

# 黑洞照相机给“天籁”拍“抖音”

■本报实习生 池涵 记者 李晨



科学界对于黑洞行为一直有一个争论：光子从黑洞的冕传播到吸积盘所需要的时间缩短，究竟是由于冕的收缩，还是吸积盘的内半径变小？

近日，一个由美国科学家领导的国际研究团队在英国《自然》杂志上发表了一篇关于黑洞行为最新观测结果的文章。研究者采用放置在空间站上的中子星内部组成探测器(NICER)，观测了 MAXI J1820+070 黑洞吸积伴星暂现源。

这次观测对上述争论给出了一个合理的解释。这让科学界很兴奋，这篇论文也因此成为《自然》杂志封面文章。能够作出这一发现，科学家依靠的是高精度的观测设备。或许有一天，我们也可以利用高精度“照相机”给黑洞拍个“抖音”。

## 拍摄黑洞的“快手”

黑洞在吸积过程中会产生两个 X 射线信号，先有一个来自黑洞冕的硬 X 射线信号(即高频信号)，第一个信号传播到吸积盘后会产另一个软 X 射线信号(即低频信号)。光子从冕传播到吸积盘需要时间，所以有时间延迟。

中国科学技术大学天文学系特聘副研究员蒋凝告诉《中国科学报》，前述最新成果发现，MAXI J1820+070 在 X 射线耀发后的时间延迟仅为之前的 1/6 至 1/20，由于黑洞的外部结构中只有冕和吸积盘两个单元，因此对这种时延缩短有两种可能的解释。

一种解释认为，是吸积盘的内半径变小了，也就是被截断了；另一种解释则是冕收缩到离吸积盘更近。科学家推测，如果前一种解释是正确的，由于引力红移效应，会导致能谱上 Fe K 线的轮廓发生变化。借助本次观测中同时拥有高时间精度和高能谱分辨率的“利器”NICER，研究人员发现 Fe K 线的轮廓基本保持不变，因此剩下的就是后一种解释了，即导致时延缩短的原因是冕的收缩。

能够获得如此精确的观测结果并推导出这一重要的科学结论，依靠的是两个安装在国际空间站上的“劳模”——全天 X 射线监测相机(MAXI)和中子星内部组成探测器(NICER)。2018年3月11日，MAXI 发现在狮子座方向距离我们大约 1 万光年的位置有一个 X 射线耀发，NICER 随即开始监测这个事件。

公开资料显示，NICER 是 NASA 为研究中子星异常引力、电磁和核物理环境而开发的一款设备，于 2017 年 6 月 3 日部署至国际空间站。

# 黑洞的那些“小秘密”

如水滴落水，清脆短暂，而这不到一秒的“噗”声，却是双黑洞系统合并的声音。

这个 13 亿年前发出的声音，经过漫长旅行，于 2015 年 9 月 14 日抵达地球，被“激光干涉引力波天文台”(LIGO)的两个探测器捕捉到。这也是人们第一次真正感受到“黑洞的声音”。

1915 年，爱因斯坦以几何语言建立而成广义相对论，不仅预言了引力波的存在，该理论还能推导出某些大质量恒星会终结为一个黑洞——时空中的某些区域发生极度扭曲以至于连光都无法“逃逸”。

100 多年过去了，天文学家一直在不断探索黑洞这个古老又神秘的“大家伙”。近日，黑洞研究又迎来一个“里程碑”：天体物理学家首次计算出物质和反物质粒子是如何围绕黑洞旋转的。

## 两股神秘粒子流

高能物质喷流在宇宙中很常见，似乎来自各种各样的来源，许多中子星会产生这些喷流，一些相对较小的黑洞在吸积物质时也会喷射。天体物理学家推测，在其他星系中心的一些超大质量黑洞，其背后是绵延数千年的壮观喷流。

现有的黑洞行为模型表明，粒子一反粒子对在强烈的磁场和电场中产生的，这些磁场和电场在黑洞的视界附近旋转——视界是一个球形的表面，没有任何东西可以在穿过视界后逃逸。最终，这些粒子大部分落入黑洞。

过去，对黑洞动力学的三维模拟是

蒋凝介绍说，与此前的类似设备，如 X 射线多镜片任务卫星 XMM-Newton 相比，NICER 最大的优势就是时间分辨率极高，达到 100 纳秒，比之前 NASA 最好的计时设备罗西 X 射线计时探测器要快 25 倍。

