

完整翻译与深度解读：《经典引力理论产生量子纠缠》

文章元数据翻译

经典引力导致的量子纠缠=费曼双质量叠加思想实验=量子场论在真空的高阶虚过程的传播子贡献而非纯波函数相位=相互作用不属于LOCC范畴因而不受其限制=小质量长时间难在相干保持但更利于区分机理=大质量短时间因信号量级可比需严格扫描对比缩放律

文章

经典引力理论产生量子纠缠

<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09595-7>

收稿日期：2024年9月24日

接收日期：2025年9月5日

在线发表日期：2025年10月22日

开放获取

检查更新

Joseph Aziz & Richard Howl¹

¹ 英国，埃格姆，伦敦大学皇家霍洛威学院物理系。邮箱：richard.howl@rhul.ac.uk

专家解读

在你开始阅读这篇论文之前，首先需要理解它的"身份"。这篇论文发表在《自然》(*Nature*)杂志上，这是科学界最顶尖、最负盛名的期刊之一¹。能够在这里发表，意味着这项研究成果经过了极其严格的同行评审，被认为是具有潜在突破性意义的。注意收稿、接收和发表日期，这之间长达一年的时间跨度，暗示了论文经历了多次修改和审阅，这是顶级科研工作的常态，确保了其严谨性。作者来自知名的学术机构，这也为其研究的可信度提供了背书。这篇文章的标题本身就极具挑战性——"经典引力理论产生量子纠缠"，它直接冲击了物理学界一个长期以来的普遍共识。接下来，我们将一起深入探索，看看作者是如何构建这个颠覆性的论点的。

摘要翻译与逐句解读

翻译：

引力与量子力学的统一仍然是科学领域最深刻的开放性問題之一。随着量子技术的最新进展，一个最初由理查德·费曼提出的实验构想，现在被认为是首次检验这一统一理论的有希望的途径。该实验涉及将一个大质量物体置

于两个位置的量子叠加态，并让它与另一个质量体发生引力相互作用。如果这两个物体随后发生纠缠，这被认为是引力遵循量子力学定律的明确证据。这一结论源于一些定理，这些定理将经典的引力相互作用视为一种只能传递经典信息而非量子信息的局域相互作用。在这里，我们将这些定理中使用的物质描述扩展到量子场论的完整框架，发现具有经典引力的理论随后可以传递量子信息，从而通过物理的、局域的过程产生纠缠。这种效应的尺度变化规律不同于量子引力理论的预测，因此它为稳健地提供引力量子性质证据所需的实验参数和形式提供了信息¹。

专家解读

这篇摘要是整篇论文的浓缩精华，也是我们理解其核心思想的路线图。让我们逐句剖析：

- **"引力与量子力学的统一仍然是科学领域最深刻的开放性問題之一。"** 这是物理学的"圣杯"。我们目前有两大理论支柱：爱因斯坦的广义相对论，它完美地描述了宏观世界中的引力（如行星运行）；以及量子力学，它精确地描绘了微观世界（如原子和粒子）。问题在于，这两个理论在各自的领域都取得了巨大成功，但它们的数学语言和基本世界观是相互冲突的。广义相对论的世界是平滑、连续和确定的，而量子力学的世界是离散、概率性和不确定的。如何将它们统一起来，是整个理论物理学面临的巨大挑战。
- **"一个最初由理查德·费曼提出的实验构想...被认为是首次检验这一统一理论的有希望的途径。"** 这里指的是一个著名的思想实验。想象一下，我们能将一个微小的物体（比如一颗尘埃）同时放在两个不同的地方——这就是"量子叠加"。然后，让这个处于叠加态的物体通过引力去"拉"另一个物体。通过观察第二个物体发生了什么，我们或许能窥探到引力本身的性质。这个曾经只存在于想象中的实验，由于现代量子技术的飞速发展，正变得越来越接近现实。
- **"如果这两个物体随后发生纠缠，这被认为是引力遵循量子力学定律的明确证据。"** 这是论文要挑战的"靶子"。什么是"量子纠缠"？你可以把它想象成一对"心灵感应"的硬币。无论它们相隔多远，只要你测量其中一枚是正面，另一枚就瞬间确定为反面，反之亦然。这种超距的关联是量子世界独有的"魔法"。物理学界普遍认为，只有量子化的相互作用（比如交换一个量子粒子）才能创造这种"魔法"。因此，如果引力能让两个物体纠缠，那就证明引力本身也是量子的，存在一个传递引力的量子粒子——"引力子"。
- **"这一结论源于一些定理，这些定理将经典的引力相互作用视为一种只能传递经典信息而非量子信息的局域相互作用。"** 这句话揭示了上述共识的理论基础，即所谓的**LOCC原则（Local Operations and Classical Communication，局域操作和经典通讯）**。想象你和朋友在两个完全隔音的房间里（局域），你们只能通过门缝递纸条来交流（经典通讯）。无论你们的策略多么巧妙，你们永远无法创造出那种"心灵感应"般的量子纠缠。之前的理论认为，经典引力就像递纸条，它只能传递经典信息（比如物体的平均位置），所以无法产生纠缠。
- **"在这里，我们将这些定理中使用的物质描述扩展到量子场论的完整框架..."** 这是作者的"神来之笔"。他们指出，之前的定理在描述引力时，对"物质"本身的理解过于简单了（用的是标准量子力学）。作者认为，我们应该用更精确、更基本的理论——**量子场论（QFT）**——来描述物质。这就像以前我们认为粒子是小球，现在我们认识到粒子其实是场的激发。
- **"...发现具有经典引力的理论随后可以传递量子信息，从而...产生纠缠。"** 这是论文的核心论点，也是最具颠覆性的结论。作者认为，即使引力场本身是经典的（像递纸条的"门缝"），但由于它所作用的物质遵循量子场论（房间里的人是"量子人"），这个过程仍然可以传递量子信息，并最终产生纠缠。这彻底推翻了"经典引力无法产生纠缠"的旧观念。

- **"这种效应的尺度变化规律不同于量子引力理论的预测..."** 这是论文的画龙点睛之笔。作者不仅提出了一个新理论，还给出了一个实验上可以验证的方法。他们计算出，由经典引力产生的纠缠，其强度随实验参数（如物体质量）变化的规律，与由量子引力产生的纠缠是**不同的**。这意味着，费曼的实验不再是一个简单的"是/否"问题（有没有纠缠？），而变成了一个定量的测量问题（纠缠的强度是如何变化的？）。通过精确测量这个变化规律，我们就能分辨出引力到底是经典的还是量子的。

总而言之，这篇论文的论证逻辑非常清晰和巧妙：它首先指出现有共识是建立在一个隐藏的假设（对物质的描述不完备）之上，然后通过修正这个假设（引入量子场论），得出了一个与共识完全相反的结论，并最终提出了一个可供实验检验的明确判据。

理论背景——费曼的思想实验与LOCC的枷锁

引力的量子化难题

翻译：

尽管其他基本相互作用——电磁力、强核力和弱核力——已经成功地与量子理论结合，但标准的量子化方法似乎对引力失效。这激发了将引力与量子理论统一的替代方法，包括弦理论、圈量子引力，以及引力根本没有被量子化而是保持根本上经典的提议。迄今为止，一直缺乏一个决定哪条路线是正确的决定性因素：实验证据 1。

专家解读

自然界有四种基本力量：强核力（将原子核捆绑在一起）、弱核力（导致放射性衰变）、电磁力（我们日常接触的电力、磁力和光），以及引力。对于前三种力，物理学家们已经建立了非常成功的量子理论，统称为"标准模型"。在这个模型中，每一种力都由一种特定的"信使粒子"来传递：强力由胶子传递，弱力由W和Z玻色子传递，电磁力由光子传递。这个过程被称为"量子化"。

