

黑洞正播放着宇宙历史的镜头,而物理学家则努力去看清每一帧画面

破译黑洞明亮细环中的宇宙“史诗”

宇宙影院中的廉价座席

黑洞的神秘身影正在变得越来越清晰。2019 年 4 月,一张在周遭一片黑暗的围绕中闪烁着朦胧橙光的圆环照片,令数十亿人为之惊叹,这只“甜甜圈”是人类拍摄下的首张黑洞照片。今年 3 月,天文学家们又公布了第二张黑洞照片,橙光圆环上多了一道道顺滑而细腻的明亮细环,像极了旋转烟花。

其实,大多数人都太过沉迷于将数据转化成图片的过程,却鲜有人尝试去理解影像所传达的深层信息,而这才是其真正重大的意义所在。

过去两年中,研究者们不懈探求,终于建起一片布满“魔镜”的天地:黑洞的引力从各个方向吸收光线,然后将其扭曲并向观者发送——我们所看到的神奇是“魔镜”对黑洞周围环境做了无限次重构得来的图像,堪称一部讲述宇宙历史的史诗巨制,在数百亿公里的巨大弧形屏幕上放映。

首张黑洞照片公布时,大多数人都沉浸于观测数据是如何转化成图片的,但天文学家却致力于理解影像所传达的深层信息。美国哈佛大学的射电天文学家迈克尔·约翰逊回忆,发布结束后,他和同事们聚在一起探究同一个问题:这只“甜甜圈”究竟是什么意思?

如果宇宙是一座大电影院,M87 超大质量黑洞是影院大屏幕上播放的一部电影,那么从地球上观测它,就好比在一个偏远(大约 5500 万光年开外)的廉价座席(观影视角相当差劲),去观看黑洞影像——人类永远都难见其全貌。

不过即便如此,通过坚持不懈的努力观测,我们眼前所获得的照片或许已足以展现黑洞的真实历史了,或许也足以给爱因斯坦的理论以最高级别的检验,甚至足以令人类对空间和时间有更深的理解。

黑洞可能是爱因斯坦广义相对论中最惊人的预测,它将广义相对论的核心思想展现到了极致:黑洞的密度是如此之大,以至于时空被其无限扭曲;任何距离过近的事物都会被它拖入无尽黑暗。

尽管爱因斯坦怀疑黑洞是否真实存在,至少迄今为止还找不出有宇宙学观测证据与之矛盾,而且近几十年来的观测令我们相信,黑洞确实存在。

大型恒星“死亡”所坍塌形成的小型恒星,质量约为太阳质量的 10 或 20 倍——LIGO(激光干涉引力波天文台)于 2015 年检测到的引力波,就是由两个这样的天体合并而引发的“时空涟漪”。而且,几乎在每个星系(包括我们的银河系)中心出现的超大质量黑洞,都拥有数百万至数十亿个太阳质量的“体格”,那些触动引力波的小恒星在它们面前简直是秋毫之末。

2019 年的黑洞图像来自室女星系团中的超巨椭圆星系 M87,其质量可能达到太阳的 65 亿倍。事件视界望远镜(EHT)团队使用复杂的信号处理,将来自世界各地射电望远镜的数据组合成 M87 核心的图像,图片的最终分辨率与地球口径的单个无线电天线相当。

在这张图片中,橙色光环中心的黑暗是黑洞的阴影,被黑洞的引力放大、变形。可周围的橙色光芒到底是什么?一开始没人能真正回答这个问题。

为解析图像,理论派与实验派研究



图/视觉中国

者并肩作战。“我的职责是找到通用语言。”约翰逊表示,他的同事中有黑洞观察者、黑洞模拟器专家、黑洞理论家……但术业有专攻,隔行如隔山,要让大形成有效沟通非常困难,每一块研究内容都太专业了。

