

## 关于本文 V2.0 版本的修正声明

我们必须首先坦诚地承认，在本文的初始版本中，我们关于宇宙背景场  $\Sigma(P)$  动态特性的核心预测（即第四、五章的内容），是一个基于过度简化的经典物理图像的**武断错误**。

该初始版本错误地预测了  $\Sigma(P)$  场是一个变化极其缓慢的“准静态”场（其相干时间  $\tau_c$  在小时或天的量级）。经过回顾，我们立即认识到，这个结论与已得到精密实验验证的 CHSH 不等式结果，在逻辑上是**不相容的**。一个准静态的超决定论模型，其在数学上无法复现超越经典贝尔不等式上限的量子关联。

我们在此明确**撤回** V1.0 版本中关于  $\Sigma(P)$  场是“准静态”的这一核心预测，并在此版本中对相关内容进行了完整更新。

这个错误也给我们一个深刻启示：**一个内部的观察者，要看清真相是何其困难**。我们相信，科学的进步，需要依靠毫不留情的、基于逻辑和事实的自我反思和革命。

我们对 V1.0 版本可能引起的任何困惑表示歉意，并诚挚地邀请您审阅并对我们的理论论述**提出质疑**。

# 量子纠缠的熵动力学机制

Haifeng Qiu

2025 年 8 月 15 日

# 1 引言——物理学的尺度涌现

## 1.1 一个统一的起点：从比特到宇宙的结构尺度

我们构建的《计算实在论》框架，其核心论断是：我们所知的全部物理现实，都是从一个唯一的、基于确定性规则的**比特计算场**中，在多个截然不同的结构尺度上涌现出的有效动力学。我们将其划分为四个尺度，分别是：

1. **比特尺度 (The Bit-Scale)**: 宇宙最根本的、离散的计算基底。其动力学由唯一的 Rule 所支配，表现为伪随机的混沌，这是所有物理现象的终极起源。
2. **粒子尺度 (The Particle-Scale)**: 由比特自组织形成的，稳定的、具有特定拓扑结构的局域模式。其动力学（拓扑动力学）负责解释基本粒子及其强、弱、电磁相互作用的产生机制。
3. **熵效应微观尺度 (The Microscopic Scale of Entropic Effects)**: 这是比特尺度的混沌，在时空微区的高频涨落的表现。其动力学负责为量子事件的创生注入确定的、但不可知的初始条件。
4. **熵效应统计尺度 (The Statistical Scale of Entropic Effects)**: 这是比特尺度的混沌，在宏观时空区域进行统计学平均后，所涌现出的平滑、经典的背景熵结构场。其动力学（熵动力学）导致引力和量子测量效应。

## 1.2 本文的定位与核心论断

《计算实在论》的完整理论，旨在统一地阐述从比特尺度到所有更高尺度的全部涌现机制。而本文将聚焦于上述的第三和第四个尺度——即“熵效应”的两个尺度，并以此为基础，为引力和量子纠缠提供一个统一的机制性解释。

为了本文论述的清晰性，后续所使用的“微观”和“宏观”这两个术语，将被特别地、本地化地定义为：

- 本文中的“微观”，特指“熵效应微观尺度”，即与量子创生耦合的熵场涨落。
- 本文中的“宏观”，特指“熵效应统计尺度”，即作为量子测量背景的经典熵结构场。

基于此限定，本文的核心论断是：量子纠缠的神秘性，可以被完全理解为粒子（一个在“粒子尺度”上涌现的低熵结构），与宇宙熵场在其“熵效应微观尺度”（影响其创生）和“熵效应统计尺度”（影响其测量）上相互作用的必然决定论后果。

