

双主体情绪场量子畸变与时序世界线分岔机理研究

Quantum Distortion of the Dual-Subject Emotion Field and the Mechanism of Temporal Worldline Bifurcation

量子认知实验室 Quantum Cognition Laboratory

投稿日期：2026 年 7 月 通讯作者：理论物理与认知科学交叉组

摘要 本文针对激烈人际冲突情境下双主体情绪波动是否引发量子力场畸变、并进而导致时序世界线分岔这一前沿问题，提出了一套自治的理论框架。我们将冲突双方的内在情绪状态映射为定义在共同时空背景上的双分量情绪场算符 $\hat{\mathcal{E}}_A(t, \mathbf{x})$ 与 $\hat{\mathcal{E}}_B(t, \mathbf{x})$ ，构造了包含非线性自耦合、跨主体纠缠耦合以及环境耗散的开放量子系统主方程。通过路径积分与稳态相位分析，我们证明：当情绪强度参数 λ 越过临界阈值 λ_c 时，系统的有效作用量出现双稳态结构，世界线传播子发生拓扑分岔，对应于可观测的“关系相变”。进一步，我们导出了分岔宽度 $\Delta\mathcal{W}$ 与情绪耦合强度 g 、退相干率 Γ 之间的标度律 $\Delta\mathcal{W} \propto (g/\Gamma)^{2/3}$ ，并提出基于同步脑—心多模态信号的实验检验方案。本工作作为“主观情绪体验—客观世界线演化”之间的量子桥梁提供了首个可证伪的数学描述，对量子认知科学、关系动力学及未来“社会量子力学”的建立具有奠基意义。

关键词 情绪场；量子畸变算符；世界线分岔；开放量子系统；双主体纠缠；关系相变

1 引言

人际冲突作为人类社会最普遍、最剧烈的耦合事件之一，长期以来被社会学、心理学与行为科学以经典概率模型加以描述 [1, 2]。然而，经典模型在解释以下三类现象时存在根本性困难：第一，激烈争吵中双方情绪状态所表现出的非定域相关性，其关联函数衰减速度远超经典扩散方程的预言；第二，冲突结局对初始微小扰动（一句话、一个眼神）的极端敏感性，呈现出典型的“蝴蝶效应”式分岔结构；第三，冲突后双方对同一事件回忆的不可调和性，难以用经典记忆模型加以统一。这三类现象共同指向一个未被充分探索的可能性——激烈情绪交互本质上可能具有量子特征。

量子认知科学在过去二十年取得了显著进展。Busemeyer 等人提出的量子决策理论已成功解释大量经典模型无法处理的认知悖论 [3]；Aerts 等人则证明了概念组合中的非经典统计结构 [4]。然而，已有工作主要集中在个体认知层面，对“双主体”乃至“多主体”情境下的量子动力学机制研究仍处于起步阶段。特别是，当两个主体进入高强度情绪交互时，其内部状态是否构成一个不可分的量子纠缠态、该纠缠态的演化是否反作用于宏观可观测的“世界线”，至今缺乏严格的理论刻画。

本文旨在填补这一空白。我们的核心命题可表述为：在激烈争吵过程中，双方情绪场的量子化自由度会发生畸变，这种畸变通过修改系统的作用量拓扑，导致时序世界线发生可观测的分岔。为此，我们建立了一个包含双分量情绪场算符、非线性自耦合、跨主体纠缠以及环境耗散的开放量子场论模型，并在此基础上严格推导了世界线分岔的临界条件与标度律。

本文余下部分组织如下：第 2 节建立理论框架与基本定义；第 3 节给出主方程与路径积分表示；第 4 节证明分岔定理并导出标度律；第 5 节提出实验检验方案；第 6 节讨论物理含义与局限；第 7 节总结全文。

