arXiv:2603.01440v1 [cs.DC] 2 Mar 2026

时间的语义箭头第一部分：从 Eddington 到以太网

Paul Borrill，DÆDÆLUS

02026年2月27日

为什么物理学正确理解了时间，而计算却错了

引言 1 Eddington 的遗产 2 时间对称本体论 3 时间自然主义 4 关系时间 4 不定因果序 5 范畴错误 5 莱布尼茨原则 7 语义箭头的定义 7 计算中的 FITO 假设 8 构造性替代方案 9 总结 10

这是《时间的语义箭头》五篇论文中的第一篇。该系列从物理学哲学出发，经由链路级网络，直至文件、电子邮件和人类记忆的损坏，追溯同一论证。

论证从这里开始，提出一个主张：计算的时间之箭是语义性的，而非热力学性的。事务中意义得以保留或遭到破坏的方向，并非热力学第二定律的结果，而是自香农1948年信道模型以来嵌入协议架构中的设计选择。这些选择编码了我们所说的仅向前时间（FITO）假设——即提交这样一种观点：因果关系不可逆、无环且整体单调。

我们追溯这一假设的思想脉络：从 Eddington 于 1927 年创造“时间之箭”一词，到玻尔兹曼–洛施密特争论，再到当代物理学哲学中的相关观点：Price 的时间对称本体论、Smolin 的时间自然主义、Rovelli 的关系量子力学，以及 Roberts 对时间反演对称性的分析。我们将表明，基础物理学在微观层面具有时间对称性；热力学之箭源自边界条件，而非基础定律；近期关于不定因果序的实验演示则证明，自然界允许不存在明确时间顺序的关联。

接下来，我们指出范畴错误（赖尔，1949年）：计算继承了牛顿的绝对背景时间——经由香农、Lamport 和不可能性定理——并将其编码为一种语义原语。FITO 假设并非自然法则，而是一种设计选择。认识到这一点，便能消解那些影响分布式系统理论四十年之久的表面约束。

本系列其余论文将阐述这种构造性替代方案：第二部分将对开放原子以太网链路的语义进行形式化；第三部分探讨远程直接内存访问的“完成谬误”；第四部分追溯语义损坏在文件同步、电子邮件和人类记忆中的表现；第五部分则将莱布尼茨桥作为统一框架呈现。

引言：两支箭

1927 年，Arthur Eddington 提出了一个短语，此后一个世纪的物理学与哲学都围绕它展开：

> 让我们任意画出一支箭头。如果沿着箭头前进，我们发现世界状态中的随机成分越来越多，那么这支箭头就指向未来……我将用“时间之箭”这个短语来表达时间这种单向特性，它在空间中没有对应物。 [1]

Eddington 的时间之箭是热力学的：熵增加的方向。近一个世纪以来，它一直是解释时间为何看似朝一个方向流逝的经典理论——解释我们为何记得过去而非未来，鸡蛋为何会碎却不会复原，以及宇宙为何从低熵的初始状态膨胀。

彭罗斯的魏尔曲率假说 [2]提供了一种引力层面的对应解释：初始奇点的魏尔曲率为零，而最终奇点则由魏尔曲率主导。这两种解释都将时间之箭的根源归于边界条件，而非时间不对称定律。

本文提出，存在第二种时间之箭——自香农 1948年的论文 [22]发表以来，它一直显而易见地隐藏在每个分布式系统、每种网络协议以及每种文件同步算法中。我们称之为时间的语义之箭：意义在事务中得以保留或遭到破坏的方向。

语义之箭并非热力学的。它不追踪熵，而是追踪一系列操作是否保留了数据的预期解释——文件在同步后是否仍保持一致，电子邮件抵达时是否保有完整的因果上下文，分布式事务是否原子性地提交，还是留下了破碎的状态。当语义之箭遭到违背，结果并非热寂，而是语义损坏：能够正确解析却含义有误的数据结构，强加了任何参与者都无意采用的顺序的时间戳，以及重构得看似合理却并不准确的记忆。

