具有拓扑特征的光学斯格明子的存储与读取

Jinwen Wang,[1,*] Xin Yang,[1,†] Yun Chen,[2] Zhujun Ye,[3] Xinji Zeng,[1] Yongkun Zhou,[1] Shuya Zhang,[1] Claire Marie Cisowski,[4] Chengyuan Wang,[1] Katsuya Inoue,[3] Yijie Shen,[5,6,3,‡] Sonja Franke-Arnold,[4,§] 和 Hong Gao[1,¶]

[1] *Ministry of Education Key Laboratory for Nonequilibrium Synthesis and Modulation of Condensed Matter, Shaanxi Province Key Laboratory of Quantum Information and Quantum Optoelectronic Devices,School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China* [2] *School of Science, Huzhou University, Zhejiang 313000, China* [3] *International Institute for Sustainability with Knotted Chiral Meta Matter (WPI-SKCM²),Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan* [4] *School of Physics and Astronomy, University of Glasgow, G12 8QQ, United Kingdom* [5] *Centre for Disruptive Photonic Technologies, School of Physical and Mathematical Sciences,Nanyang Technological University, Singapore 637371, Singapore* [6] *School of Electrical and Electronic Engineering,Nanyang Technological University, Singapore 639798, Republic of Singapore*（日期：2025年12月24日）

arXiv:2512.20378v1 [quant-ph] 23 Dec 2025

光学斯格明子是光的拓扑结构，其定义性属性——斯格明子数——对扰动具有鲁棒性。因此，它们在量子信息存储领域颇具应用前景，因为抵御退相干至关重要。然而，相干存储过程中如何保持其特性仍未得到探索。我们首次实验演示了在冷 ^{87}Rb 蒸气中，利用双路径电磁诱导透明存储器对光学斯格明子进行存储和读取。重要的是，我们表明，即使两条路径之间存在不平衡损耗，且控制光束功率受到显著扰动，斯格明子数在长达数微秒的存储时间内仍保持不变。我们的工作证明了非平凡拓扑不变量在量子存储器中的存续，标志着迈向拓扑保护光子技术的重要一步。

引言：近年来，作为具有独特偏振纹理的拓扑准粒子，光学斯格明子已成为一个活跃的研究领域 [1–3]。这些结构有望具备抵御扰动的内在稳定性，因此可能应用于光子器件和信息处理技术 [4–6]。斯格明子的概念最初是在粒子物理学背景下提出的，此后被拓展至各种物理系统，例如磁性材料[7, 8], 超冷原子 [9], 声学系统 [10], 和流体系统 [11, 12]。在光学领域，斯格明子表现为光场的矢量纹理，使人们能够探索各种斯格明子结构 [13–23]。它们的制备相对简单，因为光学系统不受凝聚态系统所固有的晶体结构限制。近期对光学斯格明子的研究表明，其拓扑信息能够抵御复杂系统中的噪声和缺陷[24–26], , 并有望应用于光与物质相互作用 [27–31], 以及经典或量子通信与计算 [32–36]。例如，可以将量子信息编码在由固定斯格明子数定义的双光子纠缠态中，其中拓扑保护能够抑制噪声效应并保持全局不变量 [37]。

具有拓扑准粒子的量子网络除了通信信道，还需要量子存储器。迄今为止，斯格明子光束的光存储仍未得到探索。存储偏振编码的信息（如偏振量子比特 [38–40] 和矢量光束 [41–44] ）通常需要在原子系综中采用双路径干涉配置，以抵消偏振敏感性；这种敏感性源于多个塞曼子能级的存在。然而，这种方法要求两条路径之间的效率和相位稳定性高度平衡，因为任何缺陷都会严重降低输出保真度 [45]。鉴于这些挑战，光学斯格明子成为一种很有前景的替代信息载体，有望克服传统偏振存储方案的局限。它们的拓扑性质在幺正或非幺正变换 [46–49] 下可能得以保持；这类变换在光学系统中十分常见，例如散射或在噪声信道中的传播，因此光学斯格明子能够抵抗退相干和模式畸变。这种拓扑保护有望提供可靠的稳定性，抵消由退相干、效率失衡以及两条路径之间的相位差产生的有效噪声，同时保留全局拓扑不变量和稳健的量子数。

本研究采用基于电磁感应透明（EIT）协议的双路径存储方案，实现了光学斯格明子的光存储。光学斯格明子的两种空间模式在空间上彼此分离，并分别存储于冷态 ^{87}Rb 原子中。两种空间模式分布的强度分布存在差异，导致存储效率不可避免地不平衡，并因色散而产生相位差；这种色散沿着