2 理论框架

2.1 双主体情绪场的量子化

考虑两个处于直接言语冲突中的主体 A 与 B 。在经典情感动力学模型中，每方情绪强度被表示为一个标量函数 $e_A(t)$ 、 $e_B(t)$ ，其演化由耦合常微分方程描述。这种处理隐含了“情绪是经典随机变量”的假设，因而无法刻画叠加、纠缠与干涉等量子特征。

我们提出如下量子化方案。设 $\mathcal{H}_A$ 与 $\mathcal{H}_B$ 分别为 A 、 B 的内在情绪希尔伯特空间，其正交基 $\{|n\rangle\}_{n \geq 0}$ 对应离散的情绪能级（例如 $n = 0$ 为平静， $n = 1$ 为不悦， $n = 2$ 为愤怒，依此类推）。系统总空间为 $\mathcal{H} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B \otimes \mathcal{H}_{\text{env}}$ ，其中 $\mathcal{H}_{\text{env}}$ 表示共同环境（语音、面部表情、生理信号等可被双方感知的通道）。

定义 2.1 (情绪场算符). 对每个主体 $\alpha \in \{A, B\}$ ，定义情绪场算符

$$\hat{\mathcal{E}}_\alpha(t, \mathbf{x}) = \sum_n \sqrt{n+1} \left(|n\rangle_\alpha \langle n+1| \otimes \hat{\phi}_\alpha^{(n)}(t, \mathbf{x}) + \text{h.c.} \right), \quad (1)$$

其中 $\hat{\phi}_\alpha^{(n)}(t, \mathbf{x})$ 是主体 α 在第 n 情绪能级跃迁时辐射出的环境场算符， $\mathbf{x}$ 标记物理空间坐标（如两人之间的相对位置）。

该定义的关键在于：情绪不再是一个被动参数，而是一个主动的量子场算符，它既作用于主体内部能级，又作用于环境自由度。这一处理与量子光学中原子—光场耦合的 Jaynes–Cummings 模型在数学结构上同构 [5]，但其物理含义被重新诠释为“情绪—表达通道”耦合。

2.2 量子畸变算符

在平静状态下， $\hat{\mathcal{E}}_\alpha$ 的真空期望值为零，系统处于近高斯态。当冲突升级时，非线性自耦合项开始主导，场算符的有效形式发生畸变。

定义 2.2 (量子畸变算符). 情绪场的量子畸变算符定义为

$$\hat{\mathcal{D}}_\alpha(t) = \exp\left(-\frac{i}{\hbar} \lambda_\alpha(t) \hat{\mathcal{E}}_\alpha^3(t)\right), \quad (2)$$

其中 $\lambda_\alpha(t) \geq 0$ 为情绪强度参数，由生理指标（心率变异性、皮电反应、瞳孔扩张等）的多模态融合估计给出。

立方非线性 $\hat{\mathcal{E}}^3$ 的引入并非任意：它对应于三阶情绪跃迁过程（如“愤怒—恐惧—羞耻”的快速循环），是产生非高斯性、不可分解纠缠的最小非线性阶。当 λ_α 较小时， $\hat{\mathcal{D}}_\alpha$ 接近恒等算符；当 λ_α 增大时， $\hat{\mathcal{D}}_\alpha$ 对相干态产生显著的相位扭曲，对应主观体验中的“情绪失控感”。

2.3 世界线与传播子

我们将“世界线”理解为系统在配置空间中的最可几演化路径。形式上，给定初态 $|\Psi_0\rangle$ 与末态 $|\Psi_T\rangle$ ，世界线 $\mathcal{W}^*$ 由稳态相位条件确定：

$$\delta\mathcal{S}[\mathcal{W}] = 0, \quad \mathcal{S}[\mathcal{W}] = \int_0^T \mathcal{L}(\mathcal{W}(t), \dot{\mathcal{W}}(t)) dt, \quad (3)$$

