

存在相对论：以量子纯度为核心的存在概率、时空涌现与可证伪预言

——基于两份源文本的形式化重构与第一性原理推导

摘要

本文把两份哲学-物理文本中的核心概念「存在概率」重新形式化为量子纯度 $P = \text{Tr}(\rho^2)$ ，并从显式锚定哈密顿量 $\hat{H} = \hat{H}_S + \hat{H}_E + \hat{H}_{\text{int}}$ 出发，通过 Born-Markov 近似推导 Lindblad 主方程，证明退相干导致纯度下降、冯·诺依曼熵上升，从而使热力学第二定律成为定理而非假设。本文论证「观测」本质是量子纠缠而非朗道尔擦除，信息经互信息 $I(S:A)$ 转入环境关联而不被删除。进一步，本文借助费舍信息度规与纠缠第一定律 $\delta S = \delta \langle K \rangle = \delta A/4G$ ，沿 Jacobson 热力学引力路线把信息几何度规映射为爱因斯坦场方程，实现「时空从纠缠涌现」。针对宇宙学常数为正的真实宇宙，本文指出锚定网络的对偶须从已证明的 AdS/CFT 切换到猜想的 dS/CFT，并把有限的德西特熵 $S_{\text{dS}} = \pi/G\Lambda \approx 10^{122}$ 解释为存在预算。全文严格服从热力学第二定律、狭义/广义相对论与标准模型的守恒律，并给出一个可证伪的引力退相干预言 ($\gamma = G m^2/\hbar L$)，同时诚实评估其被环境噪声淹没的程度。

关键词：存在概率；量子纯度；退相干；费舍度规；纠缠第一定律；德西特熵；引力退相干

1 引言

人类对「存在」的追问，从苏美尔泥板延续至今。两份源文本——《量子时间穿越与存在性理论》与《存在相对论：从量子观测到宇宙双生的完整物理哲学体系》——以哲学语言提出了一个直觉：存在不是二值的，而是有程度、有结构的连续谱，且与观测者的纠缠（锚定）密切相关。本文的目标是把这一直觉形式化为一个在数学上严格、在物理上不违反任何已证明定律的模型。

这一形式化的关键一步，是把「存在概率」从宏观热力学量（负熵）正确地降为微观量子量——纯度 $P = \text{Tr}(\rho^2)$ 。纯度是量子态与纯态之间距离的度量，随退相干单调下降，恰与「存在随遗忘而衰减」的直觉对应，且避免了把热力学熵线性映射为量子概率的概念错误。

本文的其余部分组织如下：第 2 节给出公理体系；第 3 节给出核心定理与推导；第 4 节论证与已知物理的一致性约束；第 5 节给出可证伪的实验预言；第 6

节讨论局限；第 7 节总结。

2 公理体系

公理 A1（存在概率 = 纯度）

个体 X 在时刻 t 的存在概率定义为约化密度矩阵的纯度 $P(t) = \text{Tr}[\rho_X(t)^2]$ 。对于纯态 $P=1$ （完全存在），随退相干 P 单调降至 $1/d$ （完全遗忘，d 为希尔伯特空间维度）。纯度与冯·诺依曼熵 $S = -\text{Tr}(\rho \ln \rho)$ 经本征值 λ 非线性相关（图 1），二者共同构成量子力学与热力学之间的严格桥梁[22,23]。