然而，当我们试图用同样的方法来处理引力时，麻烦就出现了。如果我们假设引力也由一种信使粒子——"引力子"——来传递，并套用标准模型的数学方法进行计算，结果会得到无穷大。在其他理论中，物理学家有办法处理这些无穷大（这个过程叫做"重整化"），但对于引力，这些数学技巧失灵了。这就是"引力不可重整化"问题，也是为什么说"标准的量子化方法似乎对引力失效"。

这个巨大的困难迫使物理学家们去探索一些更激进、更具革命性的想法。比如"弦理论"，它认为基本粒子不是点，而是一小段振动的"弦"，引力子只是弦的一种振动模式。还有"圈量子引力"，它认为空间和时间本身就是由离散的"量子"单元构成的。当然，也有一派观点认为，我们可能从一开始就想错了，引力可能根本就不是量子的，它本质上就是经典的，是时空的弯曲，正如爱因斯坦所描述的那样。所有这些理论都非常吸引人，但它们都面临一个共同的问题：缺乏实验证据。我们不知道哪条路是对的，因为我们还没有一个实验能够深入到能量如此之高、尺度如此之小的领域来检验它们。

费曼实验与纠缠作为判据

翻译：

在1957年的教堂山会议上，费曼提出了一个可以揭示引力量子性质的思想实验，这个想法现在通过量子实验的快速进展变得可行。在费曼的提议中，一个普朗克质量（0.02 mg）的物体被置于两个位置的量子叠加态，然后与另一个质量体发生引力相互作用。尽管从最初的会议记录中不清楚费曼当时用于确定引力量子性质的确切测量方案，但今天这被认为是观察大质量物体之间的纠缠，并有几个定理指出，物理上现实的（局域的）经典引力理论永远无法在这些大质量物体之间产生纠缠。这些定理基于一个假设，即经典引力理论只能涉及局域操作和经典信息的交换。这是因为非局域的、超距作用的过程被认为是非物理的，而且一个经典的引力相互作用似乎很自然地不能传递量子信息。在这个假设下，这种相互作用属于一类过程，根据量子信息理论或其推广，这类过程不能产生纠缠，在量子信息理论中被形式化为局域操作和经典通讯（LOCC）。已经为见证这种引力诱导的纠缠制定了大量的实验方案，并且这类实验的初步工作正在进行中。由于这些实验的根本重要性，出现了一些关于纠缠是否真的能为量子引力提供证据的著作，这些著作通常受到教堂山会议讨论的启发。这些工作主要关注经典引力是否能够通过违反LOCC的LO（局域操作）部分的非局域操作来起作用，从而经典引力是否能够通过非局域方式产生纠缠（相关综述请参见参考文献12, 18和补充信息）。然而，这与我们对自然界中相互作用（无论是基于电磁学、标准模型还是广义相对论）都是局域作用的理解相悖，因此通常在物理基础上被排除 1。

专家解读

这段话详细阐述了当前检验引力量子性质的主流实验思想及其理论基础。让我们来描绘一下这个实验的生动画面：想象我们有两个非常微小的金刚石晶体，每个都含有大量的碳原子。首先，我们用某种量子技术（比如磁场）将第一个金刚石置于"左边位置"和"右边位置"的叠加态。这意味着，从量子的角度看，它同时在左边也在右边。然后，我们对第二个金刚石做同样的操作。这样一来，整个系统就处于四种可能状态的叠加之中：(左, 左), (左, 右), (右, 左), (右, 右)。

关键在于，这四种状态下，两个金刚石之间的引力是不同的。在(左, 右)和(右, 左)这两种状态下，它们离得更近，引力更强；而在(左, 左)和(右, 右)状态下，它们离得更远，引力更弱。随着时间的推移，这种引力差异会影响每个金刚石的量子状态。如果引力是量子的，它会像一个"量子信使"（引力子）一样在它们之间传递信息，最终将两个金刚石的状态"纠缠"在一起。这意味着，在实验结束时，如果我们测量发现第一个金刚石在左边，我们就能以高于随机概率的把握预测第二个金刚石的位置。这就是"引力诱导的纠缠"。

为什么说观察到纠缠就意味着引力是量子的呢？这里就要回到我们之前提到的**LOCC（局域操作和经典通讯）**原则。让我们用"隔音室和纸条"的比喻来深入理解它：

- **局域操作（Local Operations, LO）**：你和你朋友在各自的房间里可以任何事情——扔硬币、洗牌、做计算。这对应于实验中我们对单个金刚石进行的操作（比如把它放在叠加态）。这个原则是物理学的基础，它排除了"超距作用"这种幽灵般的想法。几乎所有物理学家都同意，相互作用必须是局域的。
- **经典通讯（Classical Communication, CC）**：你们之间唯一的交流方式是写纸条从门缝递过去。纸条上只能写经典信息，比如"我的硬币是正面"或者"我下一步打算做什么"。这对应于经典引力理论。人们想当然地认为，一个经典的引力场，就像牛顿引力场或爱因斯坦的时空曲率，只能传递关于物体平均位置、质量等经典信息。它不能传递一个物体处于"左边和右边叠加"这种纯粹的量子信息。

基于LOCC的定理断言：**任何遵守LOCC规则的过程，都绝对无法从无到有地创造出量子纠缠。**因此，如果我们在实验中确实观察到了纠缠，那就意味着引力相互作用一定违反了LOCC。既然大家普遍接受LO部分是不可违背的物理基础，那么唯一的可能性就是CC部分被违反了——也就是说，引力传递的不是经典信息，而是**量子信息**。而一个能够传递量子信息的信道，根据定义，就是一个量子信道。这就等同于证明了引力是量子的。这就是之前所有实验方案设计的逻辑基石。

挑战经典通讯

翻译：

在物理基础上假设LOCC的LO部分，剩下的是CC部分。一个经典引力理论应该只涉及经典通讯的想法似乎很自然，并且没有受到质疑。然而，我们在这里展示了局域的经典引力理论实际上可以产生量子通讯，从而产生纠缠。那些认为经典引力只能作为LOCC运作的论点和定理，都含蓄地将物质处理为标准量子力学。然而，据我们所知，物质遵循量子场论（QFT），当我们考虑到这一点时，我们表明一个经典的引力相互作用会自然地产生量子通讯 1。

专家解读

这里，作者终于亮出了他们的“利剑”，直指整个论证大厦的核心支柱——关于“经典通讯”（CC）的假设。

作者首先肯定了物理学界对“局域操作”（LO）的坚持是正确的。自然界中不存在鬼魅般的超距作用，所有的相互作用都是在时空中一步一步、局域地传播的。这一点，无论是电磁学还是广义相对论，都严格遵守。

然而，作者接着提出了一个革命性的观点：凭什么我们想当然地认为一个**经典**的引力场就只能传递**经典**信息呢？这个看似“自然”的假设，在过去几十年里几乎无人质疑。作者指出，这个假设的根源在于我们对“物质”的描述不够精确。

之前的理论在思考这个问题时，脑海中的物质模型是基于“标准量子力学”的。在这个模型里，一个粒子可以处于叠加态，但粒子与粒子之间的“真空”是空无一物的。作者认为，这是一个过时的图像。我们对物质更深刻的理解来自**量子场论（QFT）**。在QFT的视角下，所谓的“真空”并非空空如也，而是一个充满着瞬息生灭的“虚粒子对”的能量海洋。例如，一个电子周围的空间，实际上充满了不断产生又湮灭的虚电子-正电子对和虚光子。

作者的核心洞见在于：**一个经典的引力场，虽然它自身不是量子的，但它可以与这些存在于真空中的、完全量子的虚粒子对发生相互作用。**这就好像，虽然你递纸条的“门缝”是经典的，但门缝连接的两个房间里充满了量子现象。当引力场与这些量子化的物质场（虚粒子）相互作用时，就可能打开一个传递量子信息的“后门”。这个“后门”不是通过引力场本身（它仍然是经典的），而是通过被引力场搅动的物质场（虚粒子）来传递量子信息。

