arXiv:2602.22350v3 [cs.DC] 23 Mar 2026

人为构造的同时性：

汇总价格发现的物理不可能性

跨越类空间分离的交易所

Paul
BorrillDAEDAELUS
paul@daedaelus.com
ORCID: 0000-0002-7493-5189

版本 3.0 02026-MAR-22

摘要

我们定义人为构造的同时性：构建一种系统，要求对类空分离位置上的事件进行时间比较，通过隐含的同时性约定实现这种比较，并将结果呈现为客观测量，而非约定俗成的选择。我们指出，全国最佳买价和卖价（NBBO）——美国股票市场监管体系的基石——就是人为构造的同时性的一个实例。NBBO 要求确定各交易所的“当前”价格，而交易所之间的空间距离使其价格事件处于彼此的光锥之外。狭义相对论证明，此类事件的时间次序取决于参考系：存在一些惯性参考系，在其中 NBBO 与证券信息处理器报告的数值不同。这种不可能性并非近似成立的问题，而是在闵可夫斯基时空的因果结构中确切存在且无法避免。广义相对论进一步加剧了这种不可能性：引力时间膨胀会导致不同海拔交易所之间的时钟速率出现差异，而量子信息理论中关于不定因果顺序的最新研究，则动摇了因果结构固定不变这一前提。我们运用因果先后关系对狭义相对论论证进行形式化，将其与 Lamport 关于分布式排序的定理联系起来，并指出，延迟套利者每年从 NBBO 隐含的同时性约定与物理现实之间的差距中攫取约 50 亿美元利润。

1 引言

美国股票市场通过分布在新泽西州—芝加哥走廊的数据中心内的16家交易所运行。美国证券交易委员会通过的NMS条例于 2005 [4], 规定了全国最佳买价和卖价（NBBO）：这是一个综合报价，代表任意时刻所有交易所中可获得的最佳买价和卖价。穿价交易规则（第611条规则）要求交易以不劣于NBBO的价格执行，确保投资者获得“最佳执行”。

这一监管架构基于一个物理层面的假设：对于地理位置分散的交易所而言，“任意时刻”有着明确的定义。我们表明，事实并非如此。

爱因斯坦的狭义相对论 [1] 确立了同时性并非一种绝对关系。对于相隔一个类空间隔的事件——也就是说，在经过的时间内，光无法在空间上跨越两者之间的距离——“哪一个先发生？”这个问题没有唯一答案。不同的惯性观察者在各自正确运用物理定律时，会为同一对事件指定不同的时间次序。这并非测量方面的局限，而是闵可夫斯基时空 [2]的一项结构性特征。

独立地，Lamport [3] 证明了分布式系统中与之等价的结果：没有通信，就无法为不同节点上的事件建立一致排序。“先于”关系提供了唯一具有物理意义的排序，而它是一种偏序——它不对类空分离事件排序。

全国最佳买卖报价需要一个全序。物理学只提供偏序。这两种结构之间的差距并非可通过工程手段消除的技术缺陷。它是一条定理。

我们将这种系统性地构建、部署并呈现此类全序、仿佛它是一种物理测量的做法称为人为构造的同时性。本文旨在精确界定这一概念，证明其适用于全国最佳买卖报价，并量化其后果。

2 全国最佳买卖报价作为一种同时性主张

2.1 监管定义

NMS条例将全国最佳买卖报价定义为全国性证券交易所所有“自动报价”中“当前可得”的最佳买价和最佳卖价 [4]。证券信息处理器（证券信息处理器）从各交易所接收报价更新，并发布综合全国最佳买卖报价。

起决定作用的词是“当前”。要使全国最佳买卖报价得到明确定义，就必须存在一种可同时适用于所有交易所的、有意义的“当前”概念。这要求比较发生在不同空间位置的事件——报价更新——上的价格。

2.2 整合过程

证券信息处理器的整合过程如下。每个交易所E_i($i = 1, \ldots, N$)都会生成一串报价更新。每次更新都是一个事件：在时空位置(x_i, t_i)产生的价格p_i。证券信息处理器位于固定位置x_{SIP}，经过传播延迟 $\delta_i \geq |x_i - x_{\mathrm{SIP}}|/c$ 后收到这些更新，并计算：

$$\mathrm{NBBO}(t) = \left(\max_i \{b_i(t)\},\ \min_i \{a_i(t)\} \right) \tag{1}$$

