

黑洞无毛定理检验研究获重要进展

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/27931.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

黑洞无毛定理检验研究获重要进展。 近日，中国科学院上海天文台（以下简称上海天文台）的引力波研究团队利用自主研发的非广义相对论双黑洞并合的完整引力波模板，针对目前LIGO（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，激光干涉引力波天文台）已经公布的双黑洞引力波事件进行了黑洞无毛定理的检验，给出了至今为止无毛定理的最精确检验结果，并发现了疑似偏离广义相对论黑洞的迹象。相关研究成果于6月6日发表在《宇宙学与天体粒子物理学》（Journal of Cosmology and Astroparticle Physics）上。

黑洞是广义相对论预言的极端致密天体，而且某种意义上可以说是宇宙中最简单的天体，因为广义相对论要求它只有三根毛发，即描述黑洞只需要三个物理参数：质量、自旋、电荷——这就是著名的黑洞无毛定理（图1）。通常认为，天体物理黑洞是电中性的，因此实际上描述黑洞只用两个参数：质量和自旋。而宇宙中其它天体，要想描述就不止三个参数，比如地球，除了质量、自旋外，还有形状、物质组成，甚至还有生命活动等等。

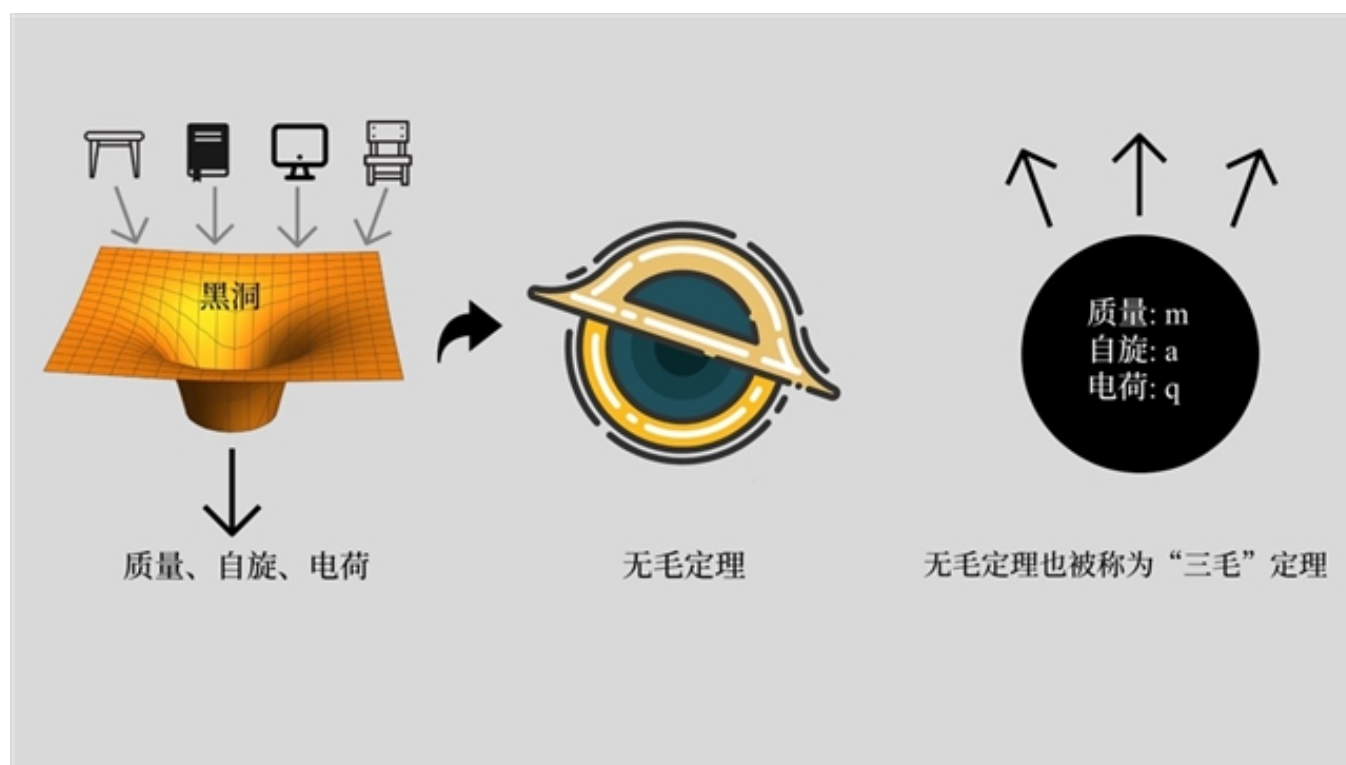


图1，任何落入黑洞的物体都无法再逃逸出来传递信息，因此广义相对论黑洞只需要三个参数来

描述：质量、自旋和电荷，这便是黑洞无毛定理。因为只需要用质量、自旋和电荷来描述黑洞，所以无毛定理有时也被称为三毛定理。

无毛定理作为广义相对论的一个预言，其成立与否直接关系到广义相对论的正确性。因此，研究黑洞是否真的只有三根毛发、还有没有其他毛发——即除了质量、自旋、电荷这三个参数之外还有没有其他参数用来描述黑洞，是检验黑洞基本性质以及广义相对论的最重要手段之一。如果无毛定理被违背了，可能意味着广义相对论需要进行修改或扩展。

