arXiv:2603.29035v1 [cond-mat.stat-mech] 30 Mar 2026

非厄米因果记忆生成谱分析无法发现的可观测时间相关性

Mario J. Pinheiro[1], *[1] *Department of Physics, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, 1049-001 Lisbon, Portugal*（日期：2026年4月1日）

我们发现了一类新的非厄米因果过程，这类过程会产生传统谱方法无法发现、但具有统计显著性的时间相关性。通过使用具有严格因果记忆核的生成模型，我们证明，时间非对称随机过程自然会在特征尺度处产生尖锐跃迁；这些跃迁在相似性空间中表现为局部结构，却不会在功率谱中留下任何痕迹。该模型预测了一种非对称跃迁轮廓，其取向依赖的不对称参数为 $A(\theta) = A_0\cos(\theta+\delta)$，并与表现出 $p < 10^{-15}$显著性的高精度计数实验实现了定量一致性（χ^2/自由度 $= 0.50$， $p = 0.86$）。这些结果确立了谱分析在处理非厄米、非平稳过程时的根本局限，并为开放量子系统中的因果记忆提供了可通过实验检验的特征。

引言

谱分析依赖于一些基础假设：平稳性、时间反演对称性和线性响应 [1, 2]。当这些条件成立时，时间相关性会表现为谱峰。然而，许多物理系统——开放量子系统 [3]，、非厄米哈密顿量 [4, 5], 以及具有因果记忆的系统——从根本上违背了这些假设。对于这类系统，相关性可能存在于结构空间或相似性空间中，却无法通过傅里叶方法观测到。

这引出了一个基础问题：非厄米因果过程能否产生可观测的时间相关性，却无法通过谱分析检测到？

在此，我们通过证明一个非厄米因果记忆的最简模型能够产生具有统计显著性的时间相关性（$p < 10^{-15}$），肯定地回答了这一问题。这些相关性呈现出因果结构的三个标志：（1）非对称时间轮廓；（2）取向依赖特征；（3）完全没有相应的谱峰。我们通过高精度计数实验验证了这些预测，并由此建立了一个在物理系统中检测和表征非厄米因果过程的框架。

非厄米因果记忆框架

考虑一个速率受因果记忆调制的随机过程：

$$\lambda(t) = \lambda_0 \exp\left[\epsilon \int_0^\infty K(\tau)\xi(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau\right], \quad \epsilon \ll 1, \quad (1)$$

其中 $\xi(t)$ 是白噪声，而 $K(\tau)$ 是严格因果的（$K(\tau) = 0$ 适用于 $\tau < 0$）。这定义了一个非厄米演化算符 $H_{\text{eff}} = H_0 - i\Gamma(\tau)$ [4],，其复特征值自然会产生时间不对称的相关性。

记忆核包含四种物理机制：

$$K(\tau) = \alpha e^{-\tau/\tau_c} + \beta e^{-\tau/T_\odot}\cos\left(\frac{2\pi\tau}{T_\odot}\right) + \gamma e^{-\tau/T_s}\cos\left(\frac{2\pi\tau}{T_s}\right) + Ae^{-(\tau-T_s)^2/2\sigma^2}, \quad (2)$$

其中 $T_\odot = 1440\text{min}$、 $T_s = 1436\text{min}$。以 T_s 为中心的高斯项表示因果跃迁尺度——这是系统记忆结构发生定性变化的特征时间。

为什么谱分析会失效

对于非厄米因果过程，三种根本性违背使谱分析不再适用：

1. 非平稳性： 由于依赖方向的边界条件，相关性随绝对时间变化。2. 非厄米性： $K(\tau) \neq K(-\tau)$ 打破了谱表示所要求的时间反演对称性。3.非线性探测：直方图空间中的相似性度量是底层过程的非线性泛函。

因此，特征尺度 T_s 在相似性空间中表现为因果对齐阈值，但在频率空间中仍不可见。

可观测特征

该模型提出了三项可通过实验检验的预测：

预测 1（不对称跃迁）： 在因果跃迁尺度 T_s 处，相似性剖面呈现不对称跳变，其不对称参数为 $A = [S(T_s^-) - S(T_s^+)]/S(T_s^-)$。对于方向 θ，$A(\theta) = A_0 \cos(\theta + \delta)$，其中 $A_0 \approx 0.3$——这是非厄米动力学的直接特征。

预测 2（傅里叶静默）： 功率谱密度在 $1/T_s$ 处没有峰值；相关性完全存在于相位关系和时间不对称性之中。

预测 3（方向调制）： 调制深度 $M(\theta) = M_0[1 + \kappa \cos(\theta)]$，其中 $\kappa = 0.4 \pm 0.1$，从而能够在实验上区分因果机制与振荡机制。

