

中国科学院物理研究所 Q03i组供稿
北京凝聚态物理国家研究中心

第45期

2020年06月08日

可控非马尔可夫噪声通道中的量子费舍尔信息流

任何量子系统都不可避免地与环境存在相互作用，因此开放量子系统的动力学性质对于量子信息科学的各个方向都至关重要。根据量子系统所处环境是否具有记忆效应，其动力学演化过程可分为马尔可夫过程和非马尔可夫过程。前者用于描述无记忆效应的环境，即环境的状态在前后时刻是没有关联的，这是较为理想的简化。真实的物理环境常带有一定的非马尔可夫性，那如何控制和定量表征开放量子系统动力学过程的非马尔可夫性呢？

理论上已有多种方案可用于定量研究非马尔可夫过程，包括两体纠缠 (Bipartite entanglement)，迹距离 (Trace distance)，量子引导 (Quantum steering)，量子费舍尔信息 (Quantum Fisher information) 等。基于量子费舍尔信息的方案通过系统与环境间的信息流动来研究非马尔可夫过程，可以处理多个量子噪声通道的情况 [PRA 82, 042103 (2010)]。值得说明的是，量子费舍尔信息可以表征系统的量子相干性、多体纠缠等量子资源，在量子精密测量等应用中起着关键作用。该方案提出后得到了广泛的关注，但实验方面进展较为缓慢，原因之一是实验上构建开放系统的多个可控非马尔可夫噪声通道较为挑战。

最近，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心固态量子信息与计算实验室博士生卢亚男在刘刚钦副研究员和潘新宇研究员指导下，与日本理化学研究所张煜然博士和Franco Nori (野里) 教授，以及物理所范桁研究员通力合作，在金刚石氮空位中心自旋量子系统中构建了多通道的可控非马尔可夫噪声环境，并用量子费舍尔信息研究了自旋量子系统的相干态、纠缠态在非马尔可夫环境下的演化行为。

在第一个实验方案中，他们将氮空位中心电子自旋当作量子系统，以近邻的两个核自旋 (^{13}C , ^{14}N) 作为可控的信息耗散通道，重点研究中心电子自旋的量子相干性在不同耗散环境下的演化规律。如图1(b)所示，当两个可控耗散通道都关闭时(核自旋处于本征态)，中心电子自旋的相干性只受到其它弱耦合核自旋的影响(处于热平衡态)，表现出典型的马尔可夫行为——量子费舍尔信息单调地从中心系统流向环境中。当把其中一个非马尔可夫耗散通道打开时(核自旋制备到叠加态)，系统的量子Fisher信息会在短暂流出之后发生明显回流，往复频率取决于电子自旋与该核自旋间的耦合强度。进一步地，当双通道同时打开时，他们发现系统的量子费舍尔信息流可以用单通道量子费舍尔信息流的叠加来表示，如图1(c)所示，此结果与这两个核自旋之间几乎没有相互作用的物理图像一致。

在第二个实验方案中，为了研究非马尔可夫环境对量子纠缠态的影响，他们将中心电子自旋和近邻的 ^{13}C 核自旋作为量子系统，将这两个自旋制备到最大纠缠态，再以 ^{14}N 核自旋作为可控的非马尔可夫耗散通道。类似地，当其它弱耦合自旋构成的马尔可夫环境主导时，系统纠缠态对应的量子费舍尔信息随着时间单调地流出；当把非马尔可夫耗散通道打开时(^{14}N 核自旋处于叠加态)，能看到纠缠态对应量子费舍尔信息的回流现象。量子费舍尔信息对时间求导即得到量子费舍尔信息流，其中大于零的部分对应着环境向系统的信息回流，是非马尔可夫噪声通道的典型结果，如图2(c)所示。

该工作从实验上检验了量子费舍尔信息与非马尔可夫性的对应关系，其实验方案和结论可拓展至超导量子比特、离子阱量子比特、光量子比特等众多的量子系统中。值得说明的是，非马尔可夫性与量子费舍尔信息的对应关系是普适成立的，即使环境中耗散通道不能被很好地控制，只要能测量开放系统的量子费舍尔信息，就可以用其信息流动来研究其开放系统动力学的非马尔可夫性质。这对量子计算、量子模拟、量子精密测量等量子技术的发展和應用有重要意义。此实验也展示了金刚石氮空位中心作为少体量子系统的高度可控性，是开放量子系统动力学研究的理想实验平台之一。

相关工作以“Observing Information Backflow from Controllable Non-Markovian Multichannels in Diamond”为题发表在Phys. Rev. Lett. 124, 210502 (2020) 上, 卢亚男和张煜然为本文的并列第一作者。此工作受到科技部 (2019YFA0308100, 2016YFA0302104, 2016YFA0300600), 自然科学基金委 (11974020, 11934018, 11574386) 和中科院B类先导专项(XDB28000000) 等项目的资助。

文章链接:

