arXiv:2601.00168v1 [physics.hist-ph] 1 Jan 2026

从奠基到稳定化：充分性作为科学解释的判准

预印本

Jonathon SendallOU 哲学系
jonathon.sendall@ou.ac.uk

Substack 配套文章，点击此处

2026年1月9日

摘要

本文提出一种基于过程的科学解释理论，将奠基重新理解为稳定化。奠基理论能够刻画层级依赖，却缺乏判据来判断解释在模型更新、扰动和理论变迁下何时仍然充分。稳定化通过模式 $C \to P(I)$ 得到形式化定义：当解释关系在可容许变换下保留指定的关系不变量时，即为充分。由此，研究不再寻求终极基础，而是转向以可测不变性为依据的操作性充分性检验，从而化解无限倒退的疑虑，同时保留一种温和的科学实在论。相关应用展现了该理论的统一能力：理论变迁成为有关结构连续性的经验问题；量子测量成为依赖仪器的模式选择；数学的有效性体现为对变换不变描述的趋同；涌现与还原则归结为跨层级映射的稳定性。黑洞事件视界说明，本体论上相同的状态可能呈现不同的可容许演化，揭示了过程在解释上的基础地位。配套研究进一步发展了依赖仪器的充分性检验方案，包括指针基旋转和耦合谱方法，使这一框架成为可证伪的研究纲领，适用于量子、热力学和相对论领域。

关键词 科学解释 · 奠基 · 稳定化 · 不变性 · 实在论 · 本体论

1 形而上学中的奠基回归

1.1 本体论探究的力量与领域

本体论取得了非凡的成功。其核心问题“什么才是终极实在？”推动物理学实现了无与伦比的预测精度，量子电动力学（QED）的精确性便是例证（Gabrielse，2006年；Schwinger，1948年）。然而，正是这一成功揭示了它的边界。对基本奠基的执着追寻，对“这是由什么构成的？”这一问题终极答案的追求，导向的并非一个终结性的实体，而是关系的无可避免的无穷倒退。本文主张，这种无穷倒退并非失败，而是一种边界条件。它标志着解释逻辑必须转变的节点：从追问一物是什么，转向追问模式如何持续存在。这种转变并非工具性的，而是结构性的：实在被界定为那些无论如何诠释，仍持续约束结果并对其作出预测的关系。

这一无穷倒退在当代形而上学中引发了广泛争论。Fine、Schaffer 和 Raven 发展出了将奠基视为形而上学依赖的系统性理论，试图解释一个层次上的实体如何依赖于另一层次上的实体（Fine，2012年；Schaffer，2016；Raven，2015）。然而，这些理论面临一个持续存在的挑战：解释关系本身似乎也需要奠基，从而导致无限倒退或任意终止。Wilson 探讨了可规定者—规定者关系如何能够避免这一问题，但结构性困难依然存在（Wilson，2012年）。与此同时，科学哲学发展出了关于解释的有力理论——机制论的

（Craver，2007年）、结构论的（Ladyman 和 Ross，2007年；Esfeld，2021）以及基于充分性的理论（Frigg 和 Votsis，2021）——这些理论无需诉诸终极的形而上学基础即可运作。然而，这些进路缺乏一个统一的判准，无法说明解释关系本身何时能够在科学实践中保持稳定。

Skiles 和 Trogdon 最近的研究指出，解释无法有效地指导奠基，因为解释关系涉及主体，而奠基则完全客观（Skiles 和 Trogdon，2021）。他们的分离主义立场保留了实在论，却牺牲了方法论上的抓手。本文提出的框架与这一观点相辅相成：它以形式化的充分性判准取代解释指导模型，从而在不承诺“世界性”形而上学的前提下保留实在论。从这个意义上说，稳定化图式是对他们批判的延伸，而非反对；它为这一分离主义洞见提供了科学上的延续，在解释与奠基能够通过经验重新建立联系之处，给出操作性充分性检验。本文提出以稳定化作为统一判准。我们不再追问什么为结构奠基，而是转而追问结构何时稳定：在什么条件下，关系模式能够经受扰动、干预和模型精细化而持续存在？这一转变将奠基从一种形而上学依赖关系转化为操作性充分性检验；该检验既保留实在论，又消解了无穷倒退。

本体论取得成功的方法是递归分解。面对复杂性时，它会追问：这是由什么构成的？一块岩石可以分解为矿物，矿物又可以分解为分子、原子，继而分解为量子场，每一层都揭示出更深层的组成部分。当然，这种还原方法并非毫无复杂性。涌现等现象表明，高层级属性并不总能直接从其组成部分推导出来（Anderson，1972）。尽管如此，这一探究链条仍不断揭示更深层的组成部分、定律与关系。

区分这一本体论研究与认识论至关重要。认识论关乎我们如何认识，而本体论关乎有什么东西可供认识。尽管在实践中，我们的认知方法与关于何物存在的主张紧密交织，但保持这一概念区别对于厘清问题至关重要。科学之所以成功，源于它能够构建一些模型，这些模型的表现仿佛捕捉到了实在；其关键在于，它们明确描述了稳定的关系模式，能够可靠地产生可测量的结果。以 H_2O 的关系几何为例：其组成原子之间精确的角度和键长，造就了水可预测的宏观属性。我们的模型并未揭示终极的微观组成部分，也没有揭示某种最终且不可分割的基底，而是识别出这些不变量结构。认识到这一区别，日后将被证明至关重要。

由“这背后是什么？”这一持续追问所推动的本体论倒退，并非缺陷，而是推动发现的系统性引擎。拒绝停止这项探究，已带来诸多深刻进展。这项研究之所以行之有效，恰恰是因为它没有预设终点，能够在每一步产出更精细、可检验且具有预测性的结构。

然而，推动此类成功的同一过程，也可能揭示其局限。其力量在于描绘可识别实体之间的内在关系；只要分解和测量仍有意义，这种方法便能奏效。这种方法预设了一个由稳定、彼此独立的对象构成的世界，但这一前提并非总能成立。要理解本体论的真正领域，我们必须指出这种方法在哪些地方无法解释自身基础，例如在个体性变得模糊的量子系统中。以下各节将追溯这条边界。

本文分为五节。第一节确立奠基回归，并追溯本体论在空间、时间和框架条件处的边界。第二节以充分性取代奠基，引入形式模式$C \to P(I)$，并展示该模式在物理系统和常规系统中的运作。第三节将稳定化阐释为通过反馈实现的递归相干性，并以黑洞事件视界为典型案例，说明过程如何决定本体论。第四节展示充分性在理论变迁、量子测量、数学有效性、自然定律和涌现方面所带来的解释性收益。第五节回应五项核心异议，包括循环论证、工具主义和显象问题。结论综合阐述这一框架对科学解释与实在论的意义。