## 2 熵的本体论——一个多尺度有效场

### 2.1 根本公设：作为唯一实在的计算性熵

我们理论的基石是，现实的终极衡量尺度是计算性熵（Kolmogorov Complexity,  $S_C$ ）。它衡量一个模式的不可压缩性。

### 2.2 重整化思想的应用：从根本场到有效场

为了用连续的数学方式来研究一个在比特尺度上定义的离散精细场，我们必须定义有效尺度。因此，我们理论的方法论核心，是应用在物理学中被广泛验证的思想——重整化（Renormalization），它是连接我们宇宙离散计算基底与连续的数学方法的桥梁。

### 2.3 尺度的流动：有效熵场的构建

我们将计算性熵物理化为在比特尺度（the bit-scale）上的、离散的、精细的根本熵张量场  $\Sigma_0(P)$ 。这是我们理论的本体论基石，是所有更高层次物理现实的唯一来源。任何一个物理过程，都只与  $\Sigma_0(P)$  在一个由该过程“固有尺度”（或观测能量）所定义的“有效尺度” $\lambda$  上，通过“重整化变换”（即粗粒化与参数重定义）之后所形成的“有效熵场” $\Sigma_{\text{eff}}(P; \lambda)$  发生相互作用。需要注意的是，在我们理论中，重整化是一个基于统计的、用连续方法研究离散问题的数学近似方法，跟物理本质无关。

### 2.4 本文聚焦的有效场： $\Sigma(P)$ 及其多极结构

本文旨在解释引力和量子测量，这两个现象都发生在统计尺度上，因此，我们聚焦于该尺度下的有效熵场，为简洁起见，我们将其表示为  $\Sigma(P)$ 。我们对这个在统计尺度上涌现出的有效熵场  $\Sigma(P)$  进行多极展开（Multipole Expansion），以分析其几何结构的不同方面（矩），这些“矩”对应于我们所观测到的不同宏观物理现象：

- **零阶矩（单极矩）**：有效熵张量场  $\Sigma(P)$  的标量迹  $\sigma(P)$ ，即有效熵密度。其物理效应是决定了时空的“计算粘滞性”，从而涌现出引力时间膨胀。
- **一阶矩（偶极矩）**：有效熵张量场  $\Sigma(P)$  的一阶协变导数，其最简单的分量是矢量梯度  $\nabla\sigma$ 。其物理效应是产生了“熵压力差”，从而涌现出引力本身。
- **二阶及更高阶矩（四极矩等）**：有效熵张量场  $\Sigma(P)$  更高阶的导数和内禀的代数属性，描述了其局域的各向异性（anisotropy）。我们断言， $\Sigma(P)$  的这种“各向异性”，正是作为量子测量背景的“超决定”场的物理本体。

### 3 量子事件的熵动力学

本章将统一地描述量子事件的两个阶段，将其都归结为粒子与“熵结构”的交互。

#### 3.1 粒子的本体论：稳定的“低熵拓扑结构”

一个基本粒子（如电子），是一个内禀结构固定的、低熵的“时空涡流”（信息孤子）。它的所有量子数（电荷、自旋等），都是其独特的“低熵拓扑形态”的体现。

#### 3.2 纠缠的“创生”：与熵的“微观结构”耦合

- **机制：**在粒子对创生的事件中，新生的两个“低熵拓扑结构”，与本地时空中一个在微观下是高频的、复杂的“熵场涨落”发生了深刻的耦合。
- **后果：**这个耦合过程，像一个“熵的模具”，将这两个粒子的“低熵拓扑形态”“铸造”得完美互补，并使其状态与那个特定的、但对任何局域观察者都不可知的微观熵涨落“锁定”在一起。
- **随机性来源：**对创生瞬间熵的“微观结构”的不可知性，赋予了粒子对一个确定的、但不可知的初始状态。

#### 3.3 量子的“测量”：与熵的“宏观结构”对齐

- **机制：**测量仪器强制那个已经被“铸造”好的粒子，将其自身的“内禀低熵拓扑形态”，与仪器所在环境中的“宏观熵结构”（即背景场  $\Sigma(P)$ ）进行“结构对齐”。
- **后果：**测量结果是这次“结构对齐”的、能量最低的那个决定论输出（例如，“上”或“下”）。
- **确定性来源：**测量基于仪器所在的、宏观的熵场环境，其结果是确定的。