双黑洞并合这样的极端引力现象是检验广义相对论的极佳场所。黑洞并合产生的引力波可作为检验广义相对论的一种探针。但引力波非常微弱，此前由于缺乏非常靠近黑洞视界的观测数据，使得科学家对黑洞无毛定理的检验很难进行。直到2015年，LIGO[注释]才首次探测到双黑洞引力波事件GW150914。截至目前，LIGO已探测到超过100起引力波事件，包括不同致密星系统的引力波事件。这些引力波事件为研究黑洞性质和检验广义相对论提供了宝贵的数据，使得科学家可以更好地对黑洞无毛定理进行检验。尽管如此，以往研究中科学家对黑洞无毛定理的检验往往限制在双黑洞并合过程的某些特定阶段，检验的结果并不理想。

为更好解决对广义相对论的黑洞无毛定理检验的难题，中国科学院上海天文台引力波研究团队利用自主研发的非广义相对论双黑洞并合的完整引力波模板，对目前LIGO已经公布的双黑洞引力波事件中信噪比最高的GW150914和GW200129_065458这两个双黑洞事件进行了黑洞无毛定理的检验。论文第一作者、上海天文台博士研究生李嵩介绍道：之所以选择这两个引力波事件作为研究对象，是因为我们在对LIGO公布的这100多起引力波事件进行分析后发现，只有当引力波信号的信噪比足够强时，检验无毛定理的精度才会比较高，而GW150914和GW200129_065458正是其中信噪比最高的两个事件。

由研究团队自主研发的非广义相对论双黑洞并合的完整引力波模板跳出了广义相对论的黑洞三毛参数的局限，并且包含旋近、并合和铃宕全过程[1]，比以往的模板更加完整且适用性更好。研究团队使用这种新模板对GW150914和GW200129_065458进行分析，通过引力波对黑洞的四极矩（即黑洞偏离球状的程度）这一形状参数进行定量描述。在理论层面上，广义相对论的无毛定理要求不带电的黑洞的四极矩完全由质量和自旋决定，因此通过测量黑洞的质量、自旋和四极矩，就可以了解黑洞是否符合广义相对论。而实际上，双黑洞并合过程中，在旋近、并合和最后的铃宕阶段（图2），黑洞偏离球对称的程度都会在引力波上留下印迹，科学家就可以通过分析引力波数据来估计黑洞质量、自旋、四极矩的大小，以此来检验黑洞无毛定理。因此，研究人员使用新模板通过测量黑洞的四极矩，然后将结果与广义相对论模板所计算出的四极矩进行比较，就可以检验无毛定理。研究团队使用这种对比方法后发现，GW150914和GW200129这两个双黑洞事件的分析显示了用新模板对实际观测数据计算所得的黑洞参数与广义相对论黑洞无毛定理所计算的参数的符合度达到95%，这是目前为止符合度最高、最精确的检验结果。

