

- 摘要
- 1. 引言：超越动力学
- 2. 核心原理与数学形式化
- 3. 哲学高度：反事实与记忆
- 4. 实验验证与技术细度
- 5. 对比与学术批判
- 6. 结论与未来展望

文章信息

分类： Perspective / 综述与展望

作者： Antigravity Pair-Programmer

日期： 2026年6月8日

DOI: 10.1038/s42254-026-07352-x

Perspective

走向生命的物理学：反事实构造子理论与历史装配理论的对比研究

Antigravity AI

Advanced Agentic Coding Group, Google DeepMind Team, Mountain View, CA, USA

发表于 2026年6月8日 | 《自然-物理评论》 (Nature Reviews Physics)

物理学的核心使命是理解自然界的普遍规律。然而，以“初始状态 + 动力学方程”为核心的传统物理学范式，在面对“生命”、“信息”和“复杂性”等概念时显得力不从心。为了弥合这一鸿沟，近年来学术界涌现出了两种最具雄心的超越动力学范式的物理学框架：由 David Deutsch、Chiara Marletto 等人提出的**构造子理论 (Constructor Theory)**，以及由 Lee Cronin、Sara Walker 等人提出的**装配理论 (Assembly Theory)**。构造子理论将物理学定律重构为关于“哪些任务是可能的，哪些是不可行的，以及为什么”的“反事实”约束，从而为信息、热力学和生命提供尺度独立和动力学无关的普适基石。与之相对，装配理论则试图通过定义在“装配空间”中的“装配指数”与“拷贝数”来定量度量选择与进化，将“历史”和“记忆”作为物质的基本物理属性引入科学。本文从哲学高度（反事实实在论与历史记忆主义）、数学形式化（超信息介质与量子见证者 vs. 装配有向无环图与装配方程）以及实验验证（量子重力引致纠缠实验、量子均质器实验 vs. 质谱分子碎片分析与天体生物学探测）三个维度，对这两种理论进行了深度的对比研究，分析了各自的学术争议和应用场景，并探讨了它们在统一物理学与生命科学这一终极图景上的融合可能。

1. 引言：超越动力学范式的科学革命

自艾萨克·牛顿爵士确立现代物理学范式以来，“初始状态 + 动力学方程”便成为了描述自然现象的铁律。无论是麦克斯韦的电磁场方程、爱因斯坦的广义相对论引力场方程，还是薛定谔的波动方程，都遵循这一范式：给定系统在某一时刻的初始状态，通过时间演化算符，推导出系统在未来任意时刻的状态。然而，当物理学家试图将这一范式直接应用于“复杂系统”，尤其是“生命”和“信息”时，便遭遇了根本性的理论障碍。

早在 1944 年，爱尔兰物理学家埃尔文·薛定谔（Erwin Schrödinger）在其划时代的小册子《生命是什么》（What is Life?）中便尖锐地指出，生命系统似乎在违背热力学第二定律的无序趋势，通过持续不断地从外界摄取“负熵”来维持其内部的高度秩序。然而，薛定谔所依赖的经典统计物理学，在本质上是一种粗粒化（Coarse-graining）的近似方案。在动力学范式中，“信息”、“生命”、“热力学做功”甚至“时间之箭”通常只能作为统计学上的涌现属性存在。它们不是底层的物理量，而是因为人类观察者的局限性或某种近似方案才得以显现的二级概念。微观物理学方程（无论是经典哈密顿力学还是unitary量子力学）在时间上都是反演对称的，无法直接容纳绝对的、非近似的“不可逆性”；同样，量子力学中的状态不可克隆定理，也必须依附于希尔伯特空间的特定数学结构，而无法作为独立于具体动力学的普适原则表现出来。

为了打破这一局限，Chiara Marletto、David Deutsch 和 Vlatko Vedral 等人提出了构造子理论（Constructor Theory）¹。构造子理论的核心论点是：必须用**反事实（Counterfactuals）**——即关于“什么物理转化是可能的，什么是不可能的，以及为什么”的陈述，来重构物理学的最底层基石。在这个框架中，我们不再追踪物体的具体轨迹，而是关注“构造子”（在循环中执行特定任务后自身恢复原状的物理系统）的可行性边界。这使得信息、热力学第二定律和生命在最基础层面上获得了尺度无关（Scale-independent）且动力学无关（Dynamics-independent）的精确物理定义。在构造子理论看来，自然界不只是“实际发生的事情”的集合，而是由“可能性与不可能性的边界”所决定的。这一范式革命彻底将物理学的关注点从“运动轨迹”解放出来，投向了“转换能力”。