其中，$b_i(t)$ 和$a_i(t)$ 分别是交易所E_i“在时间t”的买价和卖价。

但是，$b_i(t)$ 并不是交易所E_i 在时间t的买价，而是截至时间t已到达证券信息处理器的最新买价。证券信息处理器并不观察市场，而是观察自身的输入缓冲区。全国最佳买卖报价取决于单一位置的到达时间，而非多个位置的发射时间。

2.3 正式定义

定义 1(人为构造的同时性)。 当一个系统满足以下三个条件时，它就体现了人为构造的同时性：

（*ES1*）它要求对类空分离位置上的事件进行时间比较。

（*ES2*）它通过一种隐含的同时性约定来实现这种比较（通常是：在指定汇总点的到达顺序）。

（*ES3*）它将结果表示为系统的客观属性，而非所选约定的后果。

全国最佳买卖报价满足全部三个条件。(ES1)：交易所彼此相隔，报价事件发生的间隔短于光传播时间。(ES2)：证券信息处理器按照事件到达其所在位置的时间对事件排序。(ES3)：NMS条例将全国最佳买卖报价视为穿价保护所依据的客观“最佳价格”。

3 美国交易所网络的因果结构

3.1 交易所位置

美国股票交易所设在五个主要数据中心集群中。表1 列出了这些集群的位置及其两两之间的光时延间隔。

集群	位置	交易所
新泽西州Mahwah	41.08°N，74.16°W	纽约证券交易所、纽约证券交易所Arca、纽约证券交易所American
新泽西州Carteret	40.58°N，74.23°W	纳斯达克、纳斯达克BX、纳斯达克PSX
新泽西州Secaucus	40.79°N, 74.06°W	CBOE BZX、BYX、EDGX、EDGA
新泽西州韦霍肯	40.77°N, 74.02°W	IEX、MEMX、LTSE
伊利诺伊州奥罗拉	41.76°北，88.29°西	芝商所集团（期货参考）

表1：主要美国交易所数据中心位置。

Pair	距离（km）	$\Delta t_{\min}$ (μ秒)	光纤（μs）
Mahwah–Carteret	43	143	215
马瓦–锡考克斯	34	113	170
卡特雷特–锡考克斯	27	90	135
新泽西集群–奥罗拉	1,180	3,940	5,900

表 2：两两间隔与最小光行时延。 $\Delta t_{\min} = d/c$ （真空中）； 光纤时延假设$n \approx 1.5$。

3.2 闵可夫斯基分析

考虑两个交易所E_A，位置为x_A，以及E_B，位置为x_B，其中$d = |x_A - x_B|$。若报价事件α 发生在E_A，其坐标时间为t_α，而报价事件 β 发生在E_B，时间为t_β，则这两个事件类空分离，当且仅当：

$$|t_\alpha - t_\beta| < \frac{d}{c} \tag{2}$$

对于类空分离事件，洛伦兹变换给出：

$$t'_\alpha - t'_\beta = \gamma \left[(t_\alpha - t_\beta) - \frac{v}{c^2}(x_\alpha - x_\beta) \right] \tag{3}$$

其中v 是带撇号参考系的速度， $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$。当事件类空分离时，存在一些参考系使$t'_\alpha > t'_\beta$，也存在一些参考系使$t'_\alpha < t'_\beta$。时间间隔的符号——哪个事件是“先发生的”——取决于观察者。

定理1 (NBBO 的参考系依赖性)。 设 E_A 和 E_B 是相距 $d > 0$ 的交易所。设 α 和 β 分别是发生于 E_A 和 E_B 的报价事件，且 $|t_\alpha - t_\beta| < d/c$。则存在惯性参考系 S 和 S'，使得根据 $\{\alpha, \beta\}$ 计算出的全国最佳买卖报价在 S 和 S' 中有所不同。

证明。 设 α 报出的买价为 b_A， β 报出的买价为 $b_B > b_A$。在参考系 S 中， α 发生在 β 之前，因此在两个事件都发生后的任意时刻，全国最佳买卖报价都反映 b_B。在参考系 S' 中， β 发生在 α 之前，全国最佳买卖报价的更新顺序有所不同：b_B 首先进入全国最佳买卖报价，之后没有变化（因为 $b_A < b_B$）。更关键的是，在每个参考系中两个事件之间的时刻，全国最佳买卖报价并不一致：参考系 S 报告 b_A 为最佳买价，而 b_B 尚未发生；参考系 S' 则已报告 b_B。