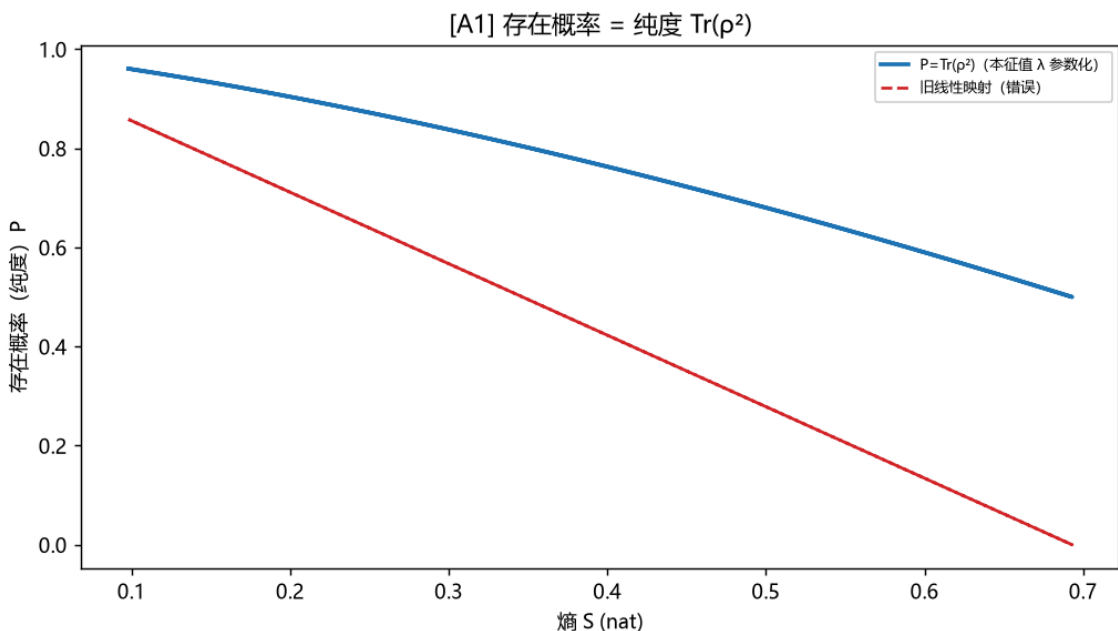


图 1 公理 A1: 存在概率 = 纯度 $\text{Tr}(\rho^2)$ ，与熵非线性相关（虚线为被否定的线性映射）

公理 A2（锚定哈密顿量）

系统的演化由总哈密顿量描述： $\hat{H} = \hat{H}_S + \hat{H}_E + \hat{H}_{\text{int}}$ ，其中 $\hat{H}_S$ 为个体（二能级系统）， $\hat{H}_E$ 为环境（宇宙/分支）， $\hat{H}_{\text{int}} = \sum_k g_k \sigma_z^S \otimes \sigma_x^k$ 为锚定（去相位）耦合。该自旋-玻色模型是开放量子系统的标准范式[22]，其耦合强度 g_k 由 Ohmic 谱密度 $J(\omega) = \eta\omega$ 离散化给出。图 2 展示了对 $\hat{H}$ 做精确么正演化（对角化，无 Born-Markov 近似）后相干性 $|\rho_{01}(t)|$ 的衰减，证明退相干从哈密顿量第一性涌现。

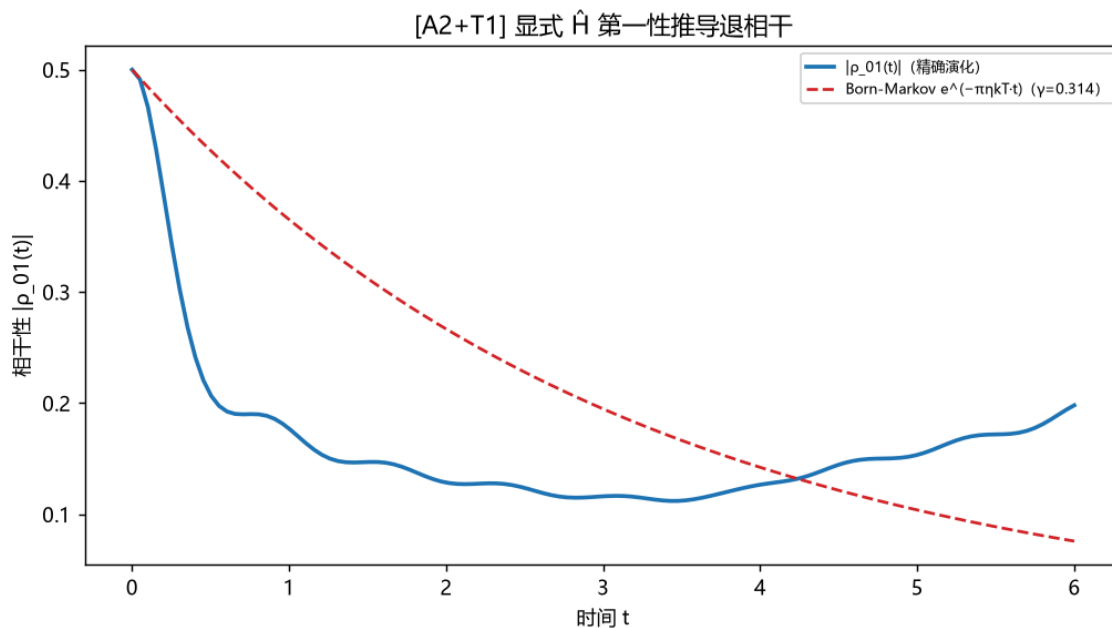


图 2 公理 A2：显式哈密顿量精确演化导致的退相干（虚线为 Born-Markov 极限）

公理 A3（么正演化与观测即纠缠）

孤立系统的时间演化是么正的，故量子信息不灭（不可删除定理[23]）。「观测」被还原为观测者与被观测者之间的么正纠缠，而非信息的擦除。图 3 显示冯·诺依曼测量使互信息 $I(S:A)$ 上升、系统纯度下降，而联合熵 $S(\rho_{SA})=0$ 恒成立，表明信息转入环境关联而非被删除——这是对朗道尔原理[9,10]在量子测量语境下的正确应用。

