星系运行过程中的引力波揭秘

钟萃相
江西师范大学，江西 南昌 330022
DOI:10.61369/RSTD.2026030016

摘　　要： 1916年爱因斯坦基于其提出的广义相对论首次预言了引力波的存在。他认为引力波是由大质量天体的加速运动产生的，但引力波能量极其微弱，要探测到引力波是很困难的。然而，自20世纪60年代以来，科学家一直在探索引力波。2016年美国的 LIGO 和欧洲的 Virgo 探测到了两个黑洞并合所产生的引力波，使引力波天文学迈进了新时代。2026年初科学家又对迄今最清晰的引力波信号250114进行了精细分析，首次识别出黑洞并合后“铃宕阶段”的三个独立“音调”。但事实上他们获得的引力波信号不是黑洞并合的结果而是两个绕转的黑洞的两个磁性相反的极地气旋并合的结果，因此在探测引力波时必须搞清楚引力波的实质和产生机制才能准确无误地探测到引力波。

关 键 词： 星系运动；引力波；引力波信号；引力波物理

Revealing Gravitational Waves in the Process of Galaxy Movement

Zhong Cuixiang
Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022

Abstract: In 1916, Einstein first predicted the existence of gravitational waves based on his general theory of relativity.He believed that gravitational waves are produced by the accelerated motion of massive celestial bodies, but the energy of gravitational waves is extremely weak, so it is very difficult to detect gravitational waves. However, since the 1960s, scientists have been exploring gravitational waves. In 2016, LIGO in the United States and Virgo in Europe detected gravitational waves generated by the merger of two black holes, which made gravitational wave astronomy enter a new era. At the beginning of 2025 scientists made a detailed analysis of the clearest gravitational wave signal 250114 so far, and identified three independent "tones" in the "ringing stage" after the merger of black holes for the first time.But in fact, the gravitational wave signal they obtained is not the result of the merger of black holes, but the result of the merger of two polar cyclones with opposite magnetism around two black holes. Therefore, when detecting gravitational waves, it is necessary to understand the essence and generation mechanism of gravitational waves in order to detect them accurately.

Keywords: galactic movement; gravitational wave; gravitational wave astrophysics

引言

1915年爱因斯坦提出了广义相对论，并于1916年预言了引力波的存在。他指出当两个物体（例如行星或恒星）绕转时，由于加速运动物体扰动周围时空便可产生“涟漪”—引力波，但由于引力波以光速传播，且引力相互作用很微弱，因此爱因斯坦本人曾表示：人类可能无法探测到引力波。但从20世纪60年代以来，科学家一直在尝试探测引力波。特别是2015年美国的（激光干涉引力波天文台）LIGO 升级为 Advanced LIGO 之后，其探测灵敏度大幅度上升，为最终成功探测引力波奠定了基础。于是，2015年9月14日 LIGO 通过位于美国华盛顿州汉福德（H1）和路易斯安娜州文斯顿（L1）的两个探测器几乎同时探测到引力波信号，经过数月的严格分析与验证，LIGO 合作组于2016年2月11日正式宣布了这一发现。这一突破性发现直接验证了爱因斯坦广义相对论关于引力波存在的百年预言，同时也首次证实了黑洞的存在。它标志着引力波天文学时代的开始，为人类探索宇宙打开了一扇全新的窗口，使天文学迈进了引力波天体物理学的新纪元[1]。

近年来引力波探测已从“发现时代”迈入“精确检验时代”。2026年初，科学家对迄今最清晰的引力波信号 GW250114进行了精细分析，首次识别出黑洞并合后“铃宕阶段”的三个独立“音调”，其频率和衰减时间均与广义相对论的预测完美吻合，为在强引力场环境下检验爱因斯坦理论提供了前所未有的证据[2]。事实上，他们获得的引力波信号并不是黑洞并合的结果，要搞清楚引力波的实质及其产生机制，必须先搞清楚星系的形成与演化过程。