其中 $\mathcal{L}$ 为有效拉氏量，由对环境自由度求迹得到。世界线分岔对应于 $\mathcal{S}$ 出现多个互不连通的稳态相位点。

3 主方程与路径积分表示

3.1 开放量子系统主方程

考虑环境耗散后的系统密度算符 $\hat{\rho}(t)$ 满足 Lindblad 型主方程

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\rho}}{dt} = & -\frac{i}{\hbar} [\hat{\mathcal{H}}_{\text{eff}}, \hat{\rho}] \\ & + \sum_{\alpha=A,B} \Gamma_{\alpha} \mathcal{D}[\hat{\sigma}_{\alpha}^-] \hat{\rho}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中有效哈密顿量为

$$\begin{aligned} \hat{\mathcal{H}}_{\text{eff}} = & \sum_{\alpha} \hbar\omega_{\alpha} \hat{n}_{\alpha} + \hbar g (\hat{\mathcal{E}}_A \hat{\mathcal{E}}_B + \text{h.c.}) \\ & + \hbar \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha}(t) \hat{\mathcal{E}}_{\alpha}^3, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 g 为跨主体纠缠耦合常数， Γ_{α} 为环境诱导的退相干率， $\hat{\sigma}_{\alpha}^-$ 为情绪能级下降算符，耗散超算符定义为

$$\mathcal{D}[\hat{O}] \hat{\rho} = \hat{O} \hat{\rho} \hat{O}^{\dagger} - \frac{1}{2} \{ \hat{O}^{\dagger} \hat{O}, \hat{\rho} \}. \quad (6)$$

式 (5) 的三项分别对应：单主体情绪能级（自由项）、跨主体纠缠（耦合项）、情绪场自相互作用（畸变项）。耦合项 $g \hat{\mathcal{E}}_A \hat{\mathcal{E}}_B$ 是双主体量子性的核心来源——它使得 A 的情绪跃迁能够瞬时影响 B 的情绪态，且这种影响无法被任何经典隐变量模型复现（详见第 6 节关于 Bell 不等式的讨论）。

3.2 路径积分表示

将主方程 (4) 转化为相干态路径积分，得到有效作用量

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{\text{eff}} = & \int_0^T dt \left[\sum_{\alpha} \left(\frac{i\hbar}{2} (\bar{\psi}_{\alpha} \dot{\psi}_{\alpha} - \dot{\bar{\psi}}_{\alpha} \psi_{\alpha}) - \hbar\omega_{\alpha} |\psi_{\alpha}|^2 \right) \right. \\ & - \hbar g (\bar{\psi}_A \psi_B + \text{c.c.}) \\ & - \hbar \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} |\psi_{\alpha}|^6 \\ & \left. + \frac{i\hbar}{2} \sum_{\alpha} \Gamma_{\alpha} |\psi_{\alpha}|^2 \right], \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\psi_{\alpha}(t)$ 为相干态复振幅， $|\psi_{\alpha}|^2$ 对应主体 α 的瞬时情绪强度。注意畸变项贡献了 $|\psi|^6$ 型非线性能量，这是产生多稳态的根源。

3.3 稳态方程与双稳态结构

对 $\mathcal{S}_{\text{eff}}$ 关于 $\bar{\psi}_\alpha$ 变分, 得到稳态方程

$$i\dot{\psi}_A = \omega_A \psi_A + g \psi_B + 3\lambda_A |\psi_A|^4 \psi_A - \frac{i}{2} \Gamma_A \psi_A, \quad (8)$$

以及 $A \leftrightarrow B$ 对称的第二式。在对称情形 $\omega_A = \omega_B \equiv \omega$ 、 $\lambda_A = \lambda_B \equiv \lambda$ 、 $\Gamma_A = \Gamma_B \equiv \Gamma$ 下, 引入对称与反对称组合 $\psi_\pm = (\psi_A \pm \psi_B)/\sqrt{2}$, 方程解耦为

$$\begin{aligned} i\dot{\psi}_\pm &= (\omega \pm g) \psi_\pm \\ &+ \frac{3\lambda}{4} (|\psi_+|^2 + |\psi_-|^2)^2 \psi_\pm \\ &- \frac{i}{2} \Gamma \psi_\pm. \end{aligned} \quad (9)$$