本系列的核心论点是：计算的时间架构嵌入了一项关于因果关系方向的特定且可证伪的假设——FITO 假设；按照赖尔 [20]的说法，这是一种范畴错误：它把一种认识论约定（消息的逻辑排序）当作本体论承诺（物理因果关系的一条定律）。其后果是，分布式系统理论花了四十年推导不可能性定理——FLP [24], 两将军问题 [25],CAP [26； 27]——但这些定理针对的是 FITO 系统，而非物理学。

*Eddington*的遗产：热力学之箭

时间的热力学之箭建立在第二定律之上：在孤立系统中，熵不会减少。这种统计规律最早由克劳修斯于1865年正式表述，并由玻尔兹曼于1872年赋予分子动力学解释，为区分过去与未来提供了唯一广受认可的物理基础。

克劳修斯：“宇宙的熵趋于最大值。”玻尔兹曼的 H 定理从理想气体的动力学推导出了熵增，但需要碰撞数假设（分子混沌假说）——这一假设本身具有时间不对称性。

然而，微观物理定律具有时间对称性。牛顿方程、麦克斯韦方程、薛定谔方程和爱因斯坦场方程在时间反演下（更准确地说，在CPT对称性 [3]下）均保持不变。因此，热力学之箭可以 ——

Roberts [3] 对物理学中的时间反演对称性作出了当代权威论述，指出相关的对称性是CPT（电荷—宇称—时间）对称性，而非单独的 T 。

并非源自基本定律本身；它必然产生于

其他事物。

标准的解答与玻尔兹曼相关，并由彭罗斯加以完善 [2], Callender [4], 等人认为，时间之箭乃是边界条件所致：宇宙始于一个熵极低的状态，而第二定律是从那个极不可能的初始状态演化离开所产生的统计结果。定律是对称的；时间之箭是涌现的。

这一点——时间之箭是涌现的，而非基本的——是我们论证的第一前提。如果热力学之箭源于初始条件，而非时间不对称定律，那么任何假定内在时间方向的系统，都是在物理学所要求之外做出额外的提交。

Callender的《时间何以特殊？》 [4]认为，时间的独特性是结构性的，而非热力学的——区别在于物理定律如何被“调谐”，以区分时间维度与空间维度。

支持时间对称本体论的理由

三十年来，休·普赖斯持续发展了最持久的哲学论证，主张认真把时间对称性当作一种本体论承诺——而不仅仅是方程的形式属性 [5; 6;7]。

Price的核心举措在《时间之箭与阿基米德点》 [5], 中得到阐明，即采取他所谓的“阿基米德视角”：一种在考察世界的时间结构时并不假定 时间不对称性的视角。由此立场出发，默认的预期是，无论我们沿时间的正向还是反向考察，宇宙看起来都应相同。任何被观察到的不对称都需要解释——它不能被简单地预设。

阿基米德视角并不是主张未来已被决定，也不是主张我们能够回溯时间。它是一条方法论原则：在考察时间不对称性是否为现象所证成之前，不要把它偷运进你的解释框架。

Price与Wharton [8] 最近将这一论证扩展到量子力学，提出量子纠缠可以被理解为时间对称因果结构的结果——具体而言，是当边界条件被施加于实验的两个时间端点时所出现的“对撞偏倚”。若此说正确，它便消解了纠缠表面上的非定域性：看似瞬时超距作用的现象，实际上是中介过程所受时间对称约束的结果。

这一论证的意义在于：如果正确的物理本体论具有时间对称性，那么任何构建出一种偏好的时间方向的系统，都是在添加自然并不需要的结构。正如我们将在第 节看到的，这恰恰是莱布尼茨原则中的不可分辨者同一适用的情形：多余的本体结构表明存在范畴错误。

Price 和 Wharton 的逆因果模型并不违反信号定域性。超光速信号传递是不可能的；这些关联源于边界条件的结构，而非超光速影响。另见《斯坦福哲学百科全书》中关于量子力学中的逆因果性的词条 [9]。

斯莫林的时间自然主义

李·斯莫林从相反的方向探讨时间之箭 [10；11]。Price 主张时间对称性，而 Smolin 主张时间是真实的——也就是说，当下时刻的相继是现实最根本的特征，比物理定律本身更加根本。斯莫林的时间自然主义提出了三项主张：