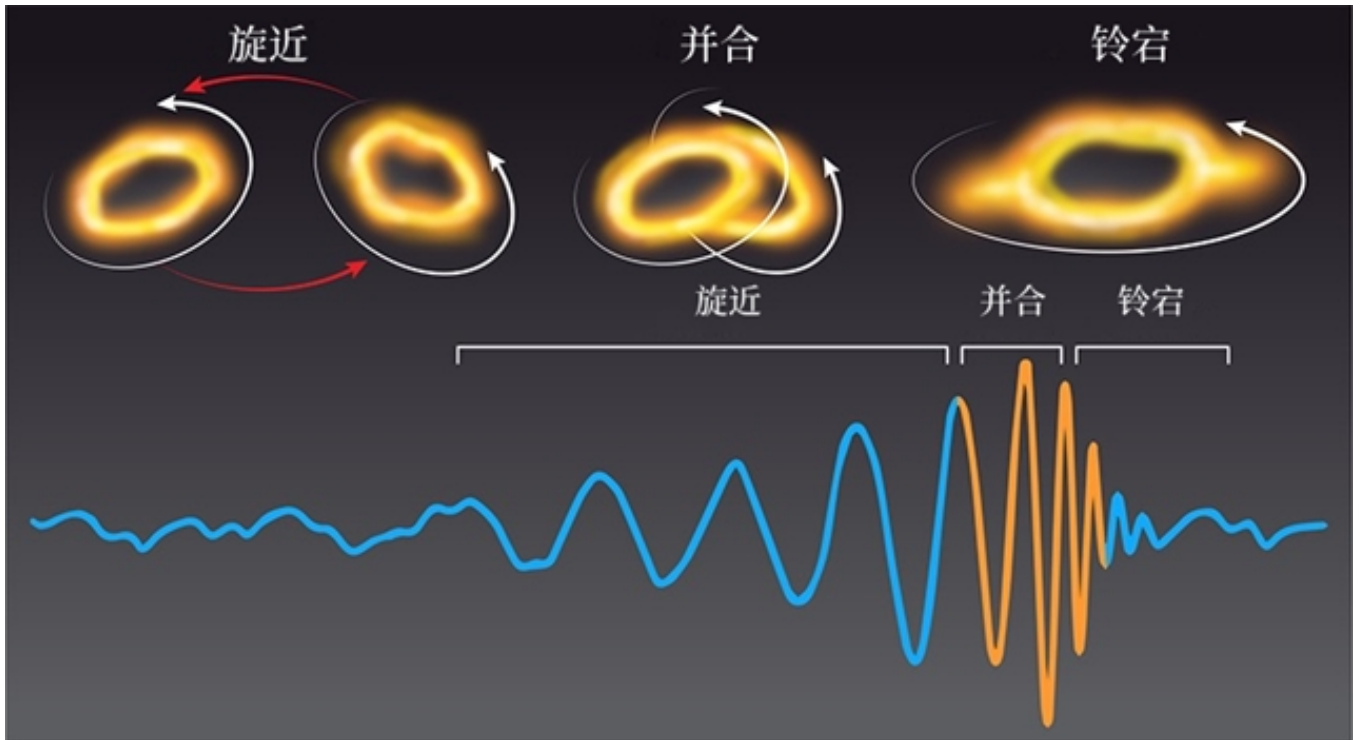


图2，双黑洞的引力波辐射，包括旋近（双黑洞互相绕转）、并合以及最后的铃宕过程。

但与此同时，这两个引力波事件的四极矩与无毛定理描述的四极矩存在约5%的偏差（图3）更加引起了研究团队的兴趣。他们在分析结果中发现了疑似偏离广义相对论黑洞的迹象，带有额外四极矩情况下，信噪比要比LIGO公布的信噪比略高，特别是GW200129这个事件，存在异常四极矩的贝叶斯因子达到5.1，已经达到强烈证据等级。但研究团队认为，这个偏差并不能确定性地得出无毛定理被违背这一结论，这两个事件的贝叶斯因子并未达到确定性证据的程度。论文通讯作者、上海天文台的韩文标研究员解释道：这种‘强烈证据’等级的异常这并不能导出黑洞无毛理论被违反的结论。虽然我们发现黑洞的形状和广义相对论预言有5%的疑似偏差，也就是黑洞还可能有额外的‘毛发’，但这种偏差一方面可能是信号噪声或其他干扰因素造成的，另一方面本次研究的样本数也偏少。