1.2 描述的边界：空间

设想两个相距一米的电子。本体论可以明确它们可测量的属性：质量、电荷、位置以及它们之间的距离。它可以预测它们之间的电磁相互作用。然而，它们之间的空间由什么构成？距离是一种数值关系，而场则是另一种实体。两者都没有告诉我们空间本身是什么。

已有的答案遵循一种熟悉的模式：将空间视为空无一物，难以解释量子真空涨落（Casimir，1948年；Milonni，1994年）；将空间视为实体的观点已被狭义相对论排除（Earman 和 Norton，1987年；Friedman，1983年）；将空间视为几何结构（广义相对论的度量）则只能描述关系，却无法为空间奠基。每一种界定都诉诸更多关系，而非最终的基底。

空间无法在本体论上获得奠基，因为若不参照关系，就无法对其加以规定。这并非探究的失败，而是边界的标志。空间的存在并未被否定；无法实现奠基的，是空间本身。

同一边界在每个尺度上都会显现。电子在经典力学中是一个点，在量子力学中则成为离域的波函数，继而在量子场论中成为电子场的激发（Zee，2010），再进一步成为传播子中的重整化极点，其属性取决于相互作用尺度。在每个层次上，描述都以关系不变量取代实体。然而，空间结构仍是预设的：场需要时空，而波函数也具有空间支撑。空间是描述所必需的，却始终无法获得奠基。

1.3 时间

当我们考察时间时，这个谜题变得更加深奥。物理学基本方程——已知的例外是弱相互作用（Christenson 等，1964年）——关于时间反演是对称的。这些核心定律中没有任何内容将过去与未来区分开来。如果我们反转时间参数（在量子力学中应用正确的反幺正算符（Wigner，1932年；Sakurai 和 Napolitano，2017年）），方程仍保持其形式。绕恒星运行的行星，或量子态的演化，在时间上正向或反向进行时，其运作方式完全相同。

然而，我们的经验以及每一种宏观现象都呈现出强烈的不对称性。我们记得过去，而不是未来；鸡蛋会破碎，却从不会自发地重新组合；熵通常会增加。时间之箭在本体论中从何处出现？如果我们在一个类空曲面上完整描述一个系统，包括每一个场值和每一个量子态，那么该描述中没有任何内容规定时间方向。不对称性源于边界条件，例如宇宙的低熵初始态（Penrose，1989年；Carroll，2010年），而非源于内在属性。熵的增加之所以定义了时间之箭，只是因为“增加”一词预先假定了时间方向。我们描述了一种不对称性，但尚未为其奠基。

如果本体论只捕捉静态构型，而不对称性关乎变换，那么时间指向性便不属于本体论的领域。本体论要么必须扩展自身以纳入过程结构，从而成为一种不同类型的描述；要么必须承认这一局限。本框架将选择前一条路径。

1.4 跨领域的结构依赖性

同样的模式也出现在其他地方。处于叠加态的电子，其自旋向上和自旋向下分量由希尔伯特空间中的正交态加以区别。这一区别是关系性的，由内积和算符代数定义（von Neumann，1932；Haag，1996），而非空间性的。本体论预设了这一数学结构，却无法为其奠基。同样，液-气界面并非实体，而是使自由能泛函最小化的梯度。边界与它所分隔的相共同涌现。本体论可以指明这些相和界面，但区分本身的功能，即对比得以呈现的方式，是关系性的，并非一个额外的实体。

一种模式贯穿这些观测。空间、时间、量子态区别以及物理边界，都构成进行本体论描述的先决条件，但本体论无法为它们奠基。每一条科学陈述都预设了自身无法解释的关系框架。本体论描述实体之间的关系，但关系结构本身仍处于其解释范围之外。

这种模式——成功描述关系，却无法为框架奠基——并不局限于空间和时间结构。唯物主义和唯心主义尽管起点相反，最终却殊途同归。二者都诉诸定律或范畴等关系结构，却无法在自身的本体论承诺之内为这些结构奠基。其他地方已对这种对称性作了详细论述，但其含义显而易见。问题不在于选择正确的本体论设定，而在于探究方式本身。奠基问题在一个领域内富有成效，但在框架层面却会引发无限倒退。这并非表明失败，而是标示出一个边界：在此处，解释逻辑必须改变。

这种对称性揭示，问题不在于任何特定的本体论设定，而在于探究方式本身，因为奠基问题会在框架层面引发无限倒退。

1.5 非本体论成功案例

科学中早已有力的例子表明，无需设定新的实体，描述也能发挥真正的解释作用。这些例子表明，解释未必依赖构成性奠基。

熵度量统计多重性或不确定性（Boltzmann，1877年；Lebowitz，1993年）。它解释了自发过程的方向，并且在给定某些边界条件（如宇宙的低熵初始态）时，解释时间之矢。然而，熵并不指称任何实体；它是一种关系度量，是对构型的计数，却具有巨大的解释力。

对称性以类似的方式发挥作用。通过诺特定理（Noether，1918年；Olver，1993年；Butterfield，2007年），连续对称性产生守恒定律：时间平移不变性带来能量守恒，而空间平移带来动量守恒。对称性不是一种事物，而是一种条件，具体而言，是定律在变换下的不变性。标准模型的对称性原理是关系约束，它们决定了可能的相互作用。信息与基底无关。比特具有物理对应物，但并不等同于其中任何一个特定的对应物。香农理论将信息视为纯粹的关系性事物，即区分构型的能力（Shannon，1948年；Cover 和 Thomas，2006年）。然而，信息受到因果约束的制约，例如不得进行超光速信号传递、幺正演化下冯·诺依曼熵守恒，以及擦除所需的热力学代价（Landauer，1961年；Berut 等，2012年）。

在熵、对称性和信息这些案例中，科学通过描述条件稳定时反复出现的事物而取得成功。这些概念并非形而上学实体，而是构成现象的形式关系。它们的成功指向一种优先考虑关系不变性、而非归因于实体的解释框架。

1.6 本体论与经验主义的相互依存

本体论对于个体化、测量和操控实体仍不可或缺。它规定了同一性与持续性的条件，使测量成为可能。然而，上文所勾勒的界限表明，本体论的成功依赖于某种它自身无法提供的东西：与经验约束的接触。要清楚地看到这一点，可以考察本体论与经验主义分离时会发生什么。