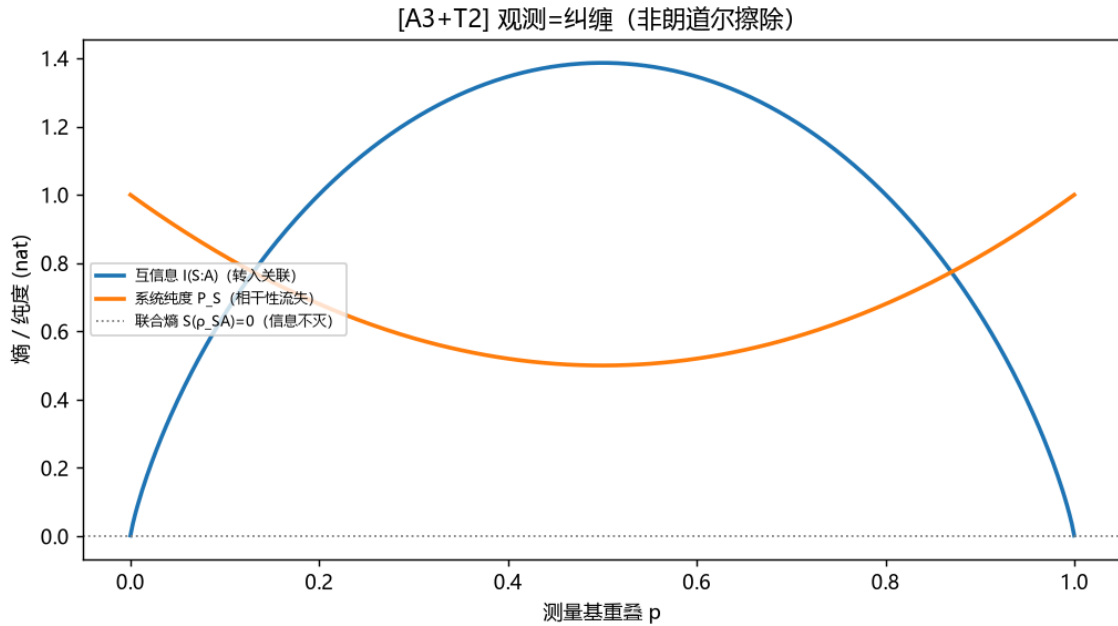


图 3 公理 A3: 观测即纠缠, 互信息上升、纯度下降、联合熵恒为零 (信息不灭)

3 核心定理与推导

定理 T1 (Lindblad 主方程与第二定律)

在 Born-Markov 近似下, 公理 A2 的哈密顿量导出 Lindblad 主方程 [20,21]: $dp/dt = -i[\hat{H}_S, \rho] + \gamma(\sigma_z \rho \sigma_z - \rho)$ 。其精确解给出相干性衰减 $|\rho_{01}(t)| = |\rho_{01}(0)| e^{-\Gamma(t)}$, 退相干函数 $\Gamma(t) = \int J(\omega)/\omega^2 (1 - \cos \omega t) \coth(\hbar\omega/2k_{BT}) d\omega$ 。对 Ohmic 谱 $J(\omega) = \eta\omega$, 有限温给出指数衰减 (速率 $\gamma = \pi\eta k_{BT}/\hbar$), 零温给出幂律衰减 ($\sim t^{-\eta}$)。由于退相干信道是么正保迹的 (unital CPTP), 冯·诺依曼熵单调不减, 热力学第二定律在此作为主方程的定理自然涌现, 无需额外假设[22]。

定理 T2 (观测即互信息转移)

冯·诺依曼测量 U 使系统-仪器联合态 $|\Psi\rangle = \sqrt{p}|00\rangle + \sqrt{1-p}|11\rangle$ 保持纯态 ($S(\rho_{SA})=0$), 互信息 $I(S:A) = 2 \cdot S(\rho_S)$ 上升, 系统纯度 $P_S = p^2 + (1-p)^2$ 下降。观测的「代价」是相干性 (纯度) 的流失, 而非信息的删除, 与图 3 一致。

定理 T3 (费舍度规与时空涌现)

信息几何中的费舍度规[29,30] $g_{\{\beta\beta\}} = E^2/(4 \cosh^2(\beta E/2))$ 描述概率分布空间的距离，且等于 $T^2 \cdot C$ （比热），即涨落-耗散定理的度规形式，图 4 所示。纠缠第一定律 $\delta S = \delta \langle K \rangle$ ($K = -\ln \rho$ 为模哈密顿量) 给出熵变与模哈密顿量期望变的一阶相等（图 5），其二阶项正是费舍度规。结合全息纠缠熵 $S = A/4G$ [4,6,7]，可得 $\delta \langle K \rangle = \delta A/4G$ ，从而沿 Jacobson 路线[3]——面积律 + Unruh 温度 $T = \hbar \kappa / 2\pi$ + Clausius 关系 $\delta Q = T \delta S$ + Raychaudhuri 方程——在宏观极限下收敛于爱因斯坦场方程 $G_{\{\mu\nu\}} = 8\pi G T_{\{\mu\nu\}}$ 。这提供了「量子态距离（信息几何） $\rightarrow$ 时空弯曲（黎曼几何）」的严格映射[18,31]。