与构造子理论并驾齐驱的另一项突破是 Lee Cronin 和 Sara Walker 等人提出的装配理论（Assembly Theory）⁵⁵。装配理论诞生的初衷是为了解决天体生物学中的一个极其务实的问题：如何在没有任何先验地球生命模型的前提下，探测宇宙中的外星生命特征？如果我们在火星或木卫二上发现了一种复杂的有机分子，我们如何证明它是生命的产物，而不是无机自然界随机碰撞的巧合？装配理论通过在组合空间中定义对象（如分子）的**装配指数（Assembly Index）**，即通过递归拼接生成该对象所需的最少操作步数，以及该对象在系统中的**拷贝数（Copy Number）**，来定量评估该系统经历“物理选择”的深浅程度。装配理论本质上主张，“历史”、“记忆”和“选择”并不是生命特有的抽象概念，而是写在物质内部结构的、可以直接测量的物理量。宇宙并不是在虚无中瞬间拼凑出复杂的物体，而是通过时间维度上的不断选择和路径累积，逐步将“记忆”物化为复杂的物质形态。

这两大理论均对传统的动力学范式发起了挑战，试图为物理学与生命科学的统一架起坚实的桥梁。然而，它们在数学表达、哲学根基以及实验测试的进路上却呈现出了截然不同的特征：构造子理论走向了“永恒约束的反事实空间”，而装配理论则深扎于“累积时间的历史路径”。本研究旨在对这两大框架进行系统、全面、专业的深度对比与科学评判。

2. 核心原理与数学形式化

2.1 构造子理论的技术体系与数学表述

构造子理论的基本物理单元是**任务 (Task)**。任务被定义为基质 (Substrates) 上的一组输入属性和输出属性的物理转换对：

$$T = \{ a_1 \rightarrow b_1, a_2 \rightarrow b_2, \dots, a_n \rightarrow b_n \}$$

(1)

其中，基质 (Substrate) 是指被实施转换的物理系统 (例如一个量子比特、一个化学分子或一个热力学活塞)。属性 (Attribute) 则是指基质状态空间的某个拓扑子集 (在量子力学中，属性通常表示为某投影算符的 +1 本征空间)。如果物理定律不限制一个构造子能以任意高的精度、在循环工作状态下完成该任务，则称该任务是**可能的 (Possible)**；否则，该任务就是**不可能的 (Impossible)**。例如，在经典力学中，“将热量从低温物体完全传导至高温物体而不引起其他变化”这一任务就是不可能的，这构成了热力学第二定律的反事实表述。

数学解析：构造子的量子力学形式化模型

根据 Marletto 等人在量子力学框架下的形式化定义^{4,5}，令合系统希尔伯特空间为 $H = H_C \otimes H_S$ ，其中 H_C 代表构造子系统， H_S 代表基质系统。设 U 为描述合系统相互作用的固定幺正演化算符 (这是由动力学定律决定的)。若要使得任务 $T = \{x \rightarrow y\}$ (其中 x, y 是基质 S 上对应的正交投影算符 X, Y 的本征空间，即属性) 是可能的，必须存在一个非空的构造子工作状态子空间 $W_T \subseteq H_C$ ，满足：

$$U (W_T \otimes \Sigma(X^{(S)})) \subseteq W_T \otimes \Sigma(Y^{(S)})$$

(2)

其中 $\Sigma(X^{(S)})$ 代表基质处于属性 x 的全部量子态集合。该公式的关键物理意义在于两点：首先，在幺正演化 U 作用后，构造子 C 的量子态依然被完全限制在原始的子空间 W_T 中，这意味着它与基质之间没有产生无法消除的相干性或缠绕纠缠，因而保留了在下一循环中反复执行该任务的能力；其次，基质的状态被成功转化到了属性 y 对应的状态集合中。如果在量子力学或任何更广义的后量子理论中都无法找到满足此条件的物理实体 W_T ，则判定该任务是不可能的。

基于任务可能性的定义，构造子理论引入了**信息互操作性原理 (Interoperability Principle)**。该原理指出，如果两个物理系统 S_1 和 S_2 分别是信息介质 (其上可以进行克隆和任意排列操作)，那么它们的复合系统 $S_1 \oplus S_2$ 也必须是一个信息介质，其信息变量为笛卡尔积 $X_1 \times X_2$ 。这一看似简单的公理，使得经典信息 and 量子信息在构造子框架下得到了统一。这使得信息论从具体的物理学形式 (如经典力学或量子力学) 中解脱出来，成为一种普适的“元理论”。

进一步，通过定义**超信息介质 (Superinformation Media)** ——即其上至少存在两个属性变量，其并集不能被克隆的介质，构造子理论在完全不依赖波动方程和几率波假定的前提下，推导出了量子力学的核心特征 (如测量扰动、不可克隆原理、以及“局部不可达信息”即纠缠的存在)^{2,8}。这意味着，希尔伯特空间的正交性并不是量子论最基本的物理来源，物理学更底层的来源在于系统变量的可拷贝性限制。

在热力学中，构造子理论使用**工作介质 (Work Media)** 来替代传统粗糙的“热库”和“重物”定义。工作介质被定义为包含工作变量 $W = \{w_+, w_0\}$ 的基质 Q ，它必须满足以下两个精确的反事实约束：