“X 射线卫星尽量要做到一个一个地记录光子，因此需要很高的时间分辨率，否则在同一个计时区间内有几个光子到达，我们就无法知道每个光子的能量。MAXI J1820+070 每秒差不多有 25000 个能量 0.2~12 千电子伏的光子到达 NICER，正因为有超快的计时，才能区分开一个光子。相比之下，XMM-Newton 在每秒接收 600~800 个光子的时候就有光子‘堆积效应’。不仅如此，NICER 在软 X 射线波段的有效能谱面积也是最高的，是 XMM-Newton 卫星的两倍。”蒋凝说，NICER 在具备快速计时和大有能谱面积的同时还能提供精良的能谱分辨率(6 千电子伏时为 145 电子伏)。

正是得益于这样优越的天赋，NICER 才能用来帮助科学家捕捉黑洞边缘的一些微弱信息。

## 逃离黑洞的信息

黑洞是广义相对论预言的一类非常独特的时空结构。它在我们观测的宇宙中主要有两类存在形式，一种是 100 倍太阳质量以下的恒星级黑洞，它们是大质量恒星演化到晚期死亡的产物。

另一类是 100 万倍太阳质量以上的超大质量黑洞，它们位于星系的中心。蒋凝告诉《中国科学报》，超大质量黑洞的物理起源并不明确，最早是上世纪 60 年代为了解释类星体巨大的能量输出而被提出的，后来被近邻宇宙的恒星或者气体动力学研究所证实。

“此外，还有一些极亮 X 射线源可能是 100 倍至几十万倍太阳质量的中等质量黑洞。”中科院国家天文台研究员、中国科学院大学教授、国家天文台恒星黑洞研究创新小组负责人、基普·索恩天文学通识著作《星际穿越》译者之一荀利军告诉《中国科学报》。

超大质量黑洞的形成和增长是目前的一个热点问题。当这些超大质量黑洞剧烈吸积物质时，会将物质的引力势能转化为辐射释放出来，表现为活动星系核(简称 AGN)。

有意思的是，世纪之交，人们发现超大质量黑洞的质量与它们所寄居的星系的性质紧密相关，强烈暗示它们是共同成长与演化的。

有人可能会问，黑洞不是光都无法逃逸的吗？为什么我们还可以观察到一些黑洞的信息？

实际上，黑洞的结构包括视界面以内的自身部分，以及冕和吸积盘等外部结构。“如果光进入视界面，确实就无法逃脱黑洞的魔爪。”蒋凝说，“但是在物质还没进入到视界面之前，我们仍然可以看到被黑洞吸积的物质落入黑洞的过程中辐射。由于具有角动量，物质并不会径直掉到黑洞里，而是沿螺旋线转着飞进去，这样就形成了一个吸积盘。”

不同的情况下，吸积盘的形式有区别。蒋凝介绍：“类星体的吸积被认为是标准薄盘。而我们银河系中心的黑洞的吸积率比较低，大家猜测它是一个径移主导吸积盘。”

黑洞的吸积过程能产生多波段的光子，甚至可以说几乎能释放全波段的辐射，从 X 射线、紫外、光学、红外到射电都有。

“其中 X 射线光子根据能量高低分成硬 X 射线和软 X 射线，它们在黑洞吸积的物理过程中主要产生的区域和机制是不同的。软 X 射线一般认为来自吸积盘的热辐射，而硬 X 射线来自吸积盘的软光子打到盘上面的冕，经过逆康普顿散射到更高能量产生的。”蒋凝告诉《中国科学报》。

除了黑洞辐射以外，某些活动星系核或类星体中心，在吸积盘磁场的的作用下，可能会产生长度达几千甚至数十万光年的等离子体喷流。如果喷流的方向恰巧和黑洞与地球的连线一致，也可以观测到受相对论影响下的喷流的明亮改变。

## 黑洞捕手

那么，有哪些观测手段可以用来探寻上面的黑洞线索呢？

由于黑洞吸积过程产生的辐射是多波段的，因此对它的研究也是多种多样的。记者从蒋凝处了解到，虽然恒星级黑洞最早是通过 X 射线发现的，但是作为类星体中心引擎的超大质量黑洞其实最早是在射电波段发现的，因此射电天文望远镜也是研究黑洞的常用手段，比如黑洞视界面望远镜。

除此之外，我们最熟悉的地面光学望远镜等更是对黑洞进行常规发现和研究的，比如美国的斯隆数字巡天项目(SDSS)就发现了成千上万的类星体。

说到黑洞观测，就不得不谈视界面

望远镜 EHT，这是一个由 12 个国家 30 多所大学和天文台站参与的国际合作项目，通过以甚长基线干涉技术 VLBI 联合全球的 8 台射电望远镜形成一口径等效于地球直径的虚拟望远镜，进行超高空间分辨率的射电成像来探测银河系中心的黑洞视界面。

