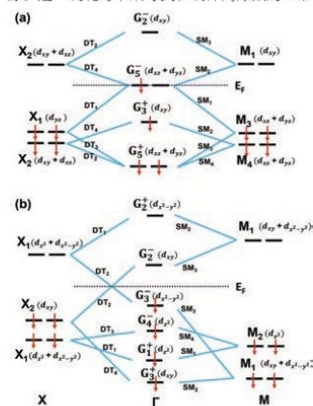


图2：单层 NiI_2 (a) 和 $FeBr_2$ (b) 在无自旋轨道耦合 (SOC) 情况下沿 $X \rightarrow \Gamma \rightarrow M$ 路径的费米能级附近能带示意图。

拓朴材料提供了重要的理论指引，12月17日发表在《物理评论快报》上。

团队结合DFT计算与紧束缚模型，系统分

析了单层 M_2X_2 材料的拓朴性质，阐明了其不同拓朴陈数的内在物理起源。研究表明，费米能级附近的3d轨道构成及其对应的对称性表示的差异，会导致两类本质不同的能带反转机制，从而形成不同的拓朴陈数与拓朴相。

第一类能带反转机制：如图(a)所示，陈数为 $C=1$ 的材料在 Γ 点发生带反转。以 NiI_2 为例，费米能级附近的电子态主要由 d_{xy} 、 d_{xz} 和 d_{yz} 轨道贡献。在布里渊区的 X 与 Γ 点，由于对称性约束，原胞中两个磁性原子之间的有效相互作用被严格禁止，导致相关轨道能带呈现两重简并。

而在 Γ 点，因原胞内磁性原子之间的强相互作用，轨道简并态发生劈裂： d_{xy} 轨道分裂为成键的 G_1^+ 与反键的 G_2^- 态，而 d_{xz} 和 d_{yz} 轨道则根据对称性形成两个二维简并态 G_3^+ 。其中，由 d_{xy} 轨道形成的成键态能级低于由 d_{xz}/d_{yz} 轨道所形成的反键态，体系在 Γ 点分数占据，形成典型的能带反转特征，这是体系产生 $C=1$ 拓朴相的根本原因。在无SOC时， G_1^+ 在 Γ 点形成两重简并的能带交叉；引入SOC后，该交叉点打开能隙，体系转变为量子反常霍尔态。基于紧束缚模型与对称性指标理论，团队进一步得到 NiI_2 的拓朴指标 $Z_4R=Z_4S+Z_2R=Z_2I$ ， $3=1$ ，与第一性原理计算得到的陈数一致。

第二类能带反转机制：如图(b)所示，以 $FeBr_2$ 为代表的体系呈现出 $C=2$ 带反转特征。与 NiI_2 结构类似，在 X 和 Y 点双简并的轨道由于原胞内磁性原子间强相互作用会劈裂为不同的成键和反键态，但 $FeBr_2$ 结构费米能级附近的能带主要由 d_{xy} 、 d_{xz} 与 d_{yz} 轨道构成，这些轨道在 Γ 点形成的成键和反键态都是单重简并的。由于 d_{xy} 轨道形成的反键态 G_2^- 能级高于 d_{xz}/d_{yz} 轨道形成的反键态能级 G_3^+ ，根据能带不可约表示的相容性关系和 C_4 对称性，体系沿着

$\Gamma \rightarrow X$ 和 $\Gamma \rightarrow Y$ 必然出现四个偶然简并点。在无SOC时，这些交叉点构成拓朴相的关键基础；引入SOC后，这些交叉点均打开能隙，体系转变为拓朴非平庸态。每个交叉点对陈数贡献为 ± 2 ，因此四个等价交叉点累计贡献的总陈数为2。进一步的对称性指标计算结果表明， $Z_4R=Z_4S=2$ ，与第一性原理计算得到的陈数一致。

由此可知，费米能级附近3d轨道构成及其对称性表示的差异，会触发两类不同的能带反转机制，并进一步决定材料所呈现的拓朴陈数与拓朴相。其中，一类由晶体对称性（如 C_4Z ）主导的带反转机制，可在布里渊区多个对称等价的k点同时发生，从而形成更高的拓朴陈数。这一机制与传统依赖单一k点发生多次能带反转以获得高陈数的机制截然不同。这一机制还能够统一解释 $LiFeSe$ 、 $KTiSb$ 、 $MgFeP$ 以及 $Janus M_2X$ 等材料中所观测到的不同拓朴陈数的解决方案。

本研究揭示了一种能够统一解释不同拓朴陈数起源的新机制，为设计具有本征高陈数的量子反常霍尔效应材料提供了明确可靠的理论依据。此类材料在低能耗自旋电子器件和拓朴量子计算平台等前沿领域具有重要应用潜力，有望在未来推动相关方向的深入发展并促成关键技术突破。本工作中的所有第一性原理计算，包括声子谱、电子能带结构、Berry曲率、霍尔电导以及表面态等关键物理量的计算，均由自主研发的ABACUS软件与PYATB软件完成。