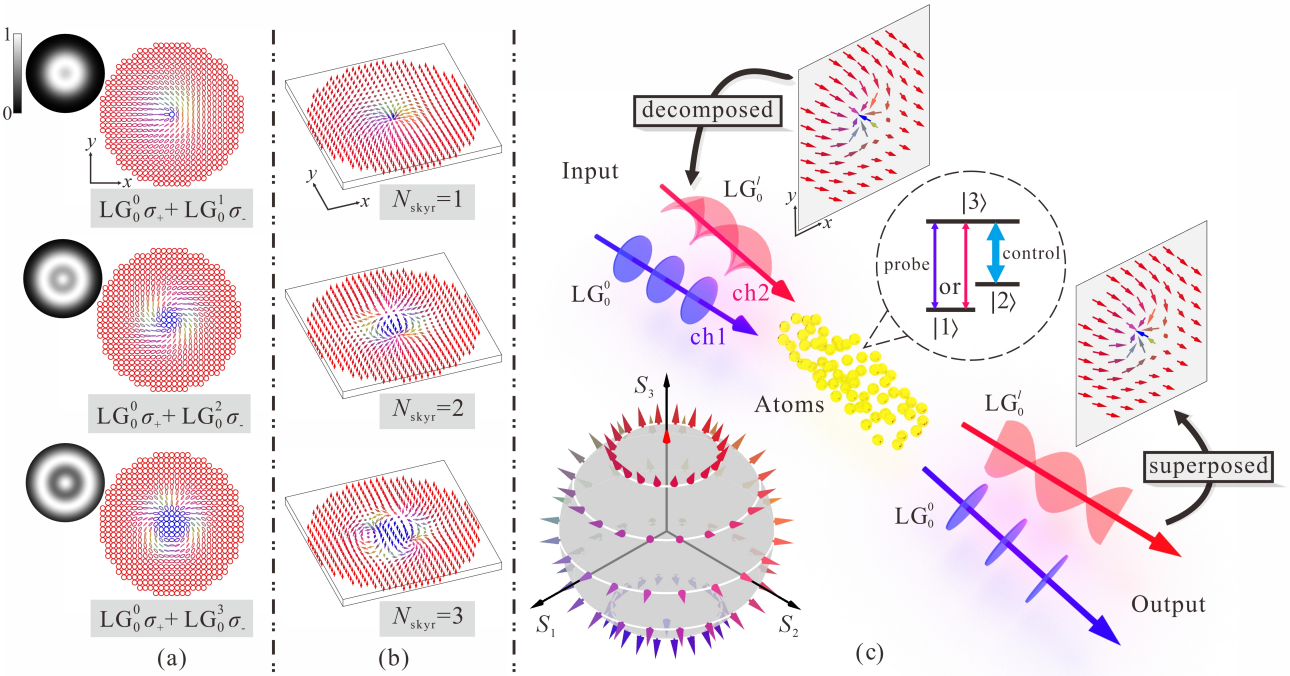

图 1. (a) 方程 (1) 中 $N_{\mathrm{skyr}} = 1$、2、3 对应的傍轴光学斯格明子的模拟偏振和强度分布。(b) 具有相应 N_{skyr} 值的光学斯格明子的模拟斯托克斯矢量三维透视图。(c) 光存储示意图。探测光束驱动每条路径中的能级 $|1\rangle$ 至 $|3\rangle$，控制光束则同时驱动两条路径中的能级 $|2\rangle$ 至 $|3\rangle$。我们将需要存储的信号输入原子存储介质，并在存储后获得输出（读出）信号。更多细节见正文。左下角插图显示了单位庞加莱球面上的斯托克斯矢量 $\boldsymbol{s}$。箭头与偏振态之间的映射关系用相同颜色标示。

两条路径累积。此外，系统还会经历退相干导致的存储效率损耗。我们的实验结果表明，尽管如此，在数微秒的存储时间内，斯格明子数仍得以守恒。虽然基于电磁感应透明的存储已相当成熟，但我们在此首次证明，光学斯格明子光束的拓扑不变量能够保持稳定；采用传统偏振或轨道角动量（OAM）编码则无法实现这一点。本研究不仅为拓扑非平庸光子编码空间在现实存储器缺陷下的稳定性提供了实验证据，也为未来基于斯格明子结构的存储器件提供了宝贵见解 [50–52]。

概念与模型：为研究光学斯格明子的存储，我们首先生成以下形式的状态

$$|\Psi^l\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\mathrm{LG}_0^0\rangle|\boldsymbol{\sigma}_+\rangle + |\mathrm{LG}_0^l\rangle|\boldsymbol{\sigma}_-\rangle\right), \qquad (1)$$

其中，p（下标）和 l 分别表示拉盖尔–高斯（LG）模式[53], 和 $\boldsymbol{\sigma}_+$的径向和方位模式数，$\boldsymbol{\sigma}_-$ 分别为左旋和右旋圆偏振。因此，偏振结构取决于两种模式之间的局部相对强度和相位，进而取决于LG模式 l 的方位量子数 [54]。具有相应斯格明子数 $N_{\mathrm{skyr}} = 1$、2和3的傍轴光学斯格明子的模拟偏振分布和斯托克斯矢量如图1(a)和(b)所示。关于光学斯格明子计算的更多细节，请参见补充材料。

如图 1(c) 所示，输入光学斯格明子借助传统偏振光学器件，由空间模式与偏振相关的态转换为空间模式与路径相关的态。此时，该态为

$$|\Psi^l\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\mathrm{LG}_0^0\rangle|\mathrm{ch}_1\rangle + |\mathrm{LG}_0^l\rangle|\mathrm{ch}_2\rangle\right)\boldsymbol{\sigma}_+, \qquad (2)$$