#### 3.4 测量与创生的本质一致性：从“1 到 2”到“1 到 N”的尺度涌现

我们断言，“测量”并非一个与“创生”截然不同的新物理过程。两者在本质上是同一种动力学——即“纠缠扩散”（Entanglement Spreading）。

- **纠缠创生（“1 到 2”）：**一次纠缠的制备，是将一个源的量子态，“扩散”并制备成一个 2 个粒子的微观纠缠态。这是一个微观的、相干性可以追踪的过程。
- **量子测量（“1 到 N”）：**一次测量，则是将一个微观系统，通过与一个由  $N \approx 10^{23}$  个粒子构成的宏观仪器发生相互作用，使其纠缠状态“雪崩式地扩散”，从而制备成一个  $10^{23}$  个粒子组成的、经典的宏观态。

“波函数坍缩”或量子-经典边界，不是一个神秘的跃变，而是一个完全物理的、基于统计学的相变过程。它标志着系统从“涨落主导”的微观量子态，通过“纠缠扩散”，演化到了一个“平均值主导”的宏观经典态。

## 4 从理论到宇宙学——背景熵场的起源与性质

### 4.1 宏观熵结构的起源

作为测量背景的背景熵结构场  $\Sigma(P)$ ，是由其整个过去光锥内所有比特模式（bit patterns）的贡献，通过一个作用积分而集体涌现的。

### 4.2 熵场的双重动力学：物质与暗能量的博弈

$\Sigma(P)$  场的宏观结构和动态演化，源于两种性质相反、永恒博弈的物理过程：

- **物质效应 (The Effect of Matter):** 由物质（信息孤子）所定义的低熵结构。物质通过消耗熵，试图在计算场中建立和维持有序的、稳定的“结构孤岛”。
- **暗能量效应 (The Effect of Dark Energy):** 由真空环境本身所定义的高熵基底。暗能量通过创生熵，体现为宇宙计算场永恒的、混沌的“背景沸腾”。

### 4.3 引力与相干解码场：同一个低熵效应的“一阶”与“高阶”涌现

我们断言，由地球这个宏观物质体产生的“低熵效应”，在其周围空间中，创造了一个特殊的、被“净化”了的区域。在这个区域内，来自外部宇宙真空的、剧烈的高熵“噪音”被显著地屏蔽了。

这个由物质主导的“低熵屏蔽区”，涌现出两种截然不同但同源的宏观物理效应，它们可以被理解为  $\Sigma(P)$  场的不同阶矩：

- **一阶效应是引力：**这是  $\Sigma(P)$  场的一阶结构（梯度）的表现。它是物质低熵效应的最宏观、最长程的表现。它的作用涌现出了引力。
- **高阶效应是相干解码场 (The Coherent Decoding Field):** 这是  $\Sigma(P)$  场的更高阶结构（各向异性、手性等）的表现。在这个被屏蔽的区域内，熵场的精细结构变得相对稳定和有序，从而形成了一个能够维持量子纠缠关联性的相干解码场。

因为引力是其低阶效应，所以它在宏观尺度上更显著、影响范围更广。而相干解码场是其高阶效应，所以它更“精细”，对微观的量子过程（如测量）更敏感。

## 4.4 相干的尺度范围：一个来自实验的半定量推论

这个由地球低熵效应所维持的“相干解码场”，其能够有效屏蔽外部真空高熵效应的时空范围，即相干时空尺度（ $\tau_c$  和  $L_c$ ），是由地球低熵效应和真空高熵效应的强度对比所决定的。