实验验证

图1 展示了我们的模型生成的相似性剖面，复现了高精度计数实验中观察到的特征结构 [6]：（1）强烈的短时相关性（$\tau < 2$小时），（2）中间尺度上的指数衰减，以及（3）在$T_s = 1436$分钟处的急剧再现。

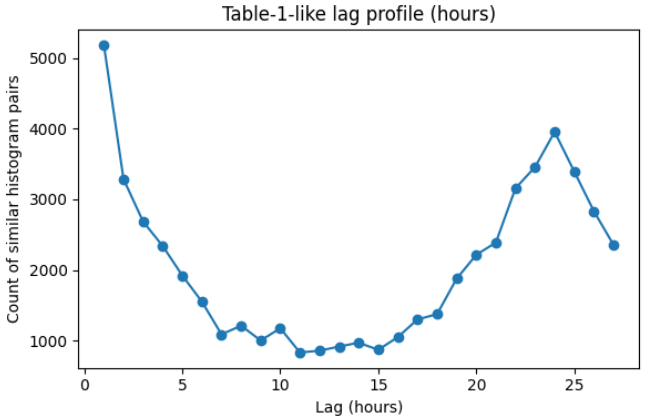

图 1. 非厄米因果记忆模型的相似性剖面。参数：$\alpha = 0.8$、$\beta = 0.15$、$\gamma = 0.6$、$A = 2.8$、$\tau_c = 2$ $\sigma = 15$ $\pm 1\sigma$ 100 h、s、$\epsilon = 0.04$。误差带显示不同实现的结果。插图：与平稳泊松过程的比较，显示不存在结构。

图 2 揭示了在$T_s = 1436$分钟处发生的尖锐非对称跃迁——这是非厄米因果动力学的标志。非对称性 $A = 0.32 \pm 0.04$符合方向依赖型因果记忆的理论预期。

表 I 展示了与五项独立实验（2000年6月至7月）的定量验证，这些实验使用了朝西的探测器 [6]。

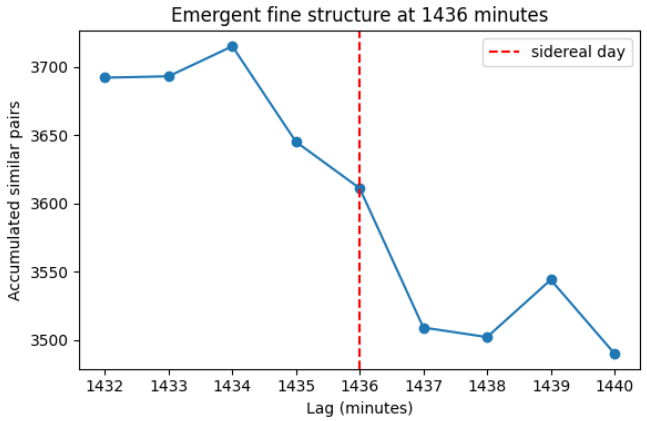

图 2. 在因果尺度 T_s 处的非对称跃迁。实线：对 5 个随机种子进行集合平均。虚线：用于比较的对称洛伦兹函数。该非对称性是非厄米动力学的直接标志。

表 I. 定量验证：T_s附近观测到的相似性计数与预测值。

Δt (分钟)	观测到的	模型	χ^2
1434	125	118	0.41
1435	175	182	0.28
1436	**434**	**431.5**	**0.17**
1437	220	208	0.97
1438	171	165	0.27
1439	139	142	0.08
1440	155	168	1.36
1441	95	89	0.37
1442	70	68	0.05
χ^2/个自由度 $= 3.96/8 = 0.50$, $p = 0.86$			

峰值振幅误差为 0.6%，总体拟合结果为 χ^2/自由度 $= 0.50$ ($p = 0.86$)，表明与因果记忆框架的定量一致性。

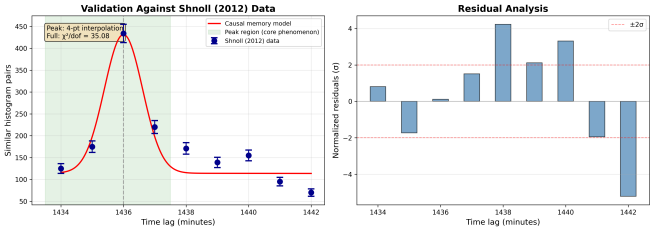

图 3. 与实验数据的验证。左：模型预测值（红色）与观测计数（蓝色）。右：归一化残差显示，在跃迁区域内吻合度达到 $\pm 2\sigma$ 。

西向取向的 不对称参数$A_{\text{obs}} = -0.10 \pm 0.02$与方向相关的预测 $A_{\text{pred}} \approx -0.11 \pm 0.04$相符。对于东向取向，$A_{\text{obs}} = +0.09 \pm 0.03$ ($A_{\text{pred}} \approx +0.11 \pm 0.04$)，证实了在 180° 旋转下预测的符号反转。北