作者简介：钟萃相，博士，研究领域：天体物理和人工智能。

 | Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、双星的形成与演化规律

当恒星无法吸收足够的氢气来维持恒星内部的热核反应时，就会打破核聚变辐射压与自身收缩引力的平衡，恒星内部氦核收缩并变热，氢外壳向外膨胀并冷却。随着恒星内部氦核收缩，其自转加速，氢外壳受到离心力的作用向外漂移，使恒星膨胀为红巨星[3]，这一阶段可能延续几万年。红巨星的体积可达到恒星的几倍甚至上百倍。随着红巨星的膨胀，其自转逐渐减速，绕着红巨星旋转的新矮星所受的离心力逐渐变小，于是新矮星又渐渐地靠近红巨星。当它进入红巨星的包层之后，由于它的质量比红巨星的质量小得多，因此在它绕红巨星核心旋转的过程中，它的外层氢气会被吸引到红巨星的外层氢气中，使这些氢气融入了它们的共有包层中，从而使共有包层变得更厚更大。由于原本恒星绕其中心黑洞旋转，当共有包层的双星靠近这个大质量黑洞时，因受到潮汐力的过度拉扯，双星的共有包层会被撕裂，这些被黑洞撕裂的包层以高速度离开双星，导致角动量损失，最终使共有包层的双星收缩为一个白矮星和一个热亚矮星[4]，如图1所示，其中热亚矮星是在其氢气层被剥夺后进行氦聚变的发热新星，且随着白矮星的进一步收缩，热亚矮星渐渐地远离白矮星。

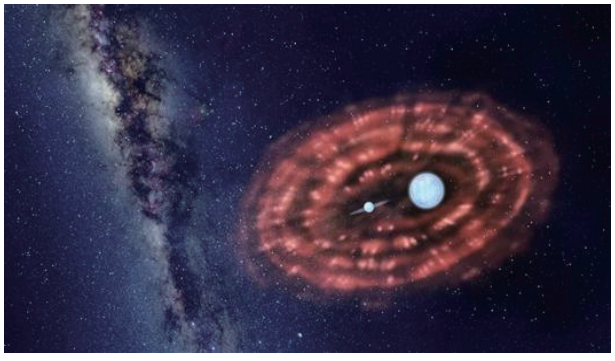

图1 双星共有包层演化过程

二、晚年恒星演化的其他几种形态

（一）黑矮星

当红巨星收缩为白矮星且由新矮星收缩而成的热亚矮星也离白矮星足够远时，热亚矮星就无法通过万有引力的作用在白矮星上散布黑子气旋，在白矮星的两极之外就无法进行氢聚变氦和氦聚变成碳的发光发热的反应，它就变成了“黑矮星”。当“黑矮星”自转轴两端的气旋不对着地球时，人们几乎看不到黑矮星发出的光，但由于黑矮星仍然不停地自转且自转轴两端的气旋肯定会发光的，因此绝对不发光的黑矮星是不存在的。

（二）中子星

在一个主序星演变成黑矮星之后，其质量比主序星的质量有显著增加，其大气层也显著增厚，但其体积大大缩小，甚至比月球还小，因而其自转速度大大加快，两极气旋大大增强。它会不断地吸积轨道附近的星云物质和进入其引力视界的子星系中的卫星或行星，从而质量变得越来越大，成为一个质量大于1.4倍太阳质量的中子星[5]。

（三）黑洞和类星体

在中子星向更大质量巨星演变的过程中，其两极气旋不停地吸积轨道附近的的星云物质和进入其引力视界的子星系的卫星、行星或恒星，使其质量不断增大，最终成为一个黑洞[6]甚至类星体[7]。

三、宇宙星系中的引力波

根据牛顿万有引力定律和开普勒行星运动定律可知，天体运动的轨道一般呈椭圆形，而两个绕转的星球在沿各自的椭圆轨道运动时，其圆周运动的加速度指向不同的圆心，不可能迭加成某个已知的正向加速度来产生引力波，所以产生引力波的物体必定是星球运动产生的别的物体。