从黑洞视角捕捉宇宙历史

自从 M87 的黑洞图像问世,物理学家运行了许多关于 M87 的磁流体数值模拟(GRMHD)——将广义相对论与磁流体动力学相结合,描述围绕黑洞的高温电离气体的行为。每次模拟,科学家都会先做一些可能产生无线电波的假设,接着计算黑洞引力对电波路径的弯曲,最终预测得到黑洞图像。

研究团队发现,EHT 照片里模糊的橙色辉光,可能源于大量黑洞引力弯曲电波路径;黑洞以强大的力量展现了电波的形状,而隐藏了真实的发射源。不过,尽管这些模型无助于寻找来源,却揭示了一些出乎意料又引人入胜

的内容。研究团队成员们预测:宽而模糊的橙色光环中应该会有非常明亮的细环。哈佛大学的卢普萨斯卡认为,这首先意味着很多困惑。

几十年前就有人对黑洞发起过探寻。1959 年,进化论奠基人查尔斯·罗伯特·达尔文之孙、英国物理学家查尔斯·加尔顿·达尔文就做出了类似预测。他介绍了黑洞周围的宇宙之光如何靠近它、绕着它游走,那些靠得更近、轨道更多的光子将被捕获。后来的工作表明,特定轨道数的光可能会被黑洞压缩成一个细环。这一切都是在表达“黑洞影像不限于宽阔而模糊的橙色光圈,还包含了明亮细环”。

不过,这一切的前提是预设黑洞不会旋转,但实际上黑洞应该会旋转,从而保留其所吸入物质的角动量。

美国纽约巴纳德学院的天体物理学家詹娜·莱文表示,黑洞旋转的字面含义是时空拖入其周围的漩涡。它附近的所有物体,包括光线,都会被拖着转。不过,没人研究过这个问题,“它太复杂了”。

但 GRMHD 模拟已证实了基本情况。模拟结果表明,如果我们仔细观察,会发现又细又亮的光子环由无数个子环嵌套组成,每个子环都由光子绕黑洞旋转一定圈数而形成,它们越接近黑洞中心阴影的边缘,就越越薄,而且这种变化是指数级的。由于内部子环由具备更多轨道的光组成,故而这些光子会早被黑洞中心捕获。研究团队在发表的论文中写道:“总而言之,子环的集合类似于电影的帧,从黑洞的视角捕捉到了可见的宇宙历史。”

在橙色光环上,相邻子环间的年龄差为 6 天。因此,只有为数不多的若干帧能将宇宙历史映射给我们,而且它们所能看见的历史很短暂。按照约翰逊的说法,我们甚至“追溯不到恐龙时代”。

尽管如此,这些光环依然充满价值。首先,它们的大小和形状并不取决于光子的来源,而仅取决于黑洞的性质。这就可以让物理学家通过研究光环来判断黑洞的性质。

目前,研究者估计 M87 黑洞的质量与 65 亿个太阳相当,估值误差不过 15%。由于黑洞光环的宽度取决于黑洞质量,卢普萨斯卡认为,如果科学家能分辨出超细光子环并测量其尺寸,那么或许就可以实现误差不过 1% 的精确测量。

其次,黑洞周围的旋转时空会将光环略微压扁,因此它们不是完美的圆环。通过对形状的分析,我们有望获得关于黑洞旋转的准确数据。这就可能将 M87 的历史透露给我们——它是否经历了一系列与较小黑洞的随机碰撞,从而令其整体旋转程度降低?抑或它通过从其宿主星系大量获取不断向上旋转的气体,从而增加自身转速?这一切都有待回答。

对广义相对论进行最严格检验

测量黑洞的自旋也能帮我们解释黑洞如何喷发出那些强大的、接近光速传播的物质射流。这些射流从宿主星系中喷出,可以飞行数十万光年的距离,最终以巨大等离子体羽流的形式遍布整个宇宙。

