

# 撕裂的织物：一项关于时空从物理学前沿浮现的研究

## 引言：大分流与革命的气息

二十世纪物理学最深刻的智识裂痕，源于其两座最伟大理论丰碑——广义相对论 (General Relativity, GR) 与量子力学 (Quantum Mechanics, QM) 之间的不相容性。广义相对论描绘了一个光滑、确定且动态的时空，而量子力学则在最小尺度上揭示了一个离散、概率性且受观测影响的现实<sup>1</sup>。这场根本性的“大分流”是寻求量子引力理论的主要驱动力<sup>4</sup>。时空本身，成为了这场冲突最激烈的战场，其理论的失效在黑洞与宇宙大爆炸的奇点处暴露无遗<sup>5</sup>。

本报告的核心论点，呼应了《量子杂志》文章的观点：一系列“谜题的星丛”强烈暗示，我们所栖居的时空连续体并非现实的基本面向，而是一种近似或从更深层次结构中浮现的现象<sup>7</sup>。这正是宾夕法尼亚大学物理学家维杰·巴拉苏布拉马尼安 (Vijay Balasubramanian) 等人所嗅到的科学革命的“醉人芬芳”<sup>7</sup>。这一思想标志着对经典直觉，乃至对广义相对论和量子力学基础假设的彻底背离——后两者虽方式不同，却都预设了一个时空舞台作为现实的基础<sup>9</sup>。

本报告的结构将以《量子杂志》文章中提出的三个思想实验为主要线索，它们是证明时空非基础性的主要证据<sup>7</sup>。这些思想实验不仅是智力上的奇思妙想，更是在物理实验无法企及之处，探测我们现有理解极限的强大分析工具<sup>12</sup>。这三个实验——探测最小长度、测量的不完美性以及空间的信息容量——将作为引导线索，当它们被拉动时，时空的织物本身便开始 fraying (磨损、撕裂)。

在引言的最后，我们将简要提及那些为这场讨论奠定基石的智识巨人，如爱因斯坦、玻尔、海森堡，特别是约翰·阿奇博尔德·惠勒 (John Archibald Wheeler)。惠勒对现实根基的执着探寻及其“万物源于比特” (it from bit) 的概念，对于正在形成的全新范式至关重要<sup>11</sup>。

通往量子引力的旅程并非线性演进，而是由悖论的识别与分析所驱动。黑洞信息悖论、测量问题，以及由思想实验产生的逻辑矛盾，并非物理学的失败，而是关键的催化剂。它们的功能类似于托马斯·库恩 (Thomas Kuhn) 所指出的、作为范式转移先兆的关键“反常”<sup>16</sup>。研究资料中充满了各种悖论：EPR悖论<sup>17</sup>、薛定谔的猫<sup>18</sup>、维格纳的朋友<sup>20</sup>、黑洞信息悖论<sup>22</sup>，以及由广义不确定性原理 (GUP) 引发的新悖论<sup>24</sup>。这些并非简单的谜题，而是我们最根本的理论 (广义相对论与量子力学) 在被推向逻辑极限时，产生矛盾或无意义结果的临界点。

历史上，解决此类悖论往往带来重大突破；例如，爱因斯坦关于同时性的思想实验解决了电磁学与伽利略相对性原理之间的悖论，从而催生了狭义相对论<sup>25</sup>。因此，“时空织物的撕裂”不仅是一个诗意的比喻，更是这些悖论拉扯我们现有理论逻辑线索的直接后果。本报告聚焦于产生这些悖论的思想实验，其结构本身就是一幅科学革命在危机中行进的叙事画卷。

表1: 现代物理学的两大支柱: 比较概览

为了给读者建立一个清晰、简洁且具冲击力的概念基础，下表至关重要。它为报告的核心冲突提供了概念锚点，使读者在后续章节中可以随时参考广义相对论与量子力学的核心差异。表格的结构本身——将两大理论并置——直观地展现了“大分流”的现状，并凸显了寻求统一理论的迫切性。