由于全国最佳买卖报价取决于哪些报价事件被视为“当前”，而对于类空分离事件，“当前”具有参考系依赖性，因此全国最佳买卖报价也具有参考系依赖性。 □ □

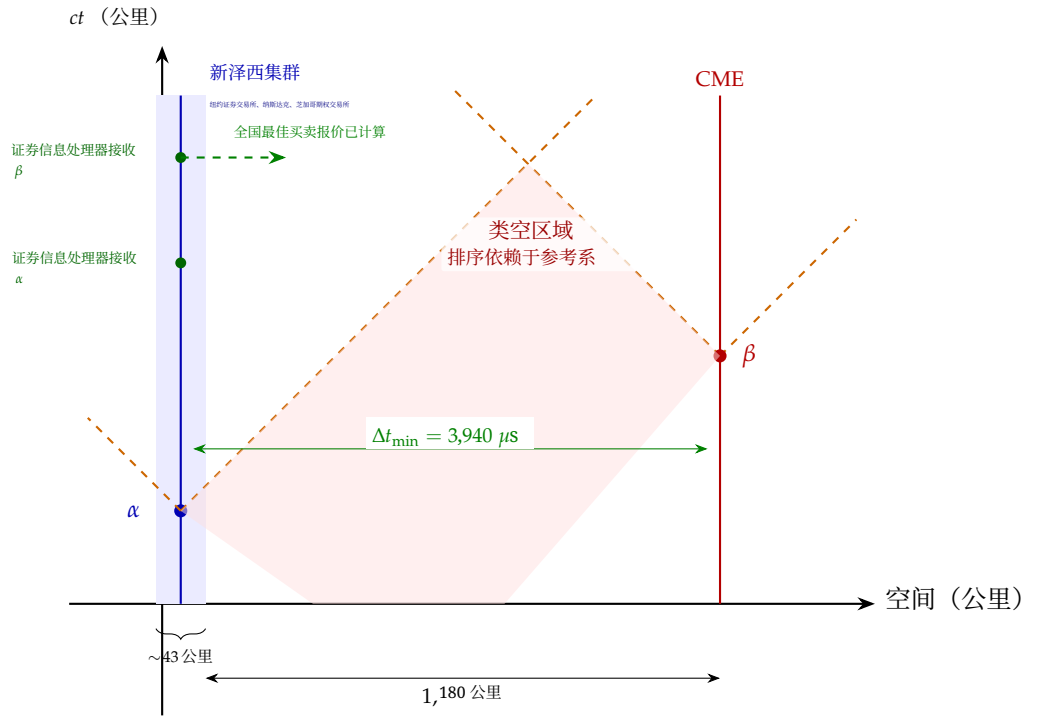


图 1：美国交易所网络的闵可夫斯基图。事件 α （NYSE报价）和 β （CME报价）是类空分离的：在 β 发生之前，没有任何光信号能从 α 到达 β 。它们的时间次序取决于参考系。位于新泽西集群附近的证券信息处理器会接收这两个事件并计算全国最佳买卖报价——但该报价反映的是它们到达证券信息处理器的次序，而非任何与参考系无关的时间次序。

推论 1。 证券信息处理器报告的全国最佳买卖报价并非对市场状态的测量，而是特定同时性约定的产物：该约定认为，“当前”意味着“在坐标时间 t 之前于 x_{SIP} 收到”。不同的约定会得出不同的全国最佳买卖报价，而物理学并未赋予任何一种约定以优先地位。

4 分布式系统理论的联系

Lamport 的奠基性成果 [3] 确立了在分布式系统中，唯一具有物理意义的事件排序是先发生于关系 $\rightarrow$，其定义如下：

1. 如果a 和b 是同一进程中的事件，且a 发生在b之前，那么$a \rightarrow b$。

2. 如果a 是消息的发送，b 是该消息的接收，那么$a \rightarrow b$。 3. 该关系具有传递性。

彼此之间不存在 $\rightarrow$ 关系的事件是并发的：它们之间不存在具有物理意义的排序。Lamport 明确指出，这种结构与狭义相对论的因果结构同构 [3]。先发生于关系是闵可夫斯基时空中类时/类光次序的离散类比；并发事件则是类空分离事件的类比。

