

What is the gravity?

李梓瑞

2024 年 11 月 19 日

- 1 牛顿引力
- 2 广义相对论
- 3 量子引力
 - 弦理论——协变量子引力
 - 圈量子引力——正则量子引力
 - AdS/CFT 对偶
- 4 黑洞
- 5 非微扰与 TQFT

牛顿引力，也称为牛顿的万有引力定律，是艾萨克·牛顿在 1687 年提出的一个描述两个物体之间引力相互作用的物理定律。

- 万有引力定律：宇宙中任意两个物体之间都存在着相互吸引的力，与质量乘积成正比，与距离的平方成反比。

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

- 局限性：牛顿的引力理论没有解释引力是如何产生的，也没有考虑引力作用的速度，这与光速有限的事实相矛盾。

牛顿的引力理论是物理学史上的一个重要里程碑，它成功地解释了地球上的重力现象以及天体运动的规律。尽管后来爱因斯坦的广义相对论提供了对引力更深刻的理解，但牛顿引力在许多日常情况下仍然是一个非常准确的近似。

广义相对论是由阿尔伯特·爱因斯坦于 1915 年提出的引力理论，它描述了引力是如何影响时空结构的。

- 光速不变，等效原理
- 时空弯曲：质量能够使周围的时空发生弯曲，而弯曲决定了物体的运动。引力不再被视为一种力，而是质量对时空几何的影响。
- 爱因斯坦场方程：广义相对论的核心方程，描述了时空的几何结构与能量分布的联系。

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

，其中 $G_{\mu\nu}$ 是爱因斯坦张量， Λ 是宇宙常数， $g_{\mu\nu}$ 是度规张量， G 是引力常数， c 是光速， $T_{\mu\nu}$ 是能量-动量张量。

- 测地线：自由下落的物体沿着时空中的测地线运动。测地线是两点间的最短或最长路径，类似于欧几里得几何中的直线。

广义相对论是现代物理学的基石之一，它不仅改变了我们对引力的理解，还推动了对引力本质的探索。

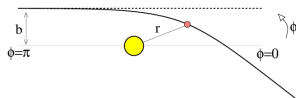


Figure 10: Light bending in the Schwarzschild metric.

(a) 光

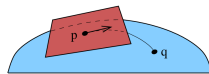


Figure 23: Start with a tangent vector, and follow the resulting geodesic to get the exponential map.

(b) 等效原理

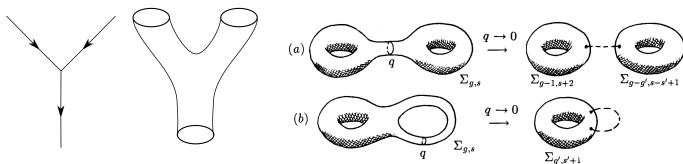
量子引力是将量子力学的原理应用于引力场的理论。由于引力子不可重整化，无法将其直接纳入标准模型中。

弦理论是协变量子引力中最成功的模型。它的背景度规是经典的，而背景度规上的物质场是量子化的，引力被看作是在这个经典时空上传播的自旋为 2 的引力子场。

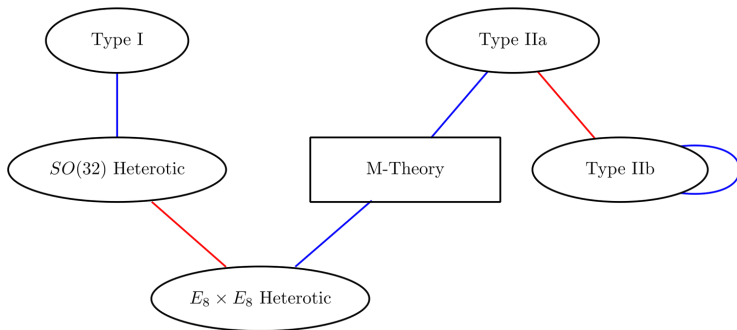
- 基本思想：基本粒子是一维的“弦”，可以是开弦或闭弦。不同的振动模式对应不同的粒子。引力子属于闭弦。
- 出发点：强相互作用。
- 量子场论的唯一性：所有的物理性质都是由理论本身决定的，而不是通过实验来确定的自由参数。
- 弦理论自动包含了量子引力场。在弦理论中，总有一个振动模式对应于引力子。
- 可观测量：强子散射振幅。

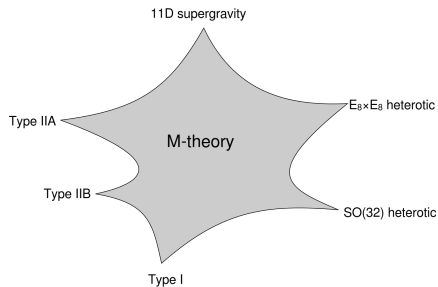
- M 理论：受对偶性的启发，爱德华·威腾提出 11 维的 M 理论，包含了不同的弦理论。其名称来源于 D 膜动力学，即“矩阵理论”。
- 从微扰出发定义