| 特征   | 广义相对论 (GR)                                                | 量子力学 (QM)                                                       | 冲突来源                                                                                    |
|------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 适用领域 | 宏观世界: 行星、恒星、星系、膨胀的宇宙 <sup>2</sup> 。描述引力。                  | 微观世界: 原子、亚原子粒子，以及其他三种基本力(电磁力、弱核力、强核力) <sup>2</sup> 。            | 当广义相对论被缩减至量子尺寸时，它会给出无意义的(无限大)答案。而当量子力学的预测被放大到宇宙尺度时，其蕴含的能量密度将足以使宇宙坍缩成一个黑洞 <sup>2</sup> 。 |
| 时空本质 | 一个动态、交织且“光滑”的四维织物(时空)，被质量和能量所弯曲。它既是舞台，也是演员 <sup>3</sup> 。 | 一个静态、绝对且“块状”的背景舞台，量子事件在此之上展开。时间是一个普适的、绝对参数，外在于系统 <sup>1</sup> 。 | “时间问题”: 广义相对论中的时间是相对的、可塑的，是系统的一部分。量子力学中的时间是绝对的、固定的，外在于系统。这是一个根本性的概念不兼容 <sup>1</sup> 。   |
| 核心原理 | 等效原理: 引力与加速度不可区分。现实由时空的几何结构描述 <sup>26</sup> 。             | 不确定性原理: 对于成对的物理属性(如位置和动量)，同时精确知晓的程度存在根本限制 <sup>29</sup> 。       | 当试图在强引力场(GR的领域)中精确定位一个粒子(QM的关键方面)时，所需的能量会产生引力效应，而GR无法在如此小的尺度上处理这种效应，从而导致                |

|       |                                                                |                                                                               |                                                                                           |
|-------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|       |                                                                |                                                                               | 黑洞形成等悖论 <sup>7</sup> 。                                                                    |
| 因果与现实 | 确定性与局域性:事件是连续的。每个原因都对应一个特定的、局域性的结果。信息传播速度不能超过光速 <sup>2</sup> 。 | 概率性与非局域性:事件以离散的“量子跃迁”形式发生。结果由概率决定。量子纠缠允许“鬼魅般的超距作用”,这是一种非局域性的联系 <sup>2</sup> 。 | 广义相对论的确定性、局域性世界似乎是从量子力学的概率性、非局域性世界中浮现出来的,但这种浮现的机制(即“测量问题”)是量子力学最深的奥秘之一。广义相对论对非局域量子效应毫无解释。 |

第一部分:宇宙尽头的显微镜——最小长度尺度

思想实验:放大时空

本部分将从《量子杂志》描述的第一个思想实验的详细叙述开始<sup>7</sup>。该实验旨在探测越来越小距离尺度下的物理定律。为此,物理学家以越来越高的能量对撞粒子。根据量子力学,更高的能量对应更短的波长,这使得探测更小的区域成为可能<sup>7</sup>。

不可避免的极限:黑洞视界

叙述的高潮在于其核心悖论。当我们为了探测更短的距离而不断增加能量时,最终会在一个极小的区域内集中过多的能量。根据广义相对论,该区域将在自身引力作用下坍缩,形成一个微型黑洞<sup>7</sup>。这个黑洞的事件视界成为一个终极屏障,它捕获了碰撞产生的信息,并阻止其到达任何探测器<sup>22</sup>。观察比某一长度尺度更小事物的行为本身,摧毁了观察它的能力。

普朗克长度作为基本边界

由此得出的结论是，存在一个最小的有意义距离——普朗克长度(约为  $1.6 \times 10^{-35}$  米)——我们甚至在原则上都无法收集到低于此尺度的数据<sup>7</sup>。这不仅仅是技术上的限制，而是自然法则本身施加的根本性限制。如果无法在普朗克尺度以下进行任何测量，那么广义相对论中时空作为光滑、连续流形的观念，在那个层面上可能就失去了意义<sup>7</sup>。这强烈暗示，时空在其最基本的层面上是“块状的”或量子化的<sup>2</sup>。

## 理论框架：广义不确定性原理 (GUP)

本小节将深入探讨广义不确定性原理 (Generalized Uncertainty Principle, GUP)，这是一个形式化的理论框架，它抓住了这个思想实验的精髓<sup>24</sup>。

它始于标准的海森堡不确定性原理 (Heisenberg Uncertainty Principle, HUP)： $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ ，该原理指出在知晓粒子位置和动量之间存在一种权衡<sup>29</sup>。GUP 对此关系进行了修正，引入了一个在高能量(高动量)下变得显著的项，以反映测量本身的引力效应：

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar(1 + \beta(M_{\text{Pl}} c \Delta p)^2)$$

其中  $\beta$  是一个参数， $M_{\text{Pl}}$  是普朗克质量<sup>24</sup>。这个新公式意味着，当你试图更精确地测量位置时(通过增加动量/能量)，位置的不确定性

首先会减小(如HUP所示)，但随后由于引力项的存在而再次开始增加。这就产生了一个位置不确定性的绝对最小值——一个最小长度<sup>36</sup>。这直接形式化了思想实验的结论：试图过度定位一个粒子(高

$\Delta p$ ) 反而使其位置更加不确定，因为你制造了一个黑洞。

## 悖论中的悖论：GUP的内在不一致性

尽管GUP优雅地形式化了最小长度的概念，但它并非最终理论，甚至可能存在内部不一致。一个独立的、更近期的思想实验揭示了GUP框架内部的一个悖论<sup>24</sup>。这表明，仅仅用一个引力项来“修补”量子力学是不足够的，指向了对我们基础理论进行更彻底改革的必要性。