我们无法直接计算这个范围，但我们可以利用现有的实验数据，对其进行一个半定量的推论。

- **时空对称性原理：**我们理论的基石之一是时空对称性，因此，相干的空间距离  $L_c$  与相干的时间差  $\tau_c$  必然被光速  $c$  所锁定： $L_c = \tau_c \cdot c$
- **结合“墨子号”实验的约束：**中国的“墨子号”量子科学实验卫星，已经成功地在相距超过 1200 公里的两个地面站之间，分发并维持了高质量的量子纠缠。这个无可辩驳的实验事实，为我们理论的相干尺度，设定了一个坚实的实验下限。
- **我们的预测：**在  $L_{\text{exp}} \approx 1200$  公里的空间距离上，纠缠关联性依然能够维持，这意味着  $L_{\text{exp}}$  必然在相干长度  $L_c$  的范围之内。由此，我们可以对相干时间  $\tau_c$  做出一个半定量的预测：

$$\tau_c = L_c/c \geq L_{\text{exp}}/c \approx \frac{1200 \text{ km}}{300,000 \text{ km/s}} = 0.004 \text{ 秒}$$

我们预测，我们本地宇宙的相干时间差  $\tau_c$ ，应该至少在 4 毫秒以上。这个可证伪的下限，为所有试图通过“时间延迟关联度测量”来检验基础物理学的未来实验，提供了一个清晰的、必须被超越的理论基准。

## 5 一个决定性的物理实验

### 5.1 实验目的 (Objective)

本实验旨在超越传统的贝尔不等式检验。我们的目标不再是验证量子关联性本身的存在，而是要直接测量在我们理论中作为量子现象根源的、那个宏观的“宇宙熵结构场  $\Sigma(P)$ ”的相干时间  $\tau_c$ ——即，这个场的“记忆”能够保持多久。

### 5.2 实验方式：带有“零延迟”对照组的时间延迟纠缠关联度测量

本实验设计的核心，是在同一个实验装置中，交替（alternatingly）进行两种不同模式的测量，以期将真正的物理效应与潜在的系统误差进行精确分离。

- **实验组 (Experimental Group):** 测量纠缠强度随宇宙背景场时间演化的物理效应。

- Alice 在  $t_A$  时刻对粒子 A 进行测量。
- Bob 在一个可控的时间延迟  $\Delta t$  之后，于  $t_B = t_A + \Delta t$  对粒子 B 进行测量。
- **对照组 (Control Group):** 用于校准和量化实验装置自身随时间产生的系统误差。
  - Alice 和 Bob 在一个经过同样时间演化的  $t + \Delta t$  时刻,同时(simultaneously) 对一对纠缠粒子进行测量，用于校准误差。

### 5.3 实验结论与我们理论的终极判决

最终得到的、经过对照组校准的纯物理关联度衰减曲线  $C_{\text{phys}}(\Delta t)$ ，将为我们的理论提供一个唯一的、决定性的判决。

基于我们理论的第一性原理（如等效原理、熵动力学）出发，我们只做出一个核心的、半定量的预测：相干时间  $\tau_c$  应该处于一个由地球的物理尺度所主导的特定宏观时间窗口内。我们基于“墨子号”量子科学实验卫星的实验数据，已为此窗口设定了一个实验下限，即  $\tau_c \geq 4\text{ms}$ 。

因此，实验的结果只有两种逻辑上互斥的可能：

- **可能的结果一：理论被证实 (Theory Corroborated)**
  - **观测结果：**实验观测到，关联度  $C_{\text{phys}}(\Delta t)$  的特征衰减时间  $\tau_c$ ，显著地落在毫秒至秒级这个宏观时间窗口之内。
  - **理论判决：**这将强有力地证实我们理论的整个框架。它将意味着，我们不仅正确地识别了超决定论的物理载体 ( $\Sigma(P)$  场)，更成功地预言了其演化速率。
- **可能的结果二：理论被证伪 (Theory Falsified)**
  - **观测结果：**实验观测到， $\tau_c$  显著地落在我们预测的窗口之外。例如， $\tau_c$  远短于毫秒级（在纳秒或微秒尺度就完全退相干），或者长到在实验可及的时间范围内（如数小时以上）完全不发生可观测的衰减。
  - **理论判决：**这将清晰地证伪我们理论的核心机制。它将意味着，存在我们理论未曾预见的、主导量子关联性的其它物理机制，或者该背景场的性质与我们预测的完全不同。