尽管弦理论在数学上具有吸引力，但它仍然尚未被实验证实。



图：费曼图





(b) Edward Witten

图: M 理论

圈量子引力理论 (Loop Quantum Gravity, 简称 LQG) 是一种背景无关的非微扰的正则量子引力理论。

- 背景独立性: LQG 将时空的几何构型视为动态变化的量。
- 自旋网络: 空间被描述为一种“自旋”网络系统。自旋网络的面积、体积和长度算符均具有普朗克尺度的最小本征值。
- 量子化时空: LQG 预言空间和时间实际上是由离散部分组成的。
- LQG 解除了广义相对论中的奇点问题, 如黑洞奇点。量子时空远比广义相对论给出的经典时空要大, 时空可以不遭遇奇异性区域, 实现在经典奇点附近的量子演化。
- LQG 提供了一个非微扰的框架, 动力学有待研究。

圈量子引力理论为我们提供了一个探索量子引力的新途径。

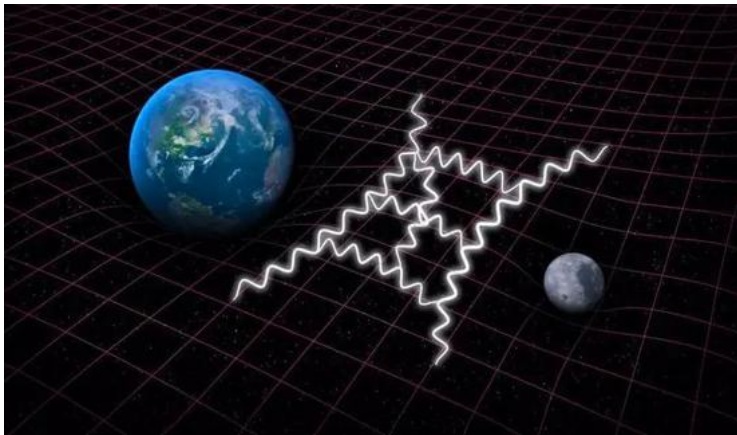
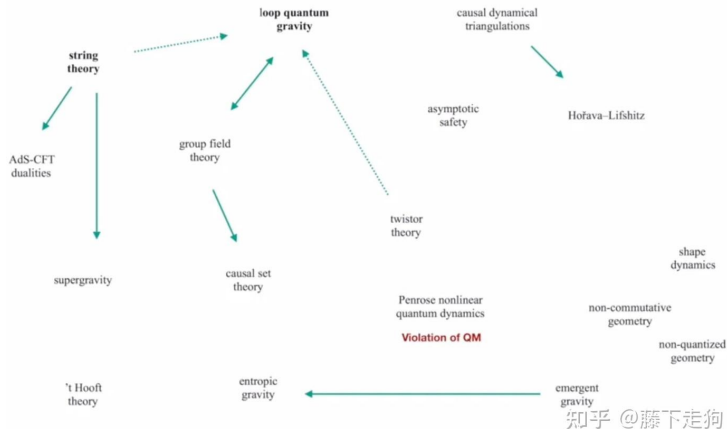


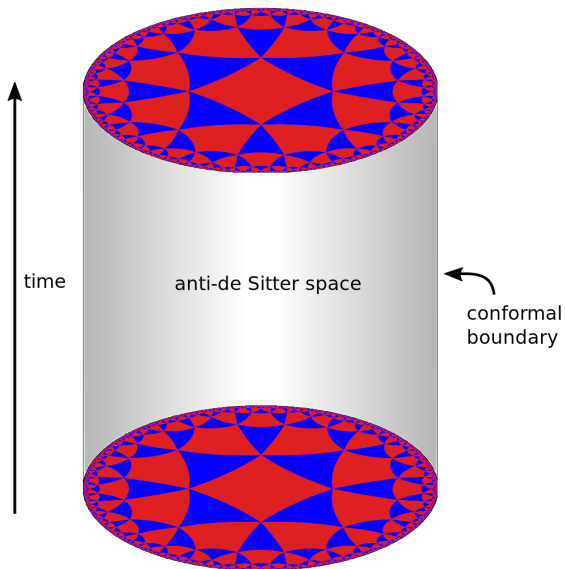
图: LQG



图：量子引力图鉴

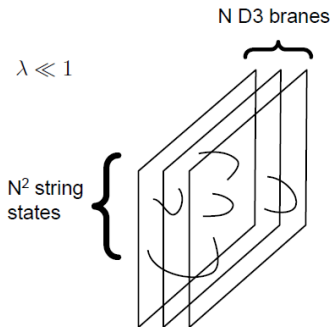
AdS/CFT 对偶，也称为反德西特/共形场论对偶，是一种在弦理论中发现的深刻关系，它连接了两种看似不同的物理理论：一个在反德西特空间（AdS）中的引力理论和一个在边界上的共形场论（CFT）。