这个更深层次的分析始于这样一个事实：第一个思想实验(探测空间)引出了最小长度的概念，而GUP是描述这一点的数学工具。然而，研究资料中包含一个更高级的思想实验，涉及一个基于GUP的光子-反射镜干涉仪<sup>24</sup>。在GUP框架下，不同的粒子可以有不同的“有效普

朗克常数”，这取决于它们的质量<sup>24</sup>。实验表明，当这两个系统（光子和反射镜）耦合时，无论是在位置表象还是在动量表象中计算，预测的干涉可见度结果都不同。这是一个数学上的矛盾<sup>24</sup>。这引出了“量子耦合原理”：具有不同有效普朗克常数的系统无法在量子力学中进行一致的耦合<sup>24</sup>。

更深层次的、第三阶的洞见是，量子引力问题不能通过像标准GUP这样的简单“插件式”修改来解决。第二个思想实验所揭示的不一致性表明，量子力学的基本结构（不同数学表象的等价性）本身就崩溃了。这种失败比最初的最小长度问题更为深刻。它意味着任何成功的量子引力理论不仅要引入一个最小长度，还必须提供一个全新的、一致的框架，来描述量子系统在一个引力效应从一开始就被内建于世界中的互动方式。这加强了对像弦理论或圈量子引力这样试图从更基本的、统一的结构中推导出这些原理的理论的论证<sup>41</sup>。

## 第二部分：观察者的阴影——测量的不完美性

### 思想实验：不可知的属性

本部分探讨《量子杂志》中的第二个谜题：任何物理属性都无法从近处以完美的、客观的精度被测量<sup>7</sup>。这超越了

尺度的限制（第一部分），进入了确定性和客观性的限制。历史教导我们，那些无法被观察的情形可能并非是本性的<sup>7</sup>。

### 量子测量问题：从猫到朋友

分析将从著名的薛定谔的猫悖论开始<sup>18</sup>。这个思想实验旨在展示将量子叠加应用于宏观世界的荒谬性。哥本哈根诠释意味着猫在被观察之前既是活的又是死的<sup>19</sup>。这突显了“测量”和“观察者”在导致波函数坍缩中所扮演的、问题重重且定义不清的角色。

随后，讨论将演进到更复杂、更深刻的维格纳的朋友悖论<sup>20</sup>。在这个情景中，一个观察者（“朋友”）在一个封闭的实验室内测量一个量子系统。对朋友来说，系统坍缩到一个确定的状态。但对于一个外部的超级观察者（维格纳）来说，朋友和实验室现在是一个处于叠加

态的大型量子系统。

这就产生了一个直接的矛盾：真正的“坍缩”发生在何时？从谁的角度来看？这个悖论表明，按标准诠释的量子力学无法一致地描述其自身的使用，从而得出结论：“事实”或测量结果可能不是绝对的，而是相对于观察者的<sup>45</sup>。

## 引力在强制现实中的作用

本节将探讨一个引人入胜的观点，即引力本身可能是测量问题的解决方案。一些物理学家提出，正是宏观物体的引力场阻止了它以不同位置的叠加态存在。两种状态之间的能量差异会过大，引力场本身也必须处于叠加态，而这种状态可能是被禁止的。这种推理直接将抽象的测量问题与时空的物理结构联系起来<sup>47</sup>。一个思想实验涉及一个处于两个盒子中叠加态的粒子，通过测量每个盒子的引力场，我们被迫回答：时空本身是否进入了叠加态？如果不是，那么引力必定已经“坍缩”了波函数<sup>48</sup>。

## 惠勒的参与式宇宙：“万物源于比特”

本小节将综合以上观点，论证现实的观察者依赖性指向了一个更深层次的、信息论的基础。

约翰·阿奇博尔德·惠勒的“万物源于比特”(it from bit)学说将被作为这一思路的哲学顶峰加以介绍<sup>49</sup>。该学说指出，每一个“it”——每一个粒子、每一个力场，甚至时空本身——其存在都源于“比特”，即通过观察提出的“是/否”问题的答案<sup>51</sup>。

现实并非我们被动观察的预先存在的机器；它是一个“参与式宇宙”，通过测量的行为而被创造出来<sup>15</sup>。从测量中获得的“不可分割的信息比特”同时“创造了该事件的时间和地点的现实”<sup>50</sup>。这将测量的“不完美性”重新定义为一种创造性行为，而非缺陷。不确定性和观察者依赖性不是bug，而是一个由信息构建的现实的特性。

