



为什么要研究黑洞?

陈弦^{1,2}

1. 北京大学物理学院天文学系, 北京 100871;

2. 北京大学科维理天文与天体物理研究所, 北京 100871

E-mail: xian.chen@pku.edu.cn

“黑洞”这一概念起源于18世纪. 当时, 英国的自然哲学家米歇尔(John Michell)和法国的数学家拉普拉斯(Pierre-Simon Laplace)都从牛顿万有引力定律的数学形式出发, 得到宇宙中最大的天体可能是“暗星”的结论. 经过200多年的发展, 黑洞研究已经从单纯的思辨演变为既有理论又有实证的“硬核”科学. 事实上, 20世纪的多项诺贝尔物理学奖都与黑洞研究有着深厚的渊源. 进入21世纪, 更是有3次诺贝尔物理学奖被授予了与黑洞直接相关的研究成果.

黑洞这种看似与生产生活毫不相干的事物, 为什么会成为物理学和天文学的研究焦点, 并且受到科学界的普遍认可与关注呢? 借着“宇宙中的黑洞是如何形成和演化的?”入选中国科协2022年度“重大科学问题、工程技术难题和产业技术问题”这个契机, 笔者将通过梳理黑洞研究所经历的部分关键节点, 尝试对上述问题作一些解答, 目的是让更多的科技工作者了解黑洞研究的进展和意义, 并能找到机会参与到这项前沿的基础科学研究中.

1 塑造时空观

时空观是人类认识世界的基础, 它深刻地影响着人类改造世界的能力. 最朴素的时空观认为时间和空间是相互独立且连续变化的. 在此基础上建立起来的牛顿力学直接导致了第一次科学革命, 并且引发了后来的第一次技术和工业革命. 到了20世纪初, 狭义相对论扬弃了牛顿力学体系所依赖的绝对时空观, 认为时间和空间会因为参照系的选择而发生变化, 只有它们构成的四维时空整体才是更基本的物理存在. 这种时空观预言了新的质量与能量关系, 导致了20世纪中叶对原子能的利用. 广义相对论将引力也纳入到时空整体中一并考虑, 从而揭示了时空弯曲与质量之间深刻的联系. 今天, 广义相对论已经成为全球定位系统和太空探索的理论基础. 量子力学的建立让人们对时空的连续性也产生了怀疑. 尽管由此引发的争论还在继续, 但我们已经在材料、通讯、能源等领域享受到了这场科学论战带来的丰硕成果.

黑洞使我们的现代时空观遇到了真正的麻烦, 这说明人类对时空的理解还远没有到尽头. 我们现在对黑洞的理解起源于1916年. 广义相对论提出仅一年以后, 德国物理学家史



陈弦 北京大学物理学院天文学系助理教授, 同时受聘于北京大学科维理天文与天体物理研究所. 主要从事与黑洞有关的天体物理理论工作.

瓦西(Karl Schwarzschild)^[1]根据爱因斯坦的场方程求得了点质量外部时空结构的精确表达式. 奇怪的是, 这个数学结果在某一特殊半径——史瓦西半径处是发散的. 数学上的发散性往往意味着物理理论的不自洽或者不完备, 以致于爱因斯坦^[2]在20多年后仍对此结果耿耿于怀, 认为这只是点质量假设造成的数学上的巧合, 不是“物理实在”. 后来, 爱丁顿(Arthur Eddington)和勒梅特(Georges Henri Joseph Édouard Lemaître)发现史瓦西半径处的发散性是坐标选取不恰当造成的, 可以通过坐标变换去除, 一定程度上为广义相对论解了围. 但是, 这里的时空仍有某种奇异性, 因为进一步的研究表明, 物质甚至光到了这里都只能进不能出. 即使考虑到天体可能在自转或者带有电荷, 我们仍可以在天体外部的时空中找到这样一个(超)曲面, 该曲面具有上述“单向膜”一样的性质. 这个曲面就是大家常说的“视界面”, 它标志着黑洞的存在.

