

黑洞研究中的机器学习与深度学习应用

丁子杨, 温泽林, 刘宇昊, 陈峻松

(山东大学(威海) 山东威海 264200)

摘要: 近年来, 黑洞的相关研究受到广泛关注。……

关键词: 黑洞 机器学习 引力波 生成对抗网络 事件视界望远镜 ……

1. 天文学背景知识简介

1.1 黑洞是什么

黑洞是由广义相对论所预言的, 存在于宇宙空间中的一种致密天体, 其引力场强到连光都无法逃脱。黑洞的边界被称为事件视界, 一旦物质或光进入该界限就无法再逃逸。黑洞的质量、自旋和电荷是它的三大基本属性。现代物理学的黑洞理论由阿尔伯特·爱因斯坦 (Albert Einstein) 的广义相对论提供了理论基础, 并且经历了几十年的发展与验证。黑洞的概念由英国物理学家约翰·米歇尔 (John Michell) 在 18 世纪末提出, 然而直到 1960 年代, 随着数学模型的完善和天文观测的进展, 黑洞才成为科学界的广泛共识。

根据 1973 年史蒂芬·霍金 (Stephen Hawking)、布兰登·卡特 (Brandon Carter) 等人证明约翰·惠勒 (John Wheeler) 提出的无毛定理 (No Hair Theorem), 黑洞只有质量、角动量以及电荷三个不能变为电磁辐射的守恒量, 丧失了其他的全部信息, 几乎没有形成它的物质所具有的任何复杂性质, 黑洞不存在如立方体、椎体或其他有凸起的形态。因此研究黑洞的物理性质等同于研究黑洞的质量、自转、电荷情况。

黑洞是通过其事件视界的样子定义的, 黑洞巨大的引力使其附近的逃逸速度大于光速, 使得任何光线皆不可能从事件视界内部逃脱, 物质和光只能向内。由于发生在事件视界内的任何事件所产生的信息, 都无法到达外部, 因此我们无法确定事件视界内有什么事发生, 也无法直接观测到黑洞。

1.2 黑洞的形成过程和不同种类黑洞演化过程

现代空间物理科学研究已经证实表明，我们的宇宙中有大量的黑洞，科学家们根据两种分类方式将黑洞分成了不同的种类。

按照黑洞的质量大致可以将黑洞分为三个种类：



1) 恒星级黑洞 (Stellar black hole) 的质量约在 $10^2 M_{\odot}$ (M_{\odot} : 太阳质量, 约为 2×10^{30} 千克) 以下, 一般认为是由于恒星能量耗尽后, 由于压力不足以抵抗自身引力向内坍缩形成中子星等致密星体, 且此时质量仍然超出奥本海默-沃尔科夫极限[1] (约 $3-4 M_{\odot}$ 之间), 进一步塌缩形成恒星级黑洞。

2) 超大质量黑洞 (Supermassive black hole) 的质量在 $10^5 M_{\odot}$ 以上, 一般认为有三种形成途径。第一种是由于恒星级黑洞经过吸积过程持续增加质量形成的, 第二种认为是由星云直接塌缩且没有形成超新星的情况下形成黑洞, 第三种则是认为在大爆炸瞬间高密度物质塌缩形成的原初黑洞留存至今。

3) 中等质量黑洞 (Intermediate-mass black hole) [2] 的质量在 $10^2 M_{\odot}$ 至 $10^5 M_{\odot}$ 之间。它的质量超过恒星黑洞, 但远小于超大质量黑洞。然而这种类型的黑洞非常神秘, 目前只能通过引力辐射的观察证明其存在, 尚不清楚它是如何形成的。学界普遍有两个推测, 一种认为是由于恒星级黑洞和其他的致密天体发生碰撞合并形成, 另一种则是恒星密集的星团中发生失控的大质量恒星碰撞形成中等质量黑洞。

当然在超大质量黑洞之上还有特大质量黑洞, 其质量在 $10^{10} M_{\odot}$ 上, 目前虽有几个特大质量黑洞的候选类星体, 但没有直接证据表明它们就是特大质量黑洞。

根据黑洞的自旋情况和电荷状态又可以分为四类：

种类	史瓦西黑洞	赖斯纳-诺德斯特龙黑洞	克尔黑洞	克尔-纽曼黑洞
是否自旋	否	否	是	是
是否带电	否	是	否	是

其中克尔-纽曼黑洞就是一般的黑洞。

1.3 黑洞的吸积过程

类似黑洞、中子星、年轻恒星这样的大质量中心体，其强大的引力会捕获一些物质（如气体、尘埃、恒星碎片等），由于被捕获的物质具有初始角动量，角动量守恒会使物质不会直接坠入中心体，而是形成一个旋转的盘状结构,即吸积盘（Accretion disk）[3]。