命题 1. 在类空分离的交易所发生、且尚未传达给任何共同进程的报价事件，按照 *Lamport* 的定义属于并发事件。全国最佳买卖报价要求对这些并发事件排序。但无法根据先发生于关系推导出任何此类排序。

证券信息处理器通过直接规定来解决这一问题：按照并发事件在同一地点的到达时间对其排序。这是一种有效的同步约定，但并非唯一约定。如果证券信息处理器位于其他地点，或采用不同的决胜规则，就会得出不同的全国最佳买卖报价。

谷歌的 Spanner 数据库 [17] 面临同样的不可能性。它的解决方案——TrueTime——将时间表示为一个不确定区间，并在不确定性消除后才宣布事务已提交。相比之下，金融体系却假装不确定性并不存在。

5 量化利用

全国最佳买卖报价的参考系依赖性造成了可利用的不对称性。通过直接专有数据源接收交易所数据的参与者，在报价事件发出后数十微秒左右即可观察到这些事件 [14]；依赖综合证券信息处理器的参与者，则要在事件发出约 1,128 μ 秒后才能观察到相同事件 [12]——延迟比超过 50:1。

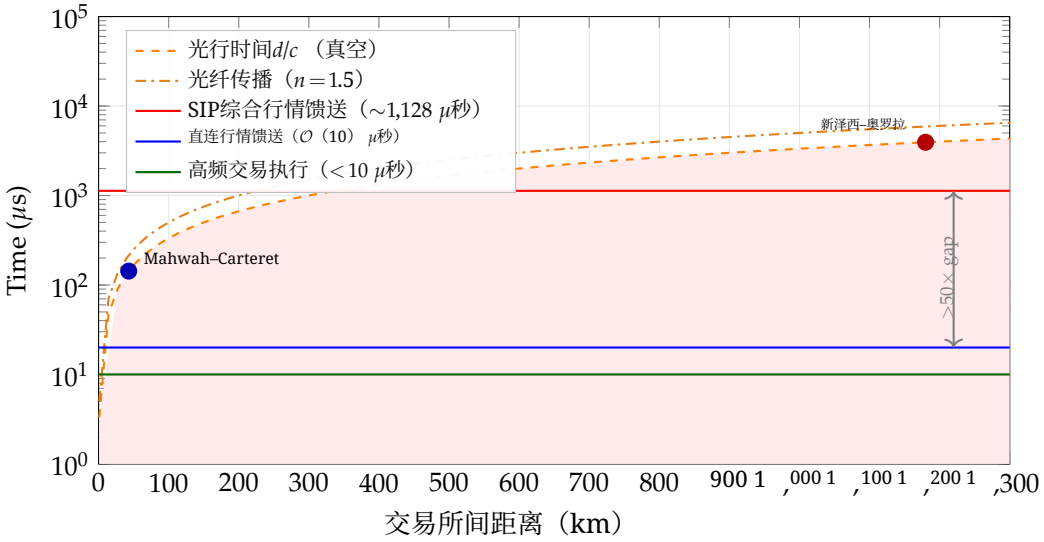


图2：美国交易所网络中的时间尺度。橙色虚线表示光行时间间隔d/c：时间间隔短于此值的事件属于类空分离。高频交易执行时间（<10 μ秒）和直连行情馈送延迟（$\mathcal{O}$（10） μ秒）远短于新泽西–芝加哥通道的光行时间（3,940 μ秒）；而即使在新泽西集群内（143 μ秒），它们也已接近这一边界。直连行情馈送与SIP综合行情馈送之间的 >50× 差距（见右侧边缘标注）构成了可利用不对称性。

这并非传统意义上的速度优势，而是一种参考系优势：直连行情馈送参与者实际上处于更接近交易所本地参考系的参考系中，而SIP参与者则处于因整合延迟而偏移的参考系中。这两个参考系对近期报价事件赋予不同的时间顺序，因此计算出不同的全国最佳买卖报价。