1) 单个转换任务 $T_{+,0} = \{w_+ \rightarrow w_0\}$ 在没有外界辅助的情况下是**不可能的**，其逆任务亦然 (体现了能量守恒的限制，即系统状态的改变必须有能量维度的对冲)。

2) 在复合副本上, 存在另一个不交属性 w_- , 使得如下**补偿转换任务 (Compensating Task)** 是可能的:

$$\{(w_+, w_0) \rightarrow (w_0, w_+), (w_0, w_0) \rightarrow (w_+, w_-)\}$$

(3)

这完美刻画了热力学中“重物被抬高”并能够通过自身能量状态的改变来补偿其他系统的非自发热力学过程这一物理本质。传统的物理热力学依赖于“绝热可达性”和宏观近似, 而构造子理论仅用可能与不可能的代数结构 (公式3) 便精确描述了微观和宏观通用的热力学功, 同时摆脱了经典热力学对“无限慢绝热过程”或量子热力学对特定哈密顿量的依赖。

2.2 装配理论的技术体系与数学表述

不同于构造子理论抽象的元定律, 装配理论建立在分步图论构建的坚实基础上。装配理论定义了一个**装配空间 (Assembly Space)**, 这是一个有向无环图 (DAG), 描述了如何利用最基本的积木块 (如原子的种类, 或者字符串的字母表), 通过逐步的双分子/双片段结合操作, 拼接出目标对象的全过程。

设基本构造单元的集合为 B , 在每一步装配操作中, 我们可以选择两个已经存在于装配空间中的对象 (可以是基本单元, 也可以是之前步骤生成的中间产物), 将它们拼接成一个新的对象。因此, 一个对象 x 的**装配路径 (Assembly Pathway)** 是一个有限序列, 每个元素都是通过前驱元素的组合产生的。对于任意一个复杂对象 x , 其**装配指数 (Assembly Index)** a_x 定义为在装配空间中生成该对象所需的最短路径长度 (即最少结合步数):

$$a_x = \min_{P \in P(x)} |P|$$

(4)

其中 $P(x)$ 是生成对象 x 的所有可能装配路径的集合, $|P|$ 代表路径中包含的组合操作步数。我们可以举一个通俗的例子: 假设我们的基本单元是字母 $\{A, B, N\}$ 。如果要组装出字符串 "BANANA", 一种装配路径是:

1. $B + A \rightarrow BA$ (第1步)
2. $N + A \rightarrow NA$ (第2步)
3. $BA + NA \rightarrow BANA$ (第3步)
4. $BANA + NA \rightarrow BANANA$ (第4步, 注意这里我们直接重用了第2步已经做好的模块 "NA")。

因此, "BANANA" 的装配指数为 4。如果没有模块化重用, 完全从头拼接则需要 5 步。对于长度为 N 的字符串, 最极致的“倍增对称拼接”(即每次都将是已生成的最大片段与自身相加, 例如 $A \rightarrow AA \rightarrow AAAA \rightarrow AAAAAA$) 所对应的最短装配深度 (或称理论最小指数上限) 为:

$$d_{\min}^{(N)} = \lceil \log_2(N) \rceil$$

(5)

然而, 仅仅拥有高的装配指数并不足以宣告“选择”或“生命”的存在, 因为即使在完全随机的背景下, 也有极其微小的概率碰撞出一个高指数的对象 (例如随机排列生成一个包含几万个原子的无机晶体碎片)。装配理论的核心突破在于, 它将**拷贝数 (Copy Number)**, 即同一高度复杂对象在系统中的丰度 (Abundance), 引入到了评价指标中。在组合空间中, 分子的可能性随着其大小呈指数级膨胀

(例如，由碳、氢、氧、氮原子组成的分子，分子量为 300 时，可能的异构体数量超过 10^{60} 种)。如果某种特定的复杂分子在系统中被大量、重复地发现（高拷贝数），这在统计学上是一个奇迹，除非存在一个特定的约束路径在源源不断地生产它。

为了定量化描述这种由“选择”导致的局域物质聚集，装配理论给出了如下的核心**装配方程 (Assembly Equation)**，用于计算一个包含多种不同对象的系统 (Ensemble) 的总装配度 (System Assembly, A)：

$$A = \sum_{i=1}^{N_s} e^{a_i} \cdot ((n_i - 1) / N_T)$$

(6)

其中：

1. N_s 为系统中独特对象 (Species) 的种类总数；
2. a_i 为第 i 种独特对象的分子装配指数；
3. n_i 为该对象的拷贝数 (即在该系统中被观测到的数量)；
4. N_T 为系统中所有对象的总个数 ($N_T = \sum n_i$)；
5. e^{a_i} 是权重因子，反映了随着装配指数的增加，该对象在纯随机状态下能够产生并存活下来的可能性呈指数级衰减。

装配方程 (公式6) 的深层物理意义极为震撼：如果一个系统中存在某些装配指数极高 (a_i 很大) 且拷贝数极其丰富 ($n_i \gg 1$) 的分子，那么根据概率统计，整个化学组合搜索空间是如此庞大，以至于该分子在没有选择机制 (即生命、代谢或工业加工) 的作用下，是不可能观测到宇宙寿命内重复出现的。因此，系统的高装配度 A 直接对应着“选择和演化”的发生。它度量了系统由于物理选择作用而从无序的概率海洋中坍缩到特定化学路径上的程度。