脱离经验主义的本体论会失去与显现的联系。它会变成一种关于连贯描述之模态约束的逻辑，关注的不是经验到什么，而是什么必须存在才能使经验成为可能。在这种形式下，本体论转向反身性。它揭示自身的使能条件，即同一性、区别、持续性和规则支配的秩序。这些并非经验发现，而是任何关于存在的论述所具有的结构语法。剥离经验内容后，本体论便成为对使任何本体论陈述保持连贯的形式关系的研究。

2 结构即关系不变性

2.1 从奠基到充分性：解释逻辑的转变

第一节追溯了本体论无穷倒退的边界。奠基回归迫使我们放弃寻找最终实体，但单凭经验主义无法解释它所观察到的模式为何具有稳定性。因此，接下来的必要步骤是聚焦于稳定性本身的结构。解释必须从寻求基础转向明确持续的条件。问题不再是“什么为结构奠基？”，而是“在什么条件下结构会趋于稳定？”。解释由此成为对充分性的探究，而非对奠基的探究。

传统的解释奠基模型是垂直的，旨在寻求本体论基础。充分性模型则是关系性的。它明确指出，在何种条件下——包括一组变换和扰动——某种模式会以高于特定阈值的稳定不变性反复出现。奠基追问某物由什么构成；充分性则追问它何时以及在何种约束下重现。这并非对解释的否定，而是将其逻辑转变为一种说明模式何时以及如何成立的论述。

这一视角的转变与第一节对空间和时间的分析相呼应。空间无法得到奠基，但可以描述其关系框架。时间的不对称性无法定位于实体之中，但可以追溯其显现的过程条件。结构也可以用类似的方式来理解：它是对关系不变性的具体说明，这些不变性界定了系统稳定时哪些东西会重复出现。本体论谓词本身就是过程不变量：称某物为“岩石”或“粒子”，就是指认一种映射，它能在尺度变换或观测变换中保持形式。因此，本体论就是充分性的稳定子类，即在生成过程变化时保持不变的部分。这一逻辑已体现在熵和对称性的成功案例中。

从这个意义上说，结构是描述性的，而非本体论的。它并非虚构，因为它捕捉了支持干预并限制可能发生之事的真实规律性。但它也不是实体，因为它没有引入任何新的实体。它具体说明了哪些东西在变换中保持不变，哪些关系在变化中持续存在，以及哪些条件维持着连贯性。它的解释价值在于它对这些模式的充分性，而不在于声称它构成了世界。下文将阐释这种描述性适切性，并进一步将其形式化为一个最简模式，说明关系不变性能够构成解释的条件。

需要澄清术语。四个术语构成了这一框架。模式指在特定条件下反复出现的经验规律。结构指模式所呈现的关系形式，即其数学或逻辑组织。不变性指在变换下得以保留的属性，即在

条件变化时仍保持稳定。稳定化指通过反馈维持模式的动态过程，即系统如何再生产其使能条件。这些术语不能相互还原：模式可以呈现多种结构；结构可以体现不同的不变性；不变性需要通过稳定化才能持续存在；而稳定化会产生模式。该框架研究的是它们之间的相互依赖性，而非各自孤立的本质。

这一框架代表一种温和实在论。所谓真实，是指在既定条件和容差下，经受干预仍保持不变的事物。这并非对某种隐藏实体的主张，而是关于稳定性的主张，任何群体都可以检验。

2.2 关系不变性的例证：物理学与数学

关系不变性最精确的例子见于物理学。狭义相对论指出，所有惯性观察者所见的物理定律都相同（爱因斯坦，1905）。这一原理，即洛伦兹不变性，并非一种实体，而是一种变换属性：这些定律在洛伦兹变换下保持其形式。不变量是时空间隔

$$s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2\Delta t^2,$$

它在不同参考系中保持恒定（泰勒与惠勒，1992）。这不是一种约定，而是描述惯性现象时必须满足的连贯性条件。

规范对称性揭示了类似的结构。在电磁学中，局部重新定义势 A_μ 不会改变可观测场强 $F_{\mu\nu}$。这种局域不变性决定了电磁相互作用的结构。对于未破缺的 U(1) 对称性，它会约束相互作用的形式，要求存在一个无质量的 U(1) 规范玻色子（Peskin 和 Schroeder，1995）。相关的全局对称性通过诺特定理确保电荷守恒。不变性并非一种事物，而是一种关系约束，它规定了哪些构型能够稳定下来。

这些物理学实例展示了基本定律中的关系不变性。不过，这种模式的适用范围更广，也包括常规系统；它们无需承诺任何形而上学立场，也能说明其逻辑结构。

数学将这种描述性作用推广开来。数学对象是由公理定义的关系结构。拓扑学研究连续形变下的不变性，而群论研究复合下的不变性。该陈述$2 + 2 = 4$ 所谈的并非实体，而是公理结构内部操作的不变性。

数学之所以成功，并非因为它触及了某个隐秘领域，而是因为世界稳定形成了与这些不变性相对应的模式。维格纳关于数学为何如此有效的疑问，由此得到了重新阐释。数学和物理学都在对称性、局域性等约束之下观察模式的反复出现。数学提供了描述不变性的一般语言，而物理学则确定了这类不变性能够在经验上成立的特定条件。

2.3 关系充分性与实在

充分性不同于工具主义：它将实在界定为稳定化不变性，而非实体。当某种结构的不变量在允许的扰动下、于明示的容差范围内反复出现，能够实现可靠干预、支持反事实主张，并在独立实验室和仪器之间呈现趋同，该结构便可被视为真实。当不存在任何能够实际实现的进一步扰动族，可以降低预测误差或增强控制时，解释便告终止。

对竞争模型的排序，依据的是其不变量能够在多大范围的变换下保持不变，同时又能在容差 ε 范围内维持干预预算。这种做法将实在论视为可测量的反复出现，而非层级依赖或可观测量的纯粹性。“有用”与“真实”之间的二分由此消解，因为真实的东西，恰恰是在语境扩展下经受风险检验、可供检验的不变性，并由此保持稳定的东西。如果提出的不变量未能经受允许的扰动，或者独立实验室对同一不变量得出了相互分歧的 ε 界限，那么该框架就被证伪。

2.4 充分性判准的形式定义

本节的见解可以简洁地表述如下：结构描述关系不变性；不变性规定了在变换过程中持续存在的内容，而充分性则衡量描述对稳定化条件的追踪程度。这种关系可以示意性地写作：

$$C \to P(I).$$

此处， C 表示描述适用的典型且必要的条件， P 表示关系模式， I 表示持续存在的不变性。该模式表述为：在条件 C下，模式 P 以不变性 I反复出现。当不变量 I 在该领域内、即使在简单干预下仍保持在规定的容差范围内时，该描述便具有充分性。若不变量在领域 C内偏离该容差范围，则充分性不成立。