## 6 结论——物理学作为“熵的结构几何学”

我们提出了一个完全基于“结构化熵”的、统一的、决定论的量子纠缠模型。在这个模型中，量子世界的神秘性——包括其概率性、非局域关联性以及“测量坍缩”——都



被还原为了一个更深刻、更物理的统一过程：即物质（作为一种稳定的、低熵的拓扑结构）与宇宙熵场在不同结构尺度上的动力学交互。

- 纠缠的创生，是粒子在熵的微观结构（小尺度涨落）中被“铸造”成型的过程，这为其注入了“不可知的有序性”。
- 纠缠的测量，则是这个粒子在熵的宏观结构（大尺度涨落）中被“读取”状态的过程，这是一个“微观不可知”向“宏观确定”的、基于统计学的相变。

这个视角，最终将量子力学的核心问题，转化为了对一个唯一的、但具有无穷复杂内部结构的物理实体——宇宙熵场——的研究。我们不再仅仅问“存在什么？”，我们问的是“存在之物（熵）具有何种结构？”

因此，我们的理论指向了一个全新的图景：引力和量子纠缠，本质上都是“熵的结构几何学”（The Structural Geometry of Entropy）的不同表现。

我们提出的“时间延迟纠缠实验”，其意义也因此变得无比深刻。它不再仅仅是检验一个关于纠缠的特定模型，它是在使用量子现象这个最精密的“探针”，去直接测量宇宙最宏大的“熵结构”的动态特性。这个实验将为这条将量子信息、引力物理和宇宙学统一在“熵的结构尺度”这一核心问题之下的探索路径，做出最终的、决定性的判决。

## X 贝尔不等式违背程度的时间尺度依赖性——对“无漏洞”实验的重新诠释

### X.1 引言：一个被忽略的关键变量

近年来，一系列“无漏洞”（Loophole-free）贝尔测试实验无可辩驳地证实了量子力学对局域实在论的违背。这些实验的关注焦点，主要在于关闭“局域性”和“探测”等空间维度上的漏洞。然而，本附录旨在论证，实验的时间结构——特别是其有效平均采样周期（effective average sampling period,  $\Delta t_s$ ）——可能是一个被长期忽略的、决定贝尔不等式违背程度的关键物理变量。

我们提出的假说：量子关联源于一个动态演化的、具有宏观相干时间  $\tau_c$  的宇宙背景场  $\Sigma(P)$ 。基于此，我们预测，贝尔测试的  $S$  值将表现出对采样周期  $\Delta t_s$  的强烈依赖性。本附录将通过重新分析两个里程碑式的“无漏洞”实验——Giustina 等人（2015）的光子实验和 Storz, Wallraff 等人（2023）的超导量子比特实验——来为这一假说提供强有力的、源自已发表数据的证据。

### X.2 理论预测：从超决定论到隐变量模型的退化

在我们的理论框架中，量子纠缠的“超光速”关联，源于两个分离的粒子对同一个非局域的、动态演化的背景场  $\Sigma(P)$  进行同步的、决定性的解码。这个背景场自身是随机演化的，其特征演化时间（即“记忆”时间或相干时间）为  $\tau_c$ 。我们基于“墨子号”卫星的实验数据，已在正文中半定量地推断出  $\tau_c$  的下界在毫秒量级（ $\tau_c \geq 4 \text{ ms}$ ）。

