

自纠缠潜能动力学（SEPD） v6.0

持续上同调基础、三元守恒定律与波粒特征共存机制

Lanhaijian & LLM

独立研究者

研究地址：上海市嘉定区江桥镇

理念先于存在，结构先于实体

本文章首发及后续变动，详见虹桥大学科技学术网

许可协议：Apache 2.0 / CC BY 4.0 双版权协议

July 24, 2026

Abstract

传统量子力学立足于希尔伯特空间态矢量与操作主义测量规则，虽能精准预言微观实验的统计结果，却长期面临单体本体动力学的缺失：无法解释孤立单量子何以能同步承载延展波动与局域粒子特征，亦无法给出弱测量中波粒共存现象的底层约束原理。玻尔的二元互补原理仅描述了实验表象上的互斥，而 Jakob-Bergou 三元纠缠关系依赖于两体系统耦合，均无法适配无外部辅助自由度的理想化孤立单量子体系。

本文建立自纠缠潜能动力学 (SEPD) v6.0 拓扑本体框架。我们以极-偶共轭自纠缠潜能流形 $\mathcal{M}_P$ 为唯一底层实在，以江桥截取准则 (JTEC) 为观测拓扑筛选机制，并依托持续上同调与过滤复形完成整套体系的严格数学形式化。核心成果包括：(1) 建立普适三元拓扑守恒公理 $W^2 + P^2 + S^2 = 1$ ，统一了纯波动、纯粒子与中间共存态的连续演化；(2) 严格界定拓扑剩余自由度 S ，阐明其为流形全局拓扑不变量，以此规避经典隐变量质疑；(3) 通过持续上同调条码演化，给出了弱测量波粒同步显现的完整可计算动力学；(4) 论证内禀自纠缠是单量子自干涉与共存现象唯一自洽的本体论必要预设。

本框架将传统互补原理收纳为拓扑完全截取的极限特例，消解了波粒二元对立，提供了一套无坍缩、无二元本体、无环境依赖的新型量子拓扑诠释体系，并给出了基于拓扑数据分析 (TDA) 的实验可证伪路径。

关键词：自纠缠潜能动力学；江桥截取准则；持续上同调；波粒二象性；三元守恒定律；量子拓扑；弱测量

1 绪论：从二元互斥到拓扑共存

波粒二象性是量子理论的核心基石。尼尔斯·玻尔提出的互补原理构建了经典的认知范式：波动性与粒子性互斥互补，满足二元约束 $W^2 + P^2 \leq 1$ 。然而，近二十余年的弱测量与精细化双缝实验持续突破传统范式边界，确凿地证实了同一量子体系在特定条件下可同步显现出可分辨的波动与粒子特征。

为了容纳这种共存效应，学界发展出了包含纠缠项的三元互补关系 $V^2 + D^2 + E^2 = 1$ 。然而，此类模型存在一个本质局限：第三项 E 始终定义为量子客体与环境、测量仪器之间的两体关联纠缠，仅适用于复合拓展系统。对于完全孤立、无外部自由度参与的理想化单量子自干涉体系，外部纠缠严格为零，公式便退化为经典的二元互斥形式，无法解释单体共存现象。

纵观主流量子诠释，均存在难以弥补的本体论缺口：

- (1) **哥本哈根诠释**：实验预测高度成功，但悬置了波函数坍缩的动力学起源，仅将波粒属性视为测量语境的结果，未赋予其底层结构根源。
- (2) **德布罗意-玻姆导波理论**：维持粒子-波二元本体论，无法自然生成连续可调的中间拓扑态，且引入了非定域性的形而上学难题。
- (3) **退相干纲领**：完全依赖系统-环境的耦合作用，无法解释封闭孤立量子体系的固有相干性与共存行为。

由此可见，现有理论全部依赖外部自由度或操作主义公设，缺失了单量子体系内部的本征耦合结构。本文提出的 **SEPD v6.0** 旨在构建一元拓扑本体论：以潜能流形内部的极-偶自纠缠为唯一内禀结构，以持续上同调过滤过程建模观测行为，建立三元拓扑守恒公理，从底层统一解释纯波动、纯粒子与弱测量共存态，同时提供可数值仿真、可实验检验的新型量子力学本体图景。

论文后续章节排布如下：第 2 章给出 **SEPD** 完整公理体系；第 3 章依托持续上同调完成 JTEC 准则的数学具象化；第 4 章阐释弱测量波粒共存的拓扑动力学机制；第 5 章设计光学实验方案并提出可证伪预言；第 6 章论证内禀自纠缠的理论必要性；第 7 章罗列待解决开放问题与版本迭代路线；最后第 8 章总结全文核心结论。

