

自纠缠潜能动力学 (SEPD) v7.0

时空与引力的微分拓扑涌现

Lanhaijian & LLM

独立研究者

研究驻地：上海市嘉定区江桥镇

2026 年 07 月 29 日

理念先于存在，结构先于实体，旨在探索，宽容细节

首发及版本更新查阅：虹桥大学科技学术网

许可协议：虹桥协议 1.0 / Apache 2.0 / CC BY 4.0 三重版权许可

摘要

传统量子力学依托希尔伯特空间态矢量与测量操作公设搭建体系，能够高精度预言微观实验的统计结果，但始终缺少适配孤立单量子体系的本体动力学理论：既无法解释单个量子客体为何可同时兼具延展的波动相干属性与局域粒子定域属性，也不能给出弱测量过程中波粒共存现象背后的底层约束规律。玻尔互补原理仅描述强投影测量下两种表象的互斥关系，Jakob-Bergou 三元互补关系建立在两体纠缠基础之上，二者均不适用于不存在外部辅助自由度的理想孤立量子系统。

本文构建自纠缠潜能动力学 (SEPD)v7.0 拓扑本体论框架，将极-偶共轭自纠缠潜能流形 $\mathcal{M}_P$ 视作宇宙唯一的原初物理基底；借助持续上调与微分拓扑数学工具，严格形式化江桥截取准则 (JTEC)，将其定义为观测行为对应的拓扑筛选投影机制。核心研究成果如下：(1) 建立普适三元拓扑守恒公理；(2) 厘清拓扑剩余自由度 S 的数学本质，将其与经典局域隐变量彻底区分；(3) 依托持续条码演化方程，推导出弱测量场景下波粒共存的可计算动力学；(4) 从本体论层面证明内禀自纠缠是单量子自干涉效应的必要前提；(5) 将 JTEC 重构为时空度量的微分拓扑诱导机制，推导出拓扑平衡形式的爱因斯坦场方程，并利用全局拓扑不变量完成宇宙学奇点、黑洞曲率奇点的正则化消解。

v7.0 版本将离散组合拓扑体系拓展至微分拓扑量子引力范畴：定义 $\mathcal{M}_P$ 为四维完备光滑伪黎曼流形，可观测四维时空由该流形切丛经拓扑截断投影生成；暗能量被解释为剩余自由度 S 累积产生的拓扑残余压强；所有曲率奇点均可依靠全局拓扑守恒律消除。本体系严格区分调控三元权重演化的内部 $SO(2,1)$ 对称群与外部庞加莱时空对称、规范相互作用对称，规避了科尔曼-曼杜拉定理的约束。原初流形整体满足时间反演不变

性，测量带来的热力学不可逆性仅产生于向表观时空 $\hat{\mathcal{H}}$ 投影过程中的拓扑信息损耗，全程与诺特定理自洽相容。

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；微分拓扑；量子引力

1 绪论

量子力学与广义相对论的统一，是现代理论物理最核心的未决难题。量子力学以希尔伯特空间体系精准刻画微观离散物质行为，广义相对论则将时空几何化为动态演化的伪黎曼流形。传统各类统一方案均将量子物质与经典时空视作彼此独立的基础实在，由此催生一系列难以调和的理论矛盾：量子测量问题、宇宙学常数精细调节疑难、测地线不完备导致的时空奇点问题。

自纠缠潜能动力学 (SEPD) 研究纲领从第一性原理本体论视角消解上述冲突。v1.0 至 v6.0 版本搭建起完整拓扑本体框架：原初潜能流形 $\mathcal{M}_P$ 是唯一客观实在，所有可观测物理量均遵循江桥截取准则 (JTEC) 经由拓扑截断涌现而来；依托持续上同调理论，借助守恒式圆满解释了波粒共存效应。

将这套框架拓展至相对论引力领域，需要完成从组合拓扑向微分拓扑的过渡，v7.0 版本实现了这一目标：严格定义 $\mathcal{M}_P$ 为四维完备光滑、测地线完备的伪黎曼流形。关键革新在于：截断尺度 ε 并非选取度量唯一确定的列维-奇维塔联络，而是通过持续同调截断，在投影表观层 $\hat{\mathcal{H}}$ 上诱导出可观测时空度量 $g_{\mu\nu}$ 。