基础框架。 目的。确立充分性的公开规则。

对象。

- C：作为一组操作的实验和情境条件。
- P：在 C 条件下将数据映射为候选陈述的描述程序。
- I：在 C条件下从 P 中提取的不变量。
- F：扰动 C 并重新运行 P 以探测稳定性的更新算子。
- ε：为可接受偏差预先注册的容差界。

程序。

1. 将 C 具体规定为干预和背景设定。2. 在 C 下运行 P 以获得 I_0。3. 将 F 应用于 C 以生成 C_1，然后重新运行 P 以获得 I_1。4. 迭代： $C_{n+1} = F$（C_n）、 $I_{n+1} = P$（C_{n+1}）。5. 使用声明的度量计算 $\Delta_n = \mathrm{dist}$（I_{n+1}， I_n）。

充分 性规则。如果对于所声明干预族中的所有 n、 $\Delta_n \le \varepsilon$，则一个描述是充分的 .

报告。陈述 C， P， F， ε、 Δ的度量，以及完整的干预族。列出失效情形和边界情形。

迭代 $C_{n+1} = F(C_n)$、 $I_{n+1} = P(C_{n+1})$及其收敛性 $\|I_{n+1} - I_n\| \le \varepsilon$，可以在标准数学框架（例如算子代数处理）中得到完全严谨的论证。对于量子测量， F会成为可观测代数上的可容许性门槛，其容差界由登记下限固定；对于时空物理，它则将高维编码投影建模为具有领域特定范数阈值的投影。上文的规范对称性示例（$\varepsilon = 0$）代表不变性精确成立的极限情形。配套论文将详细阐述相关规程并提供审计实例，包括干涉图样偏移、实验室间的输运预算，以及热力学一致性测试。

这种表述改变了解释的重心。它不试图探究结构是什么，而是具体说明结构何时以及如何成立。以洛伦兹不变性为例， C 对应于曲率可忽略的惯性参考系， P对应于在这些参考系中表述的物理定律，而 I 对应于定律在 boost 和旋转下的不变性。在国际象棋中， C 对应于有效对弈的条件， P对应于棋子的走法，而 I 对应于界定合法性的模式。

一个具体示例是电磁学中的规范对称性。我们明确条件 C：平直时空中存在孤立电荷的电磁现象。描述程序 P 将场构型映射为可观测量，例如电荷、电流和场强。在局部 U(1) 规范变换下（对任意标量 χ 重新定义势 $A_\mu \to A_\mu + \partial_\mu \chi$），不变量 I 是场强张量 $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$，它保持不变。

我们可以通过修改规范（在局部旋转相位），然后重新计算可观测量，来应用更新算子 F。在所有规范选择下，场强 $F_{\mu\nu}$ 都保持完全一致。这里的容差 ε 为零，表明这是一种精确不变性，而非近似不变性。我们可以遍历所有可能的局部相位旋转，而可观测的物理学始终保持不变。

充分性成立，因为

$$\Delta_n = \left\| F_{\mu\nu}(\text{gauge}_1) - F_{\mu\nu}(\text{gauge}_2) \right\| = 0$$

对所有规范都成立。这种不变性并非约定，而是一项发现。麦克斯韦方程组保持形式不变（Jackson，1999），电荷守恒（依据诺特定理），光子没有质量（这是 U(1) 对称性未破缺的结果）。该模式描述了规范对称性如何发挥描述作用，明确指出哪些内容保持不变（场强、守恒定律），而哪些内容（规范势）则可自由改变。

这种模式之所以重要，是因为它使结构在操作层面上变得精确，而无需预设本体论。它界定的是结构如何运作，而非结构是什么。描述一种结构，就是明确关系模式在何种条件下会稳定化并呈现不变属性。这是一种不同层面的精确：它以条件取代实体，以稳定化取代奠基。这种模式并非形式主义。它并不否认结构对应着世界的真实特征；它只主张，结构的实在性在于反复出现，而非实体。反复出现的模式并非由描述凭空创造；描述所捕捉的是其稳定性。无需任何隐藏的基底，这些关系也能成立。描述其连贯性是理论的工作，而测量其稳定性则是经验主义的工作。将其中任何一者与奠基混为一谈，正是本体论长期以来反复犯下的核心错误。

容差 ε 在操作层面上受仪器限制和领域阈值的制约，并随着测量改进而在独立观察者之间趋于一致。度量的选择因领域而异。完整的数学推导将留待后续工作。

3 无实体的稳定化

3.1 稳定化与依赖性：一个过程判据

第二节确立了结构即关系不变性，并由模式 $C \to P(I)$ 加以规定：在条件 C 下，模式 P 呈现出不变性 I。当 I 在变换过程中保持在容差 ε 之内时，描述便是充分的。由此立即产生了一个反对意见：该框架描述了模式，却没有解释模式。它规定了不变性何时成立，而没有说明不变性为何成立。解释难道不需要更多内容吗？例如因果机制、生成过程或某种潜在力量？
这一反对意见揭示了奠基直觉的持续存在。人们要求的不仅是知道模式会重复，还要知道是什么使它们重复。充分性判据在描述上似乎是成功的，但在解释上却是空洞的，因为它记录了稳定性，却没有说明稳定性为何存在。

对此的回应需要认识到，提出“是什么让模式得以持续？”这一问题，预设了一种框架已经否定的解释模型。第一节表明，奠基式探究会导致无限倒退。追问“什么奠基了条件 C？”不过是重新开启框架旨在消解的同一问题。然而，对解释的要求不能被置之不理。科学具有解释性；它不只是描述。若充分性要超越工具主义，就必须说明，在得到恰当理解时，描述本身如何构成解释。
答案在于稳定化，即模式维持自身的动态过程。解释的重心从垂直奠基（什么实体支撑着 X？）转向过程性描述（在什么递归动力学下，X 得以持续？）。这并非放弃解释，而是变换其逻辑。通过说明模式借以再生产自身使能条件的反馈关系，便能解释其持续性。