视界面虽然特殊, 但终究没有违背物理学基本定律. 真正的危机来自视界内部. 有一个地方的发散性无论如何也无法消除, 那就是黑洞的“中心”. 在这里, 已知的物理定律都将失效, 因此这个地方被叫作“奇点”. 黑洞中一定有奇点吗? 20世纪60年代, 英国数学家、物理学家彭罗斯(Roger Penrose, 获2020年诺贝尔物理学奖)^[3]在广义相对论框架下最早证明了(我们宇宙中的)黑洞中奇点必定形成. “广义相对论宣判了自己的死刑!”这让许多物理学家认识到, 要解决奇点问题, 必须寻求广义相对论之外的出路.

70年代之前的黑洞理论都从广义相对论出发, 讨论黑洞

的几何或者物理,并且得到了“描述黑洞仅需质量、角动量、电荷三个物理量”这样著名的“黑洞无毛定理”。1971年是黑洞研究的分水岭。这一年,霍金(Stephen William Hawking)提出了黑洞面积定理,这让贝肯斯坦(Jacob D. Bekenstein)^[4]意识到黑洞物理与热力学有着诸多相似性,并于1973年提出了黑洞熵的概念,由此开启了黑洞研究的新纪元。1974年,霍金^[5]顺水推舟,提出黑洞如果有熵就会有温度、有温度就会有辐射(“霍金辐射”)的大胆猜想。霍金的天才体现在他试图从量子场论这个不同以往的角度重新审视时空弯曲的后果,因此获得了崭新的发现。

霍金辐射提出后,黑洞便成了量子力学和广义相对论共同的试验场。两个领域的思想和理论在这里交织碰撞,大大拓宽了基础物理研究的思路和内涵。尤其是霍金辐射引发的“黑洞信息丢失问题”,更是凸显了广义相对论和量子力学之间的紧张关系,激励物理学家不断提出新的想法,寻找统一理论^[6,7]。

2 启迪新发现

如果仅从理论物理和数学的角度去研究,黑洞有可能会变成仅供极少数物理学家和数学家把玩的冷门知识。今天的黑洞研究之所以受到科学界和公众的广泛关注,要归功于20世纪后半叶开始的黑洞天文学研究。天文学方法的引入,让黑洞研究从理论走向实证,不仅让我们最终找到了黑洞存在的证据,更是开创了黑洞理论与天文观测相互促进、交替前进的崭新局面。

宇宙中要形成黑洞,就必须在一定的体积内积聚足够多的物质。广义相对论刚刚提出时,当时已知的最致密的天体还是白矮星。和太阳差不多大的恒星在核燃烧结束后会留下白矮星,其密度比太阳的密度高100万倍左右。在白矮星内部,电子被紧紧地压在一起,形成的电子简并压可以抗衡强大的引力。但20世纪30年代印度裔天文学家钱德拉塞卡(Subrahmanyan Chandrasekhar,获1983年诺贝尔物理学奖)^[8]发现,在电子简并状态下,物质的压强是有上限的。这个发现预示着一旦白矮星的质量超过某一极限——钱德拉塞卡极限,电子简并压将无法与引力抗衡,白矮星就会塌缩。

钱德拉塞卡^[8]并没有在论文中讨论超过钱德拉塞卡极限的星体是什么,但是星体塌缩会造成密度发散是显而易见的。这个问题的存在,导致钱德拉塞卡的观点遭到了包括他的导师爱丁顿在内的多个物理学家的反对。爱丁顿的公开反对特别令人深思。他是第一批研究黑洞的科学家,并且在黑洞的数学和几何结构方面作出过突出贡献。连这样“先锋”的科学家都不能接受白矮星塌缩的物理后果,从一个侧面反映出黑洞对当时物理学体系的冲击有多大。

爱丁顿等人的反对也并不是完全没有道理的。1932年,查德威克(James Chadwick,获1935年诺贝尔物理学奖)发现中子后,朗道(Lev Davidovich Landau,获1962年诺贝尔物理