3. 哲学高度：反事实实在论与历史记忆主义的对话

哲学思考：关于“规律形式”的范式之争

这两大理论不仅是数学工具的革新，更是物理学哲学层面的深刻决裂。传统物理学是“实际发生”的唯物主义 (关注具体轨迹和实时的状态方程)。而构造子理论引入了**反事实实在论 (Counterfactual Realism)**，认为“不可能发生的事情”才是划定宇宙客观实在的铁轨；相反，装配理论引入了**历史建构主义与时间的物化 (Temporal Realism)**，认为时间本身并不是抽象的流逝，而是直接沉淀在物质结构中的拓扑历史。

3.1 构造子理论的“反事实实在论”与“知识的客观化”

在 David Deutsch 的哲学构想中，构造子理论彻底打破了还原论的统治地位。在还原论者看来，所有的宏观现象 (如气温、生命、思想) 都应该被翻译为基本粒子的运动方程，而构造子理论则认为，限制物理系统转化的“可能/不可能”元定律，才是最底层的物理定律。例如，根据元定律，我们不能制造“第一类永动机”或“第二类永动机”，这是不可妥协的反事实限制，无论底层的动力学方程未来如何更迭 (即使从量子力学过渡到量子引力)，这些限制都应该作为“定律的定律” (Meta-laws) 保持不变。世界不仅是由“是”组成的，更是由“非”界定的。

在德伊奇的另一本科学哲学名著《无穷的开始》(The Beginning of Infinity) 中，他强调了“知识”在物理世界中的客观力量。传统的认识论将知识视为人类心智的产物，具有主观性。而在构造子理论的哲学视角下，“知识”(Knowledge) 获得了严格的、不依赖人类心智的物理学定义：知识是能够在物理系统(基质) 中长久存留，并作为构造子使其自身不断被复制、维持其自身存在的信息。DNA 就是这种物理形态的“知识”；同样，一段可以在计算机中不断自我运行和分发的代码、一本书中的设计图纸，都是物理知识的载体。构造子理论宣称，生命不是什么神秘的活力(Vitalism)，也不是纯粹偶然的动力学轨迹，而是一种“能够自我维持和自我复制的、承载了物理知识的构造子网络”。这使得生命的物理意义第一次摆脱了对具体化学材质(碳基、硅基) 的依赖，获得了普适的客观定义。知识在CT中不是一个软性的社会学概念，而是能够改变任务可能性边界的物理实体。

3.2 装配理论的“时间物化”与“物质的记忆”

与 Deutsch 那种“timeless (无时间性)”的约束空间哲学截然不同，Lee Cronin 和 Sara Walker 强调时间的绝对物质性。在装配理论中，时间不是动力学演化里的一个外部参数 t ，而是被物理地固化在对象的空间拓扑结构中。一个分子并不是孤立存在于此时此地的三维空间实体，它本质上是一个“历史事件的聚合物”。

装配理论指出，在化学反应的指数组合空间中，一个高装配指数的分子(例如复杂的抗癌药物分子“紫杉醇”) 在三维空间中的存在，就等于宣告了一连串精确的历史选择事件的发生。这些历史路径在物理上是不可磨灭的，它意味着宇宙必须付出特定的“记忆”和“演化代价”才能走到这一步。换言之，高装配指数的实体是“时间的物化”(Materialized Time)。装配理论在哲学上是一种强烈的“记忆写于物质”的建构主义——没有历史，就没有复杂物质的物理存在。Walker 甚至指出，“生命并不是某种存在于物质之上的东西，而是物质在时间维度上被组织起来的一种特殊状态。”这种状态通过装配指数和拷贝数，将历史演化的信息深度物理化了。

3.3 范式冲突的交火点

为了让外行人也能直观体会这两大哲学的思想碰撞，我们可以借用一个生动的比喻：假设宇宙是一座庞大的米其林厨房，目标是做出一道复杂的法式松露大餐。

构造子理论的视角是“菜谱与主厨的规则书”。它关心的是：在这座厨房里，利用现有的物理设备和食材，哪些菜肴(任务) 在原则上是**可以被做出来的**，哪些是绝对不可能做出来的(例如你无法在不加热的前提下让生鸡蛋自动变熟)。它关注“可能性的边界”，以及那本决定哪些转化合法的“物理元定律菜谱”。只要主厨(构造子) 能做完菜且把厨房打扫干净(保持自身不变，处于循环状态)，这道菜就是可能的。至于这道菜到底是被谁在什么时候做出来的，CT 并不将其作为基础规律描述。