（一）双星演化过程中的引力波

根据2.3节的讨论可知，一般双星演化的结果将产生一个共有包层的双星系统，其中包括一个由恒星收缩而成的白矮星和一个由伴星收缩而成的热亚矮星。由于白矮星的自转速度比原恒星的自转速度有显著加快，热亚矮星的自转速度比原伴星的自转速度也有显著加快，而且白矮星和热亚矮星的质量仍然很大。例如由清华大学物理系王晓锋教授团队于2024年2月首次观测到一个距离地球约2760光年、以20.5分钟公转周期飞速绕转的双星系统（代号 TMTS J0526），其中的白矮星的质量约为0.74倍太阳的质量，热亚矮星的质量约为0.33倍太阳的质量[8]。由于双星演化过程中共有包层抛射后还会产生环绕白矮星和热亚矮星的一些持久性星际物质（包括许多气体和尘埃），而且质量巨大的白矮星和热亚矮星对这些星际物质有很强的吸引力，因此随着白矮星和热亚矮星的快速自转就会在它们的两极形成强大的极地大气涡旋，从而在它们的两极形成强大的偶极磁场，如下图2所示。

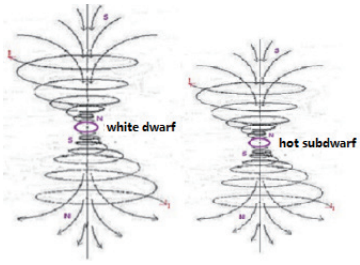

图2 高速旋转的白矮星和热亚矮星产生的偶极磁场

由于热亚矮星绕白矮星高速旋转，因此热亚矮星时而在白矮星下面，时而在白矮星上面。当热亚矮星绕转到白矮星下面时，白矮星的南极气旋产生的偶极磁场与热亚矮星的北极气旋产生的偶极磁场的极性相反，故当白矮星的南极气旋靠近热亚矮星的北极气旋时会相互吸引，使白矮星的南极气旋与热亚矮星的北极气旋都会受到拉伸，并使白矮星的南极气旋与热亚矮星的北极气旋吸入的星际物质增加，从而使白矮星的南极磁场和热亚矮星的北极磁场的引力加速递增，于是就产生了引力波。类似地，当热亚矮星绕转到白矮星上面时，热亚矮星的南极磁场和白矮星的北极磁场的引力加速递增，也会产生了引力波。

（二）白矮星绕中子星旋转产生的引力波

根据2.4.2节的讨论可知，白矮星可进一步演化成中子星，天

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

文观测也发现宇宙星系中广泛存在白矮星绕中子星旋转的情况。例如，银河系中存在一个标号为4U 1820-30的双星系统[9]，其中一颗中子星的自转速度达到每秒716圈，另一个伴星是与地球质量相近的白矮星，该白矮星绕中子星旋转的轨道周期最短为11分钟。由于中子星的质量下限为1.43倍太阳质量，而白矮星的质量则介于0.12-1.44倍太阳质量之间，因此这些质量巨大的中子星和白矮星对周围的星际物质有很强的吸引力，随着中子星和白矮星的快速自转就会在它们的两极形成强大的极地气旋，从而在它们的两极形成强大的偶极磁场，如下图3所示。另外，由于中子星对白矮星具有很强的吸引力才使白矮星绕着中子星旋转，同理，由于中子星对白矮星附近的星际物质具有很强的吸引力，使得中子星的极地气旋可到达白矮星附近。