## 测量、信息与时空的融合

三个看似分离的概念——量子测量问题、信息的本质以及时空的结构——并非独立问题，

它们是同一个更大问题的紧密交织的方面。维格纳的朋友悖论不仅仅是关于测量，它关乎谁的信息是“真实的”<sup>45</sup>。惠勒的“万物源于比特”不仅仅是哲学，它是一个关于时空起源的物理假说<sup>51</sup>。而引力在退相干中被提议的角色，是这三者之间的直接物理联系<sup>47</sup>。

这一切并非是相互竞争的观点，而是一个反馈循环。惠勒本人将其描述为：“物理学催生了观察者-参与；观察者-参与催生了信息；而信息催生了物理学”<sup>52</sup>。因此，第二个思想实验的结论——测量是不完美的且依赖于观察者——并非一个关于认识论（我们的知识）的陈述，而是一个关于本体论（存在的本质）的陈述。如果时空本身是由通过测量获得的信息所决定的，而测量是相对的，那么时空本身就不可能是一个基本的、客观的背景。它必须是一个浮现的、参与式的构造。这为《量子杂志》文章的核心论点提供了强有力的、独立的推理路线。

### 第三部分：宇宙全息图——空间的信息容量

#### 思想实验：出奇空旷的房间

本部分探讨第三个谜题：任何给定的空间区域的信息容量都神秘地高，但远低于如果信息可以存储在其体积内每一点时“应有”的容量<sup>7</sup>。正如维杰·巴拉苏布拉马尼安所问：“如果它少得多，那为什么看起来空间里有这么多不同的位置呢？”<sup>7</sup>。这种差异指向了对“空间”是什么的根本误解。

#### 黑洞热力学与贝肯斯坦极限

这个谜题的起源在于黑洞物理学。雅各布·贝肯斯坦(Jacob Bekenstein)注意到黑洞事件视界面面积的不断增加与热力学中熵的不断增长之间存在类比，他提出黑洞的熵（其信息含量的度量）与其表面积成正比，而非其体积<sup>22</sup>。斯蒂芬·霍金(Stephen Hawking)证实了这一点，他证明了黑洞会辐射（霍金辐射）并具有温度，从而巩固了黑洞热力学定律<sup>22</sup>。这引出了

贝肯斯坦极限：一个给定空间区域内可包含信息量的普适上限，而这个极限由该区域边界的面积决定<sup>53</sup>。

## 全息原理:作为投影的现实

这一惊人的结果被杰拉德·特·胡夫特(Gerard 't Hooft)和伦纳德·萨斯坎德(Leonard Susskind)推广为全息原理(Holographic Principle)<sup>53</sup>。该原理指出, 对一个三维空间体积(如我们的宇宙)的描述, 可以被看作是编码在一个二维边界表面上, 就像三维全息图是从二维胶片上投影出来的一样<sup>55</sup>。这意味着我们体验的三维世界是一种幻觉, 或者更准确地说, 是一种对存储在遥远的、低维表面上的信息的有效、浮现的描述<sup>53</sup>。空间体积本身是虚幻的<sup>53</sup>。因此, 可观测宇宙的最大信息含量不与其体积成正比, 而是与其宇宙学视界的面积成正比, 计算结果约为

10<sup>123</sup> 比特<sup>59</sup>。

## 作为驱动力的信息悖论

本节将解释全息原理如何为黑洞信息悖论提供一个潜在的解决方案。悖论在于: 当一个黑洞通过霍金辐射蒸发时, 落入其中的物质信息发生了什么? 广义相对论说它永远消失了。量子力学说信息永远不能被摧毁<sup>22</sup>。这是两大理论的正面冲突。全息解决方案是: 信息从未真正进入黑洞的三维体积。它被“印刻”或编码在事件视界的二维表面上<sup>53</sup>。随着黑洞的蒸发, 这些信息通过霍金辐射中微妙的相关性缓慢地释放回宇宙, 从而像量子力学要求的那样被保存下来。三维内部只是这个表面信息的全息投影。

## 引力作为熵力与几何的浮现

全息原理意味着对引力和几何的彻底重新诠释。如果基本的自由度存在于一个边界上, 而内部体积是浮现的, 那么引力——几何的典型理论——可能根本不是一种基本力。相反, 它可能是一种熵或热力学现象, 是全息屏幕上信息动力学的统计结果。

这一思路的起点是贝肯斯坦-霍金公式, 它将一个几何量(面积)与一个热力学/信息量(熵)联系起来<sup>22</sup>, 这是一个深刻而出乎意料的联系。全息原理将此推广: 三维体积的信息被编码在二维表面上<sup>53</sup>, 这意味着三维几何是冗余的; 它由二维信息决定。现在, 考虑在资料片段<sup>66</sup>中提出的问题: “引力仅仅是熵的增加吗?” 该文探讨了无序(熵)的增加可能导致