其中的物质（如气体，尘埃，恒星碎片等）主要以流体形式存在，磁旋转不稳定性（MRI）会导致盘内的磁场线扭曲，形成涡旋，从而产生湍流（Turbulence），湍流导致盘内的物质混合和能量传输，增加了物质向中心体运动的效率。湍流还产生了粘滞性（Viscosity），它是流体内部的一种阻力，表现为流体层之间的相对滑动时产生的内摩擦力。粘滞性使得流体在剪切力的作用下变形时，内部各层之间产生摩擦，从而消耗能量。粘滞性使物质逐渐失去角动量，向内螺旋运动。

根据不同的物理条件，吸积盘可以分为标准薄盘、厚盘、细盘和平流主导的吸积流（ADAF）等模型。下面是吸积盘模型比较表：

类型	描述	主要特征	适用场景	参考文献
标准薄盘	物质在盘内通过粘滞性逐渐向内螺旋运动	盘的厚度相对于其半径非常小，释放大量辐射	年轻恒星的原行星盘，活动星系核中的吸积盘	Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. (1973)[4]
厚盘	物质在高吸积率下形成的较厚的盘	盘的厚度较大，适用于高吸积率的情况	伽马射线暴活动星系核中的某些情况	Abramowicz, M. A., et al. (1978)[5]

细盘	物质在极高吸积率下形成的盘	辐射压力变得非常重要，适用于极端吸积情况	超大质量黑洞的极端吸积情况	Abramowicz, M. A., et al. (1988)[6]
ADAF	物质在低吸积率下形成的盘	能量主要通过平流带走，温度高但辐射效率低	银河系中心的超大质量黑洞 Sgr A，低光度活动星系核	Narayan, R., & Yi, I. (1994)[7]

1.4 黑洞的喷流过程

在所有黑洞质量尺度上，吸积黑洞和相对论喷流之间存在很强的观测联系，吸积盘中的物质接近中心体时，部分物质会被加速并沿中心体的自转轴方向高速喷出，形成喷流（Jet）。喷流的主要特征有高速，准直，高能。Bridle & Perley（1984）对银河系外喷流的定义之后，我们使用术语“喷流”来指代具有开口角 $\leq 15^\circ$ 的准直喷射物[8]。

喷流的形成主要由吸积盘中的磁场驱动。磁旋转不稳定性（MRI）导致盘内的磁场线扭曲，产生湍流，进而增强磁场的强度。磁场线的重新连接（磁重联）可以释放巨大的能量，进一步加速喷流中的粒子。此外，高温气体在盘内产生的热压梯度也可以推动物质沿自转轴方向喷出。

喷流的观测特征主要包括多波段辐射和喷流结构。多波段辐射中涉及射电波辐射、光学辐射、X射线和伽马射线。喷流中的电子在磁场中同步加速，产生射电波辐射；喷流中的高能电子与光子相互作用，产生光学辐射；喷流中的高能粒子通过逆康普顿散射和同步加速辐射，产生X射线和伽马射线。喷流结构方面，喷流的核心部分高度准直，速度最快，能量最高；喷流的外层部分相对较宽，速度较慢，能量较低。

此外通过射电望远镜来观测喷流为研究黑洞提供了极大的便利，也带来很多具体的科学成果,如类星体（Quasars）和射电星系中的喷流，这些喷流在射电波段尤为明显。

1.5 黑洞的合并过程

激光干涉引力波天文台（LIGO）在 2015 年间首次发现了双黑洞合并的产生的引力波，证实了爱因斯坦广义相对论的重要预言。

黑洞强大的引力不仅会捕获周围的物质，也会吸引黑洞。当两个黑洞在同一个星系或密集星团中相遇并形成双黑洞系统时，它们会在一个共同的轨道上绕彼此旋转。

在双黑洞系统的演化过程中，黑洞在绕行时会发射引力波。引力波是根据爱因斯坦广义相对论预言的时空扰动，会带走系统的能量和角动量。随着引力波的不断辐射，双黑洞系统的轨道逐渐收缩，轨道周期缩短。取决于初始轨道的大小和黑洞的质量，这一过程可以持续数百万年甚至数十亿年，当双黑洞系统的轨道半径缩小到一定程度时，会进入的阶段称为“快速 inspiral”阶段。此时两个黑洞之间的距离迅速减小，轨道周期急剧缩短，引力波的频率和幅度显著增加。