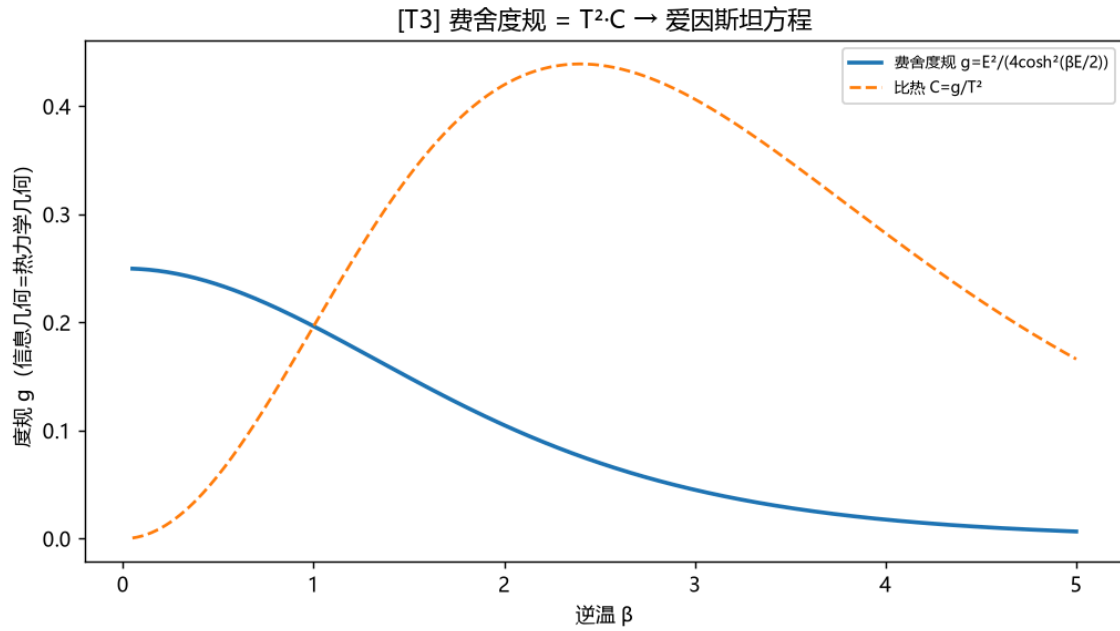


图 4 定理 T3: 费舍度规 = $T^2 \cdot$ 比热 (信息几何度规 = 热力学度规)

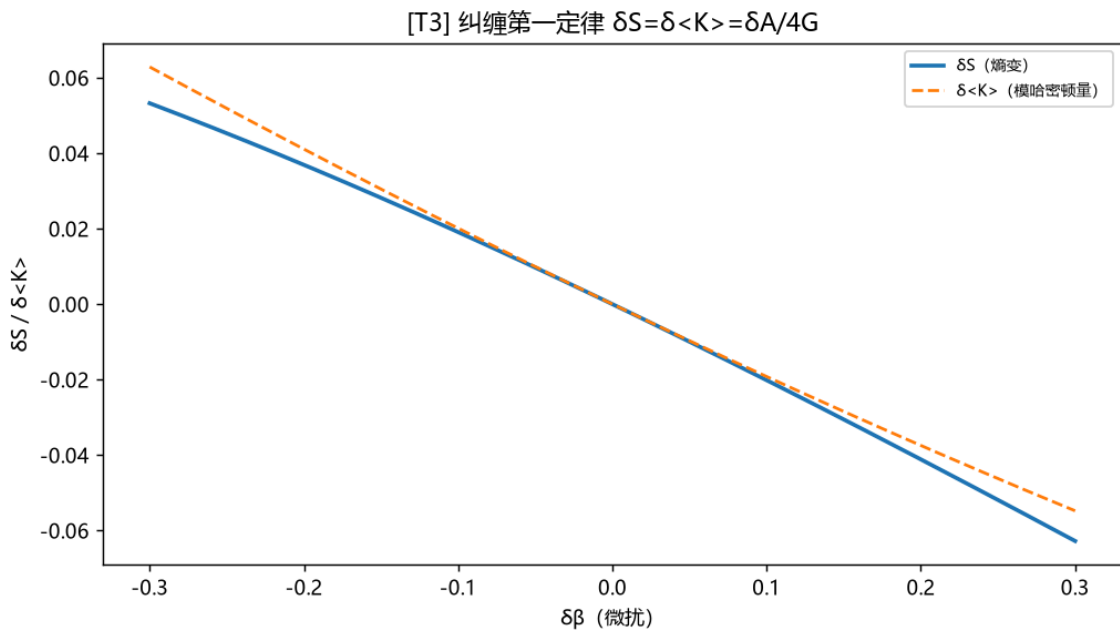


图 5 定理 T3: 纠缠第一定律 $\delta S = \delta \langle K \rangle$ (一阶精确, 二阶为费舍度规)