由此可导出一个清晰的预测：

1. **慢采样区 (Slow-Sampling Regime,  $\Delta t_s \gg \tau_c$ )**：如果实验的有效采样周期  $\Delta t_s$  远大于背景场的相干时间  $\tau_c$ ，那么每一次有效的测量，都是在对一个全新的、与前一次完全不相关的背景场  $\Sigma(P)$  进行独立采样。在这种情况下，实验能够最充分地展现量子力学的统计关联，其  $S$  值应趋近于理论最大值  $S \rightarrow 2\sqrt{2} \approx 2.828$ 。
2. **快采样区 (Fast-Sampling Regime,  $\Delta t_s \ll \tau_c$ )**：如果实验的有效采样周期  $\Delta t_s$  远小于背景场的相干时间  $\tau_c$ ，那么连续进行的多次测量，实际上都是在对一个几乎没有发生变化的、“冻结”的背景场  $\Sigma(P)$  进行重复探测。对于这一系列的测量而言，这个准静态的背景场就失去了超决定的作用。在这种情况下，我们的超决定论（非局域隐变量）模型将退化为一个近似的局域隐变量模型，其  $S$  值必然会被系统性地压低，趋近于经典的上限  $S \rightarrow 2$ 。
3. **过渡区 (Transition Regime,  $\Delta t_s \approx \tau_c$ )**：当采样周期与相干时间相当时， $S$  值应处于从量子极限到经典极限的过渡区间内，即  $2 < S < 2\sqrt{2}$ 。

### X.3 来自前沿实验的数据分析

现在，我们将上述预测与两个技术路径完全不同，且采样周期差异巨大的“无漏洞”实验进行对比。

- **实验一：Storz, Wallraff et al., Nature (2023)**

- **系统：**静态超导量子比特。
- **有效采样周期  $\Delta t_s$ ：**论文明确报告了其实验的实际重复频率为 **12.5 kHz**。这对应于一个采样周期：

$$\Delta t_s(\text{Wallraff}) = 1/12,500 \text{ Hz} = 80 \mu\text{s} = 0.08 \text{ ms}$$

- **实验结果 S 值：**  $S = 2.0747 \pm 0.0033$
- **分析：**这个采样周期 0.08 ms，**远远小于**我们预测的相干时间  $\tau_c$  ( $\geq 4 \text{ ms}$ )。该实验完美地落入了我们所定义的“快采样区”。根据我们的理论，其实验模型必然会退化为一个近似隐变量模型。其测得的 S 值 2.0747，非常接近经典极限 2，这一结果与我们的预测**高度吻合**。论文将其归因于纠缠制备保真度 ( $F \approx 80.4\%$ ) 的不足，但我们理论给出了一个不同的解释。

- **实验二：Giustina, Zeilinger et al., PRL (2015)**

- **系统：**飞行纠缠光子。
- **有效采样周期  $\Delta t_s$ ：**尽管我们无法获取 Giustina 等人 (2015) 的原始数据，但我们可以依据其论文及补充材料进行合理估算。其补充材料中提到，“晶体中每秒大约产生 3500 对（光子）” (Every second, about 3500 pairs are created in the crystal)，同时在最终的 3510 秒统计中，有效的“停止事件”总数为 276,515 次 (The total number of ... ‘stopping times’ ... is  $M = \dots = 276,515$ )。基于后者计算出的平均有效事件间隔约为 **12.7 毫秒**，而即便我们采纳源头产率的倒数 (约 **0.29 毫秒**)，这两个毫秒级的时间尺度，与 Storz, Wallraff 等人 (2023) 实验中明确的 80 微秒 (12.5 kHz) 采样周期相比，都显著**更慢**，这与他们实验观测到的 S 值 (Giustina  $\approx 2.50$  vs. Wallraff  $\approx 2.07$ ) 表现出的差异趋势，在我们的理论框架下是高度吻合的。
- **实验结果 S 值：**论文报告了  $S' > 0.101 \pm 0.020$ ，这在使用的一种不同形式的不等式中对应于  $S > 2.4$ 。我们采纳其 S 值约为  $S \approx 2.50$ 。
- **分析：**这个毫秒级的采样周期  $\Delta t_s$ ，与我们预测的相干时间  $\tau_c$  ( $\geq 4 \text{ ms}$ ) 是**同一个数量级**。该实验恰好落在了我们所定义的“过渡区”。根据我们的理论，其 S 值应该显著大于 2，但又无法达到理论极限。其测得的 S 值  $\approx 2.50$ ，恰好处于“半山腰”的位置，这一结果再次与我们的预测**惊人地吻合**。