当两个黑洞的距离足够近时，它们的视界开始重叠，最终合并成一个更大的黑洞。这一瞬间释放出巨大的能量，主要以引力波的形式辐射出去。合并过程中，黑洞会经历一个短暂的不稳定状态，形成一个“环状结构”

（ringdown）。在这个过程中，黑洞会通过发射引力波逐渐稳定下来，最终成为一个静态的、旋转的克尔黑洞。

如果合并发生在吸积盘或其他物质环境中，合并过程中可能产生强烈的喷流和电磁辐射。这些现象可以在多个波段（如射电、光学、X 射线）被观测到，为科学家提供了研究黑洞合并的多项天文学数据。这些观测数据不仅验证了广义相对论的预测，还为理解黑洞物理、星系演化和宇宙学提供了重要线索。

1.6 引力波

2015 年，LIGO 利用先进 LIGO（aLIGO）探测器[9]首次直接观测到双黑洞合并产生的引力波（Gravitational Wave, GWs）[10]。LIGO 和 VIRGO 在随后的观测运行中对来自类似系统的引力波进行了多次观测[11]。这些发现极大地推动了引力波物理学的发展，表明引力波在黑洞物理学领域具有不可替代的重

要作用。本部分将对引力波的基本理论、探测方法及机器学习和深度学习在其中的应用等进行详细阐述。

在广义相对论中，引力波被描述为时空的涟漪。类似于将石头投入池塘时在水面上产生的波纹，当带有质量的天体发生剧烈运动（如加速运动、合并等）时，也会在时空结构中引发波动。根据广义相对论，像中子星和黑洞这样的致密天体会显著弯曲周围的时空结构。当这些天体发生形状或运动的变化时，会引起时空的波动，而这种波动会以光速向外传播。这种随时空变化而传递的波动被称为引力波[12]。它不仅反映出源头天体的物理特性，也为我们提供了观测宇宙极端天体现象的全新途径[13]。

然而，探测引力波却异常困难，因为它们会引起非常小的扭曲：即使是来自天体物理事件的最强引力波，预计也只会产生 10^{-21} 数量级的相对长度变化[19]。探测引力波实验始于 20 世纪 60 年代韦伯和他的共振质量探测器[14]。相互作用的黑洞、凝聚的紧凑双星系统、恒星坍缩和脉冲星等都是可能的探测对象[15]，观测可能发出的引力波将极大地促进我们对宇宙的了解。传统的引力波探测基于以下理念：引力波可被视为空间中随时间变化的应变，具有两种线性极化状态（ h_+ 和 h_\times ）。当引力波经过空间中的测试块时，会引起测试块的位移。对测试质量相对位移的测量就是对引力波的测量。引力波对电磁场（如电容或激光光场）起作用。由于位移非常小，引力波的动量一般受到不确定性原理的限制。量子极限对未来的探测器是一个重大但并非不可逾越的障碍[16]。

当前已经产生多种引力波检测的方法和机器：LIGO 引力波探测器为改良的迈克尔逊干涉仪，通过测量正交臂的长度差异，来探测引力波应变[17]；美国航天局和欧洲航天局联合提出了一项空间发射计划，在太阳系轨道上放置三台激光转发器，组成一个空间激光干涉仪，用于引力波探测，拟议中的激光干涉仪空间天线（LISA）将部署在一个特定的太阳轨道上，由三个航天器组成的阵列构成。这些航天器之间通过激光互相连接，形成三个独立的迈克尔逊干涉仪。每束激光的入射光与出射信号的相位进行比较，这种比较（称为跳动测量）可以检测到激光波长的微小变化。同样的测量在另一束激光所在的另一臂中进行[17]；还可以通过对分离物体的多普勒跟踪来观测流逝引力波的潮汐效

应：通过对航天器进行多普勒跟踪，可以将地球和行星际航天器用作测试块[15]；通过比较地面站发出的近乎单色的微波信号和航天器发出的相干返回信号，监测它们的相对位置等等[18]。

值得注意的是，黑洞作为一种极其庞大的天体，通常伴随着强大的引力场和激烈的天体物理活动。因此，黑洞周围往往会产生频繁的引力波现象，成为研究引力波的理想对象，并由此推动了大量相关研究的开展：Masamune Oguri 研究引力透镜对来自遥远双黑洞合并引力波的影响，在观测到的合并过程中啁啾质量和红移分布的高端，引力透镜放大的影响是显著的[20]；Stefano Schmidt 等人使用机器学习方法为双黑洞合并产生的引力波建立了一个时域模型，称为 mlgw[21]；Marti Raidal 等人在 LIGO 观测到的引力波事件是由原始黑洞合并引起的假设下，证明了有可能满足目前对原始黑洞丰度的所有约束，并找到对数正态原始黑洞质量函数的可行参数范围[22]。因而，黑洞的独特性质及其强大的引力场为引力波的研究提供了重要的实验场。通过对黑洞周围引力波现象的观测与分析，科学家们得以验证广义相对论的预测并进一步探索宇宙的结构和演化。