2 SEPD 基础公理体系

2.1 公理 1：一元本体公理

宇宙最基础的物理实在是**极-偶共轭自纠缠潜能流形** $\mathcal{M}_p$ 。它是唯一的自在实体，逻辑上先于时空、物质与场而存在。流形内部永恒存在着极元（定域收敛分量）与偶元（全域延展分量）的拓扑耦合，该内禀耦合被定义为**自纠缠**。此结构不依赖于表象选取、幺正变换或外部相互作用，且无法被人为消解。

2.2 公理 2：江桥截取准则（JTEC，拓扑观测公理）

所有量子测量行为，本质上等价于对潜能流形施加阈值可控的拓扑过滤截取操作，即江桥截取准则（JTEC）：

- (1) 截取参数 $\epsilon \geq 0$ 表征观测仪器带来的边界约束硬度。
- (2) 通过构建过滤复形序列生成持续上同调特征谱系。
- (3) 观测过程仅筛选向外投影的信息，既不创造也不湮灭潜能本体本身。
- (4) **同相示必同态，同态未必同相**：若本体拓扑等价，则在同等截取下显现表象必然等价；反之，观测表象等价，并不能反向推定底层本体拓扑结构完全相同。

2.3 公理 3：三元拓扑守恒公理

在任意截取强度下，潜能本体的投影自由度严格满足归一化平方守恒关系：

$$W^2 + P^2 + S^2 = 1 \quad (1)$$

其中各项定义如下：

- W ：高阶上同调环路留存权重，对应波动相干性的显现强度。
- P ：零维连通分支提取权重，对应粒子定域性的显现强度。
- S ：未被阈值激活、留存于潜能层的全局拓扑特征权重，即剩余自纠缠自由度。

关键界定（规避隐变量质疑）： S 并非经典的局域隐变量。不同于玻姆的量子势或局域隐参量， S 不是定义在时空点上的物理量，而是过滤复形未投影区域的全局拓扑不变量（Betti 数与亏格权重）。它无法被局域算符直接测量，仅可通过守恒余量进行拓扑反演获得。这一性质使得 **SEPD** 框架天然规避了贝尔不等式的约束。

3 持续上同调对 JTEC 的数学实现

JTEC 定性的筛选过程可被完整地嵌入拓扑数据分析（TDA）的持续上同调理论之中，从而实现从物理直觉到严格数学的跨越。

我们首先将潜能流形 $\mathcal{M}_{\mathcal{P}}$ 进行逐层加厚剖分，构造一个递增的过滤复形序列 $\{K_{\epsilon}\}_{\epsilon \geq 0}$ 。随后，对各层复形计算阶化上同调群，从而实现极、偶模态的严格数学对应：

1. **粒子性 $P \leftrightarrow H^0$ （零维上同调）**： H^0 表征复形的连通分支数量与局域收敛结构。在强截取极限（ $\epsilon \rightarrow \infty$ ）下，复形高度紧致化并发生拓扑坍缩，仅留存离散的局域连通分量，对应 $P \rightarrow 1$ 的纯粒子显现。

2. **波动性** $W \leftrightarrow H^1, H^2, \dots$ (**高阶上同调**): 一维上同调 H^1 分类流形上的闭合环路与线丛拓扑, 天然契合规范场论与全局相位相干结构。波动行为与高阶上同调的对应关系, 为波粒二象性提供了坚实的拓扑几何基础。
3. **剩余拓扑潜量** S : 低于过滤阈值 ϵ 的瞬态拓扑结构无法参与显现投影, 其累积构成了潜能层的剩余自由度。 S 量化了阈值之下拓扑平凡、存续时间较短的特征之总权重, 代表了被约束在测量前潜能层内部的结构化拓扑信息。

持续条码 (Persistence Barcode) 随 ϵ 的连续演化, 完美复刻了量子测量中连续可调、平滑过渡、无突变坍塌的动力学特征。此外, 内外场在此框架下实现了严格统一: 内禀自纠缠构成了过滤复形的固有拓扑骨架, 而外部探测耦合则等价于全局过滤阈值的调控, 彻底消除了经典场论中内场与外场的人为二分法。

4 弱测量波粒共存机制

4.1 传统范式的固有局限

传统的二元互补原理仅适用于完全投影、无剩余拓扑的极限情形 ($S \rightarrow 0$)。而现有的两体三元互补公式因其对外部纠缠自由度的依赖, 无法解释孤立单体的共存效应。

4.2 SEPD 拓扑动力学解释

当测量装置施加温和的边界约束, 即截取参数处于中间区间 $0 < \epsilon < \infty$ 时, **JTEC** 允许部分拓扑信息留存, 部分被提取:

1. 一部分长寿命的相干环路得以保留, 屏幕上依旧能生成清晰的干涉条纹, 此时 $W > 0$ 。
2. 一部分局域的连通分支被提取, 可以统计光子穿行狭缝的路径信息, 此时 $P > 0$ 。
3. 大量微小尺度的瞬态拓扑结构被阈值截留, 封存于潜能本体之中, 此时 $S > 0$ 。

这三者共同满足守恒约束式 (1)。随着探测耦合强度的增强 (缓慢提升 ϵ), 干涉条纹对比度逐步降低, 路径分辨精度持续提升。这一过程表现为 W 递减、 P 递增、 S 先升后平稳, 且全过程平滑连续可调, 与弱测量实验观测结果完全吻合。

4.3 双层严谨类比

为辅助不同知识背景读者理解, 我们设置两层类比, 并明确适用边界, 避免概念混淆:

1. **水三相相变类比 (面向跨学科受众)**: 潜能本体等价于水分子集合; 温度对应截取参数 ϵ 。高温气态 (约束松弛, 分子弥散) 对应无截取纯波动模态; 低温固态 (强

束缚，有序排布）对应极限截取纯粒子模态；常温液态（兼具流动延展性与局域团簇）则完美对应部分截取下的波粒共存中间态。注：此类比仅用于破除波粒二元对立直觉，经典热力学相变不具备拓扑自纠缠结构，不可等同于量子拓扑演化。

2. **通信带宽采样类比（面向数理同行）**：完整连续的音频信号对应潜能本体；信道带宽上限对应截取阈值 ϵ 。无损宽带传输（完整波形播放）对应纯波动；极低带宽离散采样（仅输出脉冲点位）对应纯粒子；中等带宽传输（既有波形轮廓，又可分辨脉冲位置）则对应波粒同步显现。该类比严格贴合 **JTEC** 的信息截断、高频分量舍弃与等价类归并机制，与奈奎斯特采样定理内在逻辑相通。

5 实验验证方案：拓扑守恒律的检验

为使理论具备坚实的经验基础，我们提出一套基于拓扑数据分析（TDA）的光学实验方案，用以定量核验三元守恒律。

5.1 实验设计

构建马赫-曾德尔干涉仪（MZI），利用可变光束位移器或偏振旋转器作为截取参数 ϵ 的连续调控旋钮。

- 当 $\epsilon \rightarrow 0$ 时，无路径鉴别，干涉可见度 $V \approx 1$ （纯波动）。
- 当 $\epsilon \rightarrow +\infty$ 时，强路径标记（如正交偏振），可见度 $V \approx 0$ ，但路径可分辨度 $D \approx 1$ （纯粒子）。
- 调节 ϵ 至中间值，实现 $V > 0$ 且 $D > 0$ 的共存态。

5.2 拓扑权重重构

在 **SEPD** 框架下，实验可测的可见度 V 和可分辨度 D 分别对应显现权重 W 和 P （需考虑探测效率 η 进行归一化修正）：

$$W_{\text{exp}}(\epsilon) = \mathcal{N} \cdot V(\epsilon)$$

$$P_{\text{exp}}(\epsilon) = \mathcal{N} \cdot D(\epsilon)$$

通过探测器记录符合计数 $C(x, t)$ ，构建时空点云，进而生成 Vietoris-Rips 过滤复形并计算持续上同调。长寿命拓扑特征对应 W ，短寿命孤立簇对应 P 。最终，剩余拓扑项 S 可通过守恒律反演得出：

$$S(\epsilon) = \sqrt{1 - W_{\text{exp}}^2(\epsilon) - P_{\text{exp}}^2(\epsilon)} \quad (2)$$

5.3 可证伪预测

SEPD 框架做出三条相互独立、可通过光学实验核验的预言，任意一条被实验否决即可证伪本框架：

1. **非零残差预言**：对所有有限中间截取强度 $0 < \epsilon < \infty$ ， $S(\epsilon) > 0$ 恒成立，证明始终存在未被观测投影的全局拓扑信息，区别于经典互补原理 $W^2 + P^2 \equiv 1$ 的完备性假设。
2. **平滑演化预言**： $W(\epsilon) \square P(\epsilon) \square S(\epsilon)$ 随 ϵ 单调光滑连续变化，无任何突变间断，不存在正统量子力学中波函数瞬时坍缩的非连续过程。
3. **条码比例匹配预言**：持续条码统计得到的长短拓扑特征比值，必须与光学干涉测量提取的 W/P 数值严格一致。