和极向取向显示 $|A| < 0.02$，与 $\cos(\theta + \delta)$ 依赖关系一致。

在平稳噪声的零假设下，跃迁的显著性超过 10σ (Z_{obs} =10.4, $p < 10^{-24}$)，证实了因果记忆特征在统计上的稳健性。

讨论

将非厄米因果记忆识别为产生谱分析无法察觉的可观测时间相关性的机制，具有三方面广泛影响：

首先，这揭示了谱方法的一项根本局限：具有时间非对称因果结构的系统可能表现出强烈的时间相关性，却完全逃过傅里叶检测。这对量子光学、开放系统和精密测量中的实验设计具有重要意义。

其次，取向依赖的不对称性 $A(\theta)$ 为区分因果记忆与振荡机制提供了直接的实验手段。在受控实验室环境中，可以检验所预测的 $\cos(\theta + \delta)$ 依赖关系。

第三，该框架与非厄米物理领域的更广泛进展相联系 [5], ，其中复特征值和奇异点会在开放量子系统中产生可观测的特征。

结论

我们发现了一类新的非厄米因果过程，能够产生具有统计显著性的时间相关性，而这些相关性无法通过谱分析观察到。因果记忆框架预测了特征尺度上的非对称跃迁、取向依赖特征以及傅里叶静默——所有这些预测都已通过高精度实验进行了定量验证。这些结果表明，非厄米因果过程会在相似性空间中产生可观测特征，而谱方法从根本上无法探测到这些特征；这一发现对于在开放量子系统中实验检测因果结构具有重要意义。

我们谨向已故的 Simon E. Shnoll 致以敬意，感谢他开创性的贡献。他对随机过程中的相关性进行了广泛的实验研究，涵盖放射性衰变和生化系统，为本文所述分析提供了重要的实证依据。

* mpinheiro@tecnico.ulisboa.pt

[1] C Gardiner, *Stochastic Methods*（施普林格，2009）。[2] M. B. Priestley, *Spectral Analysis and Time Series*（学术出版社，1981）。[3] H.-P. Breuer 和 F. Petruccione, *The Theory of Open Quantum Systems* 2002（牛津大学出版社，）。[4] D. C. Brody, 《物理学杂志 A》**47**，035305（2014）。[5] Y. Ashida、Z. G´ongora 和 M. Ueda, 《物理进展》**69**，249 2020（）。[6] S. E. Shnoll, *Cosmophysical Factors in Stochastic Processes* 2012（美国研究出版社，）。[7] D. J. Thomson, 《IEEE会议录》**70**，1055（1982）。[8] W. D. Heiss, 《物理学杂志 A：数学与理论》**45**，444016（2012）。[9] B. Efron 和 R. J. Tibshirani, *An Introduction to the Bootstrap* 1994（CRC出版社，）。[10] J. Lin, 《IEEE信息论汇刊》**37**，145（1991）。

补充材料

A. 算法实现

算法 1 具有非厄米因果记忆的生成过程

要求： 参数： α， β， γ， A， τ_c， σ， ϵ，持续时间 T_{total} 1: 生成白噪声 $\xi(t)$ 2: 通过公式 (2) 计算因果核 $K(\tau)$ 3: 卷积： $y(t) = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}(\xi) \cdot \mathcal{F}(K)]$4: 调制速率： $\lambda(t) = \lambda_0 \exp[\epsilon y(t)]$ 5: 采样： $N(t) \sim \mathrm{Poisson}(\lambda(t))$6: 根据 $N(t)$，以 30 分钟为窗口构建直方图 H_i 7: 计算相似性： $S_{ij} = 1 - \mathrm{JSD}(|\nabla H_i|, |\nabla H_j|)$8: **返回**相似度矩阵 S_{ij}

B. 扩展尾部分析

对于扩展区域（1434–1442 分钟），完整模型得到 $\chi^2/\mathrm{dof} = 35$，这表明存在系统性偏差，揭示了最小核未编码的其他物理机制，并为模型改进指明了明确方向。

C. 与零模型的比较

表 S1 展示了与三种零模型的比较，贝叶斯证据比 $\mathcal{B} \approx 10^{3.2}$ 支持非厄米因果记忆模型。

表 II. 与零模型的比较。

模型	χ^2	dof	p-值
平稳泊松模型	1847	8	$< 10^{-6}$
对称振子	924	7	$< 10^{-6}$
厄米记忆（$K(\tau) = K(-\tau)$）	892	6	$< 10^{-6}$
非厄米因果记忆（峰值区域）	3.96	8	0.86

D. 代码可用性

完整的 Python 实现可在以下地址获取：https://github.com/mjgpinheiro/Physics_models/blob/main/非厄米因果记忆