

黑洞，量子信息以及物理学基础

(清华大学 陆遥、龙桂鲁 编译自 Steven B. Giddings, *Physics Today*, 2013, (4): 30, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

量子力学告诉我们，黑洞以辐射粒子的方式蒸发——这说明现代物理学至少有一个支柱必须倒塌。

黑洞可能是宇宙中最神秘的东西了。有极佳的证据表明它们的存在——甚至在宇宙中无处不在。但正是由于它们的存在，现代物理学基础遭到了被推翻的威胁，特别是定域性和时空的地位。引出这一激进结论的是一个孩子都会问的问题：一个东西扔

进黑洞以后会发生什么？

黑洞的基本概念简单到可以让学童为之着迷：它是一个逃逸速度超过了光速的物体。John Michell 在 1783 年发现，一个具有太阳密度和 500 倍太阳半径的物体会成为黑洞。他用非相对论牛顿方程却给出了黑洞半径的

正确相对论性公式。目前对引力的认识要用广义相对论和爱因斯坦方程。爱因斯坦于 1916 年建立了引力场的奠基性理论，仅仅几个星期之后，施瓦茨席尔德给出了对称球体的引力场(图 1)。

在爱因斯坦的理论中，引力被视为时空的弯曲。在黑洞中心，时空的曲率趋于无穷大。这个讨厌的奇点预示物理学的崩溃，而这个奇点却远没有被物理学家严格审视。人们认为，通过采用时空度规作为动力学变量对广义相对论进行

简单的量子化便可解决这些奇点困难。但是往往细节决定一切，当人们试图得到精确表达式时，尤其是在使用微扰理论研究这个问题的过程中，量子理论振幅中存在无限多的无穷大，这些无穷大的堆积使得量子系统难以重整化。但这些并不是所有的困难。最近，Giddings 认为量子信息丢失是量子引力中更中心的问题。

酉演化是量子力学最重要的性质。酉演化让初始态变成了确定的最终态，保持了态的正交化和几率，它可以还原到初始态，这个基本性质对应于量子力学中的量子信息的守恒。为了说明量子信息丢失问题，让我们来考虑一个理想实验：两个高能粒子在极小碰撞参数下的碰撞，此时会有黑洞产生和黑洞的蒸发，而黑洞蒸发是量子理论的预言。通过分析大黑洞半经典几何图像中的量子场，斯蒂芬·霍金发现，粒子像粒子隧穿一样被辐射。结果黑洞不断缩小，直到接近普朗克质量 $M_p = E_p/c^2$ 。霍金最初认为，当黑洞达到普朗克质量就会连同信息一起在爆炸中消失。因为黑洞可以从一个量子纯态演化而来，但是后消失的态是混态，伴随着辐射带走了大量的熵，演化不是酉化的，量子力学遇到了困难。

总体说来，因为定域性，量子信息不会逃逸，不会在不违反量子力学及能量守恒的情况下被破坏，不会在不破坏稳定性的情况下被保留下来。这些就是黑洞信息的明显悖论之

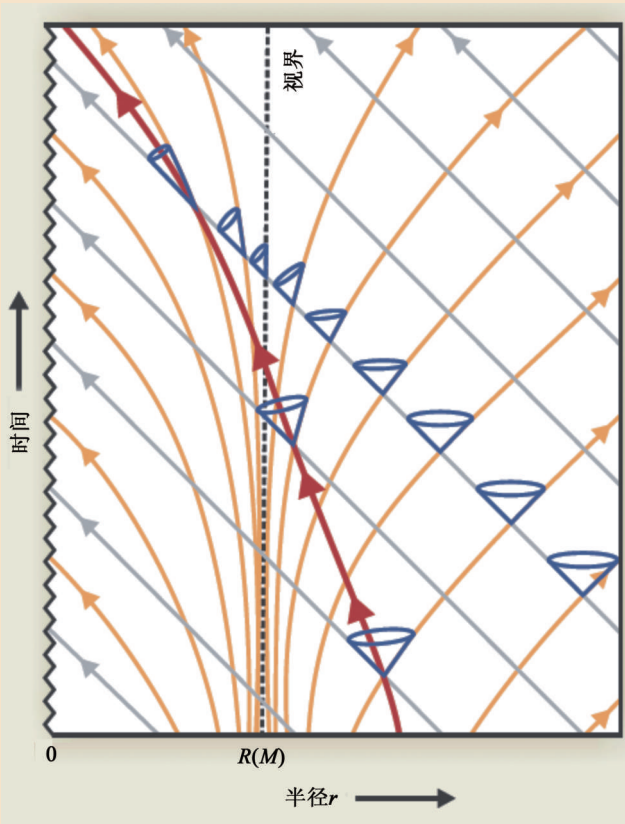


图 1 施瓦茨席尔德黑洞解的时空图像，它可以用不同方式描述。在这个描述中，向里的光线沿着向里的线走，直到达到左上角 45°，向外的光线在大半径 r 时也接近 45°。大质量的粒子速度小，沿着蓝线在向外的和向里的线里走，如红线所示。没有光线可以从内部垂直点线出发逃到无穷远处，这个范围在依赖于质量的施瓦氏半径 $R(M)$ 上。同时，任何从范围内部出发的轨道到达中心点，奇点 $r=0$ 处，时空弯曲无穷大