设想一个人脑横跨超大质量黑洞的事件视界。尽管该处的潮汐力微乎其微（Wald，1984），大脑却会立即经历因果解体：来自额叶（内部）的信号无法传至后部（外部）（Hawking and Ellis，1973）。维系系统统一性的反馈回路 F 被几何结构本身切断，而非被外力破坏。结果，统一“主体”的三维观念随之坍缩，因为内部协调条件失效，尽管大脑直到粒子层面都根本未变。边界标示的并非实体上的分隔，而是过程上的分隔；由于稳定化递归机制无法再闭合，系统就此解体，状态的区分依据也因此是其允许的演化，而非其局部构成（Sendall，2025）。

这是动力学自由度的一次绝对转变，它不会产生任何局部本体论标志，却会全局重构过程空间。任何局部观察者都无法探测到这一跨越，因为所有局部不变量都保持不变；然而，从全系统视角来看，可容许变换的集合已经坍缩。旅行者体验到的连续性，对于整体系统而言，却是可能演化的急剧收缩。

此类转变在本体论上的不可见性表明，发生改变的并非存在之物，而是整体构型所容许的变换。实在的基本结构在于可容许性规则，在于过程本身；本体论则是派生的，由构型所能维持的过程范围所界定。事件视界并非反常现象，而是典型例证。它剥去一切本体论干扰，揭示过程才是基础性的。两个相同状态之所以分化，并非因为它们是不同的事物，而是因为它们在可许可变换空间中占据不同的位置。
因此，事件视界迫使整个框架进行元层面的转变：本体论本身也遵循过程不变性。“黑洞”这样的本体论术语指的并非实体，而是一种几何构型，其稳定性完全由它允许和禁止的变换所界定。事物的名称归根结底是对可能发生与不可能发生之稳定化模式的命名。因此，事件视界标志着全局重构，而非局部改变；它是一个过程奇点，在其中，状态的本体论保持不变，而可能性拓扑却发生了转变。

这种过程性解释在维度投影框架中获得了数学表达：三维本体论是二维编码经完全正门 F 作用后形成的可容许映像。视界在宏观尺度上展示了这一原理：本体论是可容许性的映像，而非其奠基。进入不可容许领域的部分（对外部观察者而言，即黑洞内部）并未因此不复存在，而是脱离了可访问变换代数。“坍缩”并非动力学过程，而是定义上的变化：它是变换空间的收缩，而非实体的改变。这一模式也会在量子尺度上重现，此时测量揭示

在给定仪器结构的情况下，哪种模式会趋于稳定；在宇宙学尺度上，因果视界则会划分过程空间，却不会造成本体论上的不连续。

因此，问题不是“什么为 C 奠基？”，而是“C 如何稳定化？”。这不是关于形而上学基础的问题，而是关于操作动力学的问题。这要求解释逻辑发生第三次转变。奠基寻求垂直依赖性，充分性寻求条件性规定，而稳定化如今寻求时间维持：模式如何在变化中持续存在，跨越相关时间尺度，并处于一定的扰动阈值之内。关注点由存在转向过程，由存在什么转向模式如何延续。

必须承认仍存在一个边界。该框架解释了模式如何通过递归稳定化而持续存在，却没有解释为何最初形成的是这些特定模式，而非其他模式。为何是这些边界条件 C？为何是这些反馈算子 F？这并非回避问题，而是为了准确界定解释止于何处。传统形而上学试图寻找一个最终奠基，以解释实在为何如此而非以其他方式存在。该框架则止步于过程充分性：模式在可发现的条件下实现稳定化。初始条件和反馈结构的选择属于经验发现，而非形而上学推导。该框架展示了如何检验哪些模式能够稳定化，而非为何会有这些检验条件。

3.1.1 为什么循环论证并非恶性循环

稳定化理论会引发这样的质疑：“你用稳定化条件来解释稳定性，那么是什么使这些条件稳定？”这种质疑预设了解释必须以非循环的方式终结，而正是这一预设导致了第一节中的无限倒退。我们必须区分两种循环论证。

恶性循环论证 预设了本应证明的内容（“X 之所以存在，是因为 X 存在”）。这种形式不会产生任何预测。结构性循环论证 描述的是维持其所展示结果的过程。恒温器通过利用温度读数来控制加热，从而维持温度。它的成功是通过其在扰动下持续运行得到证明的，而非被当作前提预先假定。

有三项诊断标准可以确认，此处的循环论证具有结构性。

> 1. **经验可证伪性**。该框架会提出高风险预测，例如在可计算的耦合强度下出现干涉交叉，以及装置重新设计后指针基发生变换（详见配套研究）。恶性循环在经验上毫无效力；结构性循环则会对变换不变性提出可检验的主张。2. **公开的停止准则**。当不变量在预先指定的容差范围内 ε，在所有实践中可行的条件扩展下 C保持稳定时，解释便告完成。该准则可公开检验，受测量精度和领域阈值约束，而非由惯例规定。3. **历史验证**。物理学早已以这种方式运作。牛顿通过 $F = ma$将力与加速度联系起来，却没有将力奠基于某种形而上学基底。爱因斯坦通过自洽的场方程规定了时空动力学。每一次进步都以“在什么条件下 X 会呈现这些不变性？”取代了“ X 由什么构成？”这一问题。

存在一个证伪条件：如果拟议的不变量无法在我们无法控制的扰动下保持稳定，或者不同仪器的独立观察者所得出的 ε 界限彼此不一致，那么该框架就不成立。

质疑者追问“是什么使稳定化得以稳定？”犯了范畴错误，因为他要求垂直奠基，而这里适用的只有过程性描述。这种递归是经验性的，而非逻辑性的：当不变量无法在指定扰动下持续存在时，充分性便到此为止。这个循环是在自我检验，而非自我验证；独立实验室之间的可重复性构成对其闭合性的外部审计。如果独立实验室针对同一不变量得出的 ε界限彼此不一致，那么该框架本身就被证伪了。即使仪器设备完美无缺，仍然存在认知门槛；改进只会提高分辨率，而不会改变底层过程。

3.2 不以实体化基底为前提的稳定化

稳定化并未重新引入它所取代的基底形而上学。有人可能会担心，谈论“反馈算子”或“过程空间”，不过是将本体论负担从实体转移到动力学，同时引入隐含的法则形而上学或倾向性。该框架通过仅依据指定扰动下的反复出现来定义稳定化，避免了这一点。依此观点，存在的是相对于经验约束维持自身使能条件的模式，而非保证其反复出现的隐秘力量。

因此，稳定化的模式并非额外的实体，而是可容许变换的不动点。心脏的功能由涉及离子通道、压力梯度和神经控制的反馈回路维持；行星轨道则

由引力曲率与动量之间的平衡维持；干涉图样则由相干相位关系维持。在每种情况下，当模式的持续性能够完全依据其经受住的变换以及会破坏它的干预来界定时，解释便告终结。这不是一种形而上学的奠基，而是一种稳定性特征。除了模式的反复出现之外，并未假定任何其他事物来支撑其存在。