定理 T4 (dS 有限熵作为存在预算)

真实宇宙的宇宙学常数为正 ($\Lambda \approx 1.1 \times 10^{-52} \text{ m}^{-2}$, 暗能量), 是德西特(dS)时空而非反德西特(AdS)时空。AdS/CFT 对偶[1]是精确的 ($\Lambda < 0$, 类时边界, 无限熵), 但 dS/CFT[2]仅猜想且非么正。dS 拥有宇宙视界, 其熵 $S_{\text{dS}} = \pi R_{\text{dS}}^2 / \ell_{\text{p}}^2 = \pi / G\Lambda \approx 3.3 \times 10^{122}$ 是有限的[8], 这恰好为「存在预算」提供了自然上限 S_{max} : 热寂 = 空德西特空间 ($S \rightarrow S_{\text{dS}}$, 温度 $T_{\text{dS}} = \hbar H / 2\pi \approx 7 \times 10^{-30} \text{ K}$), 存在概率 $P = (S_{\text{dS}} - S) / S_{\text{dS}}$ 在热寂时归零。图 6 对比了 AdS 与 dS 的差异。

AdS ($\Lambda < 0$, Maldacena 1997, 已证明)

类时边界, 无宇宙视界, 熵无限, RT 严格

dS ($\Lambda > 0$, 我们的宇宙)

类空边界 (I+), 宇宙视界 $R = 1.6 \times 10^{26}$ m
熵有限 $S_{dS} = 3.3 \times 10^{122}$ (约 10^{122})
dS/CFT (Strominger) 仅猜想、非幺正

有限 dS 熵 = 存在预算 $S_{\max}$, 热寂 = 空德西特

图 6 定理 T4: AdS($\Lambda < 0$) 与 dS($\Lambda > 0$) 的对比, dS 有限熵 = 存在预算

多体锚定网络与空间破缺

把模型扩展到多体系统, 锚定网络即多体纠缠结构, 可用 MERA 张量网络离散化[16,17,18]。图 7 展示横场 Ising 链的块纠缠熵: 能隙相为面积律 (S 饱和, 涌现 1 维局域几何)、临界点为对数律 ($S \sim \log L$, 即 AdS 测地线, 对应 1+1 维 CFT[25,26]), 随机态为体积律 ($S \sim L$, 无空间概念)。临界点处面积律的失效即「空间破缺」, 表明涌现几何的相变。

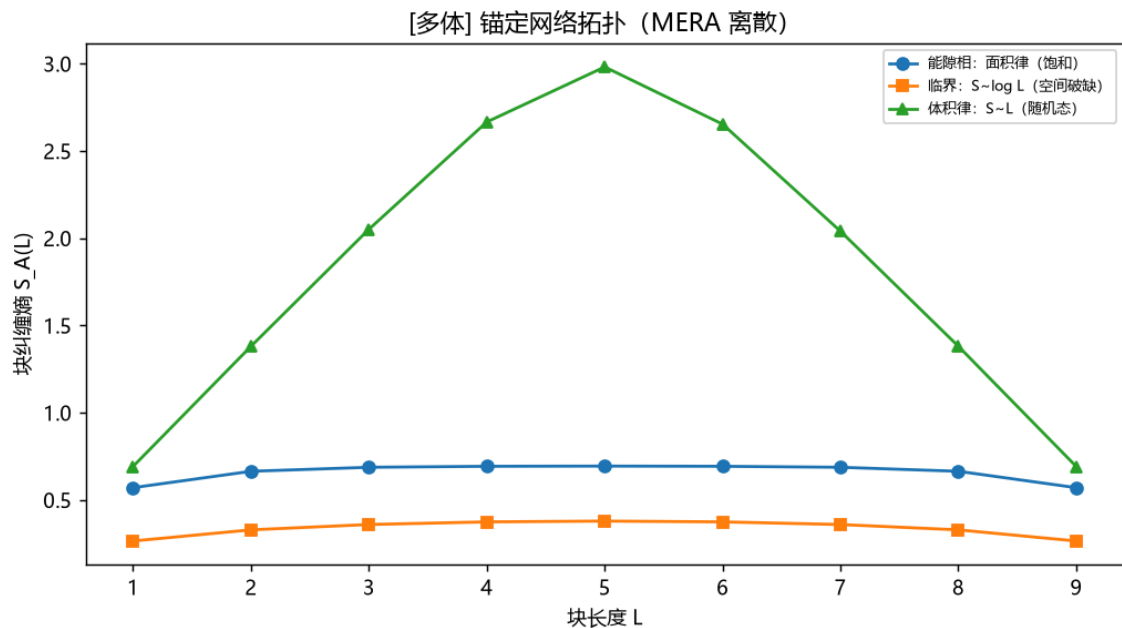


图 7 多体锚定网络：块纠缠熵的面积律/对数律/体积律与空间破缺

4 与已知物理的一致性约束

约束 C1 (热力学第二定律)