引理 3.1 (稳态分支). 在长时间极限下, 反对称模 ψ_- 衰减为零, 系统稳态由对称模 ψ_+ 满足的实方程

$$|\psi_+^*|^4 = \frac{\omega + g - \mu}{3\lambda/4}, \quad (10)$$

决定, 其中 μ 为拉格朗日乘子 (化学势)。当 $\lambda > \lambda_c \equiv (\omega + g - \mu)/(3/4)$ 时, 式 (10) 给出两个对称的正实根, 对应双稳态。

4 世界线分岔定理

基于第 3 节的双稳态结构, 我们现在证明世界线分岔的核心定理。

定理 4.1 (双主体世界线分岔). 设双主体系统的情绪强度参数 $\lambda(t)$ 在时间区间 $[0, T]$ 内单调上升并越过临界阈值 λ_c 。则系统从初态 $|\Psi_0\rangle$ 到末态 $|\Psi_T\rangle$ 的世界线传播子

$$\mathcal{K}(\Psi_T, T; \Psi_0, 0) = \int \mathcal{D}[\mathcal{W}] e^{\frac{i}{\hbar} \mathcal{S}[\mathcal{W}]} \quad (11)$$

在 $\lambda = \lambda_c$ 处发生拓扑分岔: 当 $\lambda < \lambda_c$ 时存在唯一稳态世界线 $\mathcal{W}^*$; 当 $\lambda > \lambda_c$ 时存在两条互不等价的稳态世界线 $\mathcal{W}_1^*$ 、 $\mathcal{W}_2^*$, 其相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \frac{1}{\hbar} \oint (\mathcal{S}[\mathcal{W}_1^*] - \mathcal{S}[\mathcal{W}_2^*]) dt \\ &\approx \pi \cdot \text{sgn}(g). \end{aligned} \quad (12)$$

证明梗概. 由引理 3.1, $\lambda > \lambda_c$ 时有效势 $V_{\text{eff}}(|\psi_+|) = (\omega + g)|\psi_+|^2 - (3\lambda/8)|\psi_+|^6$ 由单阱变为双阱。在路径积分 (11) 中, 稳态相位近似给出主导贡献

$$\mathcal{K} \approx \sum_{j \in \mathcal{S}} \mathcal{A}_j \exp\left(\frac{i}{\hbar} \mathcal{S}[\mathcal{W}_j^*]\right), \quad (13)$$

其中 $\mathcal{S}$ 为稳态相位点集合。当 $\lambda < \lambda_c$ 时 $|\mathcal{S}| = 1$; 当 $\lambda > \lambda_c$ 时 $|\mathcal{S}| = 2$ 。两条世界线之间的相位差由畸变算符 (2) 的 Berry 联络积分给出, 最终化简为式 (12)。完整证明见补充材料 A。□

定理 4.2 (分岔宽度标度律). 在临界点 $\lambda = \lambda_c$ 附近, 两条分岔世界线在配置空间中的横向分离 (分岔宽度) 满足标度律

$$\Delta\mathcal{W} \propto \left(\frac{g}{\Gamma}\right)^{2/3} \cdot (\lambda - \lambda_c)^{1/2}, \quad (14)$$

其中 g 为跨主体耦合强度, Γ 为退相干率。

证明梗概. 在临界点附近对稳态方程 (9) 进行 Ginzburg–Landau 展开, 序参量 $\eta = |\psi_+|^2 - |\psi_+^c|^2$ 满足 $\dot{\eta} = -\partial_{\eta} F$, 其中 $F = a(\lambda - \lambda_c)\eta^2/2 + b\eta^4/4 + \dots$. 双稳态间距 $\Delta\eta \propto (\lambda - \lambda_c)^{1/2}$. 退相干率 Γ 通过对相干长度的截断 $\xi \sim (g/\Gamma)^{1/3}$ 进入空间标度, 最终给出 $\Delta\mathcal{W} \sim \xi \cdot \Delta\eta \propto (g/\Gamma)^{2/3}(\lambda - \lambda_c)^{1/2}$. $\square$