学奖)就提出了完全由中子组成的“中子星”的概念。两年后,天文学家巴德(Wilhelm Heinrich Walter Baade)和兹威基(Fritz Zwicky)就意识到中子星可以在大质量恒星终结时将电子和质子挤压成中子而形成。特别是紧紧挨在一起的中子会提供一种比电子简并压大得多的中子简并压,这样即使中子星质量超过钱德拉塞卡极限,也一样可以维持稳定而不塌缩。但是好景不长,1939年,奥本海默(Julius Robert Oppenheimer)等人^[9]证明中子星质量超过某一极限——奥本海默极限后,连中子简并压也无法抵抗引力,中子星也要塌缩。至此,似乎再也没有什么理论能够阻止黑洞的形成了。接下来需要一个令人信服的观测证据。

突破发生在近30年后。1967年,贝尔(Jocelyn Bell)在老师休伊什(Antony Hewish,获1974年诺贝尔物理学奖)的指导下从事射电天文研究,偶然发现了脉冲星。从脉冲周期推测,这种星体在高速自转,但它们竟然没有被巨大的离心力瓦解,说明其密度相当高。休伊什和贝尔^[10]因此大胆地提出,脉冲星就是中子星。这个发现对黑洞研究的促进作用是巨大的:既然宇宙中真的存在中子星,那么黑洞的存在也不是不可能的了。因此,当20世纪60~70年代贾科尼(Riccardo Giacconi,获2002年诺贝尔物理学奖)^[11]领导的X射线卫星项目探测到一批X射线源,并且从X射线强度的快速变化推测出这种天体比太阳的尺寸小很多后,人们已经能很自然地猜到它们可能是中子星或者黑洞了。针对天鹅座X-1这个比较亮的对象,天文学家还采用了射电、光学等其他望远镜对其进行了多波段观测,发现其中的致密天体超过了奥本海默极限^[12,13]。事实上,最新的X射线观测将这个黑洞的质量限制在了21倍太阳质量左右^[14]。尽管没有直接探测到视界,很多天文学家还是认可这个致密天体就是黑洞,因为中子星塌缩成黑洞的图景已经被广泛接受了。后来,人们把这种由大质量恒星演化形成的、比太阳重好几倍到几十倍的黑洞称为“恒星级黑洞”。

天文学家灵活的观测手段和务实的行事作风一扫以往纯理论研究艰深晦涩的风格,给20世纪60年代之后的黑洞研究注入了新的活力,相关的天文发现层出不穷。二战后射电技术在天文上的应用,除了导致脉冲星的发现,还导致了大量类星体的发现。类星体是看上去像恒星一样的点源,但有着较强的射电辐射和光学发射线。1963年,施密特(Maarten Schmidt)^[15]证认出类星体3C273的宽发射线其实就是红移后氢和氧的电离谱线。谱线的红移说明类星体处在遥远的宇宙中。这么远的天体仍能被望远镜探测到,说明一个类星体必须如整个星系一样明亮。但如此剧烈的能量释放与观测上类星体的致密程度格格不入。进入70年代以后,越来越多的天文观测证据表明,类星体的能源来自气体落入黑洞前释放的引力势能^[16]。与恒星级黑洞不同,类星体中的黑洞要比太阳重几百万甚至几十亿倍,因此被称为“超大质量黑洞”。

类星体的能源问题虽然解决了,但超大质量黑洞的起源又成了新的谜团。不过天文学家好像并不在意,反而普遍接

受了类星体中存在超大质量黑洞这一观点。理论天体物理学家林登贝尔(Donald Lynden-Bell)^[17]由此得出了一个惊人的推论,那就是类星体熄灭后会留在星系核心,所以星系中心普遍存在超大质量黑洞。进入80年代,类星体的观测资料更加丰富。天文学家佐尔坦(Andrzej Soltan)^[18]据此推算出了近邻星系中超大质量黑洞的总数和总质量。