论文的第一作者是博士生戴建超（现为合肥人工智能研究院博士后），通讯作者为何力新教授。

（量子网络安徽省重点实验室 物理学院 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院 科研部）

中国科大实现电泵浦片上集成高亮度纠缠量子光源

本报讯 中国科大教授潘建伟、张强等组成的研究团队与济南量子技术研究院、中国科学院半导体所等单位合作，通过混合集成分布式反馈激光器与薄膜铌酸锂光子芯片，成功实现了电泵浦、片上集成的高亮度偏振纠缠源，向集成量子信息处理迈出重要一步。相关成果以“编辑推荐”的形式12月16日发表在《物理评论快报》上。

中国科大研究团队创新性地采用分布式反馈 (DFB) 激光器与薄膜铌酸锂 (TFLN) 光子芯片混合集成的方案，利用半导体硅光子研究团队开发的780nm波段DFB激光器，结合济南量子技术研究院的集成化双通道参量下转换TFLN光子芯片，最终实现了高效的自发参量下转换以及片上偏振纠缠态制备。其中，TFLN光子芯片集成了多模干涉分束器、双通道周期性极化铌酸锂波导以及偏振旋转约束器（图1所示）。通过直流或脉冲电信号泵浦（图2所示），团队在室温下实现了超高亮度的偏振纠缠光子对产生，亮度达到 4.5×10^6 Hz/mW，

带宽达到73nm，该亮度较此前基于氮化硅平台的电泵浦纠缠源提升了6个数量级，带宽提升了1个数量级。

实验结果表明，该纠缠源在多个波长信道下均表现出良好的贝尔态特性（保真度大于

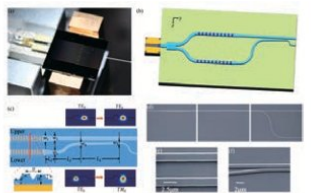


图3：(a) 电泵浦偏振纠缠光子源实物图；(b) 混合集成示意图；(c) 波导结构与光场模式分布；(d) 薄膜铌酸锂芯片扫描电镜图；(e) 双通道PPLN波导电镜图；(f) 偏振旋转约束器电镜图。



图4：电泵浦偏振纠缠光子源封装示意图

96%），并具备宽带复用能力，器件尺寸仅为 $15 \times 20 \mu m^2$ ，展现出优异的集成度。该器件适用于波分复用的光纤网络量子密钥分发、基于卫星的星地量子通信，以及基于纠缠的量子精密测量等应用场景。

中国科大博士研究生焦旭峰和济南量子技术研究院研究员郑名扬是论文共同第一作者。

（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 科研部）

新技术实现纳米尺度量子多体纠缠探测

中国科大教授王亚和北京师范大学副教授王评合作，在量子多体系统探测上取得重要进展。研究团队提出一种名为“多维关联压缩”的全新方法，成功将难以直接观测的高阶量子关联信息“编码”至一个局域量子探针的噪声信号中，从而实现了对复杂量子系统内部关联的间接高精度探测。相关成果日前在线发表于《物理评论快报》。

理解量子多体系统的非平衡动力学是现代物理学的核心前沿。其中的关键在于探测系统内部粒子间的高阶关联，尤其是量子纠缠。但对于缺乏单粒子独立操控能力的复杂系统的探测，一直是亟待解决的难题。

此次研究团队开发的“多维关联压缩”技术，其核心思想是将一个无法直接测量的复杂多体系统与一个高度敏感的局域量子探针耦合。多体系统的复杂关联会作为独特的“印记”，“压缩”在探针相对容易读取的时间涨落频谱上。通过解读这些频谱“密码”，便能反推出系统内部的多体关联特性。在实验验证中，研究团队利用空间分辨率达纳米级的金刚石氮空位色心量子探针，首次成功重构了其周围核自旋环境的三阶关联。通过分析关联累积的谱结构，该方法还能够直接可视化量子纠缠的建立过程，为探测纠缠这一奇特的量子资源提供了新途径。

这项研究为表征缺乏个体寻址能力的量子多体系统开辟了一条具有通用潜力的实验路径。它不仅适用于基础物理研究，未来还有望应用于新型量子材料的表征，以及对日益复杂的量子模拟器的有效验证，从而推动量子科技的发展。

（原载于《科技日报》2025年12月19日 记者 吴长锋）

中国科大提出视觉与波动特征融合的异常检测框架

针对上述挑战，Res-SAM将通用视觉大模型的空间感知能力与刻画局部动态变化的储备池计算模型相结合。该框架首先利用视觉大模型快速定位可能存在异常的区域，再通过局部变化特征的分析，对这些区域进行精细修正和判断，从而提高识别的准确性和稳定性。Res-SAM不依赖大规模标注数据，也无需进行复杂、耗时的模型训练过程，既可以全自动运行，也支持通过简单点击进行交互式辅助分析，在保障结果可信度的同时大幅降低了实际应用中的成本。在多种真实城市道路地下异常检测任务中，Res-SAM表现出良好的稳定性和可靠性，能够在复杂背景下稳定识别潜在风险区域。

上述研究提出了一种面向物理成像数据解析的跨模态特征融合建模新范式，并可有效推广至医疗影像数据、遥感成像数据中，为多模态数据中目标的高效识别提供了可推广、低训练成本的技术路径。

中国科大周熙人副研究员为论文第一作者，陈欢欢教授为通讯作者。

（计算机科学与技术学院 科研部）