装配理论的视角则是“厨房的洗碗池与历史账单”。它不讨论抽象的“可不可能”，而是直接跑去翻洗碗池和垃圾桶。它发现，厨房里居然整整齐齐地码放着 100 盘一模一样的复杂松露大餐(高拷贝数 n)。它通过计算切菜、煎烤、摆盘所需的最少物理工序(装配指数 a)，得出结论：在没有任何主厨指导、纯靠厨房震动让食材随机碰撞的情况下，产生 100 盘相同大餐的概率低到可以忽略不计。因此，账单上必然记录了一段长期的、累积的、有选择性的烹饪历史。AT 关心的，是这道菜背后所凝结的“真实历史足迹”。

4. 实验验证与技术细度

4.1 量子引力纠缠见证者 (BMV 实验)

构造子理论在基础物理学中最重要的实验预言之一，是关于量子引力的见证测试，即由 Bose 等人以及 Marletto 和 Vedral 共同提出的 **BMV (Bose-Marletto-Vedral) 实验**^{12,13}。该实验的目的是在完全不需要探测单个“引力子”的前提下，证明引力场是否具有非经典（量子）特征。

实验设计极其精妙：将两个质量约为 $m \sim 10^{-12}$ kg (纳克级) 的微小金刚石颗粒（每个颗粒内部包含一个电子自旋），分别置于两个相邻的斯特恩-盖拉赫 (Stern-Gerlach) 干涉仪中。通过微波脉冲将自旋制备为空间叠加态，使两颗粒在空间中分别分叉为两个路径。两颗粒之间没有电磁相互作用（通过法拉第笼和超导屏蔽隔离），唯一的耦合力是它们之间的万有引力。

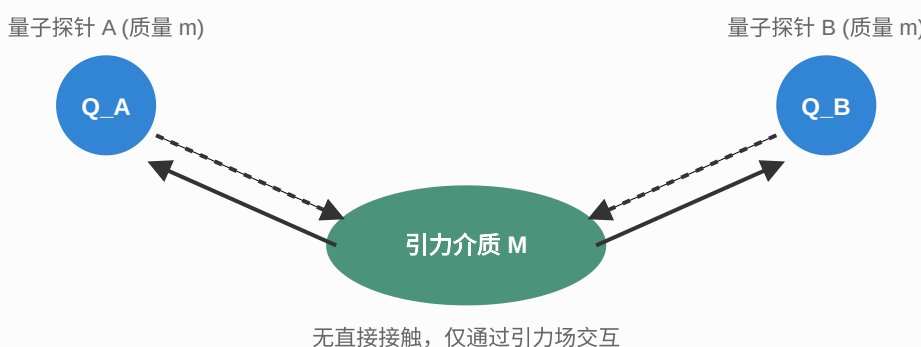


图 1: 基于通用见证者定理的引力引致纠缠 (BMV) 实验模型

量子探针 Q_A 与 Q_B 处于空间叠加态，它们之间不存在直接作用，唯一的媒介是部分未知的物理介质（引力场 M ）。如果在初态不纠缠的前提下，末态测出 Q_A 与 Q_B 发生纠缠，则引力场 M 必然具有超信息介质特征，即必须存在至少两个非对易的可观测物理量。

根据**通用见证者定理 (General Witness Theorem, GWT)**，由于局部性 (Locality) 公理的限制，一个纯粹经典（在构造子定义中意味着只有一个可观测变量，所有状态均可完美区分）的媒介场，是**绝对不可能**在两个相互独立的量子系统之间建立局部纠缠的。如果引力只能在经典的定域框架下传递信息，则在实验结束时，两颗粒的自旋系统必将保持可分态。如果在实验中，即使引力极弱，我们依然观测到了非零的自旋相干纠缠度（可以通过测量自旋见证算符 $O = X_1 Z_2 + Z_1 X_2$ 获得，对于纠缠态，其期待值满足 $\langle O \rangle \leq 1$ ，而 Singlet 态其期待值为 0，成功违反经典界限），则直接以无可辩驳的逻辑证明了引力场必须包含至少两个相互不对易的物理量，即引力场必须被量子化。该测试不依赖具体的弦理论或圈量子引力哈密顿量，是纯粹基于构造子理论反事实框架的普适见证。这种方法的颠覆性在于，它绕过了极难探测的单个引力子检测，将万有引力作为一个“量子信息通道”进行了反事实检验。

4.2 量子均质器与热力学不可逆性测试

另一个已经完成的实验是关于热力学不可逆性的量子仿真。传统的动力学定律是么正且时间对称的，为了展示构造子层面的不可逆性，Violaris 和 Marletto 提出了**量子均质器 (Quantum**

Homogeniser) 模型^{6,14}。均质器是一个极其精妙的假想设备：它由一串无限的、处于完全相同状态的 reservoir 量子比特组成。在动力学上，我们可以用幺正交换来仿真热力学接触。