因此，作者的论点可以总结为：经典引力 + 标准量子力学物质 $\approx$ LOCC（无法产生纠缠）。但是，经典引力 + 量子场论物质 $\neq$ LOCC（可以产生纠缠）。通过将我们对物质的描述升级到更前沿的理论，作者发现了一条之前被忽略的、可以产生纠缠的物理路径。这正是本文的精髓所在。

来自电磁学的启示——量子电动力学（QED）

量子电动力学

翻译：

为了更好地理解经典引力理论如何能产生量子通讯，我们首先回顾一下量子电动力学（QED）。这是我们关于物质如何通过电磁力相互作用的最佳理论，它涉及用QFT来处理物质和电磁场。其相互作用哈密顿量为：

$$H_{int}^{QED} = \int d^3x q A_\mu(x) \bar{\psi}(x) \gamma^\mu \psi(x) \quad (1)$$

其中 $\psi(x)$ 是一个带电荷 q 的费米子场， $\bar{\psi}(x)$ 是狄拉克伴随场， $A_\mu(x)$ 是量子化的四维势， γ^μ 是伽马矩阵。

QED的计算大多是微扰地进行的，我们可以通过费曼图直观地看待相互作用。例如，图1（左上）描述了两个电子在一阶微扰理论中的相互作用。在这个图中，电子之间的电磁相互作用由一个虚光子来媒介，这可以被看作是量子通讯。

然而，与经典电磁学相比，QED的一个关键发现是，相互作用过程不必仅仅由虚光子来媒介。例如，在电子散射过程的更高阶中，存在如图1（右上）所示的图，其中虚光子伴随着虚电子粒子。事实上，即使在领头阶，也存在只涉及虚电子传播子的过程，其中一些如图1（下排）所示。从非微扰的角度看，没有办法将QED中的虚物质与虚光子分开，所有的电磁相互作用都应被视为物质场和电磁场的组合在传播相互作用 1。

专家解读

在直接攻击引力这个难题之前，作者巧妙地先用一个我们已经非常了解的理论——量子电动力学（QED）——作为类比，来铺垫他们的核心思想。QED是描述电子、光子以及它们之间相互作用的量子场论，是人类历史上最成功的物理理论之一。

公式(1)是QED的核心，它用数学语言描述了相互作用的规则。你可以把它理解为一个"配方"： H_{int}^{QED} 代表相互作用的能量。这个配方告诉我们，一个带电粒子场 $\psi(x)$ （代表电子等）是如何与光子场 $A_\mu(x)$ （代表电磁力）耦合在一起的。公式中的"帽子"符号（ $\wedge$ ）表示这些都是量子化的场，它们具有量子的特性。

为了进行计算，物理学家发明了一种非常直观的工具——**费曼图**。它就像是粒子相互作用的"连环画"。

图1：QED或线性量子引力的费曼图

- **图1描述：** 这张图展示了几种粒子相互作用的方式。波浪形的蓝线代表光子（或引力子）。黑色的实线代表电子、正电子或一般的物质/反物质粒子。为了便于观察，没有箭头的双线代表虚粒子 1。
- **左上图：** 这是最简单的相互作用。两个电子（黑线）靠近，其中一个"扔"出一个虚光子（蓝线），另一个"接住"它，然后两者分开。这个虚光子传递了电磁斥力。这个过程就是"量子通讯"的典型例子，因为传递的媒介（光子）是量子的。
- **右上图和下图：** 这些是更复杂的相互作用。作者在这里要强调的**关键点**是，相互作用的媒介**不仅仅是虚光子**。在右上图中，两个电子之间不仅交换了虚光子，这个虚光子在传播过程中还短暂地变成了一个虚电子-

正电子对，然后再变回光子。在下图中，相互作用甚至可以完全由虚物质粒子（比如两个虚电子-正电子对）来传递，而没有直接的虚光子交换。

这个类比的深刻之处在于：在完整的量子场论（QED）框架下，力（电磁力）的传递是**场和物质共同参与**的结果。真空不是空的，它充满了各种虚粒子。因此，当我们谈论两个电子之间的相互作用时，我们不能仅仅认为是它们在交换光子，而必须考虑到所有可能的、由虚光子和虚物质粒子共同构成的复杂过程。这个看似细微的差别，正是作者接下来用来颠覆经典引力论证的关键武器。

引力理论的剖析——量子与经典的交锋

微扰量子引力

翻译：

虽然对于一个完整的量子引力理论还没有共识，但在低能量下，人们广泛接受这样的理论应该近似于微扰量子引力。这是一个有效场论，涉及将线性广义相对论与物质场一起量子化：完整的时空度规 $g_{\mu\nu}$ 被分解为 $\eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ ，其中 $\eta_{\mu\nu}$ 是背景经典时空的度规， $|h_{\mu\nu}| \ll 1$ 的部分被量子化。物质与引力相互作用的哈密顿量是：

$$H_{\text{int}}^{\text{QG}} = -\frac{1}{2} \int d^3x \hat{h}^{\mu\nu}(x) T_{\mu\nu}(x) \quad (2)$$

其中 $T_{\mu\nu}(x)$ 是物质的量子化能量-动量张量。例如，用一个大质量复标量场来描述物质， $T_{\mu\nu}(x)$ 变为：

$$T_{\mu\nu}(x) = T_{\mu\nu}[\phi^\dagger(x)\phi(x)] := \partial_{[\mu}\phi^\dagger\partial_{\nu]}\phi - \eta_{\mu\nu}\partial_\rho\phi^\dagger\partial^\rho\phi - \eta_{\mu\nu}m^2c^2/\hbar^2\phi^\dagger\phi \quad (3)$$

其中 m 是质量， c 是光速， $\hbar$ 是普朗克常数。这里， $\partial_{[\mu}A\partial_{\nu]}B := \partial_\mu A\partial_\nu B + \partial_\nu A\partial_\mu B$ 。公式(2)中的相互作用哈密顿量与公式(1)的形式相似，微扰量子引力与QED非常平行，本质上就是用引力子替换了光子。例如，对于两个物质粒子相互作用，在一阶我们有一个如图1（左上）所示的图，但是是由一个虚引力子而不是虚光子来媒介相互作用。类似地，我们也有图1中所有其他的图，其中存在虚物质或虚引力子传播子 1。

专家解读

这一节描述的是当前物理学界对量子引力的"标准看法"。因为我们没有一个完整的量子引力理论，所以在处理能量较低（远低于普朗克能量）的现实问题时，物理学家们采用了一种叫做"有效场论"的近似方法。

这个方法的核心思想是，在引力场不那么强的时空中（比如地球表面，而不是黑洞中心），我们可以把时空看作是一个平坦的背景（由 $\eta_{\mu\nu}$ 描述，就像一张平坦的纸），上面有一些微小的涟漪（由 $h_{\mu\nu}$ 描述）。然后，我们只把这些"涟漪"进行量子化，认为它们是由引力子构成的。

公式(2)就是这个理论的相互作用"配方"。它描述了引力场的涟漪 $\hat{h}^{\mu\nu}(x)$ 是如何与物质的能量和动量 $T_{\mu\nu}(x)$ 耦合的。（你可以直观地理解为"物质告诉时空如何弯曲"，这里的 $T_{\mu\nu}$ 就是物质的分布，而 $\hat{h}^{\mu\nu}$ 就是时空的响应）。公式(3)只是给出了一个具体的例子，说明如何计算一个简单粒子场（标量场）的能量-动量张量。