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.124.210502>

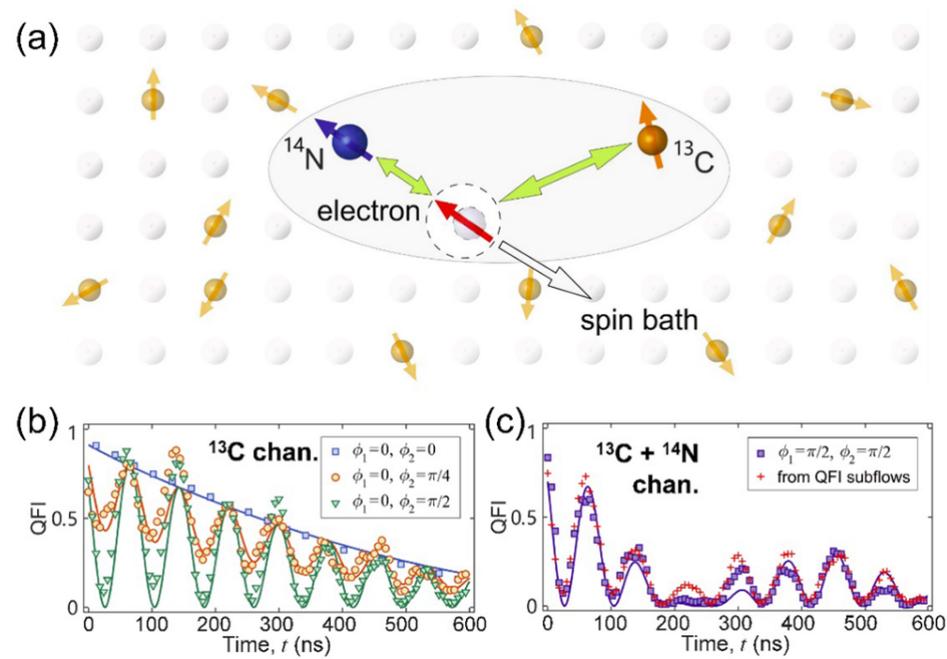


图1. 中心电子自旋相干性质在两个可控非马尔可夫通道作用下的演化。(a) 系统构成示意, 氮空位中心电子自旋为系统并被制备到相干叠加态, 近邻的两个核自旋(^{14}N 和 ^{13}C) 被用作可控的非马尔可夫耗散通道。(b) 单独控制 ^{13}C 核自旋通道时中心电子自旋相干性对应的量子费舍尔信息的演化。(c) 同时打开两个非马尔可夫耗散通道时量子费舍尔信息的演化。

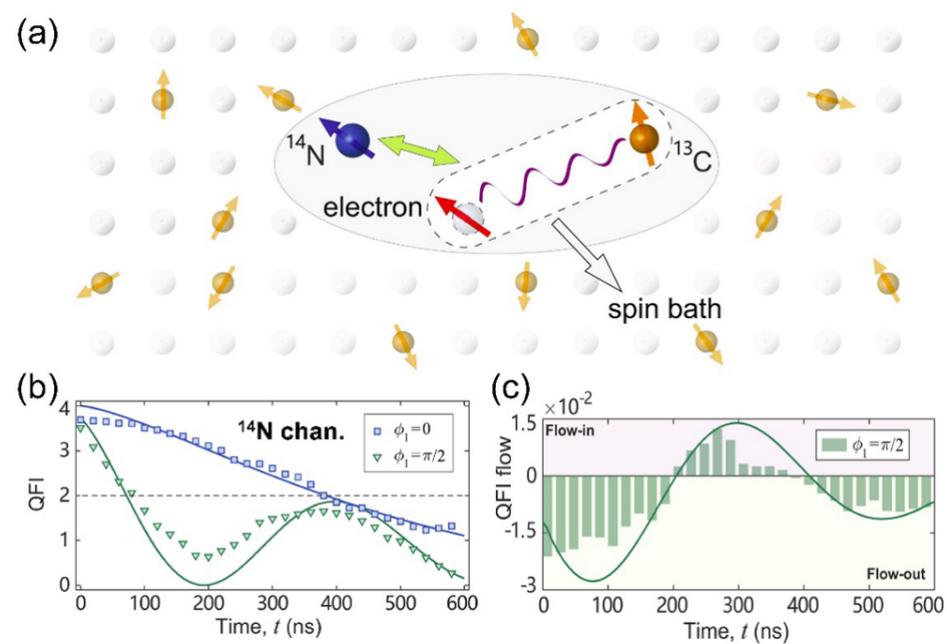


图2. 量子纠缠态在可控非马尔可夫通道作用下的演化。(a) 系统构成示意, 氮空位中心电子自旋和近邻的一个 ^{13}C 核自旋构成量子系统并被制备到纠缠态, 近邻的 ^{14}N 核自旋被用作可控的非马尔可夫耗散通道。(b) 非马尔可夫耗散通道打开和关闭时纠缠态对应的量子费舍尔信息演化。(c) 量子费舍尔信息流随时间的演化。信息流为正表示信息从环境中回流到系统中, 是非马尔可夫环境带来的特征行为。

[PRL 124, 210502 \(2020\).pdf](#)