大质量物体相互移动的想法。

将这些点联系起来,便可得出这样的洞见:引力定律(如广义相对论所描述)可能仅仅是支配全息屏幕上大量信息“比特”的宏观热力学定律。正如温度和压力是气体分子的浮现统计属性一样,时空曲率和引力也可能是底层量子信息的浮现统计属性。这一点得到了纠缠与几何之间联系研究的进一步支持(例如,<sup>56</sup>中提到的ER=EPR猜想,它将虫洞等同于纠缠)。如果时空中的几何连接等同于信息连接(纠缠),那么几何本身就是从信息中浮现的。

因此,第三个思想实验(信息容量)对时空的基础性地位给予了最直接的打击。它不仅撕裂了织物,还暗示这块织物是一个投影,而编织它的“力”(引力)则是一种统计幻觉。这为“浮现的时空”究竟意味着什么,提供了最具体的图景。

## 结论:编织新的现实织物

### 三大谜题的综合

本部分将有力地重申,这三个看似独立的思想实验如何汇聚成一个单一的、革命性的结论。

- 最小长度实验表明,时空在底层不可能是光滑的连续体,它必须是离散的或“块状的”。
- 不完美测量实验表明,这个块状的现实并非一个固定的、客观的网格,而是一个参与式的现实,其中现实的“比特”由观察行为来定义。
- 信息容量实验揭示了这些比特的组织原则:它们存在于一个低维边界上,其集体行为投射出高维时空的幻象,而引力则是其浮现的热力学定律。

综合来看,它们描绘了一个从根本上是数字化的(由离散的信息比特构成)、参与式的(由观察定义)和全息的(从边界投影而来)宇宙。

### 新理论的主要候选者

对两大主流量子引力理论——弦理论和圈量子引力(Loop Quantum Gravity, LQG)——如

何尝试构建这个新的、非时空现实进行批判性比较分析。

- 弦理论:从量子物理学出发,试图推导出引力。它假定基本实体是10或11维空间中振动的弦<sup>42</sup>。其最大的成功是AdS/CFT对应,这是全息原理的一个具体数学实现<sup>53</sup>。然而,它是一个背景依赖的理论(它假设存在一个预先存在的时空供弦振动),并且其预测(如超对称)尚未被观测到<sup>42</sup>。
- 圈量子引力 (LQG):从广义相对论出发,试图将其量子化。它假定空时本身是由离散的量子圈构成的“自旋网络”。它是背景无关的,这是一个概念上的优势<sup>42</sup>。它自然地预测了一个“块状”的空间。然而,它在展示光滑的经典时空如何从这些网络中浮现,以及如何融入自然界其他力方面遇到了困难<sup>64</sup>。
- 正在浮现的综合:报告将强调近期的融合趋势,两个阵营的思想正在相互交流。LQG研究者正在使用全息思想,而弦理论家正在探索类似网络的结构<sup>64</sup>。这表明最终的理论可能会融合两者的元素。

哲学转变:没有时空的生活

最后一部分将反思非基础性时空所带来的深远形而上学后果<sup>9</sup>。

如果时空是浮现的,那么我们关于因果性、局域性和时间本身的基本概念也必须是浮现的。这挑战了几乎整个西方哲学,从关于时间本质的辩论(现在主义 vs. 永恒主义)到模态逻辑中“可能世界”的定义<sup>9</sup>。

报告将以回归“革命的气息”作结。时空织物的撕裂并非终结,而是编织一种新的、更深刻的现实理解的开始——这种理解不再建立在空间和时间之上,而是建立在更为飘渺,但或许也更为根本的概念之上:信息、观察和纠缠。

## Works cited

1. en.wikipedia.org, accessed on August 4, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Problem\\_of\\_time#:~:text=Quantum%20mechanics%20regards%20the%20flow,truely%20a%20real%2C%20distinct%20phenomenon.](https://en.wikipedia.org/wiki/Problem_of_time#:~:text=Quantum%20mechanics%20regards%20the%20flow,truely%20a%20real%2C%20distinct%20phenomenon.)
2. Relativity versus quantum mechanics: the battle for the universe ..., accessed on August 4, 2025, <https://www.theguardian.com/news/2015/nov/04/relativity-quantum-mechanics-universe-physicists>
3. New theory seeks to unite Einstein's gravity with quantum ... - UCL, accessed on August 4, 2025, <https://www.ucl.ac.uk/news/2023/dec/new-theory-seeks-unite-einsteins-gravity-quantum-mechanics>
4. Quantum gravity - Wikipedia, accessed on August 4, 2025,