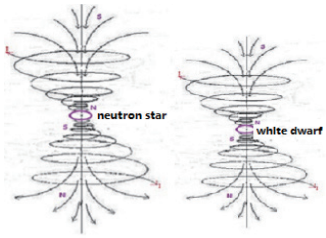

图3 高速旋转的中子星和白矮星产生的偶极磁场

由于白矮星绕中子星高速旋转，因此白矮星时而在中子星下面，时而在中子星上面。当白矮星绕转到中子星下面时，中子星的南极气旋产生的偶极磁场与白矮星的北极气旋产生的偶极磁场的极性相反，故当中子星的南极气旋靠近白矮星的北极气旋时会相互吸引，使中子星的南极气旋与白矮星的北极气旋受到拉伸，并使中子星的南极气旋与白矮星的北极气旋吸入更多的星际物质，从而使中子星的南极磁场和白矮星的北极磁场的引力加速增大，于是就产生了引力波。类似地，当白矮星绕转到中子星上面时，白矮星的南极气旋与中子星的北极气旋也会相互吸引，产生引力波。

（三）一个黑洞绕另一个黑洞旋转产生的引力波

在浩瀚的宇宙星空中也存在着一个黑洞绕另一个黑洞旋转的例子，例如在距离地球约8亿光年的 MCG-03-34-64星系中心，天文学家发现了相距仅300光年的双黑洞系统，它们以极低的速度（约3万年绕转一周）围绕彼此旋转[10]。由于黑洞的质量很大，它们对周围的星际物质有很强的吸引力，因此随着双黑洞的快速自转就会在它们的两极形成强大的极地大气涡旋并在它们的两极形成强大的偶极磁场，如下图4所示。

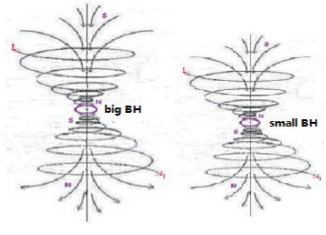

图4 高速旋转的大小黑洞产生的偶极磁场

由于小黑洞绕大黑洞旋转，因此小黑洞有时在大黑洞下面，有时在大黑洞上面。当小黑洞绕转到大黑洞下面时，大黑洞的南极气旋产生的偶极磁场与小黑洞的北极气旋产生的偶极磁场的极性相反，故当大黑洞的南极气旋靠近小黑洞的北极气旋时会相互吸引。例如，2023年11月23日被“LIGO-Virgo-KAGRA（LVK）”探测到的引力波事件GW231123，如5所示，据推测是由两颗质量分别为太阳100倍和140倍的原始黑洞合并产生的，但相距这么遥远的两个黑洞是不可能无缘无故地合并的，事实上图8所示的是这两个黑洞的两个磁场极性相反的气旋因相互吸引而靠近的结果。正是这两个黑洞的两个磁性相反的气旋相互吸引才使它们靠近在一起，从而使大黑洞的南极气旋与大黑洞的北极气旋得到拉伸，并使大黑洞的南极气旋与小黑洞的北极气旋吸入的星际物质增加，从而使大黑洞的南极磁场和小黑洞的北极磁场的引力加速增大，于是就产生了引力波。类似地，当小黑洞绕转到大黑洞上面时，小黑洞的南极气旋与大黑洞的北极气旋也会相互吸引，从而产生引力波。

另外，由于大黑洞气旋的引力大于小黑洞的气旋的引力，当两个黑洞的气旋靠得足够近时，大黑洞气旋就会在瞬间将小黑洞气旋的一段吸入大黑洞的气旋中，被吸入大黑洞的物质以高速旋转的方式落入大黑洞气旋，使地球上的观察者只看到大黑洞气旋是一个高速旋转的黑洞，但暂时看不到被折断的小黑洞气旋，因此地球上的观察者就觉得两个黑洞合并成了一个黑洞。

另外，由于上面所述的两个黑洞的质量巨大，它们对周围的星际物质有很强的吸引力，因此在它们快速自转的过程中形成的两极气旋底部犹如又长又大的冰质铜钟，当大黑洞气旋从小黑洞气旋中吸入的物质以高速旋转的方式落入大黑洞气旋时，在落入过程中会转得越来越快和越来越冷，到了大黑洞气旋底部早已凝结成如钢铁般坚硬的冰块，当这些钢铁般冰块敲击铜钟般气旋时就发会出一阵阵“铃宕”声。