视界面望远镜的观测目标为超大质量黑洞人马座 A\* 和 M87 星系中央的超大质量黑洞。2017 年 4 月，视界面望远镜首次连线观测人马座 A\*。

视界面望远镜计划的提出使得人类第一次有机会直接给黑洞拍一张能分辨的照片。黑洞是否真实存在？视界面、吸积盘和冕的细节是怎样的？诸如此类的问题终于有了正面回答的机会。

近年来，随着自主天文仪器的巨大进步，我国在黑洞观测领域也逐渐步入国际舞台。蒋凝谈到，我国早期黑洞研究偏向于理论方面，比如吸积盘理论等。现在，一些前沿设备正在积极参与黑洞观测。比如 2017 年上天的硬 X 射线调制望远镜(HXMT，又称慧眼卫星)，用来捕捉类似 MAXI J1820+070 这样的 X 射线耀发事件。

慧眼卫星，是中国第一颗大型空间 X 射线探测天文卫星。它既可以实现宽波段、高灵敏度、高分辨率宇宙 X 射线巡天、定点和小天区观测的空间 X 射线天文观测，同时也具有高灵敏度的伽马射线全天监视仪。其命名涵义之一是为了纪念推动中国高能天体物理发展的已故科学家何泽慧。

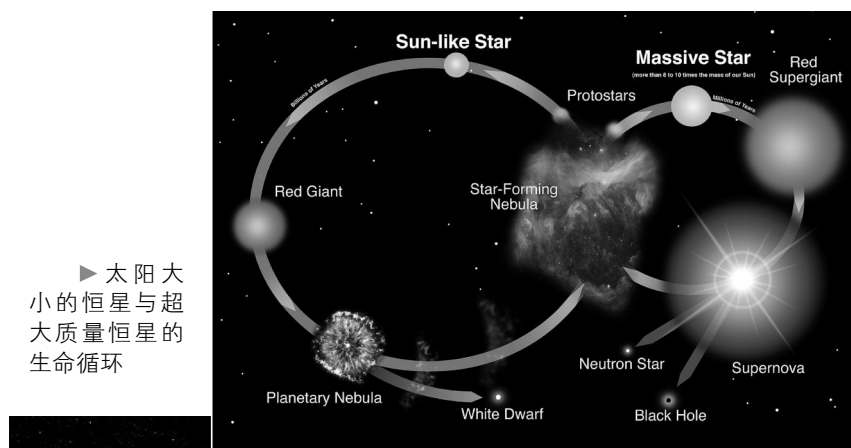
2017 年 6 月 15 日，HXMT 卫星发射成功，开展科学观测。2018 年 1 月 30 日，中国首颗 X 射线天文卫星“慧眼”正式交付，投入使用。在轨一年多来，“慧眼”已经探测到伽马暴、两个太阳大小的中子星合并引起的引力波事件等多个天文事件，取得了丰富的成果。

另外，中科院“十三五”先导专项卫星爱因斯坦探针(EP)着眼于软 X 射线波段，预计将于 2022 年前后上天。蒋凝介绍，这个卫星特别适合捕捉黑洞潮汐摧毁并吞噬恒星产生的 X 射线暂现爆。

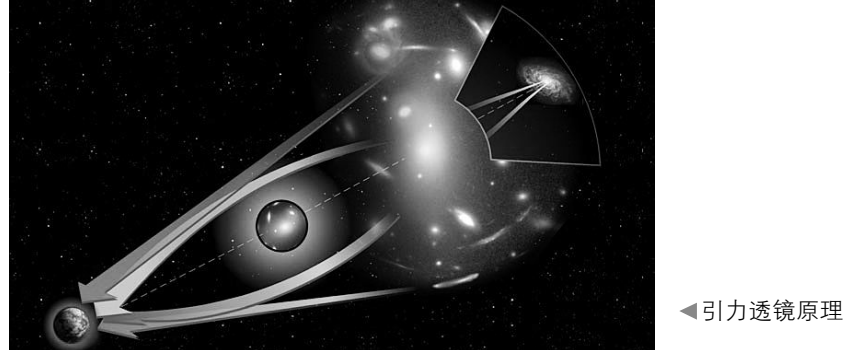
荀利军认为，包括黑洞内部的结构、奇点、对黑洞样貌的直接观测等，都是黑洞研究的当前热点问题。另外，理论上银河系内的黑洞应该有上亿个，但是目前只找到了上百个，大多数黑洞在什么地方也是困扰人们的问题。