一种适用于双路径电磁诱导透明存储的形式。每个空间模式均以 $\boldsymbol{\sigma}_+$ 偏振编码，以便与原子 Λ-系统 [55]，进行接口，并与控制光束相匹配。相应的庞加莱球图示将两条路径作为北极和南极，并表示沿两条路径的模式分量之间的复叠加态。在每条存储路径中，具有拉比频率 Ω_l 的 LG_0^l 模式驱动能级 $|1\rangle$至 $|3\rangle$，而一束共享的控制光束同时驱动能级 $|2\rangle$至 $|3\rangle$。在慢变包络近似下，探测场的麦克斯韦方程为 [55–57]:

$$\frac{\partial\Omega_l}{\partial z} + \frac{1}{c}\frac{\partial\Omega_l}{\partial t} = i\frac{D_l\Gamma}{2L}\rho_{31}, \qquad (3)$$

其中，Γ 表示 $|3\rangle$的衰减率，L 是原子介质的长度，而 ρ_{31} 表示原子在 Γ 和 $|3\rangle$能级之间的相干性。

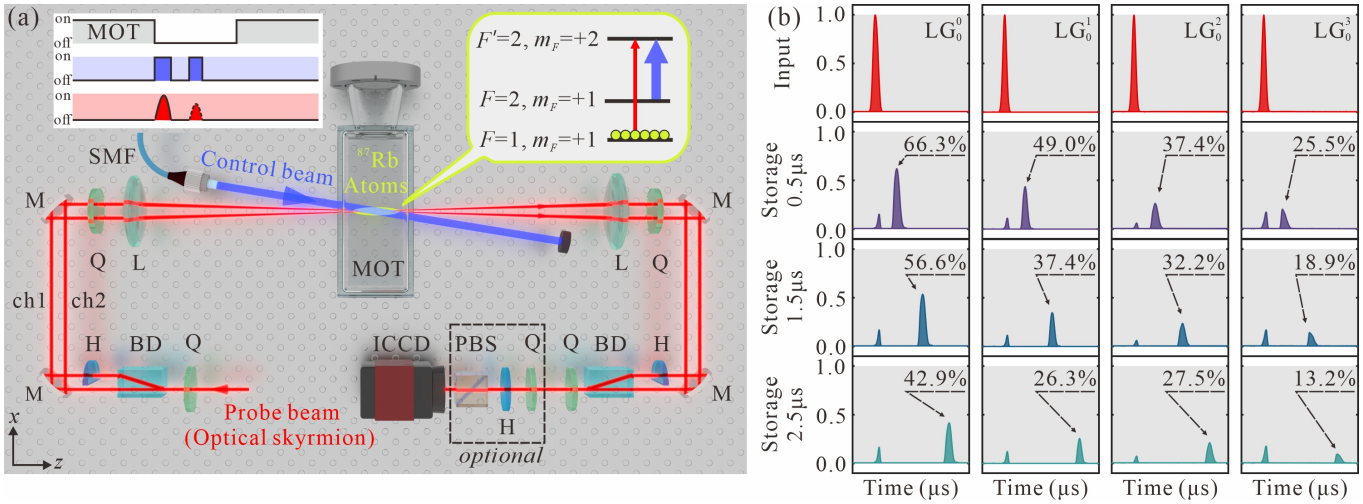

图2。（a）光学斯格明子存储的实验装置。控制光束的束腰直径为4 mm、功率为33 mW，相对于探测光束以 1° 角分离入射到原子介质中。通过控制磁光阱和光学开关的时序（左上角插图），并锁定两束光的频率和相位（右上角插图），实现存储和读取过程。通过进行完整的空间分辨斯托克斯层析（可选），表征偏振结构。光学元件：H，半波片；L，透镜；M，反射镜。（b）输入LG光束的时间波形，两束光均具有宽度为0.5 μs的高斯时间轮廓，以及相应的读取信号。图中给出了所有路径的存储效率。脉冲未被存储的（较小）残余部分即为泄漏。

D_l 是原子介质对 LG_0^l模式的有效光学深度（OD）。LG 模式的束腰随 $\sqrt{l+1}$增大而增大，因此高阶模式的 OD 降低，光与原子之间的相互作用也减弱。从公式 3 可以看出， D_l 会显著影响每条路径的存储性能，进而造成存储效率不平衡，成为一种有效噪声源。经过指定的存储时间后，控制光束触发这两个分量的读出；随后将它们重新组合，以便分析（检索得到的）输出信号的拓扑结构。通过求解麦克斯韦-布洛赫方程，我们推导出每条路径的存储效率与 l 之间的数值关系。我们进一步将其与矢量光束的并发度 [58]进行比较；与 OAM模式相比，矢量光束更能抵抗扰动 [59], ，详情见补充材料。

尽管双路径存储协议会造成效率不对称，因此属于非幺正变换，并会改变斯格明子的叠加态，但拓扑不变量 N_{skyr} 仍保持不变。这与传统的基于偏振的存储形成鲜明对比：在传统存储中，效率不平衡或相位误差会严重降低重构保真度。斯格明子结构的韧性凸显了其作为信息载体的潜力，能够兼容存在缺陷的光子存储平台。基于这一机制，我们实现了一种拓扑保护光学存储器。实验装置和结果将在下一节中介绍。