1.7 黑洞观测数据简介

事件视界望远镜（Event Horizon Telescope, EHT）是一个分布于全球各地的超长基线天文望远镜阵列。EHT 通过将全球不同地点的多个射电望远镜联合起来，形成一个等效于地球直径尺度的巨大望远镜，从而观察黑洞附近的极端天文现象。2019 年，J. Lett 等人使用 EHT 捕捉到了距地球 5500 万光年的 Messier 87*（M87）黑洞图像，这是人类天文学史上首次采集到黑洞图像[23]。

目前，黑洞的观测数据主要来源于天文望远镜阵列等观测设备。由于黑洞强大的引力场导致光线发生弯曲，黑洞本身无法直接成像。因此，传统的天文观测方法（如观察星系或行星）无法用于黑洞的直接观测。我们只能通过间接方式观测黑洞周围物质的辐射信号和相对论效应，并结合数值模拟与数据重建等技术来推测黑洞的影像。例如，Högbom J. A. 等人提出的 CLEAN 方法[24]，以及 Narayan 和 Nityananda 于 1986 年提出的正则化极大似然（RML）方法

[25]。前者是一种反向建模方法，假设观测到的信号由多个点源或光源组合而成，并通过去卷积干涉仪的点扩散函数，从傅里叶变换的可见度数据中重建图像；而 RML 方法则为正向建模方法，在此基础上加入了正则化约束，除了确保图像与观测数据一致外，还强制图像满足一定的物理性质（如平滑性、紧凑性等），这一特性尤其适用于 EHT 这样需要处理大量复杂数据的场景。

与传统的直接呈现图像不同，黑洞图像的生成更依赖于物理模型、数学计算和模拟推断。传统天文图像通常通过光学、红外、射电等波段的观测获得，而黑洞图像则依赖更为复杂的数据采集方式，如多波段观测和干涉测量等。黑洞图像不仅包含传统的图像数据，还包括大量的光度、频率等物理信息[26]。这使得黑洞观测数据在处理上具有独特性，通常需要依赖相对论、量子力学等多重复杂理论进行分析。

此外，黑洞数据处理还面临数据量极大、对计算资源要求极高的挑战。以 2019 年 EHT 团队的观测为例，每个站点接收的天文信号以每秒 4GB 的速率进行数字化并记录到硬盘上，仅一次观测的总数据量便达到 PB（ 10^6 GB）级别。随后，团队采用高性能计算集群对原始数据进行校准、精化和分析[23]。随着数据量的不断增加，传统计算方法面临前所未有的挑战。黑洞图像的生成不仅需要巨大的数据量，还需要依赖复杂的物理模型，这对计算能力、存储容量和模型的精确度都提出了极高的要求。

与此同时，随着数据量的激增，机器学习方法为黑洞观测数据的处理提供了有效的解决方案。2023 年，Medeiros 等人提出了 PRIMO 算法，这是一种基于字典学习的成像算法。研究人员利用从一般相对论磁流体动力学（GRMHD）模拟中生成的大量合成图像作为训练集，训练了一个机器学习模型，并使用 2019 年 EHT 团队采集的黑洞数据重建了一幅改进的黑洞图像[27]。与旧图像相比，新图像在理论预期的基础上呈现出更高的一致性，有望进一步优化对 M87 发射环大小的估计，并基于此得出更为精确的黑洞质量评估。

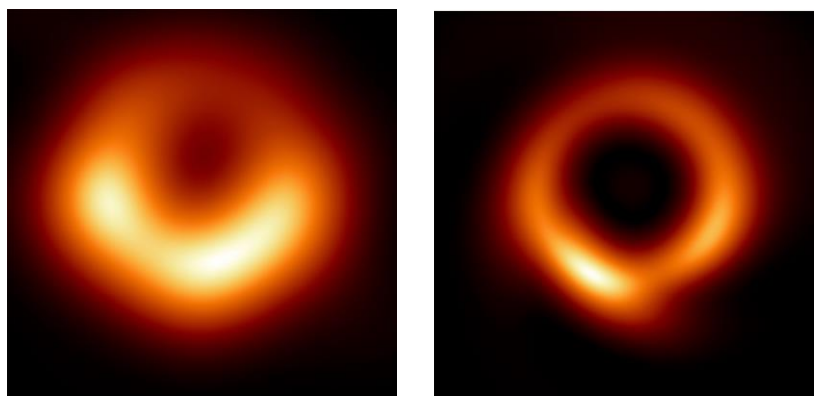


图 1：（左）2019 年 EHT 团队发布的首张黑洞图像；（右）Medeiros 等人采用机器学习算法获得的改进图像。

附录:

- [1] Oppenheimer, J. R.; Volkoff, G. M. On Massive Neutron Cores. *Physical Review*. 1939-02-15, 55(4): 374–381.
- [2] Vesperini, E.; McMillan, S. L. W.; D'Ercole, A.; et al. Intermediate-Mass Black Holes in Early Globular Clusters. *The Astrophysical Journal Letters*. 2010, 713(1): L41–L44.
- [3] Abramowicz M A, Fragile P C. Foundations of black hole accretion disk theory[J]. *Living Reviews in Relativity*, 2013, 16: 1-88.
- [4] Shakura N I, Sunyaev R A. Black holes in binary systems. Observational appearance[J]. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 24, p. 337-355, 1973, 24: 337-355.
- [5] Kozłowski M, Jaroszynski M, Abramowicz M A. The analytic theory of fluid disks orbiting the Kerr black hole[J]. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 63, no. 1-2, Feb. 1978, p. 209-220. Research supported by the Università di Padova., 1978, 63: 209-220.
- [6] Abramowicz M A, Czerny B, Lasota J P, et al. Slim accretion disks[J]. *Astrophysical Journal*, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 332, Sept. 15, 1988, p. 646-658. Research supported by Observatoire de Paris and NASA., 1988, 332: 646-658.
- [7] Narayan R, Yi I. Advection-dominated accretion: Self-similarity and bipolar outflows[J]. *arXiv preprint astro-ph/9411058*, 1994.
- [8] Mirabel I F, Rodríguez L F. Sources of relativistic jets in the galaxy[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1999, 37(1): 409-443.
- [9] Aasi J, Abbott B P, Abbott R, et al. Advanced ligo[J]. *Classical and quantum gravity*, 2015, 32(7): 074001.
- [10] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Physical review letters*, 2016, 116(6): 061102.

- [11] Chan M L, Heng I S, Messenger C. Detection and classification of supernova gravitational wave signals: A deep learning approach[J]. Physical Review D, 2020, 102(4): 043022.
- [12] Thorne K S. Gravitational waves[J]. arXiv preprint gr-qc/9506086, 1995.
- [13] Kokkotas K D. Gravitational wave physics[J]. Encyclopedia of Physical Science and Technology, 2002, 7(3): 67-85.
- [14] Weber J. Detection and generation of gravitational waves[J]. Physical Review, 1960, 117(1): 306.
- [15] Pitkin M, Reid S, Rowan S, et al. Gravitational wave detection by interferometry (ground and space)[J]. Living reviews in relativity, 2011, 14: 1-75.
- [16] Ju L, Blair D G, Zhao C. Detection of gravitational waves[J]. Reports on Progress in Physics, 2000, 63(9): 1317.
- [17] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical review letters, 2016, 116(6): 061102.
- [18] Estabrook F B, Wahlquist H D. Response of Doppler spacecraft tracking to gravitational radiation[J]. General Relativity and Gravitation, 1975, 6: 439-447.
- [19] Berti E. The first sounds of merging black holes[J]. arXiv preprint arXiv:1602.04476, 2016.
- [20] Oguri M. Effect of gravitational lensing on the distribution of gravitational waves from distant binary black hole mergers[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 480(3): 3842-3855.
- [21] Schmidt S, Breschi M, Gamba R, et al. Machine learning gravitational waves from binary black hole mergers[J]. Physical Review D, 2021, 103(4): 043020.
- [22] Raidal M, Vaskonen V, Veermäe H. Gravitational waves from primordial black hole mergers[J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2017, 2017(09): 037.

- [23] Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 event horizon telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole[J]. arXiv preprint arXiv:1906.11238, 2019.
- [24] Högbom J A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines[J]. Astronomy and Astrophysics Supplement, Vol. 15, p. 417, 1974, 15: 417.
- [25] Ramesh N, Nityananda R. Maximum entropy image restoration in astronomy[J]. Annual review of astronomy and astrophysics, 1986, 24: 127-170.
- [26] Akiyama K, Chael A, Pesce D W. New views of black holes from computational imaging[J]. Nature Computational Science, 2021, 1(5): 300-303.
- [27] Medeiros L, Psaltis D, Lauer T R, et al. The image of the M87 black hole reconstructed with PRIMO[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2023, 947(1): L7.