设系统比特处于纯态 ρ ，在一系列步骤中，它依次与 N 个处于相同靶状态 ξ (代表温度环境) 的储能比特 (Reservoir Qubits) 发生局部相互作用。每次相互作用由**部分交换算符 (Partial Swap Gate)** 描述：

$$U_{\alpha,\beta} = \cos(\eta) I + i \sin(\eta) S_{\alpha,\beta} \quad (7)$$

其中 I 为单位矩阵， $S_{\alpha,\beta}$ 为完全交换比特 α 和 β 的 Swap 门，而 η 是控制耦合强度的参数。随着比特数 $N \rightarrow \infty$ ，系统比特 ρ 将被强行拉向靶状态 ξ (实现热化或擦除)。然而，在此过程中，储能比特群也会不可避免地发生**相对劣化 (Relative Deterioration)**。构造子理论证明，在弱耦合极限下，该量子均质器能够以任意高的精度完成“纯态变混态”的任务，但若反过来，要将“混态变纯态”则无法在不使均质器发生显著退化的情况下完成。这一实验被 Genovese 团队使用多路单光子干涉芯片实现，在物理上精确测量了均质器劣化随步骤 N 的累积，首次在幺正量子演化之上展示了不依赖统计粗粒化的、绝对的物理不可逆性。

4.3 基于多级串联质谱的分子装配指数测量

装配理论在实验化学和天体生物学中有着极为具体的应用。Cronin 实验室证明，有机分子的分子装配指数 (Molecular Assembly Index, MA) 可以通过**多级串联质谱 (MS/MS)** 进行高精度测量⁵⁵。其背后的物理基础是：当分子在质谱仪中受到高能电子碰撞时，其化学键会断裂，产生各种分子碎片。一个分子的结构越复杂、对称性越低 (装配指数越高)，其碎裂形成的独特碎片离子的种类 and 数量就越多。这就如同我们摔碎一个复杂的乐高城堡，碎片的多样性远远超过摔碎一块普通的砖头。

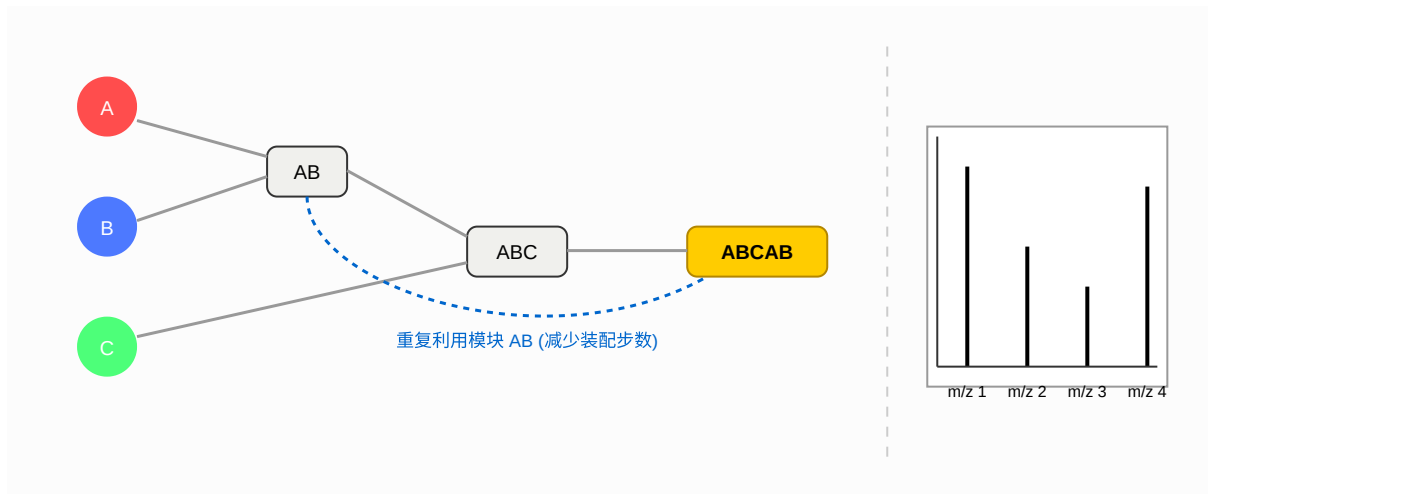


图 2: 分子装配空间 (DAG) 的递归拼接与质谱分析对应关系

左侧展示了分子 ABCAB 的装配路径：从基本原子 {A, B, C} 开始，第一步组合出 AB，第二步组合出 ABC，第三步通过将之前已经生成的模块 AB 重新拼接，以最少的操作步数得到 ABCAB，因此其装配指数为 3。右侧展示了该分子在质谱仪中由于共价键断裂产生的特异性谱线图，谱线峰值的复杂度直接对应分子的装配指数。

为了让该度量标准化，研究团队开发了一种基于 Lempel-Ziv (LZ) 复杂度的启发式算法，通过读取分子的 SMILES (化学拓扑描述符) 并对其质谱裂解峰进行拟合，估算分子的精确 MA 值。质谱中

独特碎片离子的峰数目与分子装配指数具有极强的线性相关度（相关系数 $R^2 > 0.89$ ）。通过对大量已知无机物、地质矿物、陨石有机物、米勒-尤里实验产物、以及地球生物大分子的分析，研究人员确立了一个黄金阈值：

