

视界面望远镜:为黑洞拍下史上第一张“照片”*

苟利军^{1,2,†} 黄月³

(1 中国科学院国家天文台 北京 100012)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 界面新闻文化频道 北京 100025)

2017-06-17收到

† email: lgou@nao.cas.cn

DOI: 10.7693/wl20171109

做黑洞研究将近20年,我常常被人问到“黑洞是什么样的”,说实话,我并不确定。除了在论文课件中自制的效果图,第一次“亲眼”看到黑洞形象是2015年在电影院里,荧幕上是《星际穿越》中的黑洞“卡冈图雅”——深不见底的黑色中心与明亮立体的气体圆环——相对论物理学家基普·索恩为影片设计的黑洞形象(图1),和想象中的相差无几。从广义相对论推知而来的黑洞,就存在于宇宙深处,这一点在21世纪的今天或已无可置疑。黑洞确凿地存在于无数观测数据之中,但我们并不知道它在现实中的真实模样。

如今,人类终于要为黑洞拍下第一张真正的照片了。就在刚刚过去的4月5日—10日之间,来自全球30多个研究所的科学家们开展了一项雄心勃勃的庞大观测计划,利

用分布于全球不同地区的8个射电望远镜阵列组成一个虚拟望远镜网络,人类或将第一次看到黑洞的视界面。这个虚拟的望远镜网络被称为“视界面望远镜”(Event Horizon Telescope, EHT),其有效口径尺寸将达到地球直径大小。

人类在2015年第一次听到了两个黑洞相互绕转合并所产生的引力波之声,如今科学家们又在为亲眼目睹黑洞真容而努力。不过,因为视界面望远镜要处理的数据量巨大,为黑洞“洗照片”的耗时恐怕有些漫长,黑洞的面貌究竟是否真如作家、艺术家或电影导演所呈现的那般,我们要到2018年才能知道。

无论我们最终得到的黑洞图像是什么样子——像电影画面一般壮观恢弘,或者只有几个模糊的像素点——视界面望远镜都意义非凡,

这是我们在黑洞观测史上迈出的重要一步。观测结果不仅仅是一张照片那么简单,它一方面呼应着爱因斯坦的广义相对论,一方面也将帮助我们回答星系中的壮观喷流是如何产生并影响星系演化的。我

们将成为有史以来第一批“看见”黑洞的人类,真是好运气!

1 无图无真相,科学家怎么知道黑洞在那里?

尽管“黑洞”(black hole)一词在1968年才由美国天体物理学家约翰·惠勒提出来,但早在1783年,英国地理学家约翰·米歇尔(John Michell)便已经意识到:一个致密天体的密度可以大到连光都无法逃逸。这也是普通人在今天对于黑洞的最基本认识:吸入所有一切,连光都逃不了。

既然想一睹黑洞“芳容”,我们对于这个遥远天体的认识就得再多些。黑洞的几乎所有质量都集中在最中心的“奇点”处,“奇点”在其周围形成一个强大的引力场,在一定范围之内,连光线都无法逃脱。光线不能逃脱的临界半径被称为“视界面”——顾名思义就是视线所能到达的界面。

你大概感到好奇:登山家们勇攀高峰是因为“山就在那里”,可既然天文学家们根本看不到黑洞,他们是怎么确定“黑洞就在那里”的呢?

黑洞自身不发光,难以直接探测,大大小小的望远镜对于直接观测遥远的黑洞力有不逮。科学家们



图1 《星际穿越》中的黑洞。周围的亮环是由气体构成的吸积盘(摘自影片《星际穿越》)

* 原文刊载于“科普中国”网站,作者略作修改后于本刊发表。

只能够“曲线救国”，采用一些间接方式来探测黑洞——比如观察吸积盘和喷流。在某些时候，恒星量级(从3个太阳质量到100个太阳质量大小)的黑洞会存在于一个恒星周围，将恒星的气体撕扯到自己身边，产生一个围绕黑洞旋转的气体盘，即吸积盘。当吸积气体过多，一部分气体在掉入黑洞视界之前，在磁场的作用下被沿转动方向抛射出去，形成喷流。吸积盘和喷流两种现象(图2)都因气体摩擦而产生了明亮的光与大量辐射，所以很容易被科学家探测到，黑洞的藏身之处也就暴露了。

