

# 量子黑洞

(清华大学王青编译自 Georgi Dvali, *Physics Today*, 2015, (1): 38)

黑洞首先由英国的 John Michell 在 1783 年构想出, 他说: “如果一个和太阳同样密度的球的半径与太阳半径比例达 500: 1, ……所有从这个物体辐射出的光将会被它自己的引力吸引回来”。13 年后, Pierre Simon Laplace 针对存在可囚禁光的“不可见物体”提出了独立证明。

依据现代广义相对论, 质量  $M$  的球当其半径缩小到所谓 Schwarzschild 半径  $R=2GM/c^2$  时将变成能囚禁光的黑洞; 这里  $G$  是牛顿引力常数,  $c$  是光速, 以后我们取它为 1。此特殊半径的命名源自纪念 Karl Schwarzschild 第一个发现爱因斯坦方程的黑洞解。

## 强相互作用, 小黑洞

在量子力学中, 力来自交换媒介粒子, 电磁力的媒介粒子是光子, 引力由自旋为 2 的被称之为引力子的粒子传递, 引力子之间相互吸引。

可用牛顿引力场  $-GMm/r$  来估计引力子的相互作用强度  $\alpha_g$ 。利用关系  $E=\hbar/L$  将引力子波长  $L$  联系到其能量  $E$ , 其中  $\hbar$  是普朗克常数。



图1 黑方块

用  $\hbar/L$  替代源质量  $M$  并将距离  $r$  取成  $L$ , 得到  $\alpha_g = \hbar G/L^2$ 。定义  $\hbar G \equiv L_p^2$ , 则  $\alpha_g = L_p^2/L^2$ 。尺度  $L_p$  叫普朗克长度, 是最基本的量子引力尺度, 数值  $10^{-35}$  m。对应的质量或能量尺度  $M_p = \hbar/L_p$  叫普朗克质量, 数值约  $10^{-8}$  kg, 大概是一个生物细胞的质量。

普朗克长度如此之小, 导致两个 1 cm 波长的引力子会每  $10^{14}$  年散射一次, 相应的耦合  $\alpha_g$  是  $10^{-66}$  的量级。随着引力子波长减小, 计算变得越来越不可靠, 当波长小到  $L_p$  的尺度时崩溃。这时, 引力子的相互作用足够强, 以致相互碰撞的引力子可以以接近 1 的几率相互俘获并形成束缚态。这些微观态称为量子微黑洞, 或简称量子黑洞。它们的性质介于量子基本粒子实体和宏观黑洞之间, 但不属于两个世界中的任何一个。

## 从量子粒子到黑洞

有质量的基本粒子如电子具有非零 Schwarzschild 半径, 如能只局域于其 Schwarzschild 半径内则是黑洞。但任何将电子局域在 Schwarzschild 半径内的企图都会严重扭曲系统, 以致很难再称其为电子。在量子理论中, “基本”的意思是“没有结构”。但无结构绝不意味零尺寸。在量子力学中, 任何形式的能量、质量都有相应的尺度线度, 任何线度都有相应的能量。能量为  $m$  的粒子具有一个它所局域的线度下限, 叫康普顿波长  $L_c = \hbar/m$ , 它是能量的量子涨落变得和粒子质量同样重要的线度。电子的 Schwar-

zschild 半径  $R$  比  $L_c$  小得多, 为测量则要求转移约  $10^{40}$  GeV (等价于  $10^{13}$  kg) 的动量到电子。不可能利用任何实验探测电子的 Schwarzschild 半径, 因此电子不是一个黑洞。

基本粒子要成为黑洞, 必须足够重以使  $L_c$  能达到  $R$ 。质量差不多正是使  $R$  开始具有物理意义的最小质量  $M_p$ 。因为  $L_c$  与  $L_p$  可相比拟, 对于这些最轻的量子黑洞, 量子引力效应变得十分重要。

## 来自经典黑洞的信息

现在从宏观黑洞实体的角度讨论量子黑洞。考虑  $\hbar=0$  因而  $L_p=0$  的经典世界。严格证明指出, 经典黑洞完全由其质量、角动量和电荷标志。物理学家将此总结为“黑洞无毛”。一个经典黑洞可比作 Kasimir Malevich 的著名画作“黑方块”(见图 1), 它几乎不带任何特征。

Bekenstein 于 1973 年证明黑洞具有正比于  $(R/L_p)^2$  的熵  $S$ , 它是信息储存能力的度量, Bekenstein 还证明了黑洞存储信息。随着  $L_p \rightarrow 0$ , 公式说信息存储的能力变为无穷大。这似乎与经典黑洞的无毛特性不相容。解决方案是经典黑洞中的信息不可获取。在经典极限下, 信息检索时间将变成无限长。

霍金工作在“半经典”领域, 其中粒子是量子化的, 时空几何不量子化。如果考虑无穷重的黑洞并同时以一种保持  $R$  有限的方式将牛顿常数取为零, 半经典计算严格可行。在这个极限下, 霍金证明黑洞会辐射。霍金辐射是理想热辐射,

其温度  $T$  正比于  $\hbar/R$ 。由于黑洞无旁重, 即使它以常速率辐射, 其质量也不会减少。由于辐射谱是理想黑体, 测量黑洞的观测者无法解码任何信息, 信息永恒地储存在半经典黑洞之中。