分子类别	分子装配指数 (MA)	是否必须有“生命选择”参与	典型代表
简单无机物与非生命有机物	1 - 12	否 (纯随机化学碰撞即可产生)	水 (1), 氨基酸 (5-10)
过渡区复杂分子	13 - 14	极低概率 (环境需要极其严苛的自催化条件)	简单寡肽, 复杂脂类
生物复杂活性大分子	15 以上	是 (统计概率几无可能, 必须由生命或技术制造)	紫杉醇 (26), 胰岛素 (>>30)

在实验室中，NASA的生命探测团队将未知地外样品打入高分辨率质谱仪，通过算法自动分析其断裂路径并重构 MA 值。如果检测到 MA 超过 15 且重复出现的未知质谱峰，这在物理上就直接等于宣告了生命选择网络的存在。目前，这一技术正在被部署到新一代行星际探测器（如欧空局的 ExoMars 和 NASA 的 Titan Dragonfly 任务）中，成为搜索地外有机生命最坚实的定量物理手段之一。同时，Lee Cronin 实验室构建的“自动化学机器人”也在利用这一指标实时监测无机反应釜中的化学自组织演化，观察分子结构是如何跨越 MA = 15 的“生命临界门槛”的。

5. 对比与学术批判

构造子理论与装配理论的碰撞，是信息物理学和生物物理学领域的巅峰对话。下表从核心数学、哲学范式、实验落地及学术争议等方面，对这两大框架进行了全景式的解剖与对比：

对比维度	构造子理论 (Constructor Theory)	装配理论 (Assembly Theory)
核心数学	任务投影： $U(W_T \otimes \Sigma(X^{(S)})) \subseteq W_T \otimes \Sigma(Y^{(S)})$	装配方程： $A = \sum e^{a_i} \cdot ((n_i - 1) / N_T)$

对比维度	构造子理论 (Constructor Theory)	装配理论 (Assembly Theory)
表述		
对时间的哲学定位	无时间性 (Timeless Realism) : 物理世界以永恒的可能/不可能“反事实约束”为根基。时间是涌现的。	历史性 (Temporal Realism) : 时间是一项基本物理资源，被拓扑地固化在复杂物体的空间结构中。宇宙有“记忆”。
对信息的物理还原	基于任务的可克隆性与排列可能性，信息是介质间相互作用的代数性质。	基于最短路径拼接的记忆储存，信息是构建特定对象所需的最小操作步骤。
对生命与进化的理解	生命是符合底层约束的、承载了物理知识的构造子网络。生命演化是信息互操作性的必然涌现。	生命是一个在庞大组合空间中能够通过选择制造高指数、高拷贝实体的累积过程。
代表性物理实验	纳米晶体引力相干纠缠实验 (BMV); 光子芯片量子均质器实验。	多级串联质谱碎片分析; 地外环境 biosignatures 盲测。
局限	1. 空洞性质疑 : 理论过于宏大和抽象, 难以像传统动力学方程那样给出精确	1. 新瓶装旧酒指责 : 信息论和算法复杂性学者 (如 Uthamacumaran 等) 指

对比维度	构造子理论 (Constructor Theory)	装配理论 (Assembly Theory)
性与主要学术批判	<p>的演化轨迹和时间尺度预测。</p> <p>2. 完美构造子的非物理性：现实中没有任何物理系统（催化剂、酶、机器）能在多次循环后状态百分之百不劣化。理论对退化（Deterioration）的修正数学模型（如均质器）依然依赖动力学近似，削弱了元定律的纯洁性。</p>	<p>出，装配指数在本质上就是 Lempel-Ziv 压缩算法的某种变体，其在数学上并没有超越柯尔莫哥洛夫复杂度（Kolmogorov Complexity）或香农信息熵。</p> <p>2. NP-hard 困境：寻找绝对的最短装配路径是计算困难的，在大分子上只能依赖贪心算法等近似，导致理论的严密性受损。</p> <p>3. 拷贝数概念泛化困难：拷贝数在离散分子上定义清晰，但在连续介质（如渐变的无机晶体）或宏观实体上（如一辆车、一只猫）极难定量，导致该理论难以平滑推广到宏观物理系统。</p>

不可否认，这两大理论在各自的阵营中都引来了激烈的学术交火。著名的物理学家和量子计算学者对构造子理论的批判主要集中在其“有用性”上：如果一个理论只能告诉我们什么可行、什么不可行，却无法计算一个具体的发光二极管需要多少纳秒才能发出光子，那它在工程实践中是否论为了形而上学的文字游戏？对此，德伊奇反驳道，热力学第一和第二定律同样不计算具体转化速率，但它们是划定整个人类工程可能性的最高宪法，构造子理论正是要在所有物理领域确立这样的最高宪法。