理论很丰满，现实很骨感。以银河系为例，根据理论推算，银河系中应该存在着上千万个恒星量级的黑洞，可到目前为止，我们只确认了20多个黑洞的存在，此外还有四五十个黑洞候选体。要最终真正确认一个天体是否为黑洞，我们还需要做出更多测量与计算。要探测一个从几十万个太阳质量到几十亿甚至上百亿个太阳质量的超大质量黑洞，挑战将更大，科学家们为了确认银河系中心黑洞 Sgr A* 的存在，着实费了不少力气。

2 望向银河中心黑洞的视界面，犹如在地球上看到月球上的橙子

发现黑洞已如此不易，给它拍照岂不更难？从17世纪初人类发明望远镜至今，天文望远镜的口径已变得越来越大，从最早的2.5 cm口径，到目前最大的10 m口径光学望远镜，还有我国贵州的500 m口径射电望远镜(目前正在运行的最大X射线望远镜当属欧洲的XMM-牛顿望远镜，但是它的等效口径也仅仅

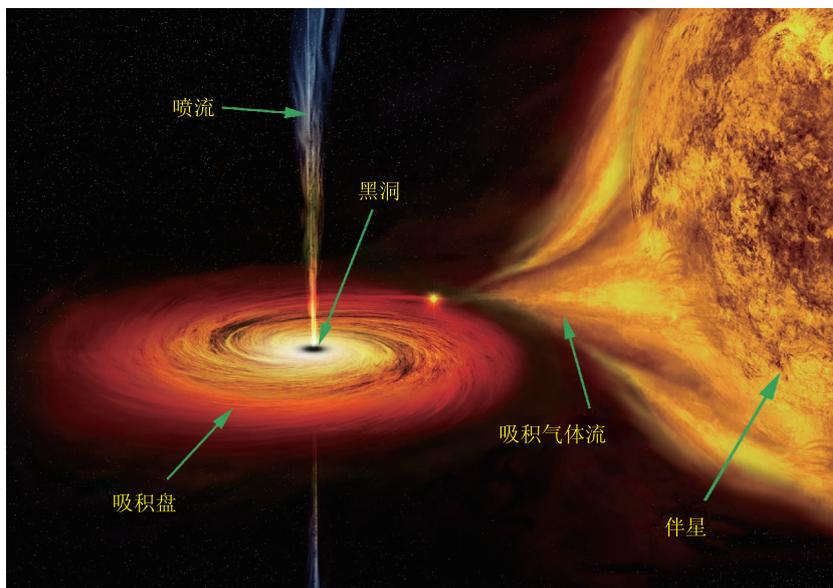


图2 恒星级黑洞系统示意图

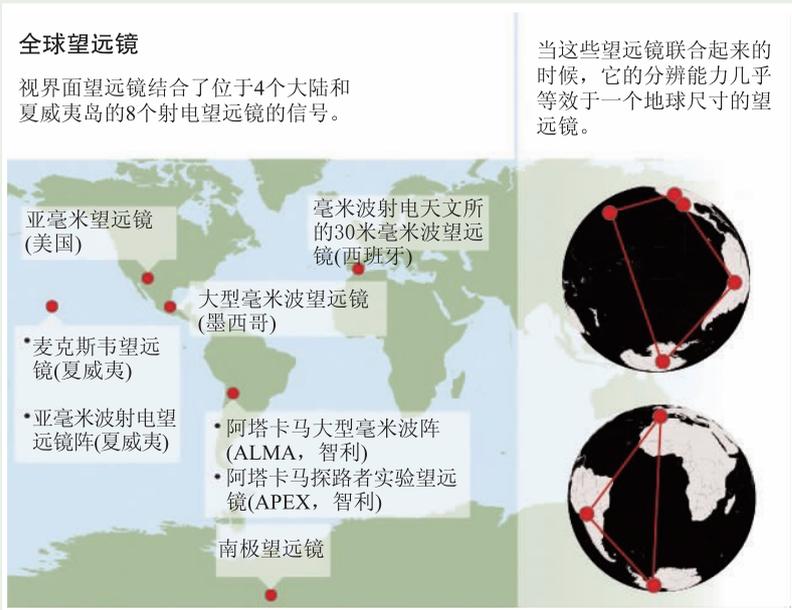


图3 望远镜在全球分布示意图，红点代表望远镜所在地(摘自 nature.com)

只有光学波段的30 cm望远镜)，下一代更大口径的望远镜也正在计划或建设当中，这些望远镜无一不凝结了人类的智慧，甚至代表了人类社会的最高科技水平。尽管对于黑洞的观测已经覆盖了全波段，从能量较低的射电波段到能量很高的X射线波段，然而要想观测遥远黑洞的附近区域，依靠目前任何单个望