- 概念起源：AdS/CFT 对偶最初由 Juan Maldacena 在 1997 年提出，作为弦理论中的一种对偶性，它提供了一个强大的工具来研究量子引力和强耦合场论。
- 对偶关系：AdS/CFT 对偶表明，一个在 d 维反德西特空间中的引力理论（包含引力）等价于其边界上的 $(d-1)$ 维共形场论（不含引力）。这种关系允许物理学家通过研究边界上的场论来间接研究引力理论。
- 在某些情况下，AdS/CFT 对偶提供了一种从弱耦合极限到强耦合极限的桥梁。

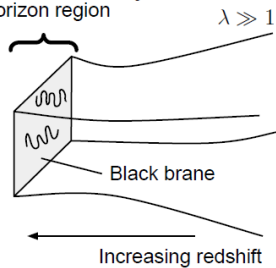


- 量子引力的全息原理：AdS/CFT 对偶是全息原理的一个具体实现。
- AdS/CFT 对偶在高能物理、凝聚态物理和量子信息等领域有着广泛的应用。比如，夸克-胶子等离子体、高温超导体和量子相变等现象。

AdS/CFT 对偶是现代理论物理中的一个重要突破，它不仅加深了我们对引力和量子场论的理解，也为探索量子引力提供了新的视角。



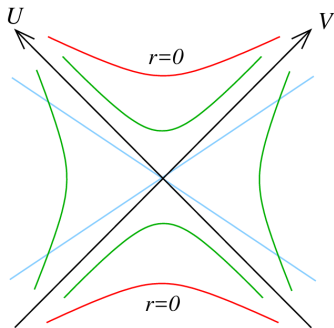
Gravitons in AdS_5 near horizon region



黑洞与量子引力的关系在现代的高能理论中占有重要地位。

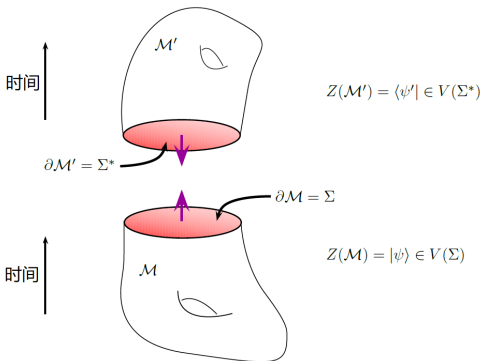
- 黑洞：黑洞是一种极端天体，在几何上表现为奇点。黑洞的边界被称为事件视界。黑洞的概念最早可以追溯到 18 世纪，但直到 20 世纪爱因斯坦的广义相对论提出后，黑洞作为一种物理实体的存在才得到了理论上的支持。其研究涉及引力、热力学和量子力学等多个领域。
- 量子引力：量子引力是理论物理学家试图将量子力学的原理应用于引力场的理论。这是由于引力子不可重整化，无法将其纳入标准模型中。
- 黑洞的量子效应：霍金辐射。从而黑洞具有温度和熵。
- 在普朗克长度量级，量子引力效应将变得显著。
- 黑洞信息悖论

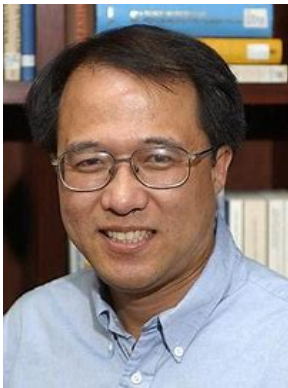
黑洞和量子引力的关系为探究引力的本质提供了切入点。



(b) 彭罗斯图

为了理解强关联体系，拓扑量子场论 (TQFT) 从范畴出发公理化量子场论。在闭流形上，拓扑量子场论的配分函数给出拓扑不变量：一个只依赖于流形拓扑的复数。





(c) topological order



(d) SYK model

References I

- [1] Matthew D. Schwartz. Quantum Field Theory and the Standard Model[M]. Cambridge University Press, 2014.
- [2] David Tong. Lectures on General Relativity[DB/OL]. (2019)[2024-11-20].
<https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/gr/gr.pdf>.
- [3] Sean A. Hartnoll, Andrew Lucas, Subir Sachdev. Holographic quantum matter[DB/OL]. (2018-3-20)[2024-11-20].
<https://arxiv.org/abs/1612.07324>.
- [4] Alexei Kitaev: Chaos and black holes[R]. 北京：国际基础科学大会，2024.
- [5] Liang Kong. An ongoing revolution in quantum many-body theory[R]. 安徽：中国科学技术大学，2024.