实验装置：人们已开发出多种生成傍轴光学斯格明子[60–63]的技术。本文采用由分段屏空间光调制器和干涉仪组成的配置，详见补充材料。用于光存储的简化实验装置如图 2(a)所示。随后，将生成的光学斯格明子存储在雪茄形冷 ^{87}Rb原子云团中，该云团长3 cm、直径1.5 mm，在二维磁光阱（MOT） [64]中制备。用于可逆映射的相关原子 Λ系统基于 D_1 线的三个塞曼子能级。存储前，将原子制备在 $|F=1,\ m_F=+1\rangle$ 以最大限度地吸收探测光束。通过将光学斯格明子转换为如式（2）所示的分离路径叠加态，实现双路径存储；通常彼此正交的圆偏振在此统一为$\boldsymbol{\sigma}_+$，而纠缠则编码在路径中。为此，使用四分之一波片（Q）和偏振分束位移器（BD）将空间模式LG_0^0 和LG_0^l分开。通过额外的偏振操作获得所需的偏振态。我们还对系统进行校准和优化，使模式轮廓相同，从而确保存储前每条路径中的OD平衡，详见补充材料。

在光学存储过程中，探测脉冲的时间波形被调整为高斯形状，持续时间为 $0.5\,\mu$s；当探测脉冲完全进入原子系综后，控制光束绝热地关闭，从而使光学态相干地转移为集体自旋激发，如图 2(a)左上方插图所示。

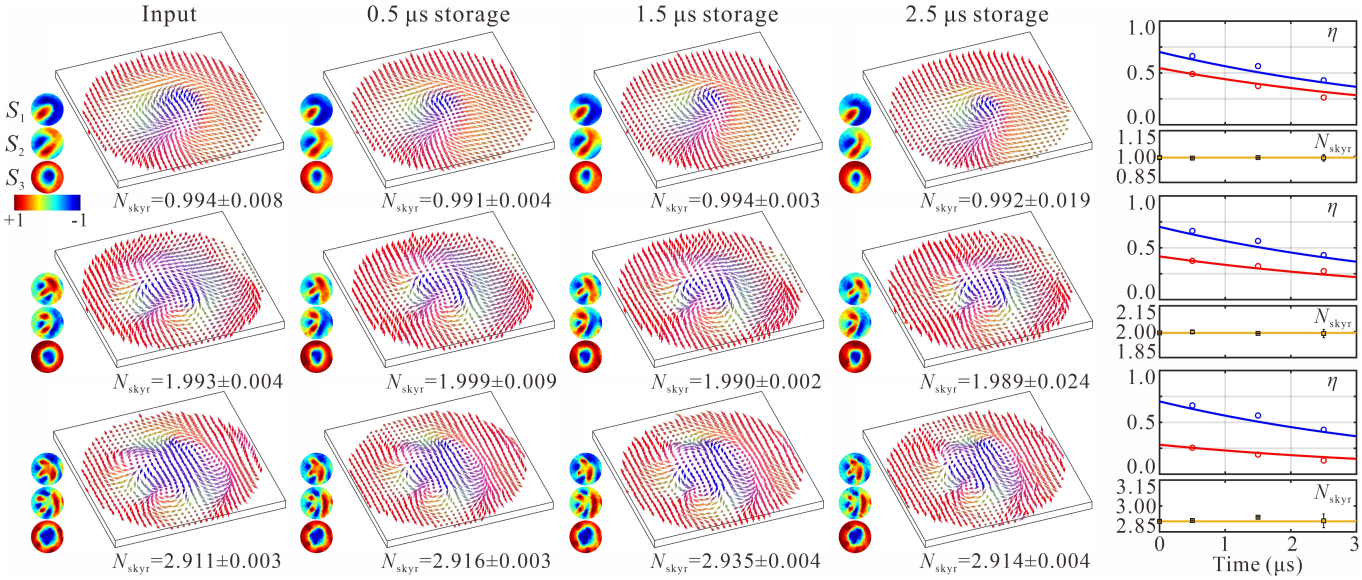

图 3. 左：输入和输出光学斯格明子的拓扑纹理， N_{skyr}=1、2 和 3（从上到下）。每个子图旁均给出了实验计算得到的 N_{skyr}，误差棒表示五次实验的标准差。侧边插图为归一化的局域斯托克斯参数。右：实验数据与理论模拟的比较。蓝色（红色）实线表示 LG_0^0 （LG_0^l）模式的存储效率随存储时间的变化关系，蓝色（红色）圆点表示相应模式的实验数据。黄色实线表示测得的输入 N_{skyr}，数据点表示存储后的实验数据。

在经过特定存储时间后重新激活控制光束，探测光束在两条路径中的两个分量均被检索出来，并保留其空间相位和强度分布，这得益于集体增强效应 [65–67]。利用光电探测器（未显示）获取两条路径的时间波形，以评估存储效率。最后，通过使用以幺正方式逆转光学斯格明子分解过程的光学元件，将检索出的斯格明子重新组装。随后重构其空间轮廓，并将其成像于增强型电荷耦合器件（ICCD）上。

实验结果：图 2(b) 展示了不同模式的时间波形和存储效率。与预期一致，LG_0^0模式的效率最高，而高阶模式的效率会随着 l增大而降低，这是因为光原子重叠减小。各路径的效率会随存储时间延长而衰减，这是由于自旋波退相干所致；已有研究表明，这会显著降低所存储信息的保真度 [68–70]。首先，我们对从原子存储器中读出的状态进行完全空间分辨的斯托克斯层析。我们记录斯托克斯参数，以重建空间偏振分布，如补充材料所示。所得斯托克斯矢量分布见图 3。