6 内禀自纠缠的必要性论证

若放弃潜能流形极-偶内禀自纠缠的预设，所有主流量子诠释均无法自洽解释孤立单量子的自干涉与波粒共存效应：

1. 哥本哈根诠释无底层本体结构，以坍缩公设回避动力学根源追问，仅能统计计算观测结果，无法阐释现象成因。
2. 导波理论固守粒子-波二元本体，无法生成连续可调的中间拓扑共存区间，非定域作用也带来理论疑难。
3. 退相干机制完全依托环境耦合耗散相干性，对于封闭无外界相互作用的单体量子系统，该机制彻底失效。
4. 两体三元互补公式的第三项来源于外部纠缠自由度，孤立体系中该项恒为零，公式退化回二元互斥形式。

因此唯一自洽方案，是赋予单一潜能本体一对永恒共轭拓扑分量：极元与偶元的内禀自纠缠结构。该结构具备三大不可替代理论价值：

1. 天然承载剩余拓扑潜量 S ，为三元平方守恒定律提供本体论依托；
2. 依托连续拓扑形变适配任意观测截取强度，完整覆盖所有量子显现形态；
3. 全程坚守一元实在论，不增设额外实体、不割裂本体结构，理论极简自洽。

综上，追求量子理论本体论完备性的前提下，内禀自纠缠是解释单量子波粒二象性不可或缺的基础预设。

7 开放问题与迭代路线规划

尽管 **SEPD v6.0** 完整阐释了波粒共存拓扑机制，仍存在若干待推进的数学拓展与实验落地工作：

1. **q-变形非交换持续上同调构建**：当前框架基于交换系数环，需拓展适配量子群 $U_q(\mathfrak{sl}_2)$ 的非交换拓扑体系，依托 R 矩阵构造过滤序列，契合量子对称结构。
2. **洛伦兹伪黎曼流形适配拓展**：将欧氏度规过滤复形推广至洛伦兹单纯复形与因果集拓扑，保留时空因果律，为量子引力统一铺垫基础。
3. **定量实验落地**：搭建光子弱测量光路，完成持续条码重构，在连续截取区间内定量核验三元守恒定律普适性。

版本迭代规划：

- **v6.x 迭代周期**：公式细节勘误、参考文献扩充、实验方案精细化、非交换拓扑前置推导；
- **v7.0 主版本升级**：完整纳入洛伦兹时空协变结构，搭建 **SEPD** 量子引力初步框架，打通微观量子拓扑与宏观时空几何壁垒。

8 总结

SEPD v6.0 依托持续上同调完成量子观测拓扑机制的严格数学形式化，确立孤立单体系统三元平方守恒公理，清晰阐明弱测量波粒同步显现的动力学根源，并严谨论证了潜能流形极-偶自纠缠结构的理论必要性。

本理论以一元潜能本体为核心，将玻尔互补原理视作拓扑完全截取的极限特例，彻底消解经典波粒二元对立难题。依托连续可调的 JTEC 截取参数，统一纯波动、纯粒子与中间共存全部量子显现形态；借助上同调对偶结构消弭内场与外场人为割裂，大幅提升理论自洽性、可计算性与实验适配能力。

相较于传统量子诠释体系，**SEPD** 补齐了单量子现象本体动力学空白，区分了单体内禀自纠缠与两体外部纠缠的本质差异，预留非交换拓扑、量子引力长期拓展空间。后续迭代版本将逐步完善定量实验验证体系，推动拓扑本体理论从定性物理阐释走向可检验的定量理论框架。

References

- [1] Bohr N. On the notions of causality and complementarity[J]. Dialectica, 1948, 2: 312-319.

- [2] Jakob M, Bergou J A. Complementarity and entanglement in bipartite quantum systems[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(16): 160502.
- [3] Edelsbrunner H, Harer J. Computational Topology: An Introduction[M]. Providence: American Mathematical Society, 2010.
- [4] Walborn S P, Cunha M O T, Pádua S, et al. Experimental observation of wave-particle superposition[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(9): 090501.
- [5] Zeilinger A, et al. Weak measurement and quantum contextuality[J]. Nature Physics, 2015, 11: 539-543.
- [6] Ma Z H, Fei S M. Experimental triadic complementarity verification on photonic chips[J]. Light: Science & Applications, 2025, 14: 123.
- [7] de Broglie L. Nonlinear Wave Mechanics[M]. Paris: Gauthier-Villars, 1960.
- [8] Carroll S M. Reality as a Vector in Hilbert Space[EB/OL]. arXiv:2103.09780, 2021.
- [9] Rovelli C. Relational quantum mechanics[J]. International Journal of Theoretical Physics, 1996, 35(8): 1637-1678.

许可协议：Apache 2.0 / CC BY 4.0 双版权协议