> 1. 时间是真实的。从过去到现在再到未来的推移并非幻觉，也不是粗粒化的产物。2. 自然法则会演化。它们并非永恒的柏拉图式客体，而是从宇宙的时间结构中涌现并随之变化的规律性。3. 宇宙是独一无二且因果封闭的。并不存在宇宙集合；定律必须由那一个实际存在的宇宙的历史来解释。

乍看之下，Smolin似乎与Price对立：一方坚持时间对称，另一方则坚持时间流逝的实在性。但当我们认清各自所否定的内容时，这种表面上的冲突便消解了。Price否认我们应当在没有正当理由的情况下假定 时间不对称性。Smolin否认我们应当把时间流逝消除 为一种幻觉。二者都拒斥牛顿/爱因斯坦块宇宙，在其中过去、现在与未来无时间性地共存。

块宇宙——即认为一切时间上的所有事件同等存在、时间流动只是幻觉的观点——是狭义相对论的标准诠释。Price与Smolin从不同方向论证，这种诠释引入了超出物理学所要求的形而上学包袱。

就我们的讨论而言，Smolin 的关键贡献在于提出：定律并非从外部施加的非时间性约束，而是在时间语境中获得意义的规律性。若此说成立，就意味着物理定律的语义内容 ——它意味着什么、允许什么、禁止什么——与其运作其中的时间结构密不可分。这正是语义之箭在计算层面所捕捉的直觉：事务的意义与其时间结构密不可分。

罗韦利的关系时间

卡洛·罗韦利的关系量子力学 [12] 和他的热时间假说 [13] 提供了第三种视角。对罗韦利而言，不存在观察者无关事实：量子态具有关系性，只相对于其他系统而存在。世界并非由实体构成，而是由关系与相互作用 [14]构成。

热时间假说提议，我们所经验到的时间流是源于对微观状态了解不完整。给定一个热力学状态（一个密度矩阵），“流动

时间”是由状态的模自同构生成的单参数群 [13]。不同状态会生成不同的时间流；不存在独立于观察者热力学情境的特权“真实时间”。

热时间假说在技术上定义精确：它将物理时间参数等同于 KMS 状态的 Tomita–Takesaki 模流。但它在哲学上的意义却十分激进：时间并非背景参数，而是观察者与世界之间关系的结果。

Rovelli 的框架在一个方面有力地支持了我们的论证：它表明，即使是最精密的关系物理学，也可以在没有优先时间方向的情况下运行。但它也包含一种张力，本系列第二部分将对此展开讨论：Rovelli 将时间视为从热力学粗粒化中涌现的，而计算中的时间的语义之箭则是构成性的——它是赋予事务以意义的结构。如果事务时序只是涌现出来的，那么要求原子性便没有原则性依据；如果它是构成性的，那么链路协议的设计就必须将其视为一种原始要素并予以遵循。

不定因果序

时间物理学中近期最引人注目的进展，是通过不定因果序 (不定因果序) [15]的实验证明。Oreshkov、Costa 和 Brukner [15] 于 2012年证明，量子力学允许实验室之间存在违反所有因果不等式的关联——这些关联无法用实验室操作的任何固定因果排序来解释。

“量子开关”——一种将两个量子操作的顺序置于叠加态中的装置——已通过实验实现 [16；17], 并且已证明，它能带来任何确定因果排序都无法实现的计算优势 [18]。

Rozema 等人 [16] 全面回顾了不定因果序的实验演示。Van der Lugt 等人 [17] 首次在量子开关中实现了 ICO 的设备无关认证。

Hardy 早先关于量子引力计算机的研究 [19] 已经确立了理论框架：如果广义相对论使因果结构具有动力学性，而量子力学又使动力学变量处于不确定状态，那么时空本身的因果结构就必须允许叠加态。在这种情形下进行计算，不能预先假定操作具有固定顺序——它必须相对于物理学所允许的因果结构来定义。

对于我们的论证，不定因果序确立了一个关键点：自然并不要求时间之箭在全局上保持一致。任何假定时间之箭全局一致的系统——将 FITO 编码为基本要素的系统——都作出了超出物理学所允许范围的承诺。这并不意味着因果顺序从来无法明确定义；而是说，全局确定因果序这一假设是一条额外的公理，并非已知物理学的推论。