精髓。

这种基本原理之间的冲突就意味着必须要修改其中的一个或者多个。其中，局域性在引力的量子描述中似乎是最不牢固的。所有其他的修正由于不自洽或者与实验冲突都失败了。虽然量子场论中局域性与因果律是紧密联系在一起的，满足自治性，但是局域性在引力理论中是难以准确描述的。无论哪个原则需要修改，如果信息确实可以逃脱黑洞，物理规律将以一种陌生的和新颖的方式呈现。

一种解决信息丢失问题的方法是寻求现有框架的适当修改。一个主要的竞争者是弦论，它已经成功地解决了不可重整化的问题，并部分解决了奇异性问题。弦论在两个方面修正了局域性。首先，弦是扩展的，而不是点状的。第二个修改是通过全息论。全息论通常与互补思想紧密联系，认为黑洞的内部和外部观测测量互补，类似于玻尔的互补原理，比如量子力学中位置和动量的互补。其结果是，对于黑洞内部和外部的观察不能同时使用一个物理描述。如果互补原理是正确的，它也代表与局域量子场论的彻底决裂。

1992年，甚至在全息术和互补性之前，Giddings提出了一个新的、非局域的从黑洞内向视界外传递信息的物理解决方案。他考虑了一个场景，包括在被称为大规模遗物中，最初的黑洞转换成新的物体，与界面以外的潜在视界传送荷载信息的状态(图2)；大规模的遗物可以与外界通过某些过程找回缺失的信息。大量遗物场景不遵从定域性，至少对于黑洞蒸发的半经典时空几何是这样的：物体的表面必须从靠近黑洞中心的地方开始膨胀到视界之外，因此必须移动得比光还快。

大规模遗物与传统的黑洞有着显著的区别。对于黑洞的情形，一个坠入其中的观察者在视界中不会发现任何值得注意的现象，而与此不同的是，一个坠入残余物的观察者会感受到其表面受到疼痛的冲击，这有点类似于掉到了中子星的表面。更进一步，人们一般会期望着来源于大规模遗物的能量反射。很显然，物理学家需要借助非定域性来调和黑洞的酉演化和信息丢失之间的矛盾——至少这与近似半经典几何有关。人们可能要研究这与传统物理学至少要有多少偏离。酉化性要求有大规模遗物的存在呢，还是有可能有别的更温和的非定域信息传递的形式？

背离定域性是激进的——它推翻了量子场论的基本支柱——但它似乎是对引力难题的最不激进的解决方式。非定域演化经历了反复的研究，但常常因为它暗示的对量子场论的修正会导致非因果性和佯谬而被轻易丢弃了。任何对于定域量子场论的合理非定域偏离都要符合一个严格约束的框架，特别是要能够重复量子场论中与黑洞无关的各种一般预测。对量子场论进行恰当修正所存在的困难，向我们提出了关于时空的基础性描述的疑问。另一种可能性是，希尔伯特空间是更基础的，而定域性和时空只是希尔伯特空间网状结构的一种近似。

在Giddings看来，对于黑洞的(也是对于宇宙的)一致性和酉化的量子描述的要求应该作为通往新物理原理的重要向导。举例来说，动力学必须提供一个关于酉化 S -矩阵的引力模拟，并且要满足重要的物理

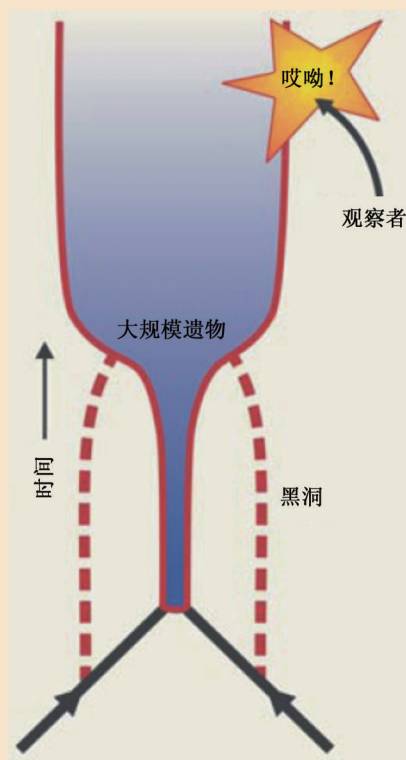


图2 大规模遗物是非局域的。在这些模型中，一个黑洞转变成一个高质量物体，其表面可能在未来的视界点之外或在这点之上(原点两侧的虚线)。在图中，黑洞是由两个粒子的碰撞(黑色线)形成的。为了达到视界，表面必须比光速的传播还快，这违反了量子场论的局域性。与落入中子星相比，一个高速落入剩余表面的观察者会体验到强大的崩溃，除非有奇迹发生。这一通常场景的其他版本包括所谓的fuzzball和firewall

和数学约束。

目前的酉化性危机与经典原子的稳定性危机有相似之处。在这一物理学历史上早期的篇章中，经典物理能够提供一致性的描述——虽然与实验观察不符——直到电子落入了电荷中心。然而，对原子的正确描述需要引入量子力学这样的基础性新原理去描述玻尔半径以内的物理学。这些原理是为了解释原子物理的特别努力开始发展起来的，甚至以牺牲经典力学为代价。很可能，再一次的，正确物理学的严格的结构将提供至关重要的引导。