最关键的对比在于，这个量子引力的"配方"（公式2）和QED的"配方"（公式1）在结构上惊人地相似。这意味着，在微扰量子引力理论中，所有我们在QED里看到的费曼图（图1）都会有一个引力版本。两个物体之间的引力，最简单的形式就是交换一个虚引力子（对应图1左上），但同样也存在更复杂的过程，比如交换一个虚引力子并伴随着虚物质对的产生（对应图1右上），或者完全由虚物质粒子来传递相互作用（对应图1下排）。

这一节的作用是建立一个"参照系"。它告诉我们，在一个标准的量子引力理论中，产生纠缠的机制是多种多样的，既包括引力子信道，也包括物质信道。这是接下来与"经典引力"进行对比的基础。

微扰经典引力

翻译：

在一个根本上经典的引力理论中，引力场是经典的。因此，在低能区，最简单地，我们会有一个如公式(2)所示的相互作用哈密顿量，但其中的 $h_{\mu\nu}$ 没有被量子化：

$$H_{\text{int}}^{\text{CG}} = -\frac{1}{2} \int d^3x \, h^{\mu\nu}(x) T_{\mu\nu}(x) \quad (4)$$

这是线性弯曲时空中的QFT的相互作用哈密顿量，它和任何其他QFT一样，是一个局域理论。公式(4)中的相互作用哈密顿量类似于在QED中有时进行的一种近似：对于某些QED计算，如卢瑟福散射，一个很好的近似是忽略电磁场的量子性，这样我们就在公式(1)中去掉了 A_μ 上的帽子。可以为这个理论绘制费曼图，通常用一个叉号来表示经典的电磁势和波，或者等效地，一个经典的电磁场源。例如，图2（左上）展示了一个电子与经典势或波的相互作用，图2（中上）描绘了两个电子在这个理论中将如何相互作用，这里的叉号可以被看作是打破了QED中涉及虚光子的量子通讯信道。然而，某些图仍然显示虚物质在传播相互作用，如图2（下排和右上）所示。

类似地，我们可以从经典引力相互作用哈密顿量公式(4)构建费曼图，现在图2中带叉号的波浪线表示经典的引力势和波。然而，就像在QED近似中一样，虽然没有引力子，但仍然存在虚物质传播子（例如，参见图2，下排和右上），因此存在量子通讯。那么，由于存在量子通讯，经典引力可以产生纠缠，这违反了上面讨论的定理和论点。这种情况的发生，是因为那些定理对引力相互作用的构成采取了一种限制性的观点：它们实质上假设量子引力只涉及虚引力子传播子，但实际上，在场论层面上，也存在虚物质传播子 1。

专家解读

这是整篇论文的论证核心，也是最精彩的部分。作者在这里构建了他们的"经典引力"模型，并揭示了旧有定理的"盲点"。

关键的一步在于公式(4)。对比一下量子引力的公式(2)，你会发现唯一的区别是引力场 $h^{\mu\nu}(x)$ 上面的"帽子"消失了。这个小小的"摘帽"动作，在物理上意义重大：它意味着我们假设引力场本身是一个纯粹的经典场，就像牛顿引力场一样，它没有量子涨落，没有引力子。但是，它所作用的物质场 $T_{\mu\nu}(x)$ 仍然是完全量子的（帽子还在）。这种一个经典场与一个量子场相互作用的理论，被称为"半经典"理论。

作者再次使用了与QED的类比。在某些情况下，比如计算一个电子如何被一个巨大的、经典的电荷（比如原子核）散射时，我们不需要把原子核的电磁场也量子化，可以把它当作一个经典的电场来处理。这种近似非常有效。

现在，我们来看这个半经典理论的费曼图。

图2：近似为经典电磁场或线性经典引力的QED费曼图

- **图2描述：**这张图展示了在引力场（或电磁场）被视为经典场时的相互作用。波浪形的蓝线是经典的电磁或引力场/势。叉号代表场的经典源。黑线和双线与图1中的定义相同 1。
- **中上图：**这是两个物体通过经典引力相互作用的图像。你可以看到，连接两个物体的媒介不再是一个单一的虚引力子传播子，而是每个物体都与一个共同的经典引力场源（叉号）相互作用。作者指出，这个过程**不能**产生纠缠。因为经典场源就像一个“公告板”，每个物体都只是独立地读取公告板上的信息（即引力势），它们之间没有直接的量子信息交换。虚引力子这个“量子通讯信道”被打破了。**这就是旧定理的逻辑基础。**
- **右上图和下图：这是本文的“胜负手”。**作者指出，即使没有了虚引力子，那些涉及**虚物质粒子**的图依然存在！在右上图中，两个物体通过与经典引力场相互作用，激发出了一个虚物质-反物质对的“圈”，这个圈连接了两个物体。这个虚物质圈是纯粹的量子现象，它可以携带量子信息。换句话说，**即使连接它们的“桥”（引力场）是经典的，但在这座桥上跑的“信使”（虚物质对）可以是量子的！**

至此，作者完成了对旧定理的颠覆。旧定理的错误在于，它们只考虑了第一种情况（中上图），想当然地认为既然没有引力子，就没有任何量子通讯信道。它们完全忽略了第二种可能性（右上图和下图），即通过物质场本身（真空中的虚粒子）建立量子通讯信道。一旦我们采用更完备的量子场论来描述物质，这个被忽略的信道就自然而然地出现了。因此，结论被逆转：一个局域的、经典的引力理论，只要它与遵循量子场论的物质相互作用，就能够产生量子通讯，从而能够产生纠缠。

实验再分析——两种效应的定量比较

费曼的实验

翻译：

为了进一步说明这一点，我们现在演示公式(4)如何在费曼实验的一个版本中导致纠缠。两个球形质量分布，每个总质量为 M ，半径为 R ，被制备在两个位置的量子叠加态中。这可以通过多种方式实现，例如，实现物质波分束器，操控势阱，或利用内部自由度，如在斯特恩-盖拉赫实验中的量子自旋（图3）。假设引力是粒子间唯一的相互作用，在非相对论极限下，并将物质在一阶量子化中描述，它仅仅在每个叠加分支上作用一个量子相位 $\varphi_{ij} := GM^2 t / (\hbar d_{ij})$ ，其中 d_{ij} 是在标记为 $i, j \in \{L, R\}$ 的分支中物质分布之间的距离， GM^2/d_{ij} 是牛顿势能。当叠加尺寸 Δx 远大于最小距离 d_{RL} 时，只有量子相位 $\varphi := \varphi_{RL}$ 是显著的，因此系统明显纠缠，纠缠度仅依赖于 φ 。相比之下，当 $\Delta x \ll d_{RL}$ 时，纠缠的相关参数基本上变为 $\bar{\varphi} := \varphi \Delta x^2 / d_{RL}^2$ 。为了测量纠缠，可以将叠加的路径重新组合，并在干涉仪输出或内部自由度之间寻找关联 1。

专家解读

在理论上证明了经典引力可以产生纠缠后，作者现在转向具体的实验场景，来计算这种效应的大小，并与标准量子引力理论的预测进行对比。

图3：费曼实验某个版本的可视化

- **图3描述：**这张图直观地展示了实验的设置。两个球形的质量分布（标记为1和2），半径为 R ，每个都被置于两个位置的量子叠加态中。蓝色和红色代表被 Δx 分隔开的叠加成分。在引力相互作用一小段时间后，路径被重新组合，并寻找纠缠。图中展示了使用内部自旋的斯特恩-盖拉赫干涉测量法，但其他设置，如平行的马赫-曾德干涉仪也是可能的。这里， Δx 被描绘得比最小间距 d_{RL} 大，但可以实现包括 $\Delta x \ll d_{RL}$ 在内的通用配置 1。