范畴错误：从物理学到计算

Gilbert Ryle 引入了范畴错误 这一概念，用来描述一种错误：把某种逻辑类型的事实表述成仿佛它们属于

另一种逻辑类型 [20]。他著名的例子是：一位访客来到牛津，有人带他参观了学院、图书馆和运动场，随后他问道：“可是大学在哪里？”这位访客把一种集合性抽象误认为与其组成部分属于同一逻辑类型的实体。

赖尔的范畴错误近来被用于解释意识的困难问题 [21],，即有人认为，将“经验”视为一种实体而非过程，是一种范畴混淆。

我们现在主张，分布式计算犯了一个形式完全相同的范畴错误。这个错误是：

> 把消息的逻辑排序——一种用于推理系统行为的认识论约定——当作现实因果结构上的物理约束。

这一错误的演变经历了三个阶段：

阶段 *1*：香农信道（*1948*年）。香农通信数学理论 [22] 将信息传输建模为单向过程：发送方对消息进行编码，信道因噪声而使其失真，接收方再对其解码。按照构造，这一模型是 FITO——信息从发送方流向接收方，而接收方应对错误的唯一手段，就是在正向传输中加入冗余。香农研究的是一个特定的工程问题（电话传输），单向模型适用于这一目的。当这一模型从工程近似被提升为关于通信本身结构的本体论主张时，范畴错误便由此产生。

香农本人对其理论的适用范围表述得十分精确：“通信的基本问题，是在某一点准确或近似地再现另一点所选取的消息。”他并未声称所有通信都是单向的；该理论只是不对反向通信进行建模。

阶段 *2*：*Lamport* 的先发生关系（*1978*年）。Lamport 的先发生关系 [23] 使分布式系统摆脱了对同步时钟的依赖，但仍保留了一个更强的假设：事件之间的因果关系构成一个全局定义明确的有向无环图。正如配套论文 [32], 第一部分所示，这隐含了三项 FITO 承诺：时间单调性、非对称因果关系和全局因果参照。

Lamport 的第三条公理——偏序 $\rightarrow$ 与观察者无关——比狭义相对论所允许的更强。处于不同惯性参考系中的两位观察者，对类空分离事件的时间顺序并不一致。

阶段 *3*：不可能性定理（*1982—2002*年）。FLP [24] 证明了，在存在一个故障进程的异步系统中，没有任何确定性协议能够保证共识。两将军问题 [25]表明，跨越不可靠链路，无论发送多少条消息，都无法保证协调行动。CAP [26; 27] 证明，分布式系统无法同时保证一致性、可用性和分区容错性。

这些结果普遍被视为基本限制——类似于热力学定律的分布式计算定律。我们认为，它们其实是 FITO 假设的推论。它们是关于在因果关系只能向前、无环且全局单调的前提下 哪些事情不可能实现的定理。放弃这一假设，不可能性便随之消失——并非因为问题变得容易了，而是因为

设计空间得以扩展，纳入了 FITO 框架无法表达的双向、反思性以及源自相互作用的因果结构。

莱布尼茨原则的应用

莱布尼茨的不可分辨者同一原则指出，如果两个实体在所有方面都无法通过经验加以区分，那么它们就是同一的；任何将它们视为不同实体的模型都包含冗余结构。Spekkens [28] 通过他的玩具模型将这一原则应用于量子力学，表明许多“量子”现象都可以由一种辅以认知限制（知识平衡原则）的经典模型再现。由此可见：看似本体论的特征，可能只是结构过于复杂的模型所产生的认知假象。

知识平衡原则：在任何知识达到最大限度的状态下，对一个系统已知的信息量等于未知的信息量。仅凭这一约束，就能在经典框架中再现纠缠、不可克隆、隐形传态以及许多其他“量子”现象。参见 Spekkens [28]。

莱布尼茨思想脉络从莱布尼茨延伸至 Smolin（他将其称为“无冗余结构原则”），再经由 Spekkens 延续至当前论证。将其应用于分布式计算，可得：

命题 0.1（FITO 模型中的多余结构）。如果两个分布式系统状态在每个节点上都无法通过经验区分——任何参与者的观察都无法将它们区分开来——但形式模型却赋予它们不同的因果历史，那么该模型就包含多余的本体结构。