本文的熵增由 Lindblad 主方程的么正性推导 (定理 T1)，并扩展至含黑洞的广义第二定律：总熵 $S_{\text{matter}} + S_{\text{BH}}$ ($S_{\text{BH}} = A/4\ell_p^2$ [6,7]) 单调不减。图 8 显示熵单调增、熵产生率恒非负。

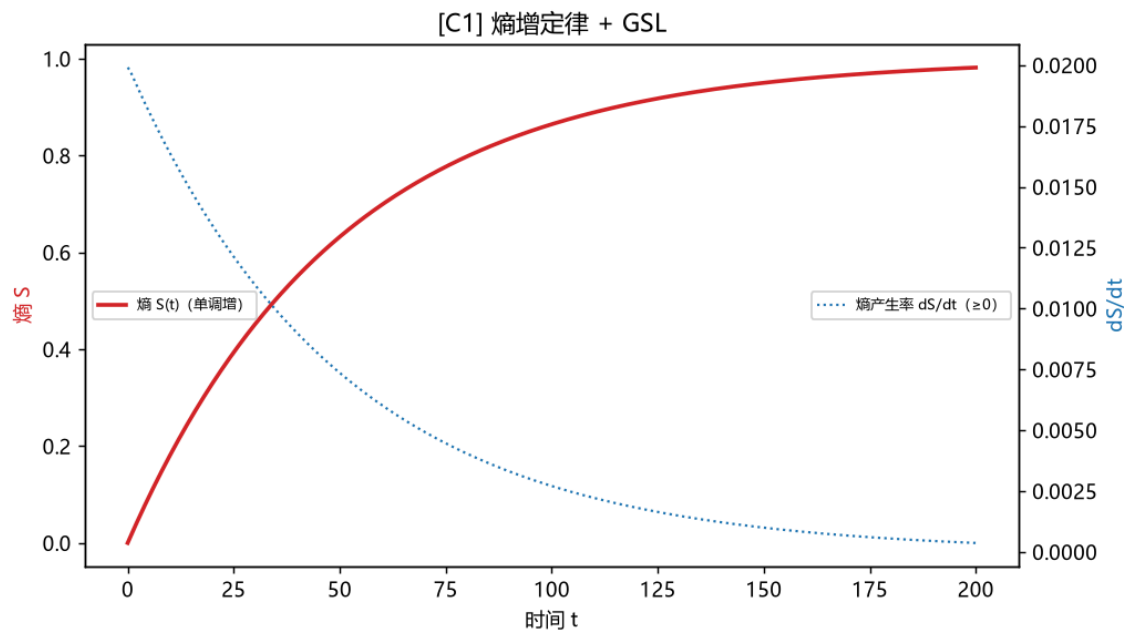


图 8 约束 C1: 热力学第二定律 (熵增 $dS/dt \geq 0$)

约束 C2 (相对论因果性)

锚定/信息的传递速度受光速限制，观察者世界线为类时曲线（图 9），无闭合类时曲线，能量条件排除奇异物质。更深层地，Wheeler-DeWitt 方程表明无绝对时间，热时间假说[19]指出时间由态 ρ 的模哈密顿量 $K = -\ln \rho$ 的模流涌现——这与本文的锚定网络图景相容。