Aquilina、Budish和O’Neill [10]直接衡量了这些后果。他们利用伦敦证券交易所的交易所消息数据，识别出延迟套利“竞速”——即同一信息在不同交易场所触发相互竞争的订单的情形——大约每只高流动性证券每分钟发生一次。竞速持续时间的众数为5–10 μ秒。年度全球攫取收益：约50亿美元。随后的一项研究 [11] 记录显示，高频交易者在涉及过时报价的竞速中胜出的比例为96–99%。

Budish 等人 [9] 将这种攫取描述为社会资源浪费：它体现的是源于时间歧义的私人利润，而不是对流动性供给或价格发现的补偿。

5.1 量级反驳

Bartlett 和 McCrary [12] 报告称，证券信息处理器报告的全国最佳买卖报价有 97% 的时间与“真实”的全国最佳买卖报价一致；在 3.7 万亿美元的交易量中，总收益仅为 1,440 万美元。对此需要作出两点回应。

首先，Bartlett与McCrary的“真实”全国最佳买卖报价本身是在单一地点利用直接行情数据计算出来的——这是另一种同时性约定。他们并未衡量约定与现实之间的差距，而是衡量了两种约定之间的差距。

其次，基于量级的论证误解了该主张。不可能性结果（定理1）并不取决于全国最佳买卖报价“出错”的频率或幅度，而取决于全国最佳买卖报价是否良定义。一支在97%的时间里读数正确、但其校准所依据的温标建立在燃素说之上的温度计，并非近似正确。它在概念上是不融贯的。它失效的那3%并非噪声，而是不融贯性变得可见之处，并且——按照Aquilina等人的说法——每年50亿美元正是在此处被攫取。

6 讨论

人为构造的同时性在Ryle [18]的意义上是一种范畴错误：它将一个概念（绝对同时性）应用于该概念并无意义的领域（类空分离事件）。错误并不在于证券信息处理器算出了某个结果——它确实算出了。错误在于，这一结果被呈现为“最佳价格”，而非“依据某一种特定的、并非唯一的同时性约定所得到的最佳价格”。

这种情况与前相对论物理对绝对时间的假设完全类似。牛顿力学假定存在一个所有观察者共享的普遍“现在”。狭义相对论表明，这是一种约定，而非事实。金融监管尚未吸收这一教训。

Lewis [19] 普及了一种观点：市场因速度差异而受到“操纵”，只要拉平时间竞争环境，就能解决问题。其隐含假设是，存在一种有意义的同时市场状态，原则上人人都能抵达。这一假设并不成立。《闪电男孩》正确指出了延迟套利，却误诊了其根本原因。问题不在于同步不足，而在于人们相信同步能够创造同时性。

由此可以得出四个结构性观察：

第一，这种不可能性是精确的。它不取决于时钟精度、同步协议或未来的技术进步。任何技术都无法将类空分离事件变成类时事件。光速不是工程上的限制，而是一条定律。

第二，全国最佳买卖报价并非一种测量，而是一种宣告。证券信息处理器分配的时间戳，并不以任何独立于参照系的方式记录事件发生的时间，而是记录事件在特定惯例下被登记的时间。任何将这些时间戳视为时间顺序客观测量的系统，都犯了范畴错误。

第三，这种不可能性并非学术问题，而是会造成可衡量的经济后果。能够优先获取惯例的输入——即与交易所撮合引擎同地共置的直连行情订阅者——每年从依赖惯例的输出的参与者那里攫取约50亿美元。

第四，这种不可能性并不局限于狭义相对论。广义相对论进一步动摇了这一前提：处于不同引力势的时钟，走时速率各不相同——全球定位系统（GPS）会主动校正这一效应 [24]。高频交易基础设施遍布不同的建筑、海拔、热梯度和机械环境。纳秒级一致性本就是一种经过协商的近似，其基础还叠加了关于对称性和稳定性、无法证实的假设 [22]。单一且权威的市场时钟这一设想，在物理上站不住脚。

6.1 对时间基础设施的启示

本文所述分析是于1月在开放计算项目时间设备项目（OCP-TAP）受邀演讲时提出的 28, 2026 [27]。OCP-TAP 为数据中心和分布式系统构建精密时间基础设施。其关联显而易见：时间设备负责测量，却不能定义现实。同步有其局限，必须明确呈现。基础设施应揭示不确定性，而非将其隐藏 [28]。一篇配套论文 [30] 追溯了同步时间这一虚构观念，从其文化起源，经由夏令时和闰秒，一直到它在分布式计算和金融市场中造成的后果。