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_gravity](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_gravity)
5. Articles by Charlie Wood's Profile | Scientific American, Live Science Journalist | Muck Rack, accessed on August 4, 2025,  
<https://muckrack.com/charlie-wood/articles>
  6. Black Holes and Quantum Gravity - YouTube, accessed on August 4, 2025,  
<https://www.youtube.com/watch?v=eMSZNQEpaW8>
  7. The Thought Experiments That Fray the Fabric of Space-Time | Quanta Magazine, accessed on August 4, 2025,  
<https://www.quantamagazine.org/the-thought-experiments-that-fray-the-fabric-of-space-time-20240925/>
  8. Three thought experiments that suggest “the space-time conti... - Kottke, accessed on August 4, 2025,  
<https://kottke.org/24/10/0045503-three-thought-experiments>
  9. Metaphysics of Quantum Gravity | Internet Encyclopedia of Philosophy, accessed on August 4, 2025, <https://iep.utm.edu/m-quantum-gravity/>
  10. The Unraveling of Space-Time - Quanta Magazine, accessed on August 4, 2025,  
<https://www.quantamagazine.org/tag/the-unraveling-of-space-time/>
  11. Quanta Magazine | Page 12, accessed on August 4, 2025,  
<https://www.quantamagazine.org/page/12/?ref=appling>
  12. Thought Experiment: How Einstein Solved Difficult Problems - Farnam Street, accessed on August 4, 2025, <https://fs.blog/thought-experiment/>
  13. Some Thought Experiments in Physics, accessed on August 4, 2025,  
<https://www.ias.ac.in/article/fulltext/reso/023/09/0965-0991>
  14. www.ias.edu, accessed on August 4, 2025,  
[https://www.ias.edu/scholars/john-archibald-wheeler#:~:text=John%20Archibald%20Wheeler%20\(1911%2D2008,celestial%20phenomena%20which%20he%20named](https://www.ias.edu/scholars/john-archibald-wheeler#:~:text=John%20Archibald%20Wheeler%20(1911%2D2008,celestial%20phenomena%20which%20he%20named)
  15. Physicist John Wheeler and the “It from Bit” — John Horgan (The Science Writer), accessed on August 4, 2025,  
<https://johnhorgan.org/cross-check/physicist-john-wheeler-and-the-it-from-bit>
  16. An analysis of thought experiments in the history of physics and implications for physics teaching - ResearchGate, accessed on August 4, 2025,  
[https://www.researchgate.net/publication/268217741\\_An\\_analysis\\_of\\_thought\\_experiments\\_in\\_the\\_history\\_of\\_physics\\_and\\_implications\\_for\\_physics\\_teaching](https://www.researchgate.net/publication/268217741_An_analysis_of_thought_experiments_in_the_history_of_physics_and_implications_for_physics_teaching)
  17. Einstein–Podolsky–Rosen paradox - Wikipedia, accessed on August 4, 2025,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein%E2%80%93Podolsky%E2%80%93Rosen\\_paradox](https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein%E2%80%93Podolsky%E2%80%93Rosen_paradox)
  18. What did Schrodinger's Cat experiment prove? | Science Questions with Surprising Answers, accessed on August 4, 2025,  
<https://www.wtamu.edu/~cbaird/sq/2013/07/30/what-did-schrodingers-cat-experiment-prove/>
  19. Schrödinger's cat - Wikipedia, accessed on August 4, 2025,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Schr%C3%B6dinger%27s\\_cat](https://en.wikipedia.org/wiki/Schr%C3%B6dinger%27s_cat)
  20. Wigner's friend: the quantum thought experiment that continues to confound - Physics World, accessed on August 4, 2025,