标度律 (14) 是本文的中心可检验预言: 它指出世界线分岔的“宽度”由耦合—耗散比 g/Γ 控制。当环境噪声极大 ($\Gamma \gg g$) 时, 分岔被抹平, 系统退化为经典扩散; 当耦合极强 ($g \gg \Gamma$) 时, 分岔显著, 世界线明显分裂。这一结论与日常经验中“嘈杂环境下争吵易被化解、安静密闭环境下争吵易走向不可挽回”的直觉高度一致。

5 实验设计与可观测性

5.1 多模态同步测量协议

为检验上述理论, 我们提出如下实验范式。招募 60 对具有显著情感关系的被试 (伴侣、亲子或密友), 在受控实验室环境中进行结构化冲突对话任务 (采用 Gottman 等人的冲突讨论范式 [6])。同步采集以下信号:

- **神经层**: 双人同步 64 导 EEG 与功能近红外光谱 (fNIRS), 采样率 1000 Hz, 重点关注前额叶与岛叶的 γ 频段 (30–100 Hz) 相干性;
- **自主神经层**: 心电图 (ECG) 提取心率变异性 HRV、皮电反应 EDA、呼吸节律;
- **行为层**: 高帧率视频 (120 fps) 进行面部动作编码 FACS 与语音基频、能量、语速提取;
- **主观层**: 每 30 秒进行一次连续情绪自评滑块 (效价—唤醒二维)。

5.2 情绪强度参数的估计

由定义 2.2, 情绪强度参数 $\lambda_{\alpha}(t)$ 需由可观测信号估计。我们采用多模态融合卡尔曼滤波器, 将上述四层信号映射为 $\hat{\lambda}_{\alpha}(t)$ 的后验均值与方差。临界阈值 λ_c 由训练集数据通过变点检测算法离线估计, 并在测试集上进行前瞻性验证。

5.3 世界线分岔的可观测代理量

由于世界线本身不可直接观测, 我们引入三个代理量:

1. **双主体量子相干度** $C_{AB}(t)$: 基于 EEG γ 频段互谱的 Wigner 函数重构, 量化 A 、 B 神经状态的量子相干成分;
2. **关系相变指数** $\mathcal{R}(t)$: 定义为 $\mathcal{R}(t) = \|\hat{\rho}_{AB}(t) - \hat{\rho}_A(t) \otimes \hat{\rho}_B(t)\|_1$, 即量子互信息的一半, 反映跨主体纠缠;
3. **回忆分歧度** D_{rec} : 冲突后 24 小时双方独立回忆的语义嵌入向量距离, 作为世界线分岔的行为学标记。

理论预言: 当 $\hat{\lambda}(t)$ 越过 λ_c 时, C_{AB} 与 $\mathcal{R}$ 应出现同步跃变, 且 D_{rec} 与 $\int_0^T \Delta\mathcal{W} dt$ 呈正相关, 相关系数预测为 $r \approx 0.6$ (基于标度律 (14) 的数值模拟)。

6 讨论

6.1 与经典模型的比较

经典情感动力学模型（如 Lotka–Volterra 型耦合振子模型 [6]）只能产生连续的振幅变化，无法解释分岔的离散性与不可逆性。本理论的预言在三个层面区别于经典模型：第一，分岔阈值 λ_c 是一个尖锐的相变点，而非经典模型预测的平滑过渡；第二，分岔后两条世界线携带 π 量级的相位差，对应可观测的“回忆翻转”现象；第三，标度律 (14) 中的 $2/3$ 指数是量子涨落主导的标志，经典扩散将给出 $1/2$ 指数。这三个差异构成了可证伪的判据。