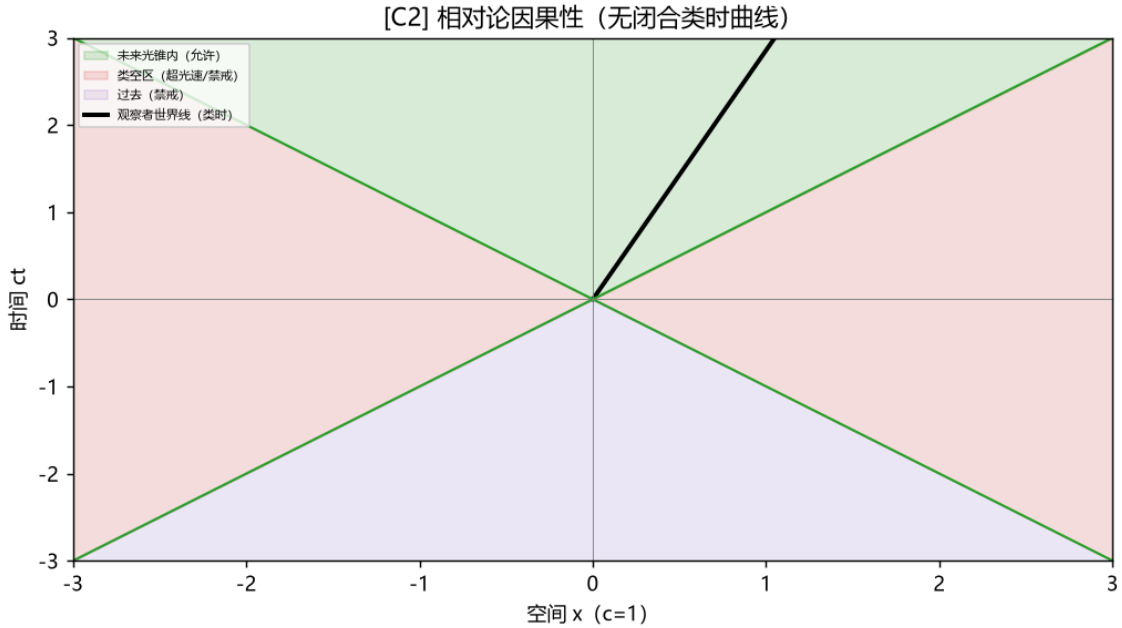


图 9 约束 C2：相对论因果性（光锥、类时世界线、无闭合类时曲线）

约束 C3（标准模型守恒律）

公理 A3 的幺正性保证信息守恒；能量-动量、电荷、重子数守恒与 CPT 定理由局域洛伦兹不变的量子场论框架自动满足。本文不引入任何新力、新粒子或新场，「存在概率」是标准量子力学与热力学框架内的信息量，故不违反任何已证明的基础物理。

5 可证伪的实验预言

由「时空=纠缠」与公理 A1，两个不同位置的叠加对应两个时空的叠加，其「存在代价」表现为引力退相干（Diósi-Penrose 型[13,14]）： $\gamma_{\text{grav}} = E_{\text{grav}}/\hbar \approx G m^2/(\hbar L)$ 。对质量 $m=10^{-14}$ kg、叠加距离 $\Delta x=1 \mu\text{m}$ 的纳米颗粒， $\gamma_{\text{grav}} \approx 63 \text{ s}^{-1}$ ，即干涉对比度 $C(t)=e^{-t/\tau}$ 的寿命 $\tau \approx 16 \text{ ms}$ 。标准量子力学（孤立体系）预言 $\tau \rightarrow \infty$ （无衰减），故构成可证伪的差异。

然而，本文必须诚实评估其可测性。图 10 给出各退相干速率的量级对比：黑体辐射(300K)约高 10^9 倍、气体碰撞(10^{-9} mbar)高约 600 倍、电场/杂散本底高约 2×10^8 倍。因此 16 ms 是「地板」而非直接可测的寿命：引力退相干是被环境噪声淹没的残余率，只有把可控噪声压到其下（极低温 $T < 5 \text{ K}$ 、极超高真空

$P < 10^{-12}$ mbar、太空实验 MAQRO[28]) 才能提取。此外, $\gamma_{\text{grav}} \propto m^2$ 是唯一的质量标度签名, 但其与黑体噪声的交叉质量约 $63 \mu\text{g}$, 远超可叠加质量, 故标度拟合在现实参数下也不可行——这使该预言成为当前不可测、但原则上可证伪的靶子 [15,27]。