3.3 事件视界作为典范案例

黑洞事件视界为该框架提供了核心例证。广义相对论将视界描述为一个类光曲面，它分隔了未来指向光锥彼此分离的区域：来自内部的信号无法到达未来类光无穷远，而来自外部的信号则可以（Hawking and Ellis，1973年；Wald，1984）。对于自由下落的观察者而言，视界处并无任何特殊现象；对于足够大的黑洞，潮汐力可以任意小。然而从整体上看，当一条世界线穿越视界时，可容许变换的集合会发生不连续变化。视界标志的不是实体的变化，而是可容许性的变化。两个构型在局部层面完全相同，连微观结构也毫无差异——一个恰在视界之外，另一个恰在视界之内——却受到不同的全局约束。外部观察者的可访问观测量代数不包括内部事件；内部观察者则无法访问渐近无穷远。局域场的本体论并未改变，但过程空间——可能延续与相互作用的集合——已经重构。定义视界的，正是可容许变换的这种不连续性，而非任何局部本体论标志。因此，视界体现了稳定化的核心主张：实在的基本结构在于可容许过程，本体论则作为这些过程的稳定映像而涌现。

3.4 跨尺度的稳定化

同样的逻辑适用于不同尺度。在量子测量中，指针基的选择并非奠基于隐变量，而是奠基于仪器—环境耦合；这种耦合会在退相干作用下稳定特定的投影算符（Zurek，2003；施洛斯豪尔，2007年）。仪器设定了一个可容许性门槛：只有在容差 ε 范围内，经反复耦合仍保持不变的模式，才算作测量结果。在热力学中，平衡态是粗粒化动力学的不动点，在小扰动和再平衡过程下保持稳定；它们由稳定性而非微观复合来定义（Callen，1985）。在进化生物学中，物种边界由涉及繁殖、选择和生态约束的反馈回路维持，而非由某种内在本质决定（Mayr，1963）。

在这些领域中，解释通过识别稳定化条件而展开：哪些反馈结构在何种扰动族下维持哪些不变量。本体论——关于粒子、相、有机体或视界的论述——是对这些稳定化不变量的精简表述。这个框架并不否认这些实体的存在；它只是将它们在解释中的作用从奠基转移到稳定化。所谓这些实体是真实的，意味着与它们相关的不变量会在明确声明的干预和观测情境中，在约定的容差范围内反复出现。

4 解释性收益

第三节论证了，在框架层面，稳定化取代奠基，成为恰当的解释关系。本节概述四个领域中的收益：理论变迁、量子测量、数学的有效性以及涌现。在每种情况下，稳定化都将形而上学争论转化为有关扰动下不变性的操作性问题。

4.1 作为稳定化审计的理论变迁

传统的理论变迁论述在实在论连续性与库恩式断裂之间摇摆。结构实在论试图通过主张革命前后得以保留的是结构而非本体论，来调和二者（Worrall，1989年；Ladyman，1998年）。然而，它缺乏一个精确的判准，无法确定何种情况下结构可被视为相同。稳定化提供了这样的判准：将理论变迁视为对 C 扩展过程中不变量的审计。

以从牛顿引力到相对论引力的转变为例。许多经验模式——行星轨道、自由落体轨迹、潮汐现象——在 C 扩展到包含更高速度和更强引力场时，仍近似保持不变。当 $v \ll c$和 $|\Phi|/c^2 \ll 1$ 时，牛顿势会作为时空曲率的极限情形出现（Misner等人，1973年）。从稳定化视角来看，得到保留的并非某种形而上的引力“力”，而是运动方程和守恒定律中的一系列不变量；在 C的扩展下，这些不变量仍处于容差 ε 范围内。

因此，理论变迁成为一个经验问题：给定一个拟议的扩展 F 领域（例如扩展到更高能量、更强场或更精细的时间分辨率），哪些不变量得以保留，哪些需要修正，哪些则彻底失效？结构连续性并非先验断言，而是通过衡量不变量在此类扩展下的持续性来确定。实在论取决于这些不变量的广度和稳健性，而非声称某种特定本体论已最终得到确立。

4.2 无坍缩的量子测量

长期以来，量子测量引发了形而上学争议：究竟是否存在真实的坍缩、分支世界、隐变量，还是基本不确定性（Bell，2004；Wallace，2012）？稳定化框架避开了这些争论，将测量视为依赖仪器的模式选择。测量结果是一种模式，它在系统、仪器与环境之间反复耦合时，在声明的容差范围内保持稳定。

条件 C 编码了仪器设计、环境耦合以及读出通道的粗粒化。程序 P 将原始探测器状态映射为候选结果；不变量 I 则是经过重复测量和轻微仪器变化后仍然保持的相对频率与关联结构。退相干理论已经描述了环境诱导超选择如何选出稳健的指针态（祖雷克，2003；施洛斯豪尔，2007）。稳定化进一步提出了一项公开的充分性判据：当测量模型所预测的不变量在指定的一系列仪器变化和环境扰动下仍处于容差范围内时，该模型便是充分的。

依照这一观点，无须假定存在根本性的坍缩或分支本体论来解释结果。需要解释的是，为什么某些模式会稳定为结果，而另一些则不会。对此，可以通过说明维持指针基并在宏观层面抑制干涉项的反馈关系来作答。不同的诠释在如何从形而上学角度理解这种稳定化方面各不相同，但真正承担解释工作的，是稳定性特征本身。

4.3 数学的有效性

维格纳关于“数学的不合理有效性”的疑问是：抽象数学结构为何能如此出色地映射物理现象（Wigner，1960）。稳定化为这个问题提供了新的诠释。数学系统地探究各种抽象变换下的关系不变性。物理学则确定，在特定领域 C 和容差 ε内，哪些不变性在自然界中得以实现。

因此，这种有效性并不神秘，而是意料之中的：这两个领域所做的都是编列不变量目录。当世界稳定为实现相同不变性的模式时，数学结构便具有有效性。例如，希尔伯特空间形式体系之所以被证明有效，是因为量子现象稳定为符合线性叠加、内积结构和幺正演化的模式（von Neumann，1932；Haag，1996）。这种成功并非柏拉图式领域存在的证据，而是物理系统的稳定化特征与数学的不变性目录相匹配的结果。