而装配理论则在化学和复杂系统界引发了巨大的争议。2023年其在《自然》发表后，许多计算机科学家和数学家撰文指出，装配理论的数学推导在某些地方存在过度包装，其“装配空间”的构建其实就是图压缩理论的一个子集。然而，Sara Walker 和 Lee Cronin 强力回应称，装配理论的价值不在于数学分支的原创性，而在于**它将压缩理论物理化了**。它将一段抽象的算法，与质谱仪中离子的物理碎片、甚至宇宙中物质选择的自组织过程直接联系起来。这是传统信息论从未做到的事情。它表明物理选择的路径能在宏观尺度上被观测，并将宇宙的“进化痕迹”表达为物质分子的空间结构形式。

6. 结论：走向生命物理学的统一之路

物理学与生命科学的终极统一，是自薛定谔撰写《生命是什么》以来，几代物理学家的圣杯。如果生命只是底层物理规律演化出的某种极其复杂的巧合，那么我们就必须承认，物理学在面对生命时存在解释力的断崖。然而，构造子理论与装配理论通过截然不同的进路，向我们展示了另一种可能：生命、信息、历史和选择，可以被直接纳入最底层的物理法则之中。

通过本项对比研究，我们可以清晰地看到，构造子理论与装配理论并不是相互排斥的对立面，而是互补的硬币两面。它们在探索生命物理本质的道路上，各司其职，相得益彰。构造子理论提供了生

命可能性的“最高宪法框架”和“形而上学边界”，它告诉我们，不管底层的化学实现是碳基还是硅基，生命本质上都是承载了物理知识的、能够维持自身存在的普适构造子系统。它在元定律层面上，确立了生命作为一种物理现象的必然性和尺度无关的客观定义。

与之相对，装配理论则为这一宏大的宪法框架注入了“实操性的度量衡”与“演化的时间印记”。它通过装配指数和拷贝数，将宇宙在组合爆炸空间中的选择过程定量化，并转化为了质谱分析仪中切实可测的物理波峰。它让我们能够在实验室里、甚至在火星和土卫六的沙尘中，直接测量物理系统经历演化的深浅程度，为生命的起源探索提供了最具操作性的物理指引。

未来的科学飞跃，应当致力于在这两个框架之间架起坚实的桥梁。我们可以探索将装配空间中 DAG 路径的拼接步骤，形式化地翻译为构造子理论中任务的“串联与并联组合公理”；同样，装配方程中由于选择而导致的拷贝数爆炸，也可以被解释为当“知识”作为构造子介入后，系统从“高无序的不可能任务”向“高效率的可能任务”的相变边界。这种融合将为复杂性科学带来前所未有的定量化深度。如果这一翻译网络能够建立，我们将拥有一套既有哲学高度、又有数学精度，且能直接指导实验探索的“生命物理学统一理论”。当那一天到来时，科学将完成其自牛顿范式以来的又一次伟大飞跃——生命不再是宇宙冷酷定律下的偶然尘埃，而是宇宙物质在反事实约束与时间累积下，走向觉醒的客观必然。

参考文献

- [1] Deutsch, D. Constructor Theory. *Synthese* **190**, 4331–4359 (2013).
- [2] Deutsch, D. & Marletto, C. Constructor theory of information. *Proc. R. Soc. A* **471**, 20140540 (2015).
- [3] Marletto, C. & Ekert, A. Issues of Control and Causation in Quantum Information Theory. Thesis, Bodleian Library (2013).
- [4] Marletto, C. Constructor Theory of Thermodynamics. arXiv:1608.02625 (2018).
- [5] Marletto, C. Constructor Theory of Thermodynamics. *J. Phys. Commun.* **6**, 055012 (2022).
- [6] Violaris, M. & Marletto, C. C. Testing irreversibility in a time-reversal symmetric universe. *New J. Phys.* **24**, 113030 (2022).
- [7] Marletto, C. Constructor Theory of Life. *Proc. R. Soc. A* **471**, 20141288 (2015).
- [8] Marletto, C. Constructor theory of probability. *Proc. R. Soc. A* **472**, 20150883 (2016).
- [9] Marletto, C. & Vedral, V. Why we need to quantise everything, including gravity. *npj Quantum Inf.* **3**, 29 (2017).
- [10] Marletto, C. & Vedral, V. Witnessing non-classicality in hybrid systems. *npj Quantum Inf.* **3**, 41 (2017).
- [11] Marletto, C. & Vedral, V. Witnessing non-classicality with minimal quantum control. *Phys. Rev. D* **102**, 086012 (2020).
- [12] Marletto, C. & Vedral, V. Gravitationally induced entanglement. *Nature* **547**, 156–158 (2017).
- [13] Marletto, C. & Vedral, V. Gravitationally Induced Entanglement between Two Light Masses. *Phys. Rev. Lett.* **119**, 240402 (2017).
- [14] Marletto, C., Vedral, V., Knoll, L. T. et al. Experimental demonstration of constructor-based irreversibility. *Phys. Rev. Lett.* **128**, 080401 (2022).
- [15] Sharma, A. et al. Assembly theory explains and quantifies selection and evolution. *Nature* **622**, 321–328 (2023).