林登贝尔^[17]的猜想激起了天文学家在近邻星系中心寻找超大质量黑洞的兴趣。这是一项艰巨的任务,因为黑洞的视界太小了,当时的望远镜无法直接探测到,所以天文学家采用了折中的方案,去探测超大质量黑洞对周围恒星和气体的动力学影响。即便如此,其难度也不亚于我们在20 m开外看清针尖大小的物体。虽然天文学家从20世纪70年代末就开始使用地面最大口径的望远镜,并配合先进的电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)对近邻星系的中心进行成像观测,但距探测到超大质量黑洞引力势阱内的恒星和气体还有一步之遥。

终于在20世纪90年代末,哈勃太空望远镜以其前所未有的空间分辨率,探测到了近邻星系核心恒星和气体的高速运动速度。这种现象说明星系核心很小的区域内集中了大量的质量,从而佐证了林登贝尔的猜测^[19]。进入21世纪,地面十米级望远镜的建成以及红外成像技术在天文观测中的应用,使得我们可以看透银河系的尘埃,证明银河系中心也存在一个超大质量黑洞,并且测量出它的质量是太阳的400万倍^[20,21](该成果被授予2020年度诺贝尔物理学奖)。

随着观测资料的丰富,另一个新的问题在世纪之交逐渐凸显出来。天文学家发现,超大质量黑洞的尺寸虽然不及星系的几亿到几十亿分之一,但它的质量却和星系的整体性质(形态、质量以及恒星的随机运动速度等)密切相关^[22]。这意味着在跨越8~9个数量级的空间尺度上(近似一颗沙粒与一座城市的比例关系),超大质量黑洞能通过某种未知的机制与其宿主星系相互作用,协同演化。这个发现也说明不能把超大质量黑洞当作孤立的体系来研究,而要把它放在星系这个大“生态系统”中去理解。

为了查明超大质量黑洞与星系的演化历史,天文学家将目光越来越多地投向宇宙早期。但面对可观测宇宙中数以千计计的星系,大家最初也只能望洋兴叹。进入21世纪后,大样本全自动光谱巡天望远镜(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)的建成使得天文学家有能力对比较亮的星系和类星体进行普查。很快人们就在红移大于6的宇宙中发现了一批明亮的类星体^[23],说明比太阳重几十亿倍的超大质量黑洞已经存在于130亿年前的宇宙(当时宇宙年龄约10亿年)。但根据传统的恒星形成演化理论,宇宙早期第一代恒星形成的黑洞是很难在这么短的时间内通过吸积气体增长到观测到的质量的。我们目前所知的物理在解释超大质量黑洞的形成演化时遇到了很大的困难,对这个问题的理论和观测研究很可能孕育着重大的科学突破。

当然,也有许多与黑洞相关的问题随着天文观测手段的进步得到了解决。比如时域天文学的开启(研究天体随时间的变化),让我们能够通过光变证认出更多的黑洞,尤其是找到了介于恒星级黑洞和超大质量黑洞之间的“中等质量黑洞”^[24,25],填补了“黑洞家谱”中的空白。又如X射线成像技术和射电综合孔径技术的成熟,让X射线和射电望远镜的空间分辨率进一步提高,有利于我们看清星系核心的结构,甚至能分辨出在某些发生合并的星系中存在不止一个超大质量黑洞^[26]。这最后一项发现一方面支持了超大质量黑洞可以通过合并而增长的观点,为引力波探测提供了理论依据,另一方面也将超大质量黑洞的增长与星系合并联系起来,构成了理解两者相关性的重要一环。

进入21世纪的第二个十年,广义相对论预言的引力波终于被地基引力波天文台探测到^[27]。目前探测到的事件大都是双黑洞合并事件,因此可以说引力波的发现掀起了黑洞研究的又一个热潮。令人始料不及的是,通过引力波探测到的黑洞大多比太阳重30~40倍,有的在合并前甚至达到了太阳质量的100倍,远远重于银河系内探测到的恒星级黑洞。这种超重黑洞对现有的黑洞形成演化理论提出了更加严峻的挑战。因此,也有物理学家认为这些黑洞不是恒星演化的产物,而是宇宙极早期由量子涨落造成的原初黑洞,它们可能构成了暗物质的一部分。为了辨别这种黑洞的起源,科学家已经开始筹划建设技术更加先进、性能更加优越的下一代地基引力波探测器了(如美国的Cosmic Explorer和欧洲的Einstein Telescope)。