这一视角也解释了为什么不同的数学框架能够描述同一现象：它们以不同形式编码了相同的不变量。在拉格朗日、哈密顿和力学的路径积分表述之间进行选择，反映的是表述同一组稳定化模式时的实用权衡，而非对不同底层实在的探索。

4.4 涌现与跨层级映射

关于涌现与还原的争论，往往取决于高层级属性是否“不过是”低层级属性，还是拥有新颖的因果能力（Anderson，1972；Kim，1999；Humphreys，2016）。稳定化聚焦于跨层级映射稳定性，从而消解了这种二分法。当某种高层级描述的不变量在 ε 范围内跨越广泛的低层级变化仍保持稳定，并且这些不变量支持在低层级难以便捷表达的干预和反事实时，该描述便是涌现的。

例如，温度和熵等热力学变量在此意义上是涌现的。尽管微观状态发生巨大变化，它们仍能保持稳定，并支持可靠的干预（例如热机）（Callen，1985）。解释的关键不在于它们是否“真实存在”，而在于其不变量在微观结构和粗粒化方案受到扰动时有多稳健。因此，涌现程度取决于稳定化的广度：高层级不变量在越广泛的微观层级扰动下仍能保持，涌现就越强。

相反，当跨层级映射足够精确，能够将高层级不变量推导为低层级动力学的极限情形或粗粒化情形，并给出量化的误差界时，还原便得以实现。该框架并不偏重任何一个方向；它研究不变量如何跨尺度传播，或为何无法传播。

5 反对意见与回应

稳定化框架容易受到几种可以预见的质疑：它是循环论证、属于工具主义、无法处理显现，或者暗中依赖它声称要取代的形而上学。本节简要回应三个核心质疑；其他质疑则在配套研究中讨论。

5.1 工具主义指控

有人可能会担心，将实在与稳定化不变性挂钩，会使实在论坍缩为工具主义。如果实在的定义是能够在干预中奏效的东西，这难道不会把本体论简化为有用性吗？本框架拒绝这种混淆。有用性是务实且依情境而定的；稳定化则指在指定扰动下跨情境反复出现，并且不取决于任何特定主体的目标。

依照这种观点，当某种结构的不变量在独立观察者、仪器和干预机制之间反复出现，且容差逐渐收敛时，这种结构便是真实的。这一要求比单纯的预测成功更严格。现象学模型可能与已有数据相符，却无法经受新的扰动；此时，它便显露出在工具层面足够适用，但在本体论上根基薄弱。真实的结构经得住这类检验：洛伦兹不变性、电荷守恒和叠加原理都经受住了日益严苛的检验（Will，2014；Jackson，1999；祖雷克，2003）。因此，实在与稳定化的约束相关，而非与便利性相关。

5.2 显现问题

另一项反对意见是，稳定化忽视了显现领域：感质、主观体验，或世界的显现图景。如果解释终止于稳定性概貌，那么体验应处于何处？该框架并不否认显现；它将显现视为神经和行为动力学中的模式，而这些模式本身可以通过稳定化加以研究。例如，知觉恒常性（颜色恒常性、形状恒常性）是在照明和视点发生变化的情况下，感觉处理所形成的稳定化模式（Noë，2004）。它们的实在性在于，这些模式在此类变化中依然保持稳健。

该框架之外的是这样一种主张：体验需要非物理基础。如果这类主张蕴含了无法由物理稳定化概貌捕捉的不变量，那么它们会产生可检验的预测；如果没有，它们就不会增加任何解释力。该框架对意识的形而上学理论保持中立，同时坚持认为，解释上的抓力取决于稳定化，而不是设定额外的实体或属性。

5.3 法则的隐蔽形而上学

最后，人们或许会怀疑，该框架暗中引入了法则或倾向的形而上学：稳定化似乎预设系统“倾向于”维持不变量。对此的回应是，倾向只是对稳定性概貌的描述性概括，而非超世界实体。在这一语境中，定律将经受最广泛扰动后仍能保持的不变量编纂起来；它们是对稳定化数据的高层压缩（Lange，2009）。这并不是说，定律独立于其所描述的模式而存在。

如果一条所谓的定律未能通过稳定化审计——如果它预测的不变量在可行扰动下被打破——那么这条定律就会被修订或舍弃。这使关于定律的论述从属于稳定化，而非相反。因此，该框架仍以经验为基础，同时提供了一种有原则的方法，依据候选定律所涵盖的不变量的广度与深度对其排序。

6 结论

稳定化图式 $C \to P(I)$ 将科学解释从奠基转向关系适切性。本体论对基础实体的传统追寻，在空间、时间和框架条件这一层面遇到了边界；在这里，无穷倒退已不可避免。稳定化接受这一边界，并以明确说明模式在何时以及如何持续存在的程序，取代对奠基基础的追寻。

在这种观点看来，实在等同于稳定化不变性：模式在经公开审计的容差范围内，经受指定扰动后，仍能再现自身的使能条件。这种温和实在论既非工具主义，也非形而上学膨胀的。它将事物的名称——粒子、视界、有机体、定律——视为对稳定性特征的简要指称，而非指向隐藏基底的标记。解释成功的衡量标准，不是本体论层级下探的深度，而是不变量在各种干预下的广度与稳健性。

事件视界案例将这一转变清晰地呈现出来：两个本体论上完全相同的局部状态，仅因其可容许演化不同而分化。解释的重心在于过程，而非实体。量子测量、理论变迁和

涌现都可视为稳定化审计的特例，而非需要终极奠基的形而上学难题。配套研究将进一步发展数学形式体系和实验方案，使这一框架能够在量子、热力学和相对论领域中得到操作化。

术语表

模式。在特定条件下反复出现的经验规律。

Str结构。模式所呈现的关系形式，包括数学或逻辑组织 n.

不变性。在一组明确界定的变换下保持稳定的属性。

稳定化。模式通过反馈维持自身并再生产其使能条件的动态过程。

条件（C）。描述适用的实验和情境设置，包括干预。

程序（P）。将 C 下的数据映射至候选描述或结果。

不变量（I）。在 C内应用 P时持续保持的性质或关系。

更新算子（F）。扰动 C 以探测 I稳定性的规则。

容差（ε）。在应用 F的过程中，针对 I 中可接受偏差的预先注册界限 .