6.2 超越相对论：不定因果顺序

不可能性论证还可以进一步加强。在量子力学中，时间并非可观测量——不存在时间算符。时间是系统外部的参数，由相互作用推断而来，而不是作为守恒量被观测到 [26]。因此，将时间戳视为不容置疑的事实而非元数据的协议，在物理基础上本就已经站不住脚。

现代量子信息理论更进一步。Oreshkov、Costa 和 Brukner [25]的研究表明，某些过程根本没有确定的因果顺序。事件A 在任何全局意义上都不先于或后于事件B 。这不是哲学，而是实验上可实现的物理学。随着市场变得更快、更具反身性且耦合更紧密，其行为越来越类似于这样的系统：因果顺序是局部的、依赖于观察者的，而非被全局定义的。

6.3 利用的结构

当一个系统声称其不可能拥有的物理正当性、利用大多数参与者看不见的不对称，并将不确定性转化为私人利润时，它在功能上就是欺诈性的。工程化同时性满足全部三个条件。高频交易行业明白，同时性在物理上并不真实，却将其表象推销为中立、客观且公平的。真正的优势不在于速度——速度差异是可见且可竞争的。真正的优势在于对定义 “现在”的控制：控制在何处测量时间、何时对时钟采样，以及以谁的时钟为准。这与速度无关。这关乎时间定义控制，而大多数市场参与者无法对此进行审计。

我们注意到，Wissner-Gross与Freer [5] 于2010年指出了相对论约束与金融市场的相关性，Angel [6]主张监管应介入相对论约束，Laughlin、Aguirre与Grundfest [7] 记录了微波基础设施推动芝加哥—纽约走廊实现的3毫秒延迟降低，Buchanan [8]则进一步扩展了这一分析。本研究的不同之处在于，将这种不可能性形式化为关于交易所网络因果结构的定理，而非将其作为对套利策略的约束，并引入“人为构造的同时性”这一概念，作为对该机制的精确描述。

7 结论

全国最佳买卖报价假定存在一个类空同时性超曲面，而狭义相对论证明其不可能存在。广义相对论通过引力时间膨胀使这一问题更为严重，量子信息理论则通过不定因果顺序进一步动摇了这一前提。我们已将狭义相对论意义上的不可能性形式化为定理1，并将其与Lamport关于分布式排序的不可能性联系起来，同时表明，全国最佳买卖报价所隐含的同时性约定与物理现实之间的差距每年被利用约50亿美元。

人为构造的同时性这一概念——系统性地构建和部署那些将不可能的时间比较视为客观事实，并据此进行假设、实现和表述的系统——不仅适用于金融市场，也适用于任何将时间戳视为物理测量的分布式系统

排序的。　　我们认为，认识到这一范畴错误，是构建有原则的系统的先决条件
design.

一篇配套论文阐述了更广泛的理论框架——分布式系统中的仅向前时间（FITO）范畴错误 [29]——而第二篇则追溯同步时间本身为何是一种虚构，从其文化起源，经由夏令时和闰秒，直至其在金融市场中的后果 [30]。