韩文标还展望道，本次工作的结果将激发科学家对更多的双黑洞并合引力波事件做进一步的深入分析，期望对黑洞无毛定理有更深刻的理解。（来源：中国科学院上海天文台）

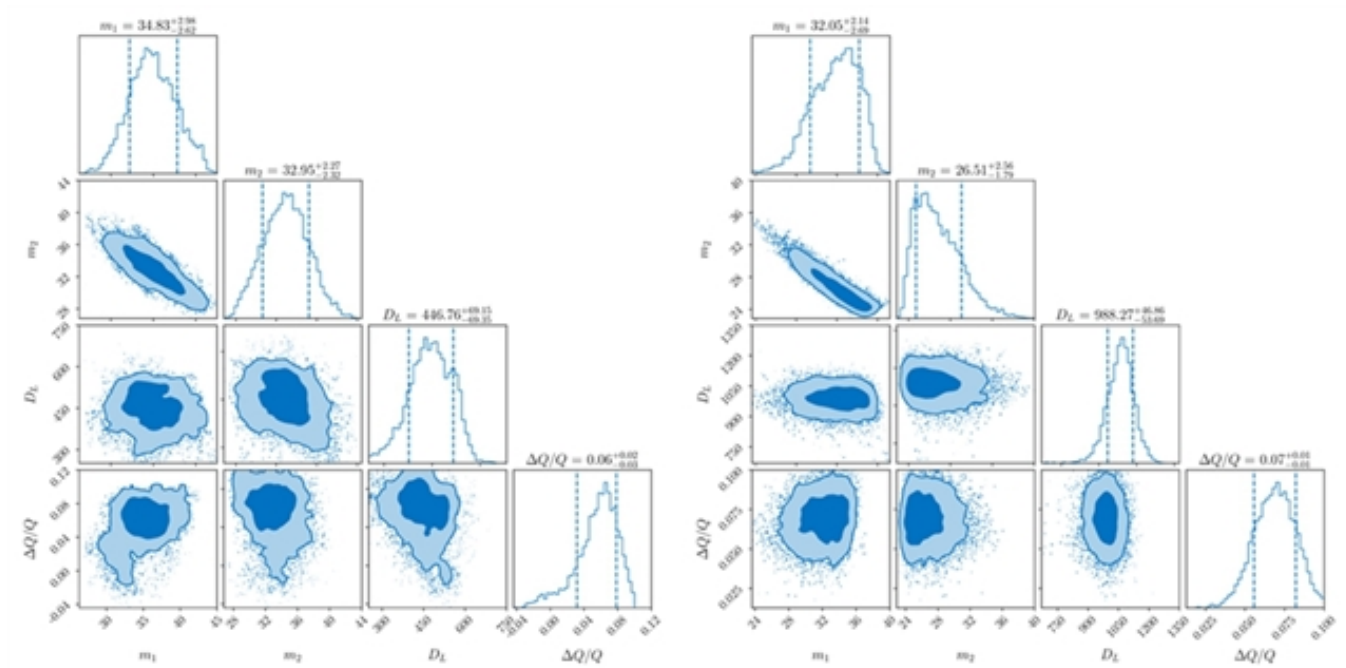


图3, 对两个引力波事件GW150914（左）和GW200129_065458（右）参数估计结果，包括两个黑洞的质量 m_1 与 m_2 、光度距离 D_L 和四极矩相对偏离 $\Delta Q/Q$ 。图中的虚线代表 1σ 的置信区间。

相关论文信息：<https://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2024/06/013>

作者：李嵩等 来源：《宇宙学与天体粒子物理学》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发