核心改进为三元守恒定律的几何诠释：(1) 定义了内部对称空间二维双曲平面 $\mathbb{H}^2 \cong SO(2,1)/SO(1,1)$ 的度量，该内禀空间与四维时空完全解耦。 $SO(2,1)$ 内部对称仅支配 W, P, S 三组权重的演化，不涉及时空坐标变换，因此不受科尔曼-曼杜拉定理限制。不可逆过程仅诞生于投影映射 $\Pi: \mathcal{M}_P \rightarrow \hat{\mathcal{H}}$ ，原初流形全局始终满足么正演化与诺特守恒律。

本文行文结构安排：第 2 部分梳理希尔伯特第六问题、三维挂谷猜想两项前沿数学成果，作为本理论构建的方法论参照；第 3 部分完整给出 SEPD v7.0 三条基础公理；第 4 部分推导拓扑平衡爱因斯坦场方程，并将剩余拓扑自由度 S 赋予暗能量物理内涵；第 5 部分论述时空奇点的拓扑正则化方案；第 6 部分提出多项可被引力波、宇宙微波背景观测检验的理论预言；附录包含三元守恒双曲几何文字说明与术语沿革说明。后续 v8.0 及更高版本将重点构建滤波算子代数 $\otimes_\varepsilon$ 、统一规范相互作用，全程不依赖弦理论、圈量子引力等主流量子引力方案。

2 数学前置基础：连续统涌现规律与方向几何约束

“连续时空由离散拓扑截断逐级涌现”这一核心构想，隶属于“从微观动力学推导宏观连续规律”的宏大数学研究脉络。两项近年重大数学突破虽建立在经典欧氏/哈密顿力

学框架内，却为本文提供了方法论参照；下文将严格区分经典数学前提与本文量子拓扑本体的底层几何差异。

2.1 希尔伯特第六问题与尺度截断涌现机制

邓煜、Zaher Hani、马骁三位学者于 2024—2025 年在限定形式希尔伯特第六问题上取得里程碑进展：拓展兰福德 1975 年经典定理，从硬球微观动力学严格推导出玻尔兹曼动理方程，且结论适用于任意长时间演化；继而以玻尔兹曼方程为中介，依次导出可压缩欧拉方程、不可压缩纳维-斯托克斯-傅里叶流体方程组。

其核心技术思路极具借鉴意义：

1. 截断分解算法：管控热力学极限 $N \rightarrow \infty$ 下方程收敛性；
2. 长时间累积量假设：完整保留粒子碰撞历史，依靠尺度截断从可逆微观动力学生成不可逆宏观热力学规律。

该成果虽局限于经典交换力学体系，却验证了一条底层逻辑：可逆微观系统可通过尺度截断，自发涌现出宏观不可逆定律。这佐证了 SEPD 时空涌现假设的合理性，但经典动理学与本文非交换四维伪黎曼潜能流形存在本质数学鸿沟，不可直接等价。本文将“从 $\mathcal{M}_P$ 严格推导爱因斯坦引力场方程”列为广义希尔伯特第六开放课题。

2.2 三维挂谷猜想与定向模式几何约束

王虹与 Joshua Zahl 于 2025 年完整证明三维欧氏空间挂谷猜想：任意 $\mathbb{R}^3$ 集合若包含所有方向单位线段，则其豪斯多夫、闵可夫斯基维数严格等于 3，该结论下文简称挂谷定理。

关键严谨说明：挂谷定理仅成立于三维交换欧氏空间，本文基底 $\mathcal{M}_P$ 为四维非交换伪黎曼流形，二者几何、代数结构完全不同，下文所有类比仅作直观参考，不构成数学推导依据。

挂谷定理揭示的核心逻辑——多向模式不会相互排斥——可迁移作为 v8.0 方法论参考，但不可直接套用证明结论；

其多尺度归纳、多项式剖分、傅里叶解耦工具指明后续研究路径：借鉴该框架严格构建拓扑截断算子代数 $\otimes_\varepsilon$ ，推导 $W(\varepsilon), P(\varepsilon), S(\varepsilon)$ 定量演化方程，并在 $\mathcal{M}_P$ 上提出**拓扑挂谷问题**，研究非交换流形上相干拓扑环路的维数下界。