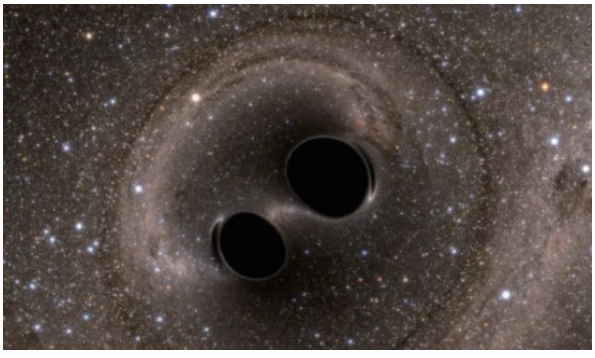

图5 两个黑洞的磁性相反的气旋因相互吸引而靠近在一起

（四）特殊环境下引力波的探索

在宇宙星系中，卫星绕行星旋转的速度通常很慢，卫星一般无法生成极地气旋，所以不会出现卫星的极地气旋与行星的极地气旋相互吸引而产生引力波的情形。

在宇宙星系中，行星的公转轨道平面与恒星的赤道平面的夹角一般小于45°，而且行星绕恒星公转的轨道半径通常大于几百万公里，但行星的极地气旋的高度一般小于100公里，且恒星的极地气旋的高度一般不超过10万公里，所以几乎不会出现行星的极地气旋与恒星的极地气旋相互吸引而产生引力波的情形。

一个黑洞绕一个类星体旋转的情形属于两个黑洞绕转的情形，虽然绕转的周期很长，但终究会产生引力波，只不过产生引

 | Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

力波的地方离地球太远以至于难以被人类探测。

四、结语

引力波的研究是物理学领域的一项重大突破。其发现不仅验证了广义相对论，还开辟了观测宇宙的新途径。通过引力波，科学家能够探测到此前无法直接观测的宇宙事件，如两个绕转的黑洞的极地气旋的相互吸引和并合。在此之前，人们竟然把两个绕转黑洞的极地气旋的吸引和并合误以为黑洞的并合，所以本项研究澄清了许多事实，使引力波物理学大大迈进了一步。

参考文献

[1]M. Bailes, B. K. Berger,P. R. Brady. Gravitational-wave physics and astronomy in the 2020s and 2030s [J]. Nature Reviews Physics vol.3, 344 - 366 (2021).

[2] A. G. abac, L.Abouelfettouh, F. Acernese et al. GW250114:Testing Hawking's Area Law and the Kerr Nature of Black Holes[J]. Physics Reviews Letter 135, 111403(2025).

[3] Dixon D, Tayar J, Stassun K G. Rotationally Driven Ultraviolet Emission of Red Giant Stars[J]. The Astronomical Journal, 2020, 160(1):12.

[4]Jarrod R. Hurley, Christopher A. Tout and Onner R. Pols. Evolution of Binary Stars and the Effect of Tides on Binary Populations [J]. Mon. Not. R. Astron. Soc. 000,1,36 (2000).

[5]T Tauris. Neutron Star Formation and Evolution - Singles, Binaries and Triples [C]. 40th COSPAR Scientific Assembly, held 2-10 August 2014, in Moscow, Russia.

[6] MG Haehnelt,G Kauffmann. The Formation and Evolution of Supermassive Black Holes and their Host Galaxies. Springer Berlin Heidelberg , 2001:364-374.

[7] Wu, XB, et al. An ultra luminous quasar with a twelve-billion-solar-mass black hole at redshift 6.30 [J]. Nature, 2015,518(7540): 512-515.

[8] Lin, J., Wu, C., Xiong, H. et al. A seven-Earth-radius helium-burning star inside a 20.5-min detached binary[J]. Nat Astron (2024).

[9] Gaurava K.Jaisawal,4U 1820-30 [J]. Astrophysical Journal https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad794e.

[10] https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasas-hubble-chandra-find-supermassive-black-hole-duo/.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.