望远镜都还远远不够。

因此，在过去10多年时间里，麻省理工学院(MIT)的科学家们联合其他研究机构的科研人员，开展了激动人心的“视界面望远镜”项目，全球多地的8个亚毫米射电望远镜将同时对黑洞展开观测(图3)。这“八兄弟”北至西班牙，南至南极，它们将向选定的目标撒出一张



图4 位于智利的阿塔卡马大型毫米波阵(ALMA)望远镜(来自 ALMA 官方网站)

大网, 捞回海量数据, 为我们勾勒出黑洞的模样。这些望远镜分别是: (1) 南极望远镜(South Pole Telescope); (2) 位于智利的阿塔卡马大型毫米波阵(Atacama Large Millimeter Array, ALMA); (3) 位于智利的阿塔卡马探路者实验望远镜(Atacama Pathfinder Experiment); (4) 墨西哥的大型毫米波望远镜(Large Millimeter Telescope); (5) 位于美国亚利桑那州的亚毫米波望远镜(Submillimeter Telescope); (6) 位于夏威夷的麦克斯韦望远镜(James Clerk Maxwell Telescope, JCMT); (7) 位于夏威夷的亚毫米波望远镜阵(Submillimeter Array); (8) 位于西班牙的毫米波射电天文所的30 m毫米波望远镜。它们多数都是单一望远镜, 比如夏威夷的JCMT和南极望远镜; 也有望远镜阵列, 比如ALMA望远镜是由66个小望远镜构成。

视界面望远镜此次观测目标主要有两个, 一是银河系中心黑洞Sgr A*, 二是位于星系M87中的黑洞。之所以选定这两个黑洞作为观测目标, 是因为它们的视界面在地

球上看起来是最大的。其他黑洞因为距离地球更远或质量大小有限, 观测难度更大。

Sgr A*黑洞的质量大约相当于400万个太阳, 所对应的视界面尺寸约为2400万千米, 相当于17个太阳的大小。哗, 超大! 然而……地球与Sgr A*相距2万5千光年(约24亿亿千米)之遥, 这就意味着, 它巨大的视界面在我们看来, 大概只有针尖那么小, 就像我们站在地球上去看一枚放在月球表面的橙子。M87中心黑洞的质量达到了60亿个太阳质量, 尽管与地球的距离要比Sgr A*与地球之间的距离更远, 但因质量庞大, 所以它的视界面对我们而言, 可能比Sgr A*的小不了太多, 也是从地球上看去视界面第二大的黑洞。

3 8个望远镜同时看到2个黑洞, 每年只有10天窗口期

要想看清楚两个黑洞视界面的细节, 视界面望远镜的空间分辨率达到足够高才行。要多高呢? 比

哈勃望远镜的分辨率高出1000倍以上。

科学家们之前可以利用单个望远镜实现黑洞周围恒星位置的测量, 但是, 相较于恒星与黑洞之间的距离尺度(1万亿千米), 视界面的尺度太微小了(至少小十万分之一倍), 因此利用单个镜面很难完成。这时候, 为了增强空间分辨率, 我们就需要使用“干涉”技术了, 即利用多个位于不同地方的望远镜在同一时间进行联合观测, 最后将数据进行相关性分析之后合并, 这一技术在射电波段已相当成熟。在这种情况下, 望远镜的分辨率取决于望远镜之间的距离, 而非单个望远镜口径的大小, 所以, 视界面望远镜的分辨率相当于一部口径为地球直径大小的射电望远镜的分辨率。

在这一视界面望远镜进行观测之前, 天文学家们已经利用其中部分毫米望远镜对Sgr A*和M87星系中心黑洞进行了联合观测, 并得到了一些令人兴奋的结果: 尽管没能看清黑洞视界面, 但已探测到了黑洞中心区域的辐射。为了增加空间分辨率, 以看清更为细小的区域, 科学家们在此次进行观测的望远镜阵列里增加了位于智利和南极的望远镜。要保证所有8个望远镜都能看到这两个黑洞, 从而达到最高的灵敏度和最大的空间分辨率, 留给科学家们的观测窗口期非常短暂, 每年只有大约10天时间(对于2017年来说, 是在4月5日—14日之间; 而此次观测是在刚刚过去的4月5日—10日之间的5个晚上)。在所有参与观测的望远镜当中, 坐落于智利、耗资140亿美金的ALMA毫米望远镜(图4)是最为重要的一个, 因为其灵敏度是目前单阵列当中最高