我们计算了在没有磁光阱时输入模式的 N_{skyr}， 以及存储 0.5 μs、 1.5 μs和 2.5 μs后相应的读取结果。实验结果显示， N_{skyr} 与其输入值略有偏差，并证明了光学斯格明子在退相干以及各路径存储效率不平衡情况下的拓扑鲁棒性，凸显了斯格明子构型固有的拓扑保护。值得注意的是，细微偏差可能归因于多种因素，例如成像系统、增强型电荷耦合器件图像的背景噪声以及原子的荧光噪声；然而，整体趋势证实，在实际存储时间尺度内， N_{skyr} 能够抵抗退相干。这与矢量光束在类似扰动下观察到的并发度衰减形成对比，凸显了斯格明子数所赋予的优越拓扑保护，详见补充材料。存储期间，光学态被映射为静止的原子自旋波，因此不存在自由空间传播，也就不会累积相对古伊相位 [71]。因此，读取出的斯格明子保留了原有的拓扑纹理，不会转变为另一种斯格明子构型。在图3右侧，我们还展示了理论模拟与实验结果的对比，详见补充材料。

我们还研究了控制光束功率对存储的光学斯格明子的影响，并以 N_{skyr}=2 和存储时间为 0.5 μs 的情况为例进行说明，如图4所示。控制光束强度的变化会改变介质的折射响应；由于两条路径的空间模式分布不同，这会导致不同的电磁诱导透明响应。这会改变重构的光学斯格明子的空间偏振，详情见补充材料。随着控制光束功率增

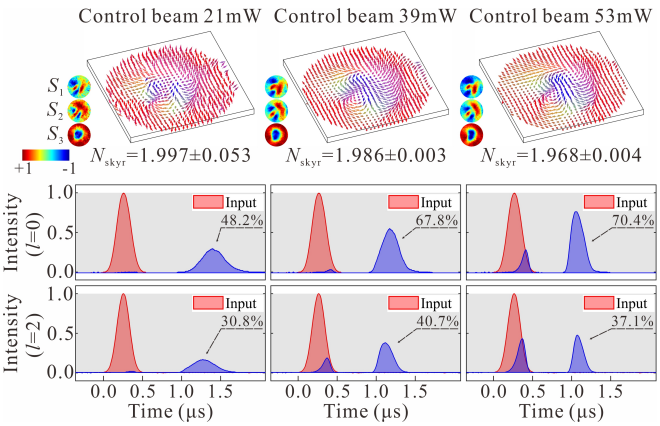

图4. 不同控制光束功率下的存储实验结果，针对一个具有 $N_{\mathrm{skyr}}=2$ 、存储时间为 $0.5\,\mu$s 的光学斯格明子。上：具有 $N_{\mathrm{skyr}}=2$ 的输入光学斯格明子的测量拓扑纹理。归一化的局部斯托克斯参数和计算得到的 N_{skyr} 分别显示在左侧和下方。误差棒表示五次实验的标准差。下：输入 LG_0^0 和 LG_0^2 模式的输入与检索时间波形。此外，还计算并展示了存储效率。未被存储的脉冲残余部分即为泄漏。

大，存储的斯格明子数略有下降，但拓扑纹理仍清晰且完整，凸显了其固有稳定性。在强耦合条件下，每条路径的损耗都会降低，路径间的延迟也会缩短 [72], ，而存储效率的不平衡则会增大。实验中使用的最大功率为 53 mW（≈48.3 MHz），这是由系统限制所设定的实际上限，同时也接近最佳控制强度的理论极限，详情见补充材料。理论上， N_{skyr} 会一直保持量子化，直到其中一条路径的存储过程完全失效；超过这一点后，叠加态便不再具有相干性。这种扰动会改变局部椭圆率、偏振旋转以及斯格明子数的细微变化，但不会破坏整体拓扑结构 [73]。因此，我们证明，即使通过将控制光束功率提高 100% 以上对存储系统施加较大扰动，也不会显著扰乱重构的斯格明子的拓扑结构。

结论：总而言之，我们首次通过实验验证了光学斯格明子的拓扑特征在光学存储器中的相干存储与读取过程中得以保持。通过采用双路径电磁诱导透明方案，我们直接证明了斯格明子数对实验不完美性具有稳健性。这种韧性并不仅仅体现为经典数值的守恒，更是斯格明子结构所固有的拓扑保护的直接表现，能够防止存储态退化为平凡构型。我们的工作因此提供了关键验证，表明斯格明子的拓扑保护不会因量子存储器中至关重要的复杂光与物质相互作用及退相干过程而受到损害。

本研究的主要重点是对斯格明子存储进行原理验证，并研究其拓扑不变量的保持情况。后续工作可进一步优化存储器性能本身，或研究斯格明子纹理在控制光束参数变化时的稳定性。特别是，探索高功率条件下可能导致破坏的机制，可为深入了解拓扑光学存储器的鲁棒性极限提供有价值的见解。