一种为更多人认同的理论是,黑洞的自旋与周围磁场相结合,从而扮演了发电机的角色——产生一个强大电场,大到足以将电子和正电子从真空中抽出,将它们加速成两道射流;每个射流背离黑洞的一个极点而去。

光子环还可作为对广义相对论最严格的检验证据。广义相对论非常适用于地球引力场的弱引力区域。为此,科学家每天都要做数十亿次验证操作,因为验证以时间扭曲为基础——卫星导航通过精确允许相对时间扭曲实现验证。

2004 年,美国宇航局(NASA)发射的引力探测器 B 帮助我们看到了地球自旋引起的参考系拖拽。我们可以将地球自旋看作黑洞周围时空漩涡折兑至地球的极弱化版本。

至于相对论真正发挥作用的极端引力场,目前,由引力波探测器常规采集到的黑洞碰撞形成的回声与爱因斯坦的理论是相符的,但如果要测算黑洞光子环间距,对精确度的要求就会非常高。

莱文认为,这是检验相对论的好方法,因为很难以其他方式看到这类内部轨道。如果实测结果与广义相对论的预测有任何偏离,都会有助于物理学家建构一套引力量子理论(长期以来学界一直缺少此类理论的支持),帮助人类搞明白空间和时间是如何组成的、宇宙大爆炸的初始瞬间究竟发生了什么,以及黑洞里面到底有些什么。

(刘迪一/编译)

EHT 已经打开了人类在地球上所能企及的最大视界,仍无法完全看清黑洞

人类需要更锐利的“无线电眸”

更高分辨率的太空观测设备将更有希望捕捉到更多——或许是上百万个分布于宇宙各处的——超大质量黑洞的阴影。这些工作有望帮助我们解答许多关于黑洞的谜团,例如它们是怎样在宇宙早期迅速成长的。

前景令人兴奋,但实际研究并不容易。在研究装备方面,我们可能需要比现有事件视界望远镜(EHT)更高级别的“无线电眼睛”。实际上,EHT 已经打开了身处地球的人类所能企及的最大视界。

目前,科学家可以采取的一种手段是,通过使用更短波长的信号获得更清晰的视野。M87 黑洞的原始图像基于波长 1.3 毫米的无线电信号。不少科学家相信,只要将这一波长缩短至四分之一,就足以看到第一个最明亮的光子环。

不过,地球上绝大多数区域的大气层都会阻碍波长如此之短的无线电信号——除了极度高纬和干旱的地区,例如南极和智利的阿塔卡马沙漠。要是可以在太空中增设一台射电望远镜,或许目标可能实现——望远镜离地球越远,对光子环的成像就越精确。

距离地球差不多 150 万千米的日地拉格朗日 L2 点就是一个绝佳位置:航天器来到此处后,会在地球和太阳的引力作用下保持相对静止。换句话说,在这个点开展工作,所需成本最低。设在 L2 点的望远镜与地球上的其他望远镜相配合,就能以足够分辨率对 M87 黑洞周围的前三个光子环和人马座 A* (银河系中心较小的超大质量黑洞)周围的光子环成像。

这些设想或许并非遥不可及。2011 年,俄罗斯发射了天基射电望远镜 Spektr-R (现已失联),就曾在距地球 30 万公里处开展工作。Spektr-R 的升级版 Spektr-M,又称“光谱-M”太空望远镜,将于 2029 年左右发射到 L2。美国的太空望远镜“起源”如果获批,也将于 2035 年左右向 L2 进发。