随着越来越多的高精度先进观测设备的服役，一个又一个黑洞相关的科研问题将在科学家面前揭开谜底。

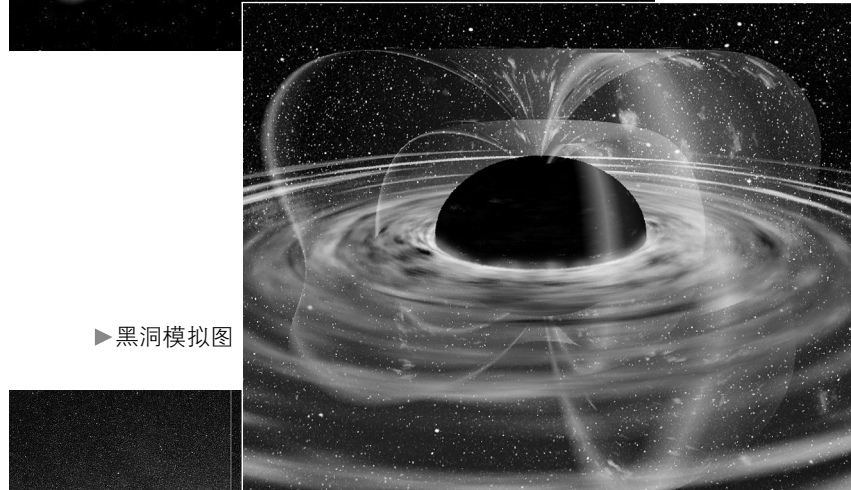
相关论文信息：  
DOI: 10.1038/s41586-018-0803-x



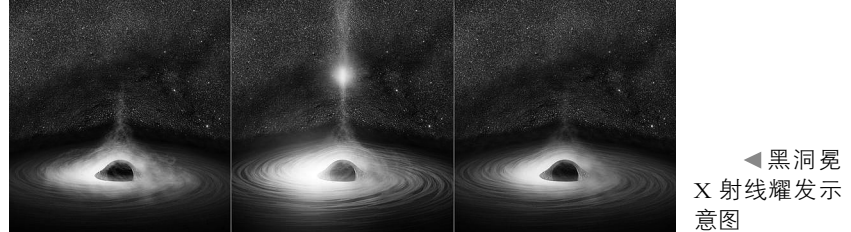
► 太阳大小的恒星与超大质量恒星的生命循环



◀ 引力透镜原理

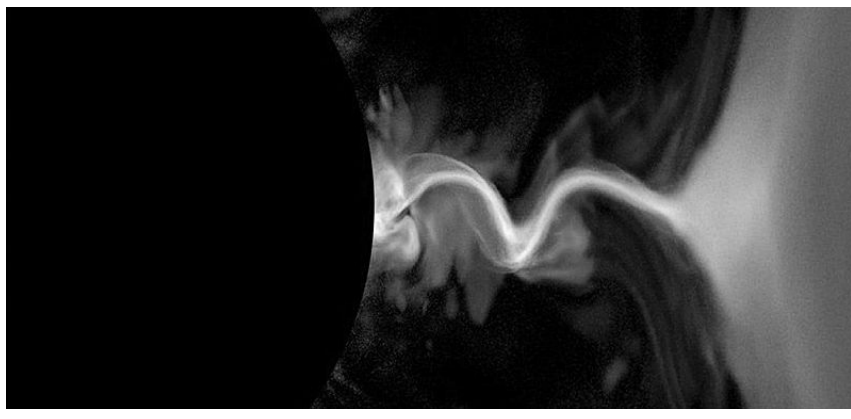


► 黑洞模拟图



◀ 黑洞冕 X 射线耀发示意图

图片来源: NASA, STScI



科学家向了解黑洞喷射流动力学又迈进了一步。 图片来源: Kyle Parfrey 等

错吗？

葡萄牙里斯本高级技术学院物理学家 Vitor Cardoso 团队曾提议，如果现实与广义相对论存在偏差，如防火墙真实存在，那么在爆发引力波的同时，两个合并的黑洞还会产生一系列回声。

产生这些回声是因为一堵防火墙或其他种类的结构会产生一个模糊区域。这个区域的内部边界是视界，没有光子或粒子能够逃逸。而其外部边界则更具渗透性，一些光子可能会逃逸。它们会在内部边界和外部边界之间弹跳。