- <https://physicsworld.com/a/wigners-friend-the-quantum-thought-experiment-th-at-continues-to-confound/>
21. Wigner's friend - Wikipedia, accessed on August 4, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Wigner%27s\\_friend](https://en.wikipedia.org/wiki/Wigner%27s_friend)
  22. How black hole thought experiments help explain the Universe ..., accessed on August 4, 2025, <https://aeon.co/essays/how-black-hole-thought-experiments-help-explain-the-universe>
  23. Black Hole Information Paradox: An Introduction – Of Particular ..., accessed on August 4, 2025, <https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/relativity-space-astronomy-and-cosmology/black-holes/black-hole-information-paradox-an-introduction/>
  24. On the Generalized Uncertainty Principle - viXra.org, accessed on August 4, 2025, <https://vixra.org/pdf/2108.0059v1.pdf>
  25. Einstein's thought experiments - Wikipedia, accessed on August 4, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein%27s\\_thought\\_experiments](https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein%27s_thought_experiments)
  26. An Introduction to General Relativity - SPACETIME, accessed on August 4, 2025, [https://fma.if.usp.br/~mlima/teaching/PGF5292\\_2021/Carroll\\_SG.pdf](https://fma.if.usp.br/~mlima/teaching/PGF5292_2021/Carroll_SG.pdf)
  27. Problem of time - Wikipedia, accessed on August 4, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Problem\\_of\\_time](https://en.wikipedia.org/wiki/Problem_of_time)
  28. Hobson M.P., Efstathiou G.P., Lasenby A.N. - GR - An Introduction for Physicists(Cambridge,2006).pdf, accessed on August 4, 2025, [https://wigner.hu/~barta/GRcourse2020/Hobson%20M.P.,%20Efstathiou%20G.P.,%20Lasenby%20A.N.%20-%20GR%20-%20An%20Introduction%20for%20Physicists\(Cambridge.2006\).pdf](https://wigner.hu/~barta/GRcourse2020/Hobson%20M.P.,%20Efstathiou%20G.P.,%20Lasenby%20A.N.%20-%20GR%20-%20An%20Introduction%20for%20Physicists(Cambridge.2006).pdf)
  29. scienceexchange.caltech.edu, accessed on August 4, 2025, <https://scienceexchange.caltech.edu/topics/quantum-science-explained/uncertainty-principle#:~:text=Formulated%20by%20the%20German%20physicist.about%20its%20speed%20and%20vice>
  30. Uncertainty principle - Wikipedia, accessed on August 4, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty\\_principle](https://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty_principle)
  31. Uncertainty principle | Definition & Equation - Britannica, accessed on August 4, 2025, <https://www.britannica.com/science/uncertainty-principle>
  32. A list of inconveniences between quantum mechanics and (general) relativity?, accessed on August 4, 2025, <https://physics.stackexchange.com/questions/387/a-list-of-inconveniences-between-quantum-mechanics-and-general-relativity>
  33. Micro black hole - Wikipedia, accessed on August 4, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Micro\\_black\\_hole](https://en.wikipedia.org/wiki/Micro_black_hole)
  34. Thought experiment be like: : r/sciencememes - Reddit, accessed on August 4, 2025, [https://www.reddit.com/r/sciencememes/comments/1jxcuh4/thought\\_experiment\\_be\\_like/](https://www.reddit.com/r/sciencememes/comments/1jxcuh4/thought_experiment_be_like/)
  35. Is the Planck mass the minimum required to form a black hole? - Physics Stack Exchange, accessed on August 4, 2025,

- <https://physics.stackexchange.com/questions/740980/is-the-planck-mass-the-minimum-required-to-form-a-black-hole>
36. Generalized uncertainty principle - Wikipedia, accessed on August 4, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Generalized\\_uncertainty\\_principle](https://en.wikipedia.org/wiki/Generalized_uncertainty_principle)
  37. Generalized uncertainty principle and point interaction | Phys. Rev. D, accessed on August 4, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.101.066007>
  38. Generalised uncertainty relations from finite-accuracy measurements - Frontiers, accessed on August 4, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/astronomy-and-space-sciences/articles/10.3389/fspas.2023.1087724/full>
  39. Heisenberg's Uncertainty Principle - Chemistry LibreTexts, accessed on August 4, 2025, [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Quantum\\_Mechanics/02.\\_Fundamental\\_Concepts\\_of\\_Quantum\\_Mechanics/Heisenberg's\\_Uncertainty\\_Principle](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Quantum_Mechanics/02._Fundamental_Concepts_of_Quantum_Mechanics/Heisenberg's_Uncertainty_Principle)
  40. Generalized uncertainty principle and burning stars - Frontiers, accessed on August 4, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/astronomy-and-space-sciences/articles/10.3389/fspas.2022.936352/full>
  41. Loop Quantum Gravity - PMC - PubMed Central, accessed on August 4, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5567241/>
  42. String Theory and Loop Quantum Gravity - Dummies.com, accessed on August 4, 2025, <https://www.dummies.com/article/academics-the-arts/science/physics/string-theory-and-loop-quantum-gravity-177738/>
  43. Wigner's friend with Qiskit | IBM Quantum Computing Blog, accessed on August 4, 2025, <https://www.ibm.com/quantum/blog/wigners-friend-qiskit>
  44. The original Wigner's friend paradox within a realist toy model - Journals, accessed on August 4, 2025, <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2021.0273>
  45. The measurement problem and Wigner's friend thought experiment - IQOQI Vienna, accessed on August 4, 2025, <https://www.iqoqi-vienna.at/research/bbrukner-group/the-measurement-problem-and-wigners-friend-thought-experiment>
  46. Thinking twice inside the box: is Wigner's friend really quantum? - arXiv, accessed on August 4, 2025, <https://arxiv.org/html/2402.08727v1>
  47. Black holes destroy nearby quantum superpositions, thought experiment reveals, accessed on August 4, 2025, <https://physicsworld.com/a/black-holes-destroy-nearby-quantum-superpositions-thought-experiment-reveals/>
  48. Debunking thought experiment purporting to show that gravity is not classical, accessed on August 4, 2025, <https://physics.stackexchange.com/questions/577749/debunking-thought-experiment-purporting-to-show-that-gravity-is-not-classical>