不过,在出发前,“起源”需要先做一些配置升级,才能更好执行测量光子环的任务。升级任务之一是提高机载时钟的精度,以确保与地球望远镜观测数据的同步。

项目负责人之一、美国加州大学欧文分校的阿萨塔·库雷指出,目前看来,“起源”今后可能遇到的主要困难并非观测精度,而是庞大的数据量。

太空望远镜所获得的原始数据必须先传

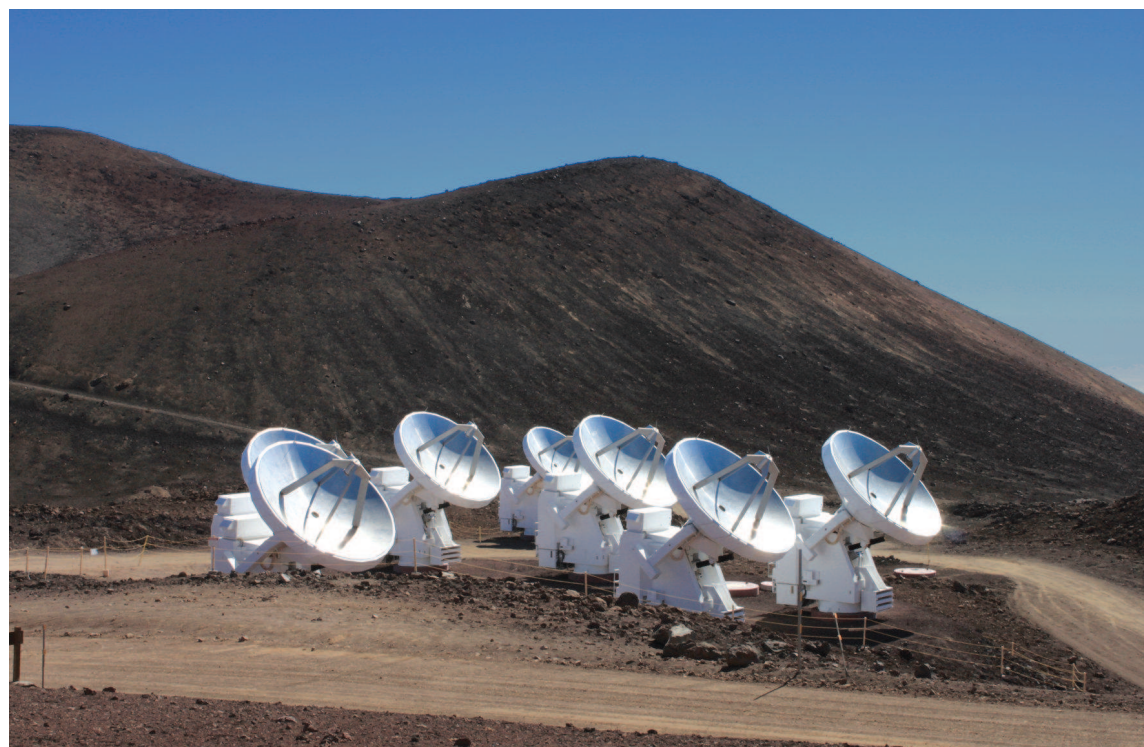
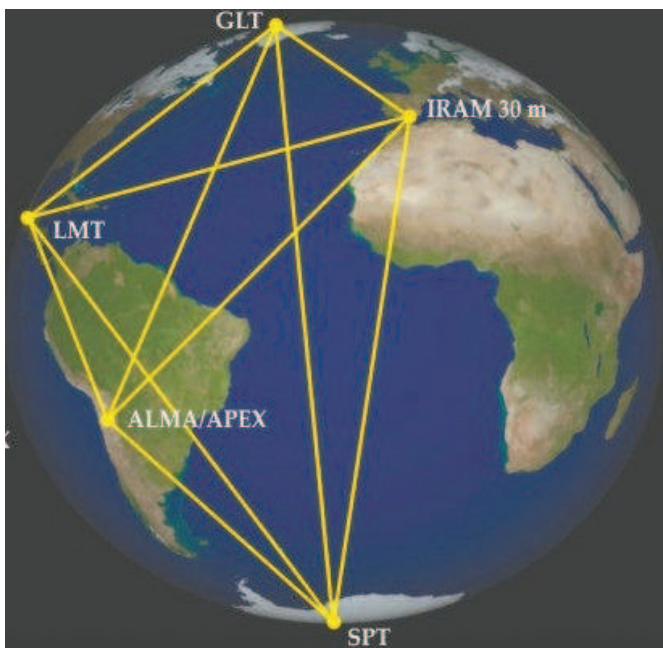
回地球,再与地球望远镜的数据相结合,以供研究团队分析处理。据估算,“起源”观测 6 小时就会存储下约 230TB 的原始数据量。航天器常用的数据传输渠道是无线网络,要将这个体量的数据传回地球,对于无线网络来说,实在太庞大了。