需要注意的是，实验最终报告的  $S$  值，实际上代表了对一个宽广的有效采样延迟谱  $\Delta t$  的统计平均。这种“混合系综”的计算，既整合了来自“快采样区” ( $\Delta t \ll \tau_c$ ，将  $S$  值拉向经典极限 2) 的贡献，也整合了来自“慢采样区” ( $\Delta t \gg \tau_c$ ，将  $S$  值拉向量子极限  $2\sqrt{2}$ ) 的贡献，从而导致了一个中间值。Storz, Wallraff (2023) 的实验，无论是其采样间隔、还是其总运行时长，都显著短于其他几个实验，这使其结果更接近于一个纯粹的“快采样区”的测量。因为无法获取原始的实验数据，本文仅对这一趋势进行定性说明，而详细的定量解构分析，期待掌握实验数据的团队来完成。

## X.4 结论：一个被忽略的时间尺度依赖现象

表 1: 实验数据与理论预测区域对比

实验	有效平均采样周期 $\Delta t_s$	理论预测区域	实测 $S$ 值
Wallraff (2023)	0.08 ms	快采样区 ( $\ll \tau_c$ )	$\approx 2.07$
Giustina (2015)	$\sim 0.29$ ms - 12.7 ms	过渡区 ( $\approx \tau_c$ )	$\approx 2.50$
(参考) Aspect (1982)	秒级	慢采样区 ( $\gg \tau_c$ )	$\approx 2.70$

将这些实验的数据并列分析，揭示了一个清晰得令人难以忽视的模式：贝尔不等式的违背程度，与实验的有效平均采样周期  $\Delta t_s$  存在着强烈的正相关性。

我们认为，将 Storz, Wallraff 实验中较低的  $S$  值仅仅归因于“纠缠制备误差”，可能是一个不完整的解释。因为它无法解释为什么一个采样周期慢了几个数量级的、技术上更早的光子实验，反而能获得高得多的  $S$  值。

我们提出的“时间尺度依赖”假说，为这个悖论提供了一个统一且自洽的解释。它暗示着，Storz, Wallraff 小组的实验，可能无意中揭示了一个更深刻的时间维度物理——即他们的测量过程，由于采样过快，探测到了一个“准静态”的、行为接近于经典隐变量的宇宙背景场。

因此，我们所提议的“时间延迟纠缠关联测量”实验，其重要性变得愈发凸显。它的目标，将是系统性地、高精度地绘制出这条  $S(\Delta t_s)$  曲线，从而直接验证这个可能被长期忽略了的、关于量子关联与时间尺度的基本物理现象。

## 参考文献

- [1] Wilson, K. G. (1974). The renormalization group and the  $\epsilon$  expansion. *Physics Reports*, 12(2), 75-199.
- [2] Yin, J., Cao, Y., Li, Y. H., Liao, S. K., Zhang, L., Ren, J. G., ... & Pan, J. W. (2017). Satellite-based entanglement distribution over 1200 km. *Science*, 356(6343), 1140-1144.
- [3] Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982). Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters*, 49(25), 1804.
- [4] Storz, S., Schär, J., Kulikov, A., Magnard, P., Kurpiers, P., Lütolf, J., ... & Wallraff, A. (2023). Loophole-free Bell inequality violation with superconducting circuits. *Nature*, 617(7960), 265-270.
- [5] Giustina, M., Versteegh, M. A., Wengerowsky, S., Handsteiner, J., Hochrainer, A., Phelan, K., ... & Zeilinger, A. (2015). Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons. *Physical Review Letters*, 115(25), 250401.