展望未来，这一结果的意义不仅限于单个拓扑荷的存储。它确立了固定的斯格明子数定义了一个受拓扑保护的子空间，可在其中编码量子信息。未来的应用可以利用这种稳定性，在该子空间内的态叠加中编码量子比特，例如，在保持总斯格明子数固定的同时使用不同的方位角指标或径向指标 [74–76], ，甚至对不同斯格明子数本身进行叠加 [77–79]。因此，我们的研究成果通过结合拓扑光子学与量子存储器，为发展稳健的量子光子技术开辟了道路。在基于电磁感应透明的存储中所展示的对现实噪声的抵抗能力，是利用拓扑不变性来保护量子信息的奠基性一步 [33–35, 37]。

致谢

本研究得到国家自然科学基金委员会（12404390、12404406、12104358、12304406 和 92476105）、中国博士后科学基金会博士后研究人员项目（GZC20232118）、陕西省博士后科学基金（2023BSHEDZZ23）、中央高校基本科研业务费专项资金（xzy012023042）以及湖州市自然科学基金（2024YZ56）的资助。S. F.-A. 感谢 QuantERA II计划的支持；该计划的资金由欧盟H2020研究与创新计划（资助协议编号：101017733）提供，并获得英国工程与自然科学研究委员会（资助协议编号：EP/Z000513/1, V-MAG）的相关支持；此外，还获得欧盟资助的COST行动CA23134（polytopo）的支持。C. M. C. 感谢利弗休姆早期职业研究员奖学金（ECF-2023-099）的支持。Y. Shen 感谢新加坡教育部学术研究基金一级资助（RG157/23 和 RT11/23），以及新加坡科技研究局MTC个人研究资助（M24N7c0080）的支持。

参考文献

* jinwenwang@xjtu.edu.cn † J. W. 和 X. Y. 对本研究的贡献相同。‡ yijie.shen@ntu.edu.sg § sonja.franke-arnold@glasgow.ac.uk ¶ honggao@xjtu.edu.cn