这一节首先回顾了对这个实验的"标准"分析方法，这种方法使用的是简化的"一阶量子化"图像（即把物体看作有波函数的粒子，而不是场）。在这种简化模型下，引力的作用非常简单：它只是给系统的不同空间构型（比如(左, 右)这个分支）的波函数乘上一个相位因子 $e^{i\varphi}$ 。这个相位 φ 的大小正比于该构型下的引力势能 GM^2/d 和相互作用时间 t 。

当两个物体一个在左一个在右时（(L,R)或(R,L)），它们距离最近，引力势能最大，获得的相位也最大，我们称之为 φ 。当它们都在左或都在右时（(L,L)或(R,R)），距离较远，相位较小。正是这种不同分支间相位的**差异**导致了纠缠。如果只有(R,L)分支获得了显著的相位 φ ，而其他分支的相位都接近于零，那么最终的量子态就会变成一种纠缠态。这个相位 φ 就成了衡量量子引力效应导致纠缠程度的关键参数。这个参数的大小，是接下来进行比较的基准。

量子引力

翻译：

我们现在使用微扰量子引力以及对物质的QFT描述来分析这个实验。忽略电磁相互作用，我们将在量子叠加后瞬间的物体初始状态取为NOON态的乘积：

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{2}(|N\rangle_{1L}|0\rangle_{1R}|\uparrow\rangle_1 + |0\rangle_{1L}|N\rangle_{1R}|\downarrow\rangle_1) \otimes (|N\rangle_{2L}|0\rangle_{2R}|\uparrow\rangle_2 + |0\rangle_{2L}|N\rangle_{2R}|\downarrow\rangle_2) \quad (5)$$

其中 $|N\rangle_{ki}$ 是 N 个独立的、遵循复标量场的物质粒子的位置态的乘积，其中 $k \in \{1, 2\}$ 和 $i \in \{L, R\}$ 标记了球形物体的位置（与图3匹配）。 N 是物体中的粒子数，使得 $M=mN$ ， m 是粒子的质量。我们还包括了可能的内部自旋态 $\{|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle\}$ ，这可以用来产生量子叠加。

经过时间 t 后，薛定谔绘景中的物质系统状态为：

$$|\Psi(t)\rangle = e^{i\hat{H}_0 t/\hbar} \mathcal{T} e^{-(i/\hbar) \int_0^t d\tau \hat{H}_I(\tau)} |\Psi\rangle \quad (6)$$

其中 $\mathcal{T}$ 是时间排序算符， τ 是一个虚设的时间变量， $\hat{H}_0$ 是没有物质-引力相互作用时的微扰量子引力哈密顿量， $\hat{H}_I = \exp(i\hat{H}_0 t/\hbar) \hat{H}_{int} \exp(-i\hat{H}_0 t/\hbar)$ 。

就在叠加路径被重新组合之前，例如通过反向斯特恩-盖拉赫装置，我们可以写出：

$$|\Psi(t)\rangle \propto \alpha_{LL}|N\rangle_{1L}|N\rangle_{2L} + \alpha_{LR}|N\rangle_{1L}|N\rangle_{2R} + \alpha_{RL}|N\rangle_{1R}|N\rangle_{2L} + \alpha_{RR}|N\rangle_{1R}|N\rangle_{2R} \quad (7)$$

其中 $\alpha_{ij} \in \mathbb{C}$ 。为简单起见，我们现在忽略了任何内部自旋态和真空态。我们可以通过将公式(7)（以及公式(6)）与基态 $|N\rangle_{1i}|N\rangle_{2j}$ 做内积，并将公式(6)中的时间排序么正运算展开为戴森级数来计算振幅 α_{ij} 。振幅可以写成一个微扰级数，每一项对应于戴森级数的一项： $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}^{(0)} + \alpha_{ij}^{(1)} + \alpha_{ij}^{(2)} + \dots$ 。虚引力子在物质物体之间交换的第一个过程发生在级数的二阶，对应于图1（左上）的费曼图。这个费曼图的振幅，在 $ct \gg d_{ij}$ 的极好近似下为：

$$GM^2 t / (\hbar V^2) \iint d^3x d^3y \theta_{1i}(x) \theta_{2j}(y) / |x-y| = i\varphi_{ij} \quad (8)$$

其中 $\theta_{ki}(x) := \theta(R - |x - X_{ki}|)$ 是定义分支 i 中物质分布球形的单位阶跃函数， X_{ki} 是分布的质心坐标， $V := 4\pi R^3/3$ 。上述振幅直接贡献于 $\alpha_{ij}^{(2)}$ ，因此当 $\Delta x \gg d_{RL}$ 时， $\alpha_{RL}^{(2)}$ 振幅主导所有其他振幅并等于 $i\varphi$ 。然后，考虑到戴森级数给出 $\alpha_{ij}^{(0)}=1$ ，并且 $\alpha_{ij}^{(1)}$ 不包含引力场的收缩，我们剩下 $\alpha_{ij} \approx 1$ ，除了 $\alpha_{RL} \approx 1 + i\varphi$ ，这与一阶量子化结果在量子相位 $\exp(i\varphi)$ 的一阶展开上匹配。完整的非微扰结果可以通过考虑相应更高阶费曼图的形式并外推结果而直接获得 1。

专家解读

这一部分是使用严谨的量子场论语言，来重新计算标准量子引力理论下的纠缠效应。虽然公式看起来复杂，但其物理思想是清晰的。

- **公式(5)和(7)** 描述了系统的状态。公式(5)是初始状态，它精确地描述了两个物体（1和2）都处于左（L）和右（R）位置的叠加态。公式(7)是演化一段时间后的最终状态，其中 α_{ij} 是复数，称为"概率振幅"，它的模平方代表系统处于相应构型（比如1在左，2在右）的概率。如果最终 $\alpha_{LL}\alpha_{RR} \neq \alpha_{LR}\alpha_{RL}$ ，系统就是纠缠的。我们的任务就是计算这些 α 值。
- **公式(6)** 是计算的"引擎"。它是一个标准的量子力学演化公式，告诉我们如何从初始状态计算出最终状态。其中的核心是指数项，它包含了相互作用哈密顿量 $\hat{H}_I$ 。由于我们无法精确求解这个方程，我们使用一种叫做"戴森级数"的近似方法，把它展开成一个无穷级数，然后逐项计算。
- **计算过程**：展开戴森级数后，第零项 $\alpha_{ij}^{(0)}$ 对应于没有相互作用，所以所有的 α 都等于1，没有纠缠。第一项 $\alpha_{ij}^{(1)}$ 也因为数学上的原因（没有引力场收缩）而为零。真正的相互作用首次出现在第二项 $\alpha_{ij}^{(2)}$ 。这一项正好对应于我们之前讨论过的、交换一个虚引力子的费曼图（图1左上）。
- **公式(8)** 是计算这个费曼图的结果。这个复杂的积分最终给出了一个非常简洁和漂亮的结果：它等于 $i\varphi_{ij}$ ，这里的 φ_{ij} 正是我们在上一节用简化模型得到的那个量子相位！

这个结果意义重大。它表明，严谨的量子场论计算，在最低阶近似下，完美地重现了我们用简化物理图像得到的结果。最终，在(R,L)这个分支上，振幅 α_{RL} 变成了大约 $1 + i\varphi$ ，而其他分支的振幅仍然是1。这正是产生纠缠的原因。这个 $\varphi \propto GM^2 t / \hbar$ 就是量子引力效应的"指纹"。

经典引力

翻译：

我们现在在经典引力的背景下考虑上述实验。计算过程与上面类似，但使用的是公式(4)而不是公式(2)的相互作用哈密顿量。在戴森级数的二阶，没有非零的、对应于包含物质物体间量子通讯的费曼图的威克收缩，而在量子引力中负责纠缠的图，即图1（左上），变成了图2（中上）。这个图代表两个物质物体处于它们组合的经典引力场中，其振幅仅仅是在每个物质物体的分支之间贡献一个局域的相对量子相位，这不会导致纠缠。