我们在经典和半经典世界对黑洞的理解是完全自洽的。在两种情形下, 黑洞都是永恒和无特征的。在两种描写中,  $L_p=0$ , 因此黑洞不管多小都不可能达到量子边界。在经典和半经典世界, 粒子和黑洞是被严格分开的, 没有实体可被看作黑洞粒子。

### 有限常数的现实世界

在现实世界中,  $\hbar$ 、 $G$  和  $L_p$  都是有限的, 有限尺寸的黑洞具有有限质量。随着黑洞辐射质量的减少, 黑洞温度增加。温度改变不仅意味着来自现实黑洞的辐射谱不再是严格的黑体谱, 而且黑洞的特征也在演化。一个黑洞所释放的信息应该随着对黑体谱的偏离而被以某种方式解码。

现实黑洞以一种深刻的方式明显区别于它们的半经典理想化产物。黑洞半衰期大约是  $N=(R/L_p)^2$  的量级,  $N$  是一个极大的数, 一个地球质量的黑洞的半衰期约是宇宙年龄的  $10^{38}$  倍。

从具体的黑洞微观量子模型可导出其量子修正, 然而目前还没有普遍被接受的模型。例如, 在一些超弦理论中, 可以通过弦的态数来理解黑洞的微观结构。一个近期的想法是, 黑洞是  $N$  个波长约为  $R$  的引力子的束缚态。很多模型给出针对黑体辐射行为偏离的相对修正量级为  $1/N$ 。对大多数宏观物体来说, 量子修正远没有那么重要, 例如对地球的引力场, 它们完全可被忽

略。黑洞越小越轻,  $N$  越小且相对量子修正越重要。如果半径足够小, 量子修正如此巨大以致这个微小的物体成为一种新的实体, 即一个通过从宏观黑洞逐渐缩小而构建的量子黑洞。当黑洞半径达到  $L_p$  (质量基本上是普朗克质量), 量子修正就达到 1 的量级。半径小于  $L_p$ , 黑洞不再存在, 进入粒子物理领域。

存在一些实体作为粒子世界和黑洞世界的衔接点, 它们分享两边的特性但又彼此很不相同。弱耦合作用基本粒子的规则和半经典黑洞物理都无法准确预期它们的物理性质。定量计算十分困难的原因是, 量子黑洞的相互作用强度参数  $\alpha_g$  是量级为 1 的量, 无法应用依据相互作用强度微扰展开的传统计算方法。对于那些比量子黑洞重几个量级的粒子, 可应用半经典黑洞方法, 而对极轻的粒子, 应用微扰论是合适的。量子黑洞正好位于两种方法都不能用的那一点! 如果我们要对这些物体获得满意的了解, 就需要发展新的强有力的理论方法。

### 实验前景

实验研究黑洞或观测它们的可能性有多现实? 若物理学家极端幸运, 我们可能会检测到宇宙历史早期产生的黑洞蒸发的最后阶段, 它缩小到了普朗克长度。这样的黑洞可能会游荡进粒子探测器, 其几率强烈依赖于模型的具体特性和宇宙早期历史的一些未知方面。直接产生量子黑洞要求粒子对撞机所达到的能量大于普朗克质量。唯一已知实现这样高能量的可能是宇宙线碰撞。即使对宇宙线, 能量高于  $M_p$  的碰撞极其稀少。直到现在, 这种碰撞还从未在地球大气中被探测到过。

人类制造的粒子加速器所能达

到的能量远低于  $M_p$ , 所以在加速器上产生黑洞的前景不太现实。然而在某些类型的新物理如大额外维理论中, 普朗克长度可望比四维理论给出的  $L_p$  长很多。实验对普朗克长度  $L_p$  的限制告诉我们, 最大可能的  $L_p$  值大约是  $10^{-19}$  m, 正好差不多是欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机 LHC 上所探测的尺度。

如果 LHC 观测到量子黑洞, 它们中最轻的将看起来完全不像半经典黑洞。它们不会慢慢地丢失其质量, 不会衰变为大量的低能粒子。它们将极快地衰变成一些高能粒子。衰变产物将按照它们自己的量子性质行事——如, 夸克和胶子将产生喷注。两喷注事例将是正确地寻找轻量子黑洞迹象的地方。按目前的计算能力, 我们无法肯定地预言量子黑洞的性质。例如, 准确的衰变道、分支比、寿命, 而量子黑洞的最小质量只能被预言到一个量级 1 的系数。

观测到量子黑洞将是有史以来最激动人心的发现之一。实验学家们需要探测高于量子黑洞(或新粒子)产生的那段能量区间。如果新产生的实体确是黑洞, 随着能量增加, 它们将更可能会被产生, 生存更长时间, 将衰变成更大量数目的产物, 并且衰变到各种产物种类的几率将趋于相同。这些是发现黑洞的标志性特征, 尽管其他实体至少在低能区也可模仿量子黑洞的实验信号。确认观测到量子黑洞将要求对大量数据进行极端仔细的分析。研究量子黑洞的理论学家们可被归入那些急切等待要看 LHC 在其新一轮运行中能给出什么的物理学家队伍。

俄国艺术家 Kasimir Malevich 1915 年的画作(见图 1)。它很像一个经典黑洞, 只解码极少信息。