[1] Y. Shen、Q. Zhang、P. Shi、L. Du、X. Yuan 和 A. V. Zayats，《Nature Photonics》18，15（2024年）。[2] A. Yang、A. Kong、F. Meng、X. Chen、M. Lin、P. Shi、L. Du、X. Yuan 和 B. Wang，《光学杂志》27，043002 2025( )。[3] S. R. Allam、Y. Yoneda 和 T. Omatsu（爱思唯尔，2025）。[4] N. Romming、C. Hanneken、M. Menzel、J. E. Bickel、B. Wolter、K. von Bergmann、A. Kubetzka 和 R. Wiesendanger，《科学》341，636（2013）。[5] R. Wiesendanger，《自然综述：材料》1，1（2016）。[6] A. Porfirev、S. Khonina 和 A. Kuchmizhak，《量子电子学进展》88，100459（2023年）。[7] S. M¨uhlbauer、B. Binz、F. Jonietz、C. Pfleiderer、A. Rosch、A. Neubauer、R. Georgii 和 P. B¨onini，《科学》323，915（2009）。[8] A. N. Bogdanov 和 C. Panagopoulos，《自然综述：物理学》2，492（2020年）。[9] U. Al Khawaja 和 H. Stoof，《自然》411，918（2001）。[10] H. Ge、X.-Y. Xu、L. Liu、R. Xu、Z.-K. Lin、S.-Y. Yu、M. Bao、J.-H. Jiang、M.-H. Lu 和 Y.-F. Chen，《物理评论快报》127，144502（2021）。[11] D. A. Smirnova、F. Nori 和 K. Y. Bliokh，《物理评论快报》132，054003（2024年）。[12] B. Wang、Z. Che、C. Cheng、C. Tong、L. Shi、Y. Shen、K. Y. Bliokh 和 J. Zi，Nature，1（2025）。[13] S. Tsesses、E. Ostrovsky、K. Cohen、B. Gjonaj、N. Lind-ner 和 G. Bartal，《科学》361，993（2018年）。[14] L. Du、A. Yang、A. V. Zayats 和 X. Yuan，《Nature Physics》15，650（2019）。[15] S. Gao、F. C. Speirits、F. Castellucci、S. Franke-Arnold、S. M. Barnett 和 J. B. G¨otte，《物理评论A辑》**102**，053513（2020）。[16] A. Karnieli、S. Tsesses、G. Bartal 和 A. Arie，Nature Communications 12，1092（2021）。[17] Q. Zhang、Z. Xie、L. Du、P. Shi 和 X. Yuan，《物理评论研究》3，023109（2021）。[18] Y. Shen，《光学快报》46，3737（2021）。[19] C. Cisowski、C. Ross 和 S. Franke-Arnold，《先进光子学研究》4，2200350（2023）。[20] A. McWilliam、C. M. Cisowski、Z. Ye、F. C. Speirits、J. B. G¨otte、S. M. Barnett 和 S. Franke-Arnold，《激光与光子学评论》17，2300155（2023）。[21] D. Sugic、R. Droop、E. Otte、D. Ehrmanntraut、F. Nori、J. Ruostekoski、C. Denz 和 M. R. Dennis，Nature Com-munications 12，6785（2021）。[22] D. Ehrmanntraut、R. Droop、D. Sugic、E. Otte、M. R. Dennis 和 C. Denz，《Optica》10，725（2023）。[23] Y. Shen、B. Yu、H. Wu、C. Li、Z. Zhu 和 A. V. Zayats，《先进光子学》5，015001（2023）。[24] C. Liu、S. Zhang、S. A. Maier 和 H. Ren，《物理评论快报》129，267401（2022）。[25] A. A. Wang、Z. Zhao、Y. Ma、Y. Cai、R. Zhang、X. Shang，Y. Zhang, J. Qin, Z.-K. Pong, T. Marozs´ak, *et al.*, Light: Science & Applications 13, 314（2024）。[26] L.-W. Wang, S. Liu, C.-J. Zhang, G. Chen, Y.-S. Zhang, C.-F. Li, and G.-C. Guo, arXiv 预印本 arXiv:2411.07775（2024）。[27] J. Wang, F. Castellucci, and S. Franke-Arnold, AVS Quantum Science 2（2020）。[28] H.-J. Wu, B.-S. Yu, Z.-H. Zhu, W. Gao, D.-S. Ding, Z.-Y. Zhou, X.-P. Hu, C. Rosales-Guzm´an, Y. Shen, and B.-S. Shi,《Optica》9, 187（2022）。[29] C. Mitra, C. S. Madasu, L. Gabardos, C. C. Kwong, Y. Shen, J. Ruostekoski, and D. Wilkowski, APL Photonics 10（2025）。[30] F. Castellucci, T. W. Clark, A. Selyem, J. Wang, and S. Franke-Arnold,《物理评论快报》127, 233202（2021）。[31] J. Jia, J. Ren, S. Zhou, Z. Zeng, H. Lin, Y. Hu, Z. Li, Y. Shen, Z. Chen, X. Chen, *et al.*, Nature Physics, 1（2025）。[32] T. He, Y. Meng, L. Wang, H. Zhong, N. Mata-Cervera, D. Li, P. Yan, Q. Liu, Y. Shen, and Q. Xiao, Nature Communications 15, 10141（2024）。[33] P. Ornelas, I. Nape, R. de Mello Koch, and A. Forbes, Nature Photonics 18, 258（2024）。[34] R. de Mello Koch, B.-Q. Lu, P. Ornelas, I. Nape, and A. Forbes, APL Quantum 2（2025）。[35] J. Ma, J. Yang, S. Liu, B. Chen, X. Li, C. Song, G. Qiu, K. Zou, X. Hu, F. Li, *et al.*, Nature Physics 21, 1462（2025）。[36] A. A. Wang, Y. Ma, Y. Zhang, Z. Zhao, Y. Cai, X. Qiu, B. Dong, and C. He, Nature Photonics, 1（2025）。[37] P. Ornelas, I. Nape, R. de Mello Koch, and A. Forbes, Nature Communications 16, 2934（2025）。[38] M. Namazi, C. Kupchak, B. Jordaan, R. Shahrokhshahi, and E. Figueroa, Physical Review Applied 8, 034023（2017）。[39] P. Vernaz-Gris, K. Huang, M. Cao, A. S. Sheremet, and J. Laurat, Nature Communications 9, 363（2018）。[40] Y. Wang, J. Li, S. Zhang, K. Su, Y. Zhou, K. Liao, S. Du, H. Yan, and S.-L. Zhu, Nature Photonics 13, 346（2019）。[41] V. Parigi, V. D'Ambrosio, C. Arnold, L. Marrucci, F. Sciarrino, and J. Laurat, Nature Communications 6, 7706 2015（）。[42] Y.-H. Ye, M.-X. Dong, Y.-C. Yu, D.-S. Ding, and B.-S. Shi,《光学快报》44, 1528（2019）。[43] L. Zeng, Y.-H. Ye, M.-X. Dong, W.-H. Zhang, E.-Z. Li, D.-C. Li, D.-S. Ding, and B.-S. Shi,《光学快报》48, 477 2023（）。[44] X. Yang, J. Wang, S. Qiu, Y. Gu, J. Xu, X. Zeng, M. Cao, Y. Chen, C. Wang, D. Wei, *et al.*, Photonics Research 13, 1747 2025（）。[45] N. Sangouard, C. Simon, H. De Riedmatten, and N. Gisin,《现代物理评论》83, 33（2011）。[46] Z. Zhang, X. Xie, C. Zhuang, B. Wu, Z. Liu, B. Wu, D. Mihalache, Y. Shen, and D. Deng, Photonics Research 13, B1（2025）。[47] Z. Guo, C. Peters, N. Mata-Cervera, A. Vetlugin, R. Guo, P. Zhang, A. Forbes, and Y. Shen, arXiv 预印本 arXiv:2509.05727（2025）。[48] C. He, B. Chen, Z. Song, Z. Zhao, Y. Ma, H. He, L. Luo, T. Marozsak, A. A. Wang, R. Xu, *et al.*, Nature Communications 16, 4902（2025）。[49] C. Peters, K. Everts, T. Kleine, P. Ornelas, and A. Forbes，arXiv 预印本 arXiv:2508.12305（2025）。