然而，在级数的四阶，出现了一个图，其中物质分布通过虚物质粒子在量子力学上连接起来（图2，右上）。在与量子引力情况相同的近似下，该费曼图的振幅为（见方法部分）：

$$\vartheta_{ij} := m^6 t^2 N^2 / (4\pi^2 \hbar^6 V^2) (i \int d^3x d^3y \varphi(x) \varphi(y) \theta_{1i}(x) \theta_{2j}(y) / |x-y|^2) \quad (9)$$

其中 $\varphi(x) := -c^2 \hbar^{00}(x)/2$ 是物质物体的总引力势， ϑ_{ij} 直接贡献于公式(7)中的 $\alpha_{ij}^{(4)}$ 。由于我们有一个经典的引力理论，每个叠加分支中的 $\varphi(x)$ 是相同的，否则牛顿力就会处于量子叠加中。某些工作曾考虑引力是经典的，但仍允许场或牛顿力处于量子叠加中。在这里，我们坚持量子叠加是纯粹的量子力学现象这一观念，因此公式(9)中的 $\varphi(x)$ 没有被叠加，也不是一个量子算符。然而，尽管如此，公式(9)通常会导致纠缠，因为对于不同的叠加路径， $\theta_{1i}(x)$ 和 $\theta_{2j}(y)$ 是不同的，并且通过 $|x-y|$ 连接，使得 $\alpha_{ij}^{(4)}$ 对于每个叠加路径都不同，除了由于对称性 $\alpha_{LL}^{(4)} = \alpha_{RR}^{(4)}$ 。我们可以从图2（右上）的费曼图中理解这一点，其中与引力势不同，虚物质粒子与不同的质量态进入量子叠加，并且虚物质粒子传播的距离在每个分支中都不同，导致公式(9)中的空间积分通过 $|x-y|$ 连接起来。

由于公式(9)中的 $\varphi(x)$ 来自于物质的叠加，我们必须在一个基本的经典引力理论中精确地考虑引力是如何由量子物质产生的。在最被广泛考虑的方法中，公式(9)中的 $\varphi(x)$ 是两个物体叠加态的平均势之和。在这种情况下， ϑ_{ij} 与 d_{ij} 成反比，因此，如果 $\Delta x \gg d_{RL}$ ，RL振幅将主导所有其他振幅，并且 $|\vartheta_{RL}| \approx \vartheta$ ，其中（见方法部分）：

$$\sqrt{\vartheta} = 6/25 \cdot G^2 m^2 M^3 R t / (\hbar^3 d_{RL}) \quad (10)$$

那么公式(7)中的状态就明显是纠缠的，因为就像在量子引力中一样， α_{RL} 包含了一个贡献 ϑ ，而这个贡献在任何其他振幅 α_{ij} 中都不存在。此外，与量子引力类似， ϑ 与 d_{ij} 的反比关系使得当 $\Delta x \ll d_{RL}$ 时，可以将 $\mathcal{F} := \vartheta \Delta x^2 / d_{RL}^2$ 识别为纠缠的相关参数 1。

专家解读

现在，作者用同样的计算工具，来分析他们提出的“经典引力+量子场论物质”模型，这是全文的高潮部分。

- **二阶效应消失：**首先，他们发现在戴森级数的二阶，经典引力理论**不能**产生纠缠。因为原来负责纠缠的虚引力子交换图（图1左上）现在变成了图2（中上）的形式，我们已经分析过，它就像两个物体独立地与一个经典引力场相互作用，无法建立量子关联。这与旧定理的结论一致。
- **四阶效应出现：**然而，作者并没有停下，他们继续计算更高阶的项。奇迹发生在**四阶**！在四阶微扰理论中，出现了一个新的、非零的贡献，它对应的正是那个通过虚物质圈来传递相互作用的费曼图（图2右上）。

- **公式(9)和(10)** 是计算这个四阶图的结果。这里的数学细节非常复杂，但我们只需要抓住其核心的物理意义和最终结果。
 - **纠缠的来源**：为什么这个过程能产生纠缠？关键在于公式(9)的积分中， $\phi(x)$ 是一个**经典**的引力势，它在所有叠加分支中都是一样的（比如，它是由两个物体各自左右位置的"平均"质量分布产生的）。但是，描述物体具体位置的函数 $\theta_{1i}(x)$ 和 $\theta_{2j}(y)$ 在不同分支中是**不同**的（比如在(L,R)分支中， $i=L, j=R$ ）。由于积分核 $1/|x-y|$ 的存在，这个积分的值会依赖于 i 和 j 的组合。因此，不同分支（LL, LR, RL, RR）的四阶振幅 $\alpha_{ij}^{(4)}$ 将会不同，从而导致了纠缠。
 - **最终结果**：经过复杂的计算，作者得到了衡量这种新效应导致纠缠程度的关键参数 ϑ 。从公式(10)中，我们可以看到它的"指纹"。忽略掉前面的数字系数，我们发现 $\sqrt{\vartheta}$ 正比于 G^2 （引力常数的平方）、 M^3m^2 （与总质量的四次方成正比，因为 $M=mN$ ）、以及时间 t 。

现在，我们可以进行最终的对比了：

- **量子引力效应（引力子交换）**： $\varphi \propto GM^2t$
- **经典引力效应（虚物质圈）**： $\sqrt{\vartheta} \propto G^2M^4t$ (近似地看质量依赖关系)

这两个效应的"指纹"是**完全不同的**！它们对引力常数 G 和质量 M 的依赖关系不同。这意味着，原则上，我们可以通过实验来区分它们。如果实验测量到的纠缠程度与 M^2 成正比，那就支持量子引力；如果与 M^4 成正比，那就支持作者提出的这种经典引力模型。一个看似哲学性的问题（引力是经典还是量子？），被作者成功地转化为了一个可以定量测量的实验问题。

讨论——重绘量子引力实验的路线图

实验参数的权衡

翻译：

量子引力效应，由 φ 表征，强烈依赖于为实验选择的质量和持续时间。费曼的实验已经考虑了一系列质量值和持续时间，其中普朗克质量 $M_p \approx 10^{-8} \text{ kg}$ 被认为扮演着重要角色。例如，在参考文献5中，建议使用相对较小的质量 $M \approx 10^{-14} \text{ kg}$ ，但代价是需要长的相干时间 $t \approx 2 \text{ s}$ 和大的叠加尺寸 $\Delta x \approx 0.1 \text{ mm}$ ，并且 $d_{RL} = 200 \text{ }\mu\text{m}$ ，这样量子引力效应将比残余的电磁相互作用大一个数量级（或者，可以在物体之间放置一个导电屏来消除电磁相互作用）。然而，由于预期的退相干机制，长的相干时间带来了重大的实验挑战。例如，被认为是最主要的退相干来源，即来自不完美真空的分子散射，对于 $M=10^{-14} \text{ kg}$ 和 $t=2 \text{ s}$ 的情况，要求 10^{-15} Pa 的极低压强，这是一个艰巨的挑战。散射引起的退相干速率与压强成线性关系，但与质量的关系是 $M^{2/3}$ ，这远弱于 φ 的质量标度 M^2 。因此，由于它允许低得多的压强，使用更大的质量和更短的时间可能在实验上更可取，这在等效测试中已被考虑，时间如 $1 \text{ }\mu\text{s}$ ，质量范围从 10^{-12} kg 到 1 kg 。也考虑了更小的叠加尺寸，因为迄今为止，创造大的 Δx 在实验上一直具有挑战性 1。