另一项黑洞天文学的突破发生在2019年。由全球多台射电望远镜组网构成的“事件视界望远镜”发布了近邻星系M87中心超大质量黑洞的照片。这是人类第一次以接近黑洞视界的分辨率看清楚了黑洞周围的环境。2022年,该望远镜又公布了银河系中心超大质量黑洞的照片。通过这些照片,科学家能够进一步研究强引力场中物质与光的行为,验证视界是否存在,并且检验其他基本的黑洞物理过程。

如果说黑洞与天文学有着天然的联系,那么黑洞研究对物质科学的促进作用可能是大多数科学家没有想到的。在解决黑洞信息丢失问题的过程中,物理学家提出了一种“全息对偶”理论,将低维量子系统与高维引力理论相对应起来研究。受这种理论的启发,凝聚态、核物理、冷原子物理和量子计算等领域的科学家都展开了新的计算和实验,来重新理解他们在各自领域遇到的问题^[28]。这种跨界研究揭示了量子信息与时空几何更加深刻的联系,也反过来促进了黑洞物理学家对黑洞信息熵的理解。

3 催生“黑”科技

黑洞研究从纯理论逐渐走向实证,最后成为理论物理和天文学的主流研究方向,这个飞跃很大程度上得益于20世纪发生的几次技术革命。与此同时,黑洞科学家们提出的科学

目标和需求又反过来牵引了技术的发展,催生了一大批在生产生活中具有高度实用价值的颠覆性技术。

黑洞的发现与通讯技术的发展有着密切的联系。比如,银河系中心的超大质量黑洞就是贝尔实验室的无线电通讯工程师央斯基(Karl Guthe Jansky)无意间发现的。第二次世界大战(简称二战)后,天文学家改装闲置的雷达来观测天体,推动了无线电技术的进一步发展。事实上,很多成功的通讯技术公司都是由射电天文学家创立的。

二战后的类星体研究对射电望远镜的分辨率提出了更高的要求。为了解决单天线分辨率差的问题,天文学家和工程师开始尝试射电干涉技术。尤其是赖尔(获1974年诺贝尔物理学奖)等人发展的综合孔径技术,使得建造一个口径相当于地球大小的望远镜(如“事件视界望远镜”)成为可能。值得一提的是,综合孔径技术所依赖的数据处理方法后来被移植到了医疗成像技术中,促成了计算机断层扫描(computed tomography, CT)和磁共振(magnetic resonance imaging, MRI)的发明。

大型射电望远镜很重要的任务之一是跟踪多个脉冲星,利用它们稳定的自旋来计时,目的是探测超大质量黑洞旋近(inspiral)而辐射的引力波。为了实现这个科学目标而发展起来的一套理论和方法,已经可以建立比原子钟更加精确、稳定的时间基准,并且有望在将来应用于太空探索和导航。

很多黑洞系统都辐射X射线,因此寻找黑洞的能力一定程度上取决于X射线探测器的性能。天文学家探测微弱X射线天体的需求,催生了低照度高分辨率X射线成像技术。这种技术后来被广泛应用于安检、质检等领域。为了让望远镜能够精确测量每个光子的能量,天文学家还率先定制了高分辨率的X射线衍射光谱仪。这种仪器在生物、制药等领域也得到了广泛应用。要让X射线光谱仪在太空中也能运行,工程师还开发了一种低温磁铁技术。这种磁铁被应用在磁共振中,