的, 但它的观测时间也是最为宝贵的。限于ALMA望远镜满满的排班表上一系列拥挤的观测计划, 此次黑洞视界面的观测只计划了5天, 其中两个晚上对银河系中心黑洞Sgr A*进行了观测, 剩下的时间对星系M87黑洞展开了观测。

尽管中国有很多的射电望远镜, 但很遗憾的是大多数望远镜观测频段都不在毫米或者亚毫米波段, 仅有的两个毫米波望远镜(位于德令哈的13.7 m毫米望远镜和位于西藏羊八井的KOSMA亚毫米望远镜), 也不具有联网干涉功能, 所以没有直接参与。但是中国还是有着间接贡献, 中国国家天文台是东亚核心天文台成员之一, 而此次参与观测的JCMT望远镜就是附属于东亚核心天文台。

4 除了黑洞“芳容”几何, 这一观测还将为我们解答诸多问题

为黑洞拍张照片不容易, “洗照片”更是耗时漫长。射电望远镜不能直接“看到”黑洞, 但它们将收集大量关于黑洞的数据信息, 用数据向科学家们描述出黑洞的样子。

对于之前的干涉仪来说, 因为不同望远镜之间的距离不会太远, 不同位置的观测数据通常可以实时比较、合并而后得到图像, 科学家们是有可能实时在屏幕上看到图像的。但对于此次跨越南北半球的视界面望远镜观测, 因其所涉及的站点区域非常广阔, 所产生的数据量将十分庞大。视界面望远镜每一个晚上所产生数据量可达2 PB(1 PB=1024 TB=1048576 GB), 和欧洲大型质子对撞机一年产生的数据量差

不多。考虑到有些区域(比如南极)的数据传输速度相对较慢, 科学家们在观测时不会对各个站点的数据进行实时相关分析, 因此更不可能在屏幕上看到黑洞的实时图像。在每一个观测中心, 科学家们将利用

提前校对好的原子钟时间, 对每一个电磁波到达的时间进行分别标定和存盘, 等到观测结束之后再汇总比较。

在观测结束之后, 各个站点收集的数据将被汇集到两个数据中心(美国麻省理工学院Haystack天文台和德国波恩的马普射电所; 南极的数据要等到10月份也就是其冬天结束之后才能够被运送回来)。在那里, 大型计算机集群将会对数据时间进行合并与分析, 从而产生一个关于黑洞的图像。这一分析所需的时间少则半年, 长则一年。即便是最乐观的情况, 我们也要等到2018年初才能“看见”黑洞了。

万事俱备, 只欠东风。设备准备就绪之后, 剩下一个非常重要的因素, 就是天气以及观测时间。由于大气中的水对这一观测波段的影响极大, 要想视界面望远镜顺利观测, 需要所有8个望远镜所在地(从夏威夷到智利, 从墨西哥到南极)的天气情况都非常好。目前这些望远镜所在之处通常都是海拔较高, 另外降雨量也是极少, 所以全部晴天的概率其实非常高。尽管毫米波的观测在白天也可以进行, 考虑到视



图5 视界面望远镜可能得到的计算机模拟黑洞图像。由于黑洞的转动效应, 黑洞左侧较亮(摘自《科学》杂志网站)

界面附近的辐射极其微弱, 在白天太阳的照射下, 大气中的水汽会在一定程度上增加, 从而导致吸收增强, 所以为了降低吸收和增强灵敏度, 此次视界面的所有观测都是在晚上进行。

当所有数据被合并, 最终得到图像时, 包括我在内的天文学家们希望看到这样一副图像: 一个黑色的圆盘, 被一个非常靠近黑洞视界面、很亮的光子圆环所围绕; 因为黑洞转动的多普勒效应, 光子圆环一侧较亮, 另外一侧较暗(图5)。视界面望远镜的观测对于科学研究有着非常重大的意义。天文学家们希望能够通过这一观测结果, 对爱因斯坦的广义相对论做出最为严格的限制。与此同时, 黑洞图像将帮助我们回答星系中的壮观喷流是如何产生并影响星系演化的。当然, 这是科学家心中的理想图景, 实际得到的黑洞图像可能要差很多。但无论最终的图像如何, 即便是只能看到几个像素, 此次视界面望远镜的观测也将是人类黑洞观测史上的重要一步。我们是何其幸运, 将成为宇宙中第一批亲眼看到黑洞的碳基生物。