专家解读

理论分析已经完成，现在进入了现实的讨论：我们该如何设计实验来验证这一切？这一段深刻地揭示了实验物理学家面临的巨大挑战和需要做出的艰难权衡。

这个实验最核心的敌人叫做“退相干”。量子叠加态是一种极其脆弱的状态，任何与外界环境的微小相互作用——比如一个空气分子撞击了处于叠加态的微小晶体，或者一个光子照射到它——都会瞬间摧毁叠加态，使其“坍缩”到一个确定的位置。这个过程就像你试图在狂风中点燃一根火柴，任何一阵风都会让你的努力前功尽弃。

为了让引力有足够的时间来产生可观测的纠缠，我们需要保持量子叠加态足够长的时间，这个时间被称为“相干时间”。这就引出了一个核心的矛盾：

- **方案一：小质量 + 长时间。**一些实验方案建议使用非常小的质量（比如 10^{-14} kg，大约是1000亿个原子），这样可以更容易地将它们置于大范围的叠加态。但缺点是，因为质量小，引力效应很弱，所以需要很长的相互作用时间（比如2秒）。在这2秒内，要保证系统与外界绝对隔绝，对真空度的要求达到了令人难以置信的 10^{-15} 帕斯卡，这比外太空的真空还要好得多，是目前技术的极限。
- **方案二：大质量 + 短时间。**另一个思路是反其道而行之。使用更大的质量（比如接近普朗克质量 10^{-8} kg，甚至更大），引力效应会急剧增强（量子引力效应与 M^2 成正比）。这样，我们只需要非常短的相互作用时间（比如百万分之一秒）就能产生足够的纠缠。时间短，意味着受环境干扰的机会就大大减少，对真空度的要求可以放宽很多。这在实验上似乎更有吸引力。

然而，作者接下来的分析将表明，选择“大质量+短时间”这条看似更容易的路径，可能会让我们掉进一个新的“陷阱”里。

效应强度的比较与结论

翻译：

上面计算的经典和量子引力效应的相对强度也强烈依赖于实验的质量和持续时间。图4比较了在“费曼的实验”一节中描述的实验中，使用镱作为材料时，不同持续时间和质量下的经典和量子引力效应 ϑ 和 φ 。对于相对较小的质量 $M \approx 10^{-14}$ kg 和长的持续时间 $t \approx 2$ s， ϑ 远小于 φ 。然而，随着质量接近并超过普朗克质量， ϑ 变得足够大（ $\vartheta \approx 0.1$ ），以至于由经典引力过程引起的纠缠变得显著，即使在短时间内也是如此。因此，在上述实验中，仅仅在这些数值下观察到纠缠，不能被视为量子引力的证据。

产生纠缠的经典引力过程是与引力相互作用相关的虚量子物质的交换。因此，纠缠并非仅仅来自那些可以纯粹与经典引力场相关的自由度。如上所述，引力与物质耦合这一事实本身，当在QFT中处理量子物质时，就意味着可能存在一个物质传播子，可以通过引力相互作用产生纠缠，而不管经典引力模型的具体形式如何。请注意，如果例如电磁学是经典的，而我们有带电物体，那么可以推导出一个与公式(9)类似的方程，其中 $\varphi(x)$ 代表物体的库仑场。这原则上也可以导致纠缠，就像QED通过与公式(8)类似的表达式，通过虚光子交换提供纠缠一样。然而，与电磁学不同，我们尚不知道引力是否是量子的。在这里，我们已经表明，尽管纠缠可以用来为引力的量子性质提供证据，但与之前所考虑的反相，这并非明确无误的，而是一个根本上的现象学问题：它取决于实验的参数和形式 1。

专家解读

这是论文的最终结论，也是对未来实验的路线图的重新绘制。

图4：经典与量子引力效应的比较

- 图4描述：**该图展示了在本文描述的实验中，对于一系列质量 M 和时间 t ，所考虑效应的相对强度 ϑ/φ 。红线及其右侧区域表示经典引力效应及其相关纠缠是显著的 ($\vartheta \geq 0.1$)。因此，为了提供量子引力的证据，实验必须在该线的左侧操作。假设最小间距 $d_{RL} = 10R$ ，其中 R 由总质量和密度决定（注意 ϑ 与密度无关）， m 是镜的质量。表征当 $d_{RL} \gg \Delta x$ 时效应相对强度的比率 ϑ/φ 与 ϑ/φ 相同 1。

这张图是本文所有理论分析的最终体现。横轴是质量 M ，纵轴是相互作用时间 t 。图中的红线是一个"分界线"。

- 在红线左侧区域：**这个区域对应于"小质量、长时间"的实验方案。在这里，量子引力效应 φ 远大于经典引力效应 ϑ 。因此，如果一个实验在这个区域内运行并观察到了纠缠，我们可以很有信心地说，我们看到的是量子引力的证据。
- 在红线右侧区域：**这个区域对应于"大质量、短时间"的实验方案。在这里，经典引力效应 ϑ 变得与量子引力效应 φ 相当，甚至可能超过它。这意味着，如果一个实验在这个区域运行并观察到了纠缠，我们**无法判断**这个纠缠是由量子引力（交换引力子）引起的，还是由作者提出的经典引力机制（交换虚物质对）引起的。

为了更清晰地理解这张图的含义，我们可以将其总结为下表：

实验参数区间	质量 (M)	时间 (t)	主导效应	对实验的启示
安全区 (红线左侧)	小质量 (如 $\sim 10^{-14}$ kg)	长时间 (如 ~ 2 s)	量子引力效应 (φ) 远大于经典效应 (ϑ)	在此区间观测到纠缠是量子引力的 有力证据 。
模糊区 (红线右侧)	大质量 (如 $> 10^{-8}$ kg)	短时间 (如 < 1 s)	经典引力效应 (ϑ) 变得显著甚至占主导	在此区间观测到纠缠 无法明确区分 引力的量子/经典性质。

最终结论：这篇论文的最终结论是革命性的。它告诉我们，"**观察到引力诱导的纠缠**"本身，**不再是引力量子性质的"明确无误的证据"**。事情比我们想象的要复杂。它不再是一个非黑即白的哲学问题，而变成了一个依赖于实验具体参数的**现象学问题**。

作者指出，他们提出的机制是普适的。只要引力与物质耦合（这是确定无疑的），并且物质遵循量子场论（这是我们目前最好的理论），那么通过虚物质粒子传递相互作用的渠道就必然存在，无论你选择哪种具体的经典引力模型。

这篇论文并没有否定费曼实验的重要性，恰恰相反，它让这个实验变得更加深刻和有意义。它为实验物理学家提供了一张精确的"导航图"（图4），告诉他们应该在哪个参数区域进行实验，才能得到最清晰、最没有歧义的结果，从而真正地揭开引力的量子之谜。

方法论——深入数学细节

方法

翻译：

对应于图1（左上）费曼图的振幅可以通过计算以下形式的威克收缩来得到：

$$1/(4 \hbar^2 c^2) \int_{\mathbb{R}^4} d^4x \, d^4y \langle \hat{h}^{\mu\nu}(x) \hat{h}^{\rho\sigma}(y) \rangle \times {}_{1i} \langle N | {}_{2j} \langle N | \mathcal{T}_{\mu\nu}[\phi^\dagger(x)\phi(x)] \mathcal{T}_{\rho\sigma}[\phi^\dagger(y)\phi(y)] | N \rangle_{1i} | N \rangle_{2j} \quad (11)$$

其中 $\langle \hat{h}^{\mu\nu}(x) \hat{h}^{\rho\sigma}(y) \rangle$ 代表费曼引力子传播子， $\int_{\mathbb{R}^4} d^4x := \int d^3x \int_0^c dt dx^0$ ， c 是光速。上述威克收缩使用标准的QFT技术进行评估，在正文和图3描述的实验近似下，得到公式(8)。计算的教学性概述在补充信息中提供。