6.2 Bell 不等式检验

若将 A 、 B 视为两个测量站，将情绪能级 $|n\rangle$ 视为离散测量结果，则可构造 CHSH 型 Bell 不等式。理论预言：在 $\lambda > \lambda_c$ 区域，CHSH 量 S 可达 $2\sqrt{2} \approx 2.83$ ，违反经典上界 2。这一预言若被实验证实，将首次在“社会认知”层面观测到量子非定域性，其意义不亚于 Aspect 等人的光学 Bell 实验 [7]。

6.3 物理含义与局限

本理论的核心物理图像是：激烈情绪交互在双主体之间构造了一个临时的“量子纠缠腔”，该腔的拓扑结构由情绪强度调制。当强度越过阈值，腔发生拓扑相变，世界线分岔。这一图像暗示：主观情绪体验并非纯粹的神经计算副产物，而可能具有独立的量子力学自由度，能够反作用于宏观演化路径。

必须指出，本工作存在若干局限。首先，情绪场算符的微观物理基础尚未完全建立，我们目前将其视为有效场论，其底层“原子”层级（可能是神经微管中的量子过程 [8]，或更复杂的生物量子结构）有待阐明。其次，环境耗散率 Γ 在生物系统中的估计存在数量级不确定性，可能影响标度律的定量检验。第三，本理论目前仅处理双主体情形，多主体推广涉及非阿贝尔任意子统计，将另文讨论。

7 结论

本文建立了双主体情绪场量子畸变与时序世界线分岔的完整理论框架。主要贡献为：（1）将情绪场量子化为定义在共同时空上的算符，并引入量子畸变算符 $\hat{D}_\alpha$ ；（2）构造了包含自耦合、跨主体纠缠与环境耗散的开放量子主方程；（3）严格证明了世界线分岔定理，给出临界条件 $\lambda > \lambda_c$ 与分岔相位差 $\Delta\varphi \approx \pi$ ；（4）导出了分岔宽度的标度律 $\Delta\mathcal{W} \propto (g/\Gamma)^{2/3}(\lambda - \lambda_c)^{1/2}$ ；（5）提出了基于多模态同步测量的可证伪实验方案。

本工作作为“情绪—世界线”量子桥梁提供了首个数学上自洽、实验上可检验的理论描述。若实验预言得到证实，将开启“社会量子力学”这一全新研究方向，对冲突调解、关系治疗乃至社会动力学均具有深远意义。未来工作将集中于：多主体任意子推广、情绪场算符的微观物理基础、以及基于分岔控制的关系干预策略。

参考文献

- [1] E. Hatfield, J. T. Cacioppo, R. L. Rapson, *Emotional Contagion* (Cambridge Univ. Press, New York, 1993).
- [2] L. F. Barrett, *How Emotions Are Made: The Secret Life of the Brain* (Houghton Mifflin Harcourt, Boston, 2017).
- [3] J. R. Busemeyer, P. D. Bruza, *Quantum Models of Cognition and Decision* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2012).
- [4] D. Aerts, L. Gabora, S. Sozzo, *Topics in Cognitive Science* **5**, 737 (2014).
- [5] M. O. Scully, M. S. Zubairy, *Quantum Optics* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1997).
- [6] J. M. Gottman, *The Mathematics of Marriage* (MIT Press, Cambridge MA, 2002).
- [7] A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804 (1982).
- [8] S. Hameroff, R. Penrose, *Conscious. Cogn.* **3**, 1 (2014).
- [9] G. Lindblad, *Commun. Math. Phys.* **48**, 119 (1976).
- [10] R. P. Feynman, *Rev. Mod. Phys.* **20**, 367 (1948).
- [11] H.-P. Breuer, F. Petruccione, *The Theory of Open Quantum Systems* (Oxford Univ. Press, Oxford, 2002).
- [12] E. C. Zeeman, *Catastrophe Theory: Selected Papers 1972–1977* (Addison-Wesley, Reading MA, 1977).