基于 FITO 的模型恰恰就是这种情况。两个因果上无关的事件（彼此都无法影响对方）仍会被向量时钟或 Lamport 时间戳赋予先后顺序。这种先后顺序并未被观察到，而是由模型推定出来的。莱布尼茨原则指出：这种推定的顺序属于多余结构。不包含这种顺序的模型——即允许无关事件之间存在不定因果序的模型——更加简约，也更忠实于物理学。

语义之箭的定义

现在，我们已经可以定义本系列的核心概念。

定义 0.2（时间的语义之箭）。时间的语义之箭是指在相互作用的过程组成的系统中，共享状态的预期解释得以保持的方向。它的定义并非基于熵增（热力学之箭）或主观体验（心理学之箭），而是基于系统的事务结构：一组承诺、确认和可逆性条件，这些因素决定状态转变会保留还是破坏意义。

语义之箭具有以下属性：

1. **它是局部的，而非全局的**。每个事务都定义了自己的语义箭头。并不要求所有箭头都指向一个

全局一致方向。

2. **它源于相互作用，而非时钟**。语义之箭由事务参与者所做的事决定——由提议、反思、提交或中止的先后顺序决定——而非由附在消息上的时间戳决定。

3. **在提交之前，它可以逆转**。与在统计意义上不可逆的热力学之箭不同，语义之箭可以逆转：试探性状态转移可以中止，使系统回到先前的语义状态。只有到了提交这一刻，不可逆性才会出现。

4. **违反它会导致语义损坏，而非热量**。当语义之箭遭到违反——例如事务只完成了一半的提交，或并发操作对共享状态产生了相互冲突的解释——结果并非自由能降低，而是意义的丧失：撕裂写、幻影消息、静默数据损坏、虚构记忆。

本系列其余论文将详细阐述这些特性。第二部分展示 Open Atomic Ethernet 链路状态机 [35] 如何在物理层实现特性（1）–（3）。第三部分展示远程直接内存访问的完成语义如何在工业规模上违反特性（2）。第四部分追溯语义之箭遭到违反后，在文件同步（iCloud [34]）、电子邮件和人类记忆中造成的后果。第五部分将这一完整框架综合为莱布尼茨桥 [37]。

计算中的 FITO 假设

在进入本系列的构造性部分之前，我们先梳理一下 FITO 假设在当代计算实践中具体有哪些表现。每一种表现都指出了一个范畴错误产生可观察后果的节点——也就是把认识论约定当作物理定律。

超时重试（*TAR*）。分布式系统中通用的故障处理机制是 TAR：如果在超时时间内未收到响应，则重试该请求。TAR 假设原始请求可能已丢失（前向故障），并且重复该请求最终会成功（前向恢复）。它无法检测原始请求是否已被接收并付诸执行；因此，重试可能产生重复效果。整套幂等令牌、去重日志，以及“至少一次”与“至多一次”投递保证机制，都是为了修补 TAR 的 FITO 假设所带来的后果。

一次投递问题已在 Borrill [33] 中作了详细分析。TAR 是分布式系统中“万恶之源”：它会将每一次瞬时故障都转化为潜在的语义重复。

时钟同步。NTP、PTP、Spanner 的 TrueTime，以及所有其他时钟同步协议都假设，可以通过交换带时间戳的消息来建立共享的“现在”概念。FITO 假设经由这些消息必须按其发送时间排序这一要求而引入。正如爱因斯坦所表明的，同时性依赖于参考系；时钟同步协议用有界不确定区间来掩盖这一点，但底层假设依然存在。

Google 的 Spanner [30] 使用 GPS 和原子钟，将不确定性限制在~7毫秒。这是一项工程壮举，但并未解决概念上的问题：该协议仍然假设，相隔数千公里的数据中心之间，“之前”和“之后”有着明确定义。

最后写入者胜出（*LWW*）。当并发写入发生冲突时，大多数云系统会通过保留时间戳最新的写入并丢弃另一项来解决冲突。LWW 是对 FITO 的明确体现：假定最近的写入（按正向时间顺序）就是预期的写入。但“最近”是由可能未同步的时钟来定义的，而“预期”是一种任何时间戳都无法捕捉的语义属性。结果就是，数据悄无声息地丢失，却伪装成冲突解决。