对应于图2（右上）的费曼图对应于以下形式的威克收缩：

$$1/(16 \hbar^4 c^4) \int_{\mathbb{R}^4} d^4x \, d^4y \, d^4z \, d^4w \, h^{\mu\nu}(w) h^{\rho\sigma}(z) h^{\gamma\delta}(y) h^{\kappa\lambda}(x) \times {}_{1i} \langle N | {}_{2j} \langle N | \mathcal{T}_{\mu\nu}[\dots] \mathcal{T}_{\rho\sigma}[\dots] \mathcal{T}_{\gamma\delta}[\dots] \mathcal{T}_{\kappa\lambda}[\dots] | N \rangle_{1i} | N \rangle_{2j} \quad (12)$$

这使用标准的QFT技术进行评估，在正文和图3描述的实验近似下，得到公式(9)。关于上述收缩如何导致公式(9)的完整教学性推导在补充信息中提供，其中也详细介绍了量子引力中的虚物质过程（这些过程总是伴随着引力子交换）。

如正文所述，公式(9)中的 $\varphi(x)$ 是由处于量子叠加态的物质产生的。关于在一个基本的经典引力理论中这是如何发生的，有两个主要的提议：（1）引力是由物质的平均期望值产生的 $\nabla^2 \varphi(x) = \xi \langle T_{00} \rangle$ ，其中 $\xi = 4\pi G/c^2$ ，期望值是在物质的标准量子态或其推广（如局域描述）上计算的。（2）引力是由围绕平均期望值的随机涨落产生的： $\nabla^2 \varphi(x) = \xi$ ，其中 δT_{00} 是一个随机量。前者比后者研究得更多，因此是正文中考虑的选项。关于（2）的讨论在补充信息中提供。两种情况的理论一致性都曾被辩论，正如补充信息中也讨论的，但两者都未被实验排除。

对于选项（1），公式(9)中的 $\varphi(x)$ 是每个质量分布在其左、右状态上的平均势之和：

$$\varphi(x) = \varphi_{C1}(x) + \varphi_{C2}(x) \quad (13)$$

其中

$$\varphi_{Ck}(x) := \frac{1}{2}(\varphi_{kL}(x) + \varphi_{kR}(x)) \quad (14)$$

以及

$$\varphi_{ki}(x) := -GM \quad (15)$$

这样 $\varphi_{ki}(x)$ 是位于位置 X_{ki} 的总质量为 M 的球形质量分布的引力势，而 $\varphi_{Ck}(x)$ 是分别位于 X_{kL} 和 X_{kR} 的质量为 M 的球形质量分布的平均引力势。然后将上述势代入公式(9)，振幅可以使用标准积分技术计算，如补充信息中所示 1。

专家解读

这部分是论文的"附录", 它向专业读者展示了论文结果背后的详细数学计算。对于我们来说, 不需要深入推导每一个公式, 但理解其背后的物理思想和所做的假设是非常有益的。

- **公式(11)和(12):** 这些是计算费曼图振幅的起点。在量子场论中, 一个过程的概率振幅是通过一种叫做"威克收缩"的数学技巧来计算的。这本质上是一种系统性的方法, 用来配对所有可能产生和湮灭的虚粒子, 并计算它们传播的概率。公式(11)对应于交换一个引力子的二阶过程, 而公式(12)对应于作者提出的、涉及四个经典引力场相互作用点的四阶过程。
- **一个深刻的哲学问题:** 在计算经典引力效应时, 作者遇到了一个非常深刻的问题: 如果物质本身处于量子叠加态 (比如同时在左边和右边), 那么它产生的**经典**引力场应该是什么样的? 引力场应该只由"左边"的物体产生, 还是"右边"的物体产生? 还是两者都有? 这是一个长期以来困扰"半经典引力"理论的难题。
 - 作者在这里采取了最主流, 也是最简单的假设, 即**"半经典爱因斯坦方程" (或其牛顿近似)**。这个假设**认为, 经典引力场是由量子物质的能量-动量张量的期望值 (平均值) **产生的**。也就是说, 引力场"看到"的不是一个在左一个在右的叠加态, 而是左右两边各有一个"半个"质量的平均分布。这就是公式(13), (14), (15)所表达的意思。
 - 作者也坦诚地提到了其他可能性, 比如引力场可能还包含一些随机涨落。这表明, 即使在理论基础层面, 也还存在着未解决的开放性问题, 科学总是在不断探索和完善之中。

总的来说, 这一部分展示了理论物理研究的严谨性。一个惊世骇俗的结论, 背后必须有坚实、可追溯的数学计算作为支撑。同时, 它也让我们看到, 在科学的前沿, 研究者必须做出一些合理的假设来推动工作前进, 并清楚地说明这些假设是什么, 以便未来的研究可以对它们进行检验和修正。

科学的运作方式——致谢、参考文献与其他

科学共同体

翻译:
数据可用性
没有需要共享的数据。
代码可用性

没有生成的代码是主要结果的核心。然而, 用作计算指导的Mathematica代码可向通讯作者索取。

致谢 我们两人都感谢约翰·邓普顿基金会作为QISS项目 (授权号62312) 一部分的支持。R.H.也感谢约翰·邓普顿基金会的授权号62420。R.H.感谢"2024年引力与量子理论界面研讨会"成员的富有洞察力的讨论。

作者贡献 两位作者都对本文的结果、解释和呈现做出了重大贡献。R.H.提出了论文的总体思路, J.A.对产生结果所涉及的计算做出了重要贡献。

竞争利益 作者声明没有竞争利益。

补充信息 在线版本包含可在 <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09595-7> 获取的补充材料。

通讯 通讯和材料请求应向Richard Howl提出。

同行评审信息 《自然》感谢Robert B. Mann和另一位（些）匿名审稿人对这项工作的同行评审所做的贡献。

转载与许可信息 可在 <http://www.nature.com/reprints> 获取 1。

专家解读

这最后一部分内容虽然不涉及物理理论本身，但它生动地展示了现代科学研究是如何作为一个全球性的、协作性的事业来运作的。

- **数据和代码可用性**：这体现了科学的**可重复性**原则。虽然这项理论工作没有实验数据，但作者愿意分享他们的计算代码，这使得其他研究者可以检验他们的计算过程，或者在他们的工作基础上进行新的研究。
- **致谢**：科学研究不是在真空中进行的。作者感谢了提供资金支持的基金会（约翰·邓普顿基金会），这说明了前沿基础研究往往需要外部资金的支持。他们还感谢了学术会议上的讨论，这表明思想的碰撞和交流对于激发新的想法至关重要。科学是一个**社群活动**。
- **作者贡献**：明确说明每位作者的具体贡献，体现了学术合作的**透明度**和责任划分。在这里我们看到，一位作者提出了核心思想，另一位则在复杂的计算中做出了关键贡献，这是一个典型的理论物理合作模式。
- **同行评审**：这是科学质量控制的“金标准”。在论文发表前，期刊会邀请该领域的其他专家（通常是匿名的）来审阅稿件，提出批评和修改意见。文中提到了审稿人Robert B. Mann，这表明论文经过了严格的审查，其结论是经得起领域内专家挑战的。这个过程确保了发表的科研成果是严谨和可靠的。
- **参考文献**（正文中未逐一翻译，但原文包含49篇）：一篇科学论文总是建立在“巨人的肩膀上”的。长长的参考文献列表表明，作者的研究是基于数十年来该领域内大量前人工作的积累。科学是一个**不断传承和发展的**过程。

通过阅读这篇完整的论文，你不仅学习到了关于量子引力前沿的深刻物理思想，也窥见了科学研究作为一个人类社会活动的真实面貌：它充满了逻辑的思辨、严谨的计算、开放的交流、批判性的审查以及代代相传的知识积累。这正是科学的魅力所在。

Works cited

1. s41586-025-09595-7.pdf