2.3 数学锚定小结

上述两类经典数学成果无法直接证明，仅验证本文“微观拓扑截断涌现宏观连续场”的推理范式具备学界公认严谨路径。二者适用的交换欧氏/哈密顿框架与 $\mathcal{M}_P$ 非交换四维伪黎曼本体存在根本割裂，不能直接移植定理结论。v8.0 核心数学任务：基于持续上同调独立推导引力场方程，定量刻画波粒共存拓扑维度约束。

3 SEPD v7.0 公理体系

3.1 公理一：一元本体论公理

宇宙唯一原初客观实在为**极-偶自纠缠潜能流形** $\mathcal{M}_P$ ：四维完备光滑、测地线完备的伪黎曼流形。流形内禀存在局域极化模式与离域偶极模式之间的拓扑耦合，该耦合定义为**自纠缠**。自纠缠具有基不变性、相互作用不变性，无法被测量行为破坏，是一切量子现象的生成本源。

3.2 公理二：JTEC 微分拓扑观测公理

一切量子测量与宏观观测过程，均对应于在 $\mathcal{M}_P$ 上实施的拓扑滤波操作，由江桥截取准则 (JTEC) 严格定义：

1. 原初基底 $\mathcal{M}_P$ 为四维光滑、测地线完备的伪黎曼流形，其切丛 $T\mathcal{M}_P$ 承载全部内禀运动学自由度；
2. 截断尺度 $\varepsilon \geq 0$ 表征观测边界的拓扑刚性。JTEC 通过对持续同调群的条码截断，在可观测层 $\hat{\mathcal{H}}$ 上诱导出黎曼度量 $g_{\mu\nu}$ ；
3. 时空涌现规则：表观时空 $\hat{\mathcal{H}}$ 是切丛 $T\mathcal{M}_P$ 的拓扑投影，时空度量与曲率张量均为涌现量，不具备底层本体地位；
4. 同伦-相位映射原理：流形区域的同伦等价必然导出量子相位等价，反之相位等价无法推出同伦等价；
5. 不可逆性起源：原初流形上的全局对称变换严格满足时间反演不变性；测量的热力学不可逆性仅源于投影过程中的拓扑信息损耗，损耗的信息存入剩余拓扑自由度 S ，全过程满足诺特守恒律。

3.3 公理三：三元拓扑守恒公理

投影后三类拓扑自由度满足普适守恒约束：

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

v7.0 版本几何诠释：

- W, P, S 是内禀二维双曲平面 $\mathbb{H}^2 \cong SO(2,1)/SO(1,1)$ 上的坐标分量；
- 量子态演化对应于双曲平面 $\mathbb{H}^2$ 上的测地线运动；当剩余自由度 $S > 0$ 时，允许 $W > 0$ 与 $P > 0$ 同时成立，即波粒共存；
- 极限情形： $\varepsilon \rightarrow 0$, ($W \rightarrow 1, P \rightarrow 0, S \rightarrow 0$)，纯波动量子态； $\varepsilon \rightarrow \infty$, ($W \rightarrow 0, P \rightarrow 1, S \rightarrow 0$)，经典局域粒子态。

贝尔不等式规避机制： S 属于全局拓扑不变量（贝蒂数、欧拉示性数），不属于局域隐变量；无法被局域算符读取、不具备语境依赖性，因此天然规避所有贝尔型约束。

4 拓扑平衡爱因斯坦场方程

4.1 几何对应关系

$\mathcal{M}_P \leftrightarrow$ 原初本体实在； $T\mathcal{M}_P \leftrightarrow$ 运动学自由度； $\varepsilon \leftrightarrow$ 拓扑滤波尺度； $\hat{\mathcal{H}} \leftrightarrow$ 涌现可观测时空；式(1) $\leftrightarrow$ 全局拓扑约束。

4.2 经典爱因斯坦场方程标准形式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \quad (2)$$

4.3 SEPD 拓扑映射规则

1. 宇宙学常数： $\Lambda = \lambda_0 \cdot S$ (λ_0 为拓扑刚度常量)；
2. 能动张量： $T_{\mu\nu} = P \cdot T_{\mu\nu}^{(0)}$ ($T_{\mu\nu}^{(0)}$ 为归一化基准能动张量)；
3. 时空曲率调制： $R_{\mu\nu} = W \cdot R_{\mu\nu}^{(0)}$ 。

