

旋转黑洞会长“毛”

(北京大学 徐仁新 编译自 Sam Dolan. *Physics*, July 24, 2017)

通过激发微小质量的假想粒子场而自发地生长“毛发”，旋转的黑洞可损失其9%的质量。

加拿大Perimeter理论物理研究所 William East 和普林斯顿大学的 Frans Pretorius 最近模拟了旋转黑洞的动力学，发现一个有趣的现象。若自然界存在质量极小($<10^{-10} \text{ eV}/c^2$)的玻色子，则黑洞会自发地滋生“长发”，即：在黑洞周围迅速激发这种场(见图)。这一发现认为，黑洞可能会生出长期存在于事件视界面之外的“毛发”，从而挑战“无毛”的论点。同时也引发如下可能：或许某一天能依据引力波特征来探测“有毛”黑洞。

这项研究要追溯到上世纪七十年代初两个关于黑洞的不同看法(分别被 John Wheeler 和 Roger Penrose 所推崇)。1971 年 Wheeler 声称“黑洞无毛”。不管过去如何，黑洞一旦形成后将迅速处于稳态，只需三个量(质量、角动量和电荷)就能描述。所有其他自由度(毛发只是个比喻)会快速地辐射或吸收。在经典框架

内，黑洞并不记忆它所吞噬的细节。值得注意的是，去年 LIGO 探测到的第一个引力波事件支持“无毛”观点(参见《物理》2016 年第 7 期“相对论通过 LIGO 的全面审查”一文)。

而 Penrose 则认为，原则上黑洞的质量和转动可被释放以驱动诸如类星体的喷流等过程。1971 年，Penrose 描绘一个思想实验：黑洞可将其能量转移至散射粒子。类似地，电磁波被旋转黑洞反射后也可提取黑洞的能量，这一过程称为黑洞的超辐射。

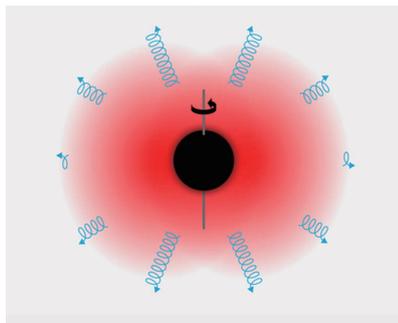
学者们在 1972 年认为，若存在能束缚电磁波的机制，超辐射将反反复复地作用于黑洞，就会触发称为“黑洞炸弹”的失控过程。如果自然界存在质量非常轻的玻色场，则其非零质量导致的势能使得玻色场被束缚(即玻色场某些模式会束缚于黑洞的引力势阱)，这一过程即可自发产生。事实上，这一长波共转模式的玻色场可通过超辐射而指数增长，直至黑洞的角动量降至超辐射能发生的临界值以下，或场的非线性效应开始起关键作用。要使得这个过程在几年时间尺度上发生，玻色场的质量必须非常小，以至于其康普顿波长(与粒子质量成反比)跟黑洞视界半径相当。对于太阳质量黑洞而言，玻色场质量要求接近电子质量的 10^{-17} 倍。

看起来这一切都是假设，但研究人员却想尽办法来验证这个想

法。过去十年，不少人认为旋转黑洞可用作新物理的灵敏探针。据推测，天文学家可以通过窥视宇宙以获取黑洞炸弹的特征，从而推断极轻玻色子(例如 QCD 轴子、弦轴子、“模糊”暗物质粒子等)是否存在。然而，究竟该怎么找呢？

这个问题被 East 和 Pretorius 的研究所触及。他们考虑引力的非线性并数值模拟黑洞炸弹的增长，以确定其末态。曾经有人认为，黑洞会爆发性喷出物质和能量(又称为玻色新星, Bosenova)，然后玻色场再进入一个新的增长周期。但是 East 和 Pretorius 的模拟表明，黑洞可跟玻色场处于准平衡态。特别地，若矢量玻色场康普顿波长跟事件视界半径相当，高达 9% 的黑洞质量会用于增强束缚于周围的玻色场偶极模式。换句话说，旋转黑洞长出“毛发”，它长寿(至少可与光穿过黑洞的时间相比)且延伸至事件视界远处。关键是黑洞炸弹不会爆炸：毛发增长有序，不会失控而导致灾难，且以确定的频率旋转。

如何探测有毛黑洞？这种黑洞会以特定频率辐射引力波。多颗这类黑洞可产生引力波背景，也会成为可分辨的引力波点源，从而被 LIGO 或计划中的 LISA 探测。引力波数据将会严格限制玻色场质量上限：对于 LIGO， $\sim 10^{-11}—10^{-14} \text{ eV}/c^2$ ；对于 LISA， $\sim 10^{-15}—10^{-19} \text{ eV}/c^2$ 。未来，我们或能用引力波探测器来寻找基本粒子！



East 和 Pretorius 两位学者的研究表明，一颗旋转的黑洞(黑色)可使周围束缚态的极轻质量玻色场快速放大，形成近乎稳定的“毛发”位型(红色)。这种状态将通过引力波辐射而逐渐衰减(蓝色)