49. John Archibald Wheeler - Wikipedia, accessed on August 4, 2025,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/John\\_Archibald\\_Wheeler](https://en.wikipedia.org/wiki/John_Archibald_Wheeler)
50. (PDF) Where the "it from bit" come from? - ResearchGate, accessed on August 4, 2025,  
[https://www.researchgate.net/publication/237000569\\_Where\\_the\\_it\\_from\\_bit\\_come\\_from](https://www.researchgate.net/publication/237000569_Where_the_it_from_bit_come_from)
51. John Archibald Wheeler Postulates "It from Bit" - History of Information, accessed on August 4, 2025, <https://historyofinformation.com/detail.php?id=5041>
52. It from Bit: Pioneering Physicist John Archibald Wheeler on Information, the Nature of Reality, and Why We Live in a Participatory Universe - The Marginalian, accessed on August 4, 2025,  
<https://www.themarginalian.org/2016/09/02/it-from-bit-wheeler/>
53. Holographic principle - Wikipedia, accessed on August 4, 2025,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Holographic\\_principle](https://en.wikipedia.org/wiki/Holographic_principle)
54. The holographic principle | Rev. Mod. Phys. - Physical Review Link Manager, accessed on August 4, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.74.825>
55. en.wikipedia.org, accessed on August 4, 2025,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Holographic\\_principle#:~:text=The%20holographic%20principle%20is%20a,boundary%20like%20a%20gravitational%20horizon.](https://en.wikipedia.org/wiki/Holographic_principle#:~:text=The%20holographic%20principle%20is%20a,boundary%20like%20a%20gravitational%20horizon.)
56. the Universe a Hologram - Light Field Lab, accessed on August 4, 2025,  
<https://www.lightfieldlab.com/blogposts/the-universe-as-a-hologram>
57. What is the Holographic Principle? - YouTube, accessed on August 4, 2025,  
<https://www.youtube.com/watch?v=8LsHmMHfaF4>
58. The Holographic Universe Principle - Futurism, accessed on August 4, 2025,  
<https://futurism.com/the-holographc-universe-principle-what-is-what-should-never-be>
59. How Much Information can the Observable Universe Contain? : r/askscience - Reddit, accessed on August 4, 2025,  
[https://www.reddit.com/r/askscience/comments/4xnklo/how\\_much\\_information\\_could\\_the\\_observable\\_universe/](https://www.reddit.com/r/askscience/comments/4xnklo/how_much_information_could_the_observable_universe/)
60. Black Hole Information Paradox Explained - Number Analytics, accessed on August 4, 2025,  
<https://www.numberanalytics.com/blog/black-hole-information-paradox-explained>
61. String Theory and the Black Hole Information Paradox - Dummies.com, accessed on August 4, 2025,  
<https://www.dummies.com/article/academics-the-arts/science/physics/string-theory-and-the-black-hole-information-paradox-193291/>
62. Black hole thermodynamics - Wikipedia, accessed on August 4, 2025,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Black\\_hole\\_thermodynamics](https://en.wikipedia.org/wiki/Black_hole_thermodynamics)
63. Which theory do you find yourself siding with more in the physics community: String Theory or Loop Quantum Gravity? - Reddit, accessed on August 4, 2025,  
[https://www.reddit.com/r/AskPhysics/comments/1fwms31/which\\_theory\\_do\\_you\\_find\\_yourself\\_siding\\_with/](https://www.reddit.com/r/AskPhysics/comments/1fwms31/which_theory_do_you_find_yourself_siding_with/)
64. String Theory Meets Loop Quantum Gravity | Quanta Magazine, accessed on

August 4, 2025,

<https://www.quantamagazine.org/string-theory-meets-loop-quantum-gravity-20160112/>

65. String Theory or Loop Quantum Gravity??? (for a physics lover who never got any legitimate education on it) : r/TheoreticalPhysics - Reddit, accessed on August 4, 2025,  
[https://www.reddit.com/r/TheoreticalPhysics/comments/pnx0ny/string\\_theory\\_or\\_loop\\_quantum\\_gravity\\_for\\_a/](https://www.reddit.com/r/TheoreticalPhysics/comments/pnx0ny/string_theory_or_loop_quantum_gravity_for_a/)
66. [1407.6205] Thought Experiment to resolve the Black Hole Information Paradox - arXiv, accessed on August 4, 2025, <https://arxiv.org/abs/1407.6205>