充分性。条件是，对于声明的干预族中的所有 n， $\Delta_n = \mathrm{dist}(I_{n+1},\ I_n) \le \varepsilon$。

可容许性。属于给定稳定化特征所允许的变换或状态集合。

过程空间。在指定动力学和约束条件下，一个构型可以经历的可容许变换集合。

参考文献

Anderson, P. W.（1972年）。多即不同。《科学》，177，393–396。Bell, J. S.（2004年）。《量子力学中可说与不可说》（第2版）。剑桥：剑桥大学出版社。Bérut, A. 等（2012年）。验证联系信息与热力学的兰道尔原理的实验。《自然》，483，187–189。Boltzmann, L.（1877年）。论机械热理论第二定律与概率论之间的关系。《帝国科学院会议报告》，76，373–435。Butterfield, J.（2007年）。论对称性与守恒定律。载于 K. Brading 与 H. R. Brown（编），《物理学中的对称性：哲学思考》（第43–99页）。剑桥：剑桥大学出版社。Callen, H. B.（1985年）。《热力学与热统计学导论》（第2版）。纽约：威利。Carroll, S.（2010年）。《从永恒到此时：探索时间的终极理论》。纽约：Dutton。Casimir, H. B. G.（1948年）。论两块理想导体板之间的吸引力。《荷兰皇家科学院会刊》，51，793–795。Christenson, J. H.、Cronin, J. W.、Fitch, V. L. 与 Turlay, R.（1964年）。2π 介子衰变的证据。《物理评论快报》，13，138–140。Cover, T. M. 与 Thomas, J. A.（2006年）。《信息论基础》（第2版）。新泽西州霍博肯：威利。Craver, C. F.（2007年）。《解释大脑：神经科学的机制与镶嵌统一性》。牛津：牛津大学出版社。Earman, J. 与 Norton, J. D.（1987年）。时空实体论的代价是什么？《英国科学哲学杂志》，38，515–525。Einstein, A.（1905年）。运动物体的电动力学。《物理学年鉴》，17，891–921。Esfeld, M.（2021年）。《科学哲学：统一方法》。伦敦：劳特利奇。Fine, K.（2012年）。奠基指南。载于 F. Correia 与 B. Schnieder（编），《形而上学奠基：理解实在的结构》（第37–80页）。剑桥：剑桥大学出版社。Friedman, M.（1983年）。《时空理论基础》。普林斯顿：普林斯顿大学出版社。

Frigg, R. 与 Votsis, I.（2021年）。关于结构实在论你一直想知道却不敢问的一切。《欧洲科学哲学杂志》，11，31。Gabrielse, G.（2006年）。用囚禁带电粒子检验标准模型与 CPT。《国际质谱学杂志》，251，273–280。Haag, R.（1996年）。《局域量子物理》（第2版）。柏林：施普林格。Hawking, S. W. 与 Ellis, G. F. R.（1973年）。《时空的大尺度结构》。剑桥：剑桥大学出版社。Humphreys, P.（2016年）。《涌现：一种哲学论述》。牛津：牛津大学出版社。Jackson, J. D.（1999年）。《经典电动力学》（第3版）。纽约：威利。Kim, J.（1999年）。理解涌现。《哲学研究》，95，3–36。Ladyman, J. 与 Ross, D.（2007年）。《万物皆须消逝：自然化的形而上学》。牛津：牛津大学出版社。Ladyman, J.（1998年）。什么是结构实在论？《科学史与科学哲学研究》，29，409–424。Landauer, R.（1961年）。计算过程中的不可逆性与热量产生。《IBM研究与开发杂志》，5，183–191。Lange, M.（2009年）。《规律与立法者：科学、形而上学与自然定律》。牛津：牛津大学出版社。Lebowitz, J. L.（1993年）。玻尔兹曼熵与时间之箭。《今日物理》，46（9），32–38。Mayr, E.（1963年）。《动物物种与进化》。马萨诸塞州剑桥：哈佛大学出版社。Milonni, P. W.（1994年）。《量子真空：量子电动力学导论》。圣迭戈：学术出版社。Misner, C. W.、Thorne, K. S. 与 Wheeler, J. A.（1973年）。《引力》。旧金山：W. H. Freeman。Noë, A.（2004年）。《知觉中的行动》。马萨诸塞州剑桥：麻省理工学院出版社。Noether, E.（1918年）。不变变分问题。《哥廷根科学学会通报》，235–257。Olver, P. J.（1993年）。《李群对微分方程的应用》（第2版）。纽约：施普林格。Penrose, R.（1989年）。《皇帝新脑》。牛津：牛津大学出版社。Peskin, M. E. 与 Schroeder, D. V.（1995年）。《量子场论导论》。马萨诸塞州雷丁：艾迪生－韦斯利。Raven, M.（2015年）。奠基。《哲学指南》，10，322–333。Sakurai, J. J. 与 Napolitano, J.（2017年）。《现代量子力学》（第3版）。剑桥：剑桥大学出版社。Schaffer, J.（2016年）。因果关系映像中的奠基。《哲学研究》，173，49–100。Schlosshauer, M.（2007年）。《退相干与量子到经典的转变》。柏林：施普林格。Schwinger, J.（1948年）。论量子电动力学与电子的磁矩。《物理评论》，73，416–417。Sendall, J.（2025年）。《事件视界、时空几何与整合意识的局限》。https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.23105 Shannon, C. E.（1948年）。通信的数学理论。《贝尔系统技术杂志》，27，379–423，623–656。Skiles, A. 与 Trogdon, K.（2021年）。形而上学、认识论与解释。《牛津形而上学研究》，12，1–40。Taylor, E. F. 与 Wheeler, J. A.（1992年）。《时空物理学》（第2版）。纽约：W. H. Freeman。von Neumann, J.（1932年）。《量子力学的数学基础》。柏林：施普林格。Wald, R. M.（1984年）。《广义相对论》。芝加哥：芝加哥大学出版社。Wallace, D.（2012年）。《涌现的多重宇宙：依据埃弗雷特诠释的量子理论》。牛津：牛津大学出版社。Wigner, E. P.（1932年）。论量子力学中的时间反演运算。《哥廷根科学学会通报》，31–56。Wigner, E. P.（1960年）。数学在自然科学中的不合理有效性。《纯粹与应用数学通讯》，13，1–14。

Will, C. M.（2014年）。广义相对论与实验之间的对峙。《相对论评论》，17，4。Wilson, J. M.（2012年）。基本可确定项。《哲学家印记》，12，1–17。Worrall, J.（1989年）。结构实在论：两全其美？《辩证法》，43，99–124。Zee, A.（2010年）。《量子场论浅说 （第2版）。普林斯顿：普林斯顿大学出版社。
Zurek, W. H.（2003年）。退相干、环境诱导选择与经典的量子起源。《现代物理学评论》，75，715–775。