

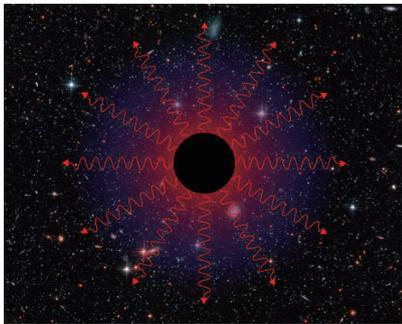
黑洞有量子软毛

(中国科学院高能物理研究所 易疏序 编译自 Gary T. Horowitz, *Physics*, June 6, 2016)

四十年前，Stephen Hawking 提出了一个挑战标准量子物理的观点：黑洞可以摧毁信息。这催生了被称为“黑洞信息疑难”的悖论，至今悬而未决。Hawking 本人和他剑桥大学的同事 Malcom Perry 以及哈佛大学的 Andrew Strominger 的新研究显示，这个悖论的一些前提可能是错的。他们的工作并没有完全解决问题，不过却指出了有望终结这个悬案的方向。

按照爱因斯坦的广义相对论，稳态黑洞由 3 个可观测量参数完全描述：质量、电荷、角动量。坠入黑洞的物质所携带的几乎所有信息都不能外部获知。物理学家 John Wheeler 称之为“黑洞无毛”。

1975 年，Hawking 研究了黑洞边缘的量子过程，并得出了一个结论：黑洞并非“纯黑”。它们有近似于热物体的黑体辐射。如果没有物质落入，这种“Hawking 辐射”会让黑洞损失能量，减少质量，最终蒸发殆尽。那么问题来了：原先落入黑洞的物质携带的信息去哪了？因为 Hawking 辐射来自黑洞表面，而黑洞又仅由几个参数决定，因此



Hawking, Perry 和 Strominger 指出黑洞有可能带有“软毛”，即低能量的量子激发，它们可以在黑洞蒸发时带着信息

Hawking 得出结论：信息丢失了。

不过 1990 年代后期，弦理论以及其他理论的发展让大多数研究者相信掉入黑洞的物质所携带的所有信息一定在黑洞蒸发时从中逃离。不过信息如何逃离还不清楚。我们可以从回答下面的问题开始：Hawking 最初关于信息一定丢失的论证哪里出错了？Hawking, Perry 和 Strominger 提供了一个可能的答案。他们指出，Hawking 早期的工作依赖于两个假设。其一，量子引力中的真空是唯一的；其二，黑洞无毛。这两个假设都不正确，因此得出了一个错误的结论。量子理论允许无穷个简并的真空，黑洞可以携带作者们所谓的“软毛”，即非常低能量激发态的量子毛发。

2014 年，Strominger 在研究另外一个问题的时候得到了一个重要的结论，有无数个守恒定律支配引力子的散射。在他和他的学生的努力下，Strominger 不久意识到，电磁理论也有类似的结论。现在，他正与 Hawking 和 Perry 一起把这个想法应用到黑洞。

他们得出黑洞毛发新理论的关键是一些新的守恒律，这些守恒律可以看作是电荷守恒定律的推广。一个区域中的总电荷数，可以通过对任意一个包围了这个区域的曲面上的电场法向分量积分而得到。如果没有电荷进入或离开这个区域，总电荷数就不随时间改变。Strominger 把上述曲面积分推广为：在一个半径为无穷大的曲面上，对电场的法向分量进行以任意函数加权的积分。他证明这个新的积分量依然是守恒

的。这就给出了无穷多个守恒量。

上述结论可以和黑洞这样联系起来：高斯定理可以把描述新守恒电荷的表面积分转换成对空间的体积分。当黑洞不存在时，这个新守恒定律仅仅表明：这个体积分在过去和在未来是相等的。但当黑洞存在时，对未来的积分必须包括黑洞视界上的贡献。

如果引力和电磁都用经典的理论描述，那么黑洞视界上贡献的新电荷应该为零。但作者们证明当用量子力学描述电磁场时，情况就大不相同了。为了理解它，首先让我们来考虑一个真空态，并在其上叠加一个光子。结果是得到了一个新的量子态，这个态的能量等于光子的能量。Strominger 在他的文章里写道，如果取极限让光子的能量趋于零(软光子)，结果就得到一个新的量子态，人们也可以把这个新的量子态称为真空，因为它的能量几乎为零，和原先的真空是一样的。把第一个真空态变换为第二个真空态的量子力学算符就对应于新电荷。作者们的工作证明，把同样这个算符作用到黑洞的视界上会增加一个能量几乎为零的光子。这些光子组成了他们所谓的黑洞“软毛”。由于存在无穷多种新电荷，黑洞可以携带无穷多根软毛。不仅如此，研究者们显示，当一个带电荷的粒子落入黑洞，它就能激发一些软毛。新电荷的严格守恒说明当一个黑洞蒸发时，这些毛发所携带的信息必须通过 Hawking 辐射被带走。

更多内容详见：Stephen W. Hawking et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116: 231301.