[50] G. Yu, P. Upadhyaya, Q. Shao, H. Wu, G. Yin, X. Li, C. He, W. Jiang, X. Han, P. K. Amiri, *et al.*, 《纳米快报》**17**，261（2017）。[51] A. Fert, N. Reyren 和 V. Cros, 《自然·材料评论》**2**，1（2017）。[52] X. Zhang, Y. Zhou, K. M. Song, T.-E. Park, J. Xia, M. Ezawa, X. Liu, W. Zhao, G. Zhao 和 S. Woo, 《凝聚态物理学杂志》**32**，143001（2020）。[53] S. Franke-Arnold, 《英国皇家学会学报 A 辑：数学、物理与工程科学》**375**，20150435（2017）。[54] Z. Ye, S. Barnett, S. Franke-Arnold, J. G¨otte, A. McWilliam, F. Speirits 和 C. Cisowski, 《英国皇家学会学报 A 辑》**480**，20240109（2024）。[55] Y.-F. Hsiao, P.-J. Tsai, H.-S. Chen, S.-X. Lin, C.-C. Hung, C.-H. Lee, Y.-H. Chen, Y.-F. Chen, I. A. Yu 和 Y.-C. Chen, 《物理评论快报》**120**，183602（2018）。[56] M. Fleischhauer, A. Imamoglu 和 J. P. Marangos, 《现代物理学评论》**77**，633（2005）。[57] M.-X. Dong, W.-H. Zhang, L. Zeng, Y.-H. Ye, D.-C. Li, G.-C. Guo, D.-S. Ding 和 B.-S. Shi, 《物理评论快报》**131**，240801（2023）。[58] J. Wang, S. J. Svensson, T. W. Clark, Y. Chen, M. A. Al Khafaji, H. Gao, N. Westerberg 和 S. Franke-Arnold, 《物理评论快报》**132**，193803（2024）。[59] I. Nape, K. Singh, A. Klug, W. Buono, C. Rosales-Guzman, A. McWilliam, S. Franke-Arnold, A. Kritzinger, P. Forbes, A. Dudley, *et al.*, Nature Photonics **16**，538（2022）。[60] Y. Shen, E. C. Mart´ınez 和 C. Rosales-Guzm´an, 《ACS光子学》**9**，296（2022）。[61] W. R. Kerridge-Johns, A. S. Rao 和 T. Omatsu, 《Optica》**11**，769（2024）。[62] W. Lin, Y. Ota, Y. Arakawa 和 S. Iwamoto, 《Optica》**11**，1588（2024）。[63] V. Hakobyan 和 E. Brasselet, 《物理评论快报》**134**，083802（2025）。[64] X. Yang, C. Wang, J. Wang, M. Cao, Y. Chen, H. Chang, R. Dong, S. Zhang, D. Wei, P. Zhang, F. Li 和 H. Gao, 《先进光子学》**7**，056010（2025）。

[65] L. Veissier、A. Nicolas、L. Giner、D. Maxein、A. Sheremet、E. Giacobino 和 J. Laurat, 《光学快报》**38**, 712 (2013). [66] D.-S. Ding、Z.-Y. Zhou、B.-S. Shi 和 G.-C. Guo, Nature Communications **4**, 2527 (2013). [67] A. Nicolas、L. Veissier、L. Giner、E. Giacobino、D. Max- ein 和 J. Laurat, Nature Photonics **8**, 234 (2014). [68] Y. Chen、J. Wang、C. Wang、S. Zhang、M. Cao、S. Franke-Arnold、H. Gao 和 F. Li, 《光学快报》**29**, 31582 2021( ). [69] C. Wang、Y. Yu、Y. Chen、M. Cao、J. Wang、X. Yang、S. Qiu、D. Wei、H. Gao 和 F. Li, 《量子科学与技术》**6**, 045008 (2021). [70] Y.-H. Ye、L. Zeng、M.-X. Dong、W.-H. Zhang、E.-Z. Li、D.-C. Li、G.-C. Guo、D.-S. Ding 和 B.-S. Shi, 《物理评论快报》**129**, 193601 (2022). [71] A. M. Yao 和 M. J. Padgett, 《光学与光子学进展》**3**, 161 (2011). [72] M. Lukin 和 A. Imamo˘glu, 《自然》**413**, 273 (2001). [73] Z. Ye、J. G¨otte 和 C. Cisowski, 《光学杂志》( ). [74] K. Zeissler、S. Finizio、C. Barton、A. J. Huxtable、J. Massey、J. Raabe、A. V. Sadovnikov、S. A. Nikitov、R. Brearton、T. Hesjedal、*et al.*, Nature Communications**11**, 428 (2020). [75] J. Wang、X. Zeng、K. Ren、Z. Ye、C. M. Cisowski、Y. Chen、X. Yang、C. Wang、H. Gao 和 S. Franke- Arnold, 《应用物理快报》**126** (2025). [76] X. Zeng、J. Fang、H. Wu、J. Wang、Y. Chen、Y. Zhou、X. Yang、C. Wang、D. Wei、H. Chen、*et al.*, 《激光与光子学评论》, e00732 (2025). [77] C. Psaroudaki 和 C. Panagopoulos, 《物理评论快报》**127**, 067201 (2021). [78] C. Psaroudaki、E. Peraticos 和 C. Panagopoulos, 《应用物理快报》**123** (2023). [79] A. P. Petrovi´c、C. Psaroudaki、P. Fischer、M. Garst 和 C. Panagopoulos, 《现代物理评论》**97**, 031001 (2025).