2016 年，物理学家分析了来自 LIGO 公开发布的数据，并宣称已经发现了这些引力波的“回声”。

当然，这些回声可能只是统计结果。但 2018 年，爱因斯坦被证明是正确的。

黑洞具有超强引力，被认为是检验广义相对论强引力场理论的“完美实验室”。

德国马普学会地外物理研究所等机构天文学家利用欧洲南方天文台设在智利的甚大望远镜，对黑洞“人马座 A\*”进行了观测。当时，一颗名为 S2 的恒星从这个位于银河系中心的超大黑洞附近掠过。

结果表明，当 S2 飞至距黑洞不足 200 亿公里的最近点时，其速度提升至每小时 2500 万公里以上。该恒星发出的光线波长变长，颜色从蓝变红，与广义相对论的预测完全一致。

此外，广义相对论还预言了引力波的存在，但曾长期缺乏观测证据。引力波是一种“时空涟漪”，类似石头丢进水

2014 年，霍金将自己的新论文《黑洞的信息保存与气象预报》发表在了 arXiv 预印本服务器上。他提出了一个新理论：视界只能暂时“扣押”物质和能量，最终会将它们释放，尽管其形式已发生改变。

当时，霍金在接受媒体采访时指出：“经典理论认为没有任何物质能从黑洞中逃逸，但是量子理论却证明能量和信息是可以从黑洞中逃离的。”而霍金新著作的源头则是所谓的“黑洞火墙悖论”。

卡弗里理论物理研究所理论物理学家 Joseph Polchinski 等人提出一个设想：一位宇航员在落入黑洞之后会发生什么？

长期以来，物理学家一直认为，宇航员在穿过事件视界时根本意识不到他的悲惨命运：他将被黑洞逐步拉入深处，并最终在到达黑洞核心“奇点”时被彻底粉碎，这就是“黑洞火墙悖论”。

但根据量子理论，黑洞的事件视界必将转化为一个充斥着超能量的区域，即形成一堵“火墙”，宇航员在落入黑洞之前便会被烧成灰烬。

于是，霍金提出了第三条理论，量子力学和广义相对论仍保持各自的正确性，黑洞则根本不存在形成“火墙”的事件视界，而是黑洞周围剧烈的量子效应会使时空发生严重扭曲，无法形成“边界”。

## 爱因斯坦对吗

那么爱因斯坦的广义相对论出了

里产生的波纹。黑洞、中子星等天体在碰撞过程中有可能产生引力波。

直到 2016 年年初，LIGO 宣布人们首次观测到引力波。2018 年，研究人员又利用 LIGO 和欧洲“处女座”引力波探测器，探测到 4 次由黑洞合并事件产生的引力波。

于是，至今尚未有人证实广义相对论存在漏洞。

## 黑洞也有“中不溜”

无论如何，宇宙黑洞本就是广义相对论预言的一类独特时空结构，而且已知的黑洞要么相对“很小”，要么“超大”。那么，有中等大小的黑洞吗？

2018 年年底，中国科学技术大学、中国极地研究中心和安徽师范大学研究人员，在距离地球几千万光年外的 NGC 3319 星系中心发现了疑似“中等大小”的黑洞。

研究人员通过分析美国国家航空航天局和欧洲太空局的两颗 X 射线卫星在 NGC 3319 星系中心探测的数据，

以及对哈勃太空望远镜的紫外和光学图像揭示的星系中心位置，采取多波段交叉认证的方法在近邻宇宙成功发现一例“中等大小”黑洞候选体。

“花开两朵，各表一枝。”同年 6 月，美国新罕布什尔大学与欧洲同行组成的研究团队，综合多个天文望远镜的观测数据，分析了一颗恒星被黑洞撕裂、吞噬的过程中发出的辐射，并推算出该黑洞的质量处于中等水平。

这颗恒星位于一个遥远星系外围的星团中，于 2003 年 10 月出现多波段辐射增强，此后 10 年间辐射强度逐渐减弱。相关数据显示，这次事件是一个中等质量黑洞造成的，其质量约为太阳的几百万倍。

“中等大小”黑洞被认为可能是超大质量黑洞的“种子”，而且，通常认为中等质量黑洞会很“安分”。寻找中等质量黑洞也有助于揭示超大质量黑洞的来源，更好地理解宇宙演化过程。

(唐一尘)  
相关论文信息: B. Phys. Rev. Lett. 122, 035101 (2019)