

重量级黑洞的并合

(北京大学 徐仁新 编译自 Rosalba Perna. *Physics*, September 2, 2020)

最大质量双黑洞合并的发现给出了中等质量黑洞存在的证据。

引力波观测打开了认识宇宙的新窗口，首次直接证明存在广义相对论描述的黑洞。2015年以来已确认10对黑洞并合，其质量、自旋各异。最近，LIGO/Virgo合作组公布了迄今最大质量黑洞的并合事件：质量分别为 $85 M_{\odot}$ 和 $65 M_{\odot}$ 的黑洞融合为一颗 $142 M_{\odot}$ 的黑洞。它有两点罕见：首先 $85 M_{\odot}$ 的黑洞处于“间隙”中，不能通过常规方式形成；其次残留的 $142 M_{\odot}$ 的黑洞为首次发现的中等质量黑洞(这类黑洞质量大约在 $10^2 M_{\odot}$ 至 $10^4 M_{\odot}$ 之间)。

根据爱因斯坦广义相对论，原则上黑洞质量可大可小。但在现实宇宙中，只有通过特定的天体物理过程才能产生某个质量范围的黑洞。大质量恒星塌缩是黑洞形成的重要途径，但质量有限制。

恒星经剧烈的超新星爆发后，可能会形成恒星质量的黑洞。大质量恒星的核能源耗尽后，其内部开始塌缩并释放引力能，最终导致爆炸。如果塌缩物质质量大于某个临界值(至少 $2.17 M_{\odot}$)，则核心注定形

成黑洞。这种方式形成的黑洞质量范围较宽，但最大质量由所谓的“对不稳定”(pair instability)确定。

“对不稳定”指通过正反电子对的产生来消耗恒星能量的过程。恒星内部高温核心产生的伽玛射线向外施加辐射压，从而抵抗引力。但是，如果核心质量约大于 $65 M_{\odot}$ ，则伽马射线将有效地转化为正反电子对，削弱辐射压，导致外层向内塌缩，触发失控的热核燃烧，恒星最终瓦解而不残留黑洞。不过，若质量超过约 $135 M_{\odot}$ ，恒星还能够直接坍塌成黑洞。可见，这一不稳定性造就了黑洞质量分布的“间隙”：理论预言不存在质量大约介于 $65 M_{\odot}$ 和 $135 M_{\odot}$ 之间的黑洞。此前LIGO/Virgo没有发现位于此质量间隙的并合前黑洞。

其他观测手段发现的黑洞质量分布则不一样。有证据表明，“超大质量”黑洞约分布于 $10^6 M_{\odot}$ 至 $10^9 M_{\odot}$ 之间，例如银河系和M87星系(最近Event Horizon Telescope拍摄)中心的黑洞。虽然认为超亮X射线源等可能是中等质量黑洞，但迄今并无直接证据。

新的双黑洞并合事件GW190521传递了两个重要信息。并合产物 $142 M_{\odot}$ 表明中等质量黑洞确实存在，而并合前黑洞 $85 M_{\odot}$ 恰恰处于传统的“对不稳定”性确定的质量间隙中。这些发现对于理解黑洞的天体物理形成过程具有重要意义。

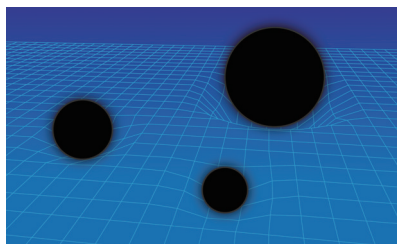
有两种可能方案解释GW190521黑洞双星。第一种方案认为双黑洞由双星系统中的两颗子星分别坍塌

而成。如何能直接塌缩成 $85 M_{\odot}$ 的黑洞？或许能通过修正恒星内部核反应过程来实现。最近的计算表明，质量间隙的下边界敏感地依赖于 ^{12}C 燃烧成 ^{16}O 的核反应率。若该速率低于目前模型的设定值，则质量间隙将向大质量方向移动，就可能允许 $85 M_{\odot}$ 的黑洞了。

第二种方案认为 $85 M_{\odot}$ 的黑洞其实是个“二代”，由两颗更轻黑洞双星并合形成。由此推测，GW190521这对黑洞是通过引力俘获而在一起。可根据这对黑洞的自旋来鉴别这两种方案：在双星系统演化情况下子星的自旋趋于一致，但动力学俘获形成双黑洞的自旋方向随机。数据分析表明，GW190521合并前黑洞的自旋可能不一致，倾向于支持第二方案，但证据还不充分。

更多线索来自于最近观测到的GW190521可能的电磁对应体。35天后，ZTF(Zwicky Transient Facility)在同一天空观测到一次光学耀发。并合产生的激波加热黑洞周围的气体可能导致了这次耀发。若耀发真得跟并合事件关联，则并合应该发生在活动星系核的盘中。那里利于多代黑洞的形成，出现超过 $50 M_{\odot}$ 的黑洞(位于质量间隙内)则不足为奇了。

未来，LIGO/Virgo可能探测到更多这类重量级黑洞并合事件。关于中等质量黑洞的统计分布或有助于揭示超大质量黑洞的宇宙学成因。此外，发现更多位于质量间隙之内或附近的黑洞，可能会有助于解决跟质量间隙范围相关的核反应问题。



LIGO/Virgo合作组发现了迄今最大质量双黑洞并合所释放出的引力波：一颗 $65 M_{\odot}$ ，另一颗 $85 M_{\odot}$ ，最终并合为 $142 M_{\odot}$ 的黑洞