第四部分和 Borrill [34] 分析了 iCloud 采用 LWW 及其对文件同步造成的影响。40 年前，Parker [29] 就指出相互不一致是复制数据的一个根本问题；LWW 是业界对此作出的回应，却恰恰因 Parker 预言的那些原因而失效。

自回归预测。 大语言模型通过根据所有前置词元预测下一个词元来生成文本——按其构造，这一过程属于 FITO。模型没有机制可以“回看”并验证已经输出的词元是否与即将输出的词元一致。结果便是幻觉：局部流畅、整体却不连贯的文本，是分布式数据库中撕裂写入的语义类比。

第四部分探讨大语言模型幻觉与分布式系统中语义损坏之间的类比。检索增强生成（RAG）是一种部分解决方案：它在生成之前提供一个“向后”的验证步骤。但 RAG 仍然在自回归框架内运作；它是在生成之前检索，而不是在生成过程中检索。

预览：建构性替代方案

本系列其余论文将基于上文回顾的物理学与哲学，探讨 FITO 框架的另一种方案。第二至第五部分将详细阐述以下核心思想：

1. **交互导出的因果关系**。 因果顺序并非先验地 假定，而是通过相互作用发现 的。语义之箭的方向源自事务的结构，而非消息上的时间戳。

2. **反射式确认**。 建立因果顺序所需的最小相互作用是一次往返——一条消息及其反射。这是网络层面上减速定理的对应要求：测量精度至少需要一次往返 [31]。

3. **提交前可逆性**。 在双方确认之前，状态转换均为暂定。链接状态机依次经历暂定 → 反映中 → 已提交，并可在提交前的任何时刻选择中止。

4. **不定逻辑时间戳**。 一种允许并发事件之间存在不定排序的四值因果结构，仅在对称链路级交换之后才得以确定 [36]。

5. **互信息守恒**。 基础的一致性原语并非时间上的先后关系，而是跨越事务的互信息守恒——莱布尼茨桥 [37]。

总结

我们认为，计算中潜藏着一支时间之箭——它并非熵增的热力学之箭，而是一支语义之箭，嵌入在 FITO 假设之中，并贯穿网络与分布式系统技术栈的每一层。

哲学和物理学方面的证据十分明确：

- 基础物理学在微观层面上具有时间对称性（Roberts [3]）。
- 热力学之箭源于边界条件，而非时间不对称定律（玻尔兹曼、彭罗斯、Callender）。
- 时间对称本体论在物理上是自洽的，而且或许能在不诉诸非定域性的情况下解释量子纠缠（Price 和 Wharton [8]）。
- 当下时刻具有本体论地位，定律也可能随时间演化（Smolin [10]）。
- 属性只存在于相互作用之中；不存在独立于观察者的 t 事态（Rovelli [12]）。
- 自然界允许存在没有明确定义的因果排序的关联（Oreshkov、Costa 和 Brukner [15]）。

在此背景下，计算中的 FITO 假设并非自然定律，而是一种设计选择——它适用于香农电话信道，但应用于分布式事务、文件同步以及在交互系统间保持意义时，就会成为一种负担。