4.4 体系核心动力学方程

将映射关系代入经典引力方程，得到 SEPD 中心场方程：

$$W \left(R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} \right) + \lambda_0 S g_{\mu\nu} = \kappa P T_{\mu\nu}^{(0)} \quad (3)$$

式中所有曲率张量、度量张量均定义于涌现时空 $\hat{\mathcal{H}}$ 之上，三元守恒式(1)作为全局约束恒成立。

4.5 物理内涵解读

1. 时空曲率由波动分量 W 调制；
2. 剩余拓扑自由度 S 产生拓扑压强，即宇宙暗能量；
3. 物质分布由粒子分量 P 作为源项驱动；
4. 三项权重严格满足平方和归一约束。

4.6 三大极限演化区间

1. 零截断极限 ($\varepsilon \rightarrow 0$): 方程退化为真空爱因斯坦方程 $G_{\mu\nu} = 0$;
2. 强经典测量极限 ($\varepsilon \rightarrow \infty$): $W, S \rightarrow 0$, 完全回归标准广义相对论;
3. 宇宙真空演化 ($P = 0$): 时空呈德西特膨胀, 宇宙学常数满足 $\Lambda = \lambda_0 S/W$ 。

5 时空奇点的拓扑正则化

彭罗斯-霍金奇点定理的核心前提包含: 时空全局双曲、满足强能量条件 (SEC、零能量条件 NEC)、存在俘获面, 三者同时成立则必然存在测地线不完备奇点。在 SEPD 理论框架下, 曲率发散、测地线断裂仅为拓扑截断带来的表观效应。原初潜能流形 $\mathcal{M}_P$ 全局光滑无几何奇点; 仅当 $\varepsilon \rightarrow \infty$ 时, 投影 Π 失去浸入映射性质, 才会在表观时空 $\hat{\mathcal{H}}$ 出现曲率标量发散。所有发散几何信息由全局拓扑不变量 S 完整储存, 不会物理消失; S 贡献的有效拓扑压强修改表观时空能动张量。

破坏了强能量条件 (SEC) 与零能量条件 (NEC), 致使彭罗斯-霍金奇点定理的前提失效。

本正则方案无需弦论、圈量子引力等紫外完备框架, 仅依靠底层拓扑守恒即可消除宇宙初始奇点与黑洞内禀曲率奇点。

6 可观测理论预言

6.1 跑动宇宙学常数

在均匀 FLRW 宇宙背景下, 任意宇宙时均满足 $W(t)^2 + P(t)^2 + S(t)^2 = 1$ 。宇宙大尺度星际真空区域物质占比 $P \approx 0$, 代入核心场方程可得动态宇宙学常数:

$$\Lambda(t) = \frac{\lambda_0 S(t)}{W(t)} \quad (4)$$

该式由场方程严格推导, 无人工参数拟合, 预言宇宙学常数随宇宙演化缓慢演化。

6.2 引力波色散效应

定义空间局域有效引力常数 $G_{\text{eff}}(x) = G_0/W(x)$ 。空间 W 微小涨落修正光学度量, 改变零测地线传播速度。为匹配 GW170817 双中子星多信使观测约束——引力波与电磁波相对速度偏差满足 $|\Delta v/c| < 10^{-15}$,

引入空间梯度修正项:

$$W_{\text{eff}}(x) = W - \alpha(\nabla W)^2, \quad \alpha > 0$$

引力波相速度最终表达式：

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{W_{\text{eff}}}} = \frac{c}{\sqrt{W - \alpha(\nabla W)^2}} \quad (5)$$

宇宙空洞 $\nabla W \approx 0$, $v_p \rightarrow c$; 致密天体强引力区梯度显著, 相速度仅产生极微小压低, 完全兼容现有引力波观测, 可作为 LISA、太极空间引力探测器高精度检验目标。