大大提高了磁共振的安全性和稳定性。

探测引力波的需求更是让众多技术领域获益,包括精密测量、计量、光学、激光、材料、空间技术和高性能计算等。为了使地基引力波探测器达到亚飞米测量精度($1\text{ fm}=10^{-15}\text{ m}$),科学家们进行了一系列旨在突破标准量子极限的理论研究和实验,发展了诸如quantum non-demolition、back-action evasion等概念,以及衡量光学机械系统的双光子方法等。这些理论和技术成果已经被今天的光学、量子等研究领域广泛采用。

为了探测中等质量和超大质量黑洞的引力波,天文学家更是提出了在太空建造巨型激光干涉仪的计划。根据具体的科学目标,这些探测器需要在几十万到几百万公里的距离上测量出 10 pm ($1\text{ pm}=10^{-12}\text{ m}$)左右的位移变化。要达到这一目标,就必须在皮米级测量、激光稳频、微推进等技术领域进行科研攻关。这些“未来技术”有可能改变激光通讯、太空探索、精确制造等行业的面貌。

4 中国的机遇

综上所述,对黑洞的进一步研究有望取得新的科学突破,并且带来观念和技术的革命。近些年来,中国经济实力的整体增长和对基础科研的加大投入,让中国科学家更有机会、也更有能力在黑洞研究领域率先取得突破性成果。尤其是在天文学领域,我国的郭守敬光纤光谱巡天望远镜、“慧眼”X射线望远镜、“天眼”射电望远镜阵列、“拉索”宇宙线和伽马射线观测站等,以及正在建设或规划中的中国空间站工程巡天望远镜、“爱因斯坦探针”X射线巡天望远镜、下一代X射线望远镜eXTP、大型光学红外望远镜、“太极”和“天琴”等空间引力波探测项目,都把黑洞作为它们重要的科学研究目标。不难看出,未来5~20年将成为中国乃至世界黑洞天文学研究的下一个黄金时代。

致谢 感谢北京大学稻吉恒平研究员、江林华教授、王然教授,中国科学院国家天文台苟利军研究员,中国科学院理论物理研究所黄庆国研究员的讨论。感谢国家自然科学基金(11873022, 11991053)和国家重点研发计划(2021YFC2203002)资助。

推荐阅读文献

- Schwarzschild K. Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. Berlin: Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, 1916. 189–196
- Einstein A. On a stationary system with spherical symmetry consisting of many gravitating masses. *Ann Math*, 1939, 40: 922–936
- Penrose R. Gravitational collapse and space-time singularities. *Phys Rev Lett*, 1965, 14: 57–59
- Bekenstein J D. Black holes and entropy. *Phys Rev D*, 1973, 7: 2333–2346
- Hawking S W. Black hole explosions? *Nature*, 1974, 248: 30–31
- Unruh W G, Wald R M. Information loss. *Rep Prog Phys*, 2017, 80: 092002
- Susskind L. *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. New York: Little, Brown and Company, 2008
- Chandrasekhar S. The maximum mass of ideal white dwarfs. *Astrophys J*, 1931, 74: 81