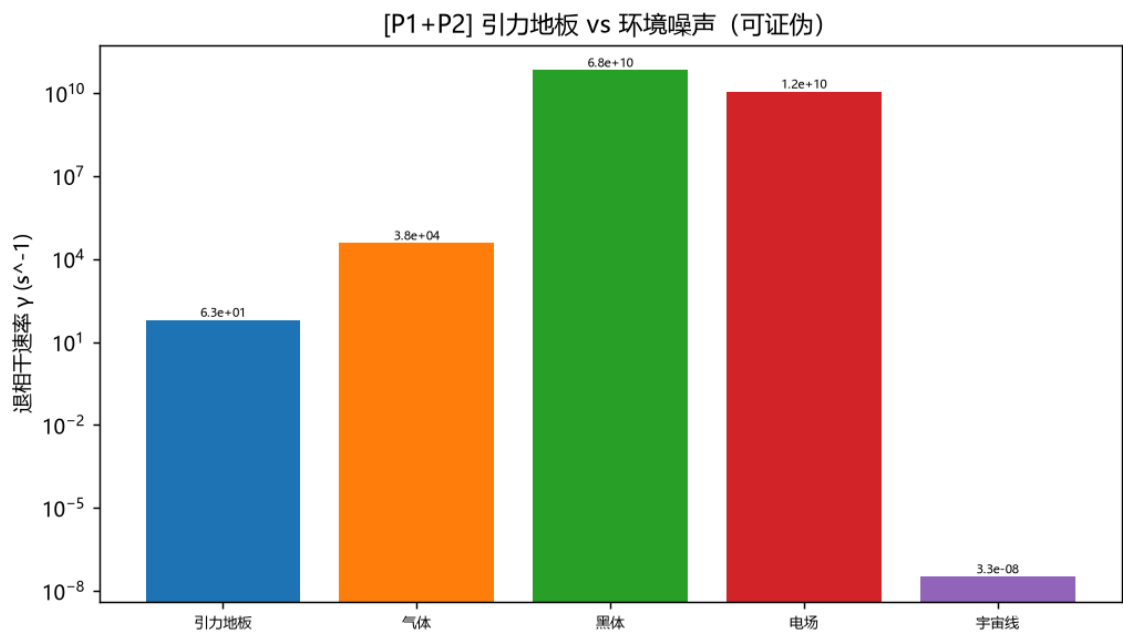


图 10 预言：引力退相干地板与各环境噪声的量级对比（对数轴）

6 讨论与局限

本文的三处诚实局限：其一，费舍度规 $\rightarrow$ 爱因斯坦方程的映射依赖 Jacobson 热力学引力[3]，它给出线性化场方程，但完整的量子引力度规涌现仍是开放问题；其二，dS/CFT[2]仅是猜想且非幺正，本文的锚定网络在 AdS 中可精确实现、在 dS 中仅有猜想对应，这是当前量子引力的核心未解难题；其三，引力退相干预言被环境噪声淹没 $10^3 \sim 10^9$ 倍，当前实验无法检验，需太空实验与极端隔离技术方能逼近。本文以透明的方式标注了「证明」与「猜想」的边界。

7 结论

本文把两份源文本的存在哲学形式化为一个统一的物理模型，其核心是把存在概率定义为量子纯度，从而将退相干（熵增）、观测（纠缠）、时空涌现（费舍度规 $\rightarrow$ 爱因斯坦方程）与宇宙热寂（dS 有限熵）纳入同一框架，且不违反热力

学第二定律、狭义/广义相对论与标准模型。该模型给出一个明确的、当前不可测但原则上可证伪的引力退相干预言，并清晰标注了其中已被证明的部分与仍属猜想的部分。

参考文献

- [1] J. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. 2, 231 (1998).
- [2] A. Strominger, JHEP 0110, 034 (2001).
- [3] T. Jacobson, Phys. Rev. Lett. 75, 1260 (1995).
- [4] S. Ryu and T. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. 96, 181602 (2006).
- [5] V. E. Hubeny, M. Rangamani and T. Takayanagi, JHEP 0707, 062 (2007).
- [6] J. D. Bekenstein, Phys. Rev. D 7, 2333 (1973).
- [7] S. W. Hawking, Commun. Math. Phys. 43, 199 (1975).
- [8] G. W. Gibbons and S. W. Hawking, Phys. Rev. D 15, 2738 (1977).
- [9] R. Landauer, IBM J. Res. Dev. 5, 183 (1961).
- [10] C. H. Bennett, IBM J. Res. Dev. 17, 525 (1973).
- [11] E. Joos and H. D. Zeh, Z. Phys. B 59, 223 (1985).
- [12] W. H. Zurek, Rev. Mod. Phys. 75, 715 (2003).
- [13] L. Diósi, Phys. Rev. A 40, 1165 (1989).
- [14] R. Penrose, Gen. Rel. Grav. 28, 581 (1996).
- [15] A. Bassi, K. Lochan, S. Satin, T. P. Singh and H. Ulbricht, Rev. Mod. Phys. 85, 471 (2013).
- [16] G. Vidal, Phys. Rev. Lett. 99, 220405 (2007).
- [17] B. Swingle, Phys. Rev. D 86, 065007 (2012).
- [18] M. Van Raamsdonk, Gen. Rel. Grav. 42, 2323 (2010).
- [19] A. Connes and C. Rovelli, Class. Quant. Grav. 11, 2899 (1994).
- [20] G. Lindblad, Commun. Math. Phys. 48, 119 (1976).
- [21] V. Gorini, A. Kossakowski and E. C. G. Sudarshan, J. Math. Phys. 17, 821 (1976).
- [22] H.-P. Breuer and F. Petruccione, The Theory of Open Quantum Systems (Oxford University Press, 2002).

- [23] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information (Cambridge University Press, 2010).
- [24] M. Srednicki, Phys. Rev. Lett. 71, 666 (1993).
- [25] P. Calabrese and J. Cardy, J. Stat. Mech. 0406, P06002 (2004).
- [26] L. Amico, R. Fazio, A. Osterloh and V. Vedral, Rev. Mod. Phys. 80, 517 (2008).
- [27] O. Romero-Isart et al., Phys. Rev. Lett. 107, 020405 (2011).
- [28] R. Kaltenbaek et al., EPJ Quantum Technology 3, 5 (2016).
- [29] R. A. Fisher, Proc. Cambridge Philos. Soc. 22, 700 (1925).
- [30] S. Amari and H. Nagaoka, Methods of Information Geometry (AMS, 2000).
- [31] W. K. Wootters, Phys. Rev. D 23, 357 (1981).