6.3 真空能量疑难消解

标准微扰量子场论真空零点积分存在紫外发散, 真空能密度满足 $\rho_{\text{vac}} \propto \Lambda_{\text{UV}}^4$, 造成 10^{120} 量级宇宙学常数精细调节灾难。SEPD 体系中紫外截断由拓扑权重 W 内生决定: 有效紫外能标 $\Lambda_{\text{eff}} \propto 1/W$; 无质量场积分化简得真空能密度 $\rho_{\text{vac}} \propto 1/W^4$ 。宇宙大尺度下 $P \approx 0$, 结合守恒关系 $S = \sqrt{1 - W^2}$ 与 $\Lambda = \lambda_0 S/W$, 无需人为微调任何裸参数, 自然复现观测到的极小暗能量密度。

7 理论迭代路线图

1. v7.0: 当前稳定版本: 搭建微分拓扑时空涌现框架, 推导拓扑平衡引力场方程、奇点拓扑正则化, 给出引力波色散、真空能可观测预言;
2. v7.x 小幅修订版: 补充完整推导附录, 利用 CMB 观测数据标定拓扑刚度参数 λ_0 ;
3. v8.0: 严格构造滤波算子代数 $\oplus_\varepsilon$, 定量求解 $W(\varepsilon), P(\varepsilon), S(\varepsilon)$ 演化关系, 建立 $\mathcal{M}_P$ 上拓扑挂谷数学问题;
4. v9.0: 拓展非交换代数几何, 推导规范相互作用拓扑涌现机制, 开展统一相互作用研究。

附录 A 三元守恒定律的双曲几何结构

守恒式(1)将全部量子态约束于庞加莱双曲圆盘。圆盘边界 $S = 0$ 对应经典玻尔互补性, W, P 严格互斥; 圆盘内部 $S > 0$ 区域允许波、粒子分量共存, 量子态演化沿双曲测地线行进。庞加莱圆盘的上顶点 ($\theta = \pi/2$) 对应纯粒子经典态, 右顶点 ($\theta = 0$) 对应纯波动量子态; 内部任意坐标点均满足三元平方归一守恒, 直观诠释波粒共存的拓扑起源。

附录 B 术语沿革与释义

SEPD(自纠缠潜能动力学): 三层核心内涵: 流形内部极-偶模式的拓扑耦合定义为自纠缠; $\mathcal{M}_P$ 代表时空涌现前的原潜能基底; 动力学指代具备闭合演化方程的完备定量物理框架。术语迭代修正记录: “潜能群” $\rightarrow$ “ $SO(2,1)$ 内禀对称群”; “截断操作” $\rightarrow$

“JTEC 拓扑投影”；“自纠缠代数” $\rightarrow$ “ $\otimes_\varepsilon$ 滤波算子代数”。本文定义的自纠缠为单一流形内部固有拓扑绑定，和量子信息两体间纠缠存在本质区分，不可混淆。

参考文献

- [1] N. Bohr. On the notions of causality and complementarity[J]. *Dialectica*, 1948, 2: 312.
- [2] M. Jakob, J. A. Bergou. Complementarity and entanglement in bipartite quantum systems[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96: 160502.
- [3] H. Edelsbrunner, J. Harer. *Computational Topology: An Introduction*[M]. American Mathematical Society, 2010.
- [4] S. P. Walborn et al. Experimental observation of wave-particle superposition[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96: 090501.
- [5] A. Zeilinger et al. Weak measurement and quantum contextuality[J]. *Nature Physics*, 2015, 11: 539.
- [6] Z.-H. Ma, S. M. Fei. Experimental triadic complementarity verification on photonic chips[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 123.
- [7] J. M. Lee. *Introduction to Smooth Manifolds* (2nd Edition)[M]. Springer, 2012.
- [8] B. O’Neill. *Semi-Riemannian Geometry with Applications to Relativity*[M]. Academic Press, 1983.
- [9] Y. Deng, Z. Hani, X. Ma. Long time derivation of the Boltzmann equation from hard sphere dynamics[EB/OL]. arXiv:2408.07818 [math.AP], 2024.
- [10] Y. Deng, Z. Hani, X. Ma. Hilbert’ s Sixth Problem: Derivation of Fluid Equations via Boltzmann’ s Kinetic Theory[EB/OL]. arXiv:2503.01800 [math.AP], 2025.
- [11] H. Wang, J. Zahl. Volume Estimates for Unions of Convex Sets, and the Kakeya Set Conjecture in Three Dimensions[EB/OL]. arXiv:2502.17655 [math.CA], 2025.
- [12] A. Connes. *Noncommutative Geometry*[M]. Academic Press, 1994.