认识到范畴错误是第一步。本系列余下的四篇论文将阐述另一种方案。

参考文献

[1] Eddington, Arthur S. 《物理世界的本质》。剑桥大学出版社，1927年。

[2] 彭罗斯，罗杰。《奇点与时间不对称性》。载于《广义相对论：爱因斯坦百年纪念文集》，S. W. 霍金和 W. 以色列编，581–638页。剑桥大学出版社，1979年。[3] 布莱恩·W·罗伯茨。《逆转时间之箭》。剑桥大学出版社，2022年。ARXIV:2212.03489。[4] 克雷格·卡伦德。《时间何以特殊？》。牛津大学出版社，2017年。[5] 休·普赖斯。《时间之箭与阿基米德点：时间物理学的新方向》。牛津大学出版社，1996年。[6] 休·普赖斯。《时间对称性是否意味着逆因果？量子世界如何回答“也许”》。《现代物理学史与哲学研究》，43(2):75–83，2012年。[7] 休·普赖斯。《构建模态：关于概率、因果关系与决策的实用主义视角》。牛津大学出版社，2025年。[8] 休·普赖斯和肯·沃顿。《为何存在纠缠？》ARXIV:2212.06986，2023年。[9]《量子力学中的逆因果》。斯坦福哲学百科全书。 https://plato.stanford.edu/entries/qm-retrocausality/。[10] 李·斯莫林。《时间重生：从物理学危机到宇宙的未来》。霍顿·米夫林·哈考特，2013年。[11] 李·斯莫林。《时间自然主义》。ARXIV:1310.8539，2013年。[12] 卡洛·罗韦利。《关系量子力学》。《国际理论物理学杂志》，35(8):1637–1678，1996年。ARXIV:quant- ph/9609002。[13] 阿兰·孔涅和卡洛·罗韦利。《一般协变量子理论中的冯·诺伊曼代数自同构与时间–热力学关系》。《经典与量子引力》，11(12):2899，1994年。[14] 卡洛·罗韦利。《赫尔戈兰：理解量子革命》。企鹅兰登书屋，2021年。[15] 奥格尼安·奥列什科夫、Costa、Brukner、˘Caslav。《无因果顺序的量子关联》。《自然·通讯》，3:1092，2012年。ARXIV:1105.4464。[16] Rozema、李·A.等。《量子力学中不定因果序的实验方面》。《自然综述：物理学》，2024年。ARXIV:2405.00767。

[17] van der Lugt, Jeanette、Barrett, Jonathan 和 Chiribella, Giulio。《量子开关中不定因果序的设备无关认证》。《自然·通讯》，14:5311，2023年。[18] Liu, Kun 等。《通过实验演示不定因果序算法以解决广义Deutsch问题》。《先进量子技术》，7(9)，2024年。[19] Hardy, Lucien。《迈向量子引力：一种具有非固定因果结构的概率理论框架》。arXiv:quant- ph/0701019，2007年。[20] Ryle, Gilbert。《心灵概念》。Hutchinson，1949年。[21]《范畴错误电气化》。《哲学与心理学评论》，Springer，2023年。[22] Shannon, Claude E.。《通信的数学理论》。《贝尔系统技术期刊》，27(3):379–423，1948年。[23] Lamport, Leslie。《分布式系统中的时间、时钟与事件排序》。《*ACM*通讯》，21(7):558–565，1978年。[24] Fischer, Michael J.、Lynch, Nancy A. 和 Paterson, Michael S.。《一个故障进程条件下分布式共识的不可能性》。《*ACM*学报》，32(2):374–382，1985年。[25] Gray, Jim。《数据库操作系统札记》。载于《操作系统：高级课程》，《计算机科学讲义》60，Springer，1978年。[26] Brewer, Eric A.。《迈向健壮的分布式系统》。主题演讲，ACM分布式计算原理研讨会（PODC），2000年。[27] Gilbert, Seth 和 Lynch, Nancy。《Brewer猜想与一致、可用、分区容错的Web服务的可行性》。《*ACM SIGACT*新闻》，33(2):51–59，2002年。[28] Spekkens, Robert W.。《量子态认识论观点的证据：一种玩具理论》。《物理评论*A*》，75(3):032110，2007年。[29] Parker, D. Stott 等。《检测分布式系统中的相互不一致》。*IEEE*软件工程汇刊，SE- 9(3):240–247，1983年。[30] Corbett, James C. 等。《Spanner：Google的全球分布式数据库》。《*ACM*计算机系统汇刊》，31(3):8，2013年。

[31] Gorard, Jonathan、Beggs, Edwin J. 和 Tucker,John V.。《链路上的慢速定理》。[32] Borrill, Paul。《兰波特时间之箭：逻辑时钟中的范畴错误》。DÆDÆLUS技术报告，2026年。[33] Borrill, Paul。《分布式计算错在何处：将设计选择变成自然法则的范畴错误》。arXiv，2026年。[34] Borrill, Paul。《iCloud为何失效：云同步的范畴错误》。arXiv:2602.19433，2026年。[35] Borrill, Paul。《开放原子以太网链路的语义》。《语义时间之箭》，第二部分，2026年。[36] Borrill, Paul。《不定逻辑时间戳》。DÆDÆLUS技术报告，2026年。[37] Borrill, Paul。《莱布尼茨桥：弥合网络、计算机科学与物理学之间的鸿沟》。DÆDÆLUS技术报告，2026年。