- 9 Oppenheimer J R, Snyder H. On continued gravitational contraction. *Phys Rev*, 1939, 56: 455–459
- 10 Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. Observation of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, 1968, 217: 709–713
- 11 Giacconi R, Gursky H, Paolini F R, et al. Evidence for X rays from sources outside the solar system. *Phys Rev Lett*, 1962, 9: 439–443
- 12 Webster B L, Murdin P. Cygnus X-1—A spectroscopic binary with a heavy companion? *Nature*, 1972, 235: 37–38
- 13 Bolton C T. Identification of Cygnus X-1 with HDE 226868. *Nature*, 1972, 235: 271–273
- 14 Miller-Jones J C A, Bahramian A, Orosz J A, et al. Cygnus X-1 contains a 21-solar mass black hole—Implications for massive star winds. *Science*, 2021, 371: 1046–1049
- 15 Schmidt M. 3C 273: A star-like object with large red-shift. *Nature*, 1963, 197: 1040
- 16 Shields G A. A brief history of active galactic nuclei. *Publ Astron Soc Pac*, 1999, 111: 661–678
- 17 Lynden-Bell D. Galactic nuclei as collapsed old quasars. *Nature*, 1969, 223: 690–694
- 18 Soltan A. Masses of quasars. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1982, 200: 115–122
- 19 Kormendy J, Richstone D. Inward bound—The search for supermassive black holes in galactic nuclei. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1995, 33: 581–624
- 20 Genzel R, Thatte N, Krabbe A, et al. The dark mass concentration in the central parsec of the Milky Way. *Astrophys J*, 1996, 472: 153–172
- 21 Ghez A M, Salim S, Hornstein S D, et al. Stellar orbits around the galactic center black hole. *Astrophys J*, 2005, 620: 744–757
- 22 Kormendy J, Ho L C. Coevolution (or not) of supermassive black holes and host galaxies. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2013, 51: 511–653
- 23 Fan X. Evolution of high-redshift quasars. *New Astron Rev*, 2006, 50: 665–671
- 24 van der Marel R P. Intermediate-mass black holes in the universe: A review of formation theories and observational constraints. In: Ho L C, ed. *Coevolution of Black Holes and Galaxies*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 37
- 25 Mezcuca M. Observational evidence for intermediate-mass black holes. *Int J Mod Phys D*, 2017, 26: 30021
- 26 Komossa S. Observational evidence for binary black holes and active double nuclei. *Mem Soc Astron Italy*, 2006, 77: 733
- 27 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102
- 28 Blake M, Gu Y F, Hartnoll S A, et al. Snowmass White Paper: New ideas for many-body quantum systems from string theory and black holes. 2022, arXiv: [2203.04718](https://arxiv.org/abs/2203.04718)

Summary for “为什么要研究黑洞?”

Why do we study black holes?

Xian Chen^{1,2}

¹ Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

² Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics at Peking University, Beijing 100871, China

E-mail: xian.chen@pku.edu.cn

Black holes are arguably the most mysterious object in the universe. They are an important research subject in physics and astronomy, as well as a favorite topic among the general public. The concept was conceived in the 18th century based on the mathematical form of Newton's gravitational theory. Now, more than 200 years later, black-hole research has evolved from pure mathematical speculation to a “hard-core” science with sound theoretical and observational foundations. Many Noble prizes in physics were, in some degree, related to black holes. In particular, not long into the 21st century, three Nobels prizes in physics have been awarded to the studies directly related to black holes.

Why is an object seemingly so disconnected with daily life attracting so much attention from the scientific community? By reviewing some of the most important breakthroughs over the history of studying black holes, I will try to show the readers that black-hole research is important.

First, it has shaped our perception of space and time. The theory of general relativity predicts the existence, at least in theory, of black holes. However, it cannot self-consistently explain the existence of a singularity which is bound to form at the “center” of a black hole. The motivation of resolving the singularity problem has inspired the later studies of the quantum nature of black holes, but has also led to the discovery of the paradox of information loss. The potential solution of such a paradox has pointed to a more fundamental relationship between quantum mechanics and the nature of spacetime.

Second, it has inspired a chain of scientific discoveries. Here, I will focus on the discoveries made by astronomers. I will show that the different approaches adopted by astronomers have given rise to a series of breakthroughs in black-hole research. These discoveries not only proved that black holes exist in our universe, but also have greatly enriched our understanding of the formation and evolution of stars, galaxies, and even the whole universe.

Third, black-hole research has triggered major technological developments in various fields. I will show that the history of discovering black holes is closely tied to the development of radio astronomy, X-ray detectors, measurement theory, as well as quantum technology. In particular, the requirements raised by the observation of black holes have, in turn, driven many technological breakthroughs. These breakthroughs have also resulted in inventions which have become important in our daily life.

China is currently running and also planning many large-scale astronomy projects which list black holes as one of their major targets. These projects will place China in the forefront of scientific exploration and technological innovation, and probably open a new era of black-hole revolution.

black hole, physics, astronomy, gravitational wave

doi: [10.1360/TB-2022-0792](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0792)