参考文献

[1] A. Einstein，《运动物体的电动力学》，《物理学年鉴》17，891–921（1905年）。[2] H. Minkowski，《运动物体中的电磁过程基本方程》，哥廷根科学学会会报，53–111（1908年）。[3] L. Lamport，《分布式系统中的时间、时钟与事件排序》，Commun. ACM 21(7)，558–565（1978年）。https://doi.org/10.1145/359545.359563。[4] 美国证券交易委员会，《NMS条例》，第34-51808号公告（2005年）。https://www.sec.gov/rules/final/34-51808.htm。[5] A. D. Wissner-Gross和C. E. Freer，《相对论统计套利》，Phys. Rev. E 82，056104（2010年）。https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.056104。[6] J. J. Angel，《当金融遇上物理：光速对金融市场及其监管的影响》，The Financial Review 49(2)，271–281（2014年）。https://doi.org/10.1111/ fire.12035。[7] G. B. Laughlin、A. Aguirre和J. Grundfest，《芝加哥与纽约金融市场之间的信息传输》，The Financial Review 49(2)，283–312（2014年）。https://doi.org/ 10.1111/fire.12036。[8] M. Buchanan，《金融中的物理学：以光速交易》，Nature 518，161–163（2015年）。https://doi.org/10.1038/518161a。[9] E. Budish、P. Cramton和J. Shim，《高频交易军备竞赛：以频繁批量拍卖作为市场设计应对方案》，Q. J. Econ. 130(4)，1547–1621（2015年）。https://doi.org/ 10.1093/qje/qjv027。[10] M. Aquilina、E. Budish和P. O’Neill，《量化高频交易“军备竞赛”》，Q. J. Econ. 137(1)，493–564（2022年）。https://doi.org/10.1093/qje/qjab032。[11] M. Aquilina、E. Budish和P. O’Neill，《暗处的鲨鱼：量化HFT暗池延迟套利》，国际清算银行工作论文第1115号（2023年）。https://www.bis.org/publ/work1115.htm。[12] R. P. Bartlett和J. McCrary，《股票市场有多受操纵？来自微秒时间戳的证据》，J. Financial Markets 45，37–60（2019年）。https://doi.org/10.1016/j.finmar.2019. 06.002。[13] M. A. Goldstein、P. Kumar和F. C. Graves，《计算机化交易与高频交易》，The Financial Review 49(2)，177–202（2014年）。https://doi.org/10.1111/fire.12031。[14] S. Ding、J. Hanna和T. Hendershott，《全国最佳买卖报价有多慢？与交易所直连行情的比较》，The Financial Review 49(2)，313–332（2014年）。https://doi.org/10.1111/fire. 12037。[15] M. P. Herlihy和J. M. Wing，《线性化：并发对象的一种正确性条件》，ACM Trans. Prog. Lang. Syst. 12(3)，463–492（1990年）。https://doi.org/10.1145/78969.78972。

[16] M. J. Fischer、N. A. Lynch和M. S. Paterson，《存在一个故障进程时分布式共识的不可能性》，《美国计算机学会期刊》32(2)，374–382（1985年）。https://doi.org/10.1145/3149.214121。[17] J. C. Corbett等，《Spanner：谷歌的全球分布式数据库》，操作系统设计与实现研讨会论文集，261–264（2012年）。https://dl.acm.org/doi/10.5555/2387880.2387905。[18] G. Ryle，《心灵概念》（Hutchinson，伦敦，1949年）。[19] M. Lewis，《闪电男孩：华尔街反叛》（W. W. Norton，纽约，2014年）。[20] 美国证券交易委员会，《NMS条例修正案》，第34-101070号公告（2024年）。https://www.sec.gov/rules/final/2024/34-101070.pdf。[21] C. E. Shannon，《通信的数学理论》，《贝尔系统技术期刊》27，379–423（1948年）。https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x。[22] W. Rindler，《相对论：狭义、广义与宇宙学》，第2版（牛津大学出版社，2006年）。[23] IEX集团，《作为全国性证券交易所注册的Form 1申请》，美国证券交易委员会申报文件（2016年）。[24] N. Ashby，《全球定位系统中的相对论》，《相对论综述》6，1（2003年）。https: //doi.org/10.12942/lrr-2003-1。[25] O. Oreshkov、F. Costa和˘C. Brukner，《无因果顺序的量子关联》，《自然·通讯》3，1092（2012年）。https://doi.org/10.1038/ncomms2076。[26] W. Pauli，《波动力学的一般原理》，载于《物理学手册》第5/1卷（施普林格，柏林，1958年）。[27] P. Borrill，《时间不是守恒量——以及我们为何在假装时间守恒时导致网络故障》，开放计算项目时间设备项目（OCP-TAP）特邀演讲，2026年1月28日。视频：https://www.youtube.com/watch?v=zvqZwaeOqNU。[28] P. Borrill，《时间不是守恒量》（演示幻灯片），OCP-TAP，2026年1月28日。https://drive.google.com/file/d/16YuClYaluN5i6jAIXihly0eR8OQ20OZq/view。[29] P. Borrill，《分布式计算错在何处：将设计选择变成自然定律的范畴错误》，arXiv:2602.18723（2026年）。https://arxiv.org/abs/2602.18723。[30] P. Borrill，《同步时间是一种虚构：夏令时、闰秒，以及毫无意义地磨快的断头铡》，arXiv:2603.19099（2026年）。https://arxiv.org/abs/2603. 19099。