至于通过黑洞视角拍摄宇宙电影的任务,即使我们真的能在 L2 点安排覆盖百万英里宽的无线电网,也只够搞出一部 3 帧长的预告片。即便是在遥远的未来,拍摄一部正片长度所需的技术也未见得有望实现。

当所需观测的光子环变得越来越细,科学家必须不断放大用于观测的望远镜口径——如果能把无线电网的覆盖面扩展到从地球到离地球最近的恒星半人马座(相距 4 光年)的范围,人类将可观测到大约 10 个子环。

► EHT 网络示意图

▼ 设在智利阿塔卡马沙漠的射电望远镜。



科学新知
上海期刊

计算流体动力学揭示
海洋立管复杂运动轨迹

《海洋工程与科学》近期发表的一项研究表明,在低折合速度情形下立管的振动包含有三种成分:低频振动、立管反转过程中的一阶固有频率振动,以及漩涡脱落引起的二阶固有频率振动。

海洋立管作为深海油气生产系统的一部分,是连接水面平台装置和海底设备的重要通道。在洋流中的海洋立管会产生涡激振动,同时风浪的影响也会使立管产生往复运动。因此,准确计算出海洋立管在实际海洋环境中受到的流体载荷及其在流体载荷作用下的动力学响应,对深海油气资源的开采至关重要。

过去,由于缺少基于计算流体力学的研究,故而无法更好地揭示流体与立管之间的相互作用。而该研究利用了基于切片理论的计算流体力学方法,成功模拟了考虑流体与立管之间相互作用的情形下立管顶端在各种复杂激励下的动力学响应。

论文提到,当立管的顶端受激励时,沿立管展向的剪切振荡流动会造成立管在来流方向上更高阶模态的低频振动,这种低频振动会使得立管的来流方向与垂直来流方向位移产生不同的相位差。因此,当立管只受一个方向激励时,在立管展向的不同位置处会产生“X”型、“I”型和“O”型运动轨迹。当立管受两个方向激励时,研究者观察到了更加复杂的运动轨迹。

(陆瑶/整理)



《海洋工程与科学》由上海交通大学主办,2020 年被 SCI 收录。

光刻机照明系统透镜
表面膜层生长更加均匀

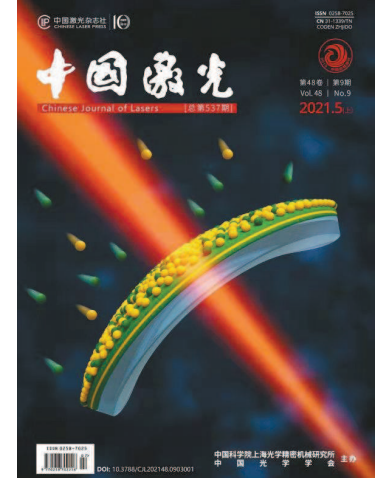
《中国激光》近期以封面文章报道了中国科学院上海光学精密机械研究所张伟丽研究组在大口径大陡度透镜表面膜层性能提升方面做出的一系列突破性进展,该研究采用宽角宽带膜系和温度-转速综合调控技术,解决了大口径大陡度透镜表面膜层倾斜沉积导致的膜层生长特性变化和均匀性难题。

高精度光学系统,尤其是光刻机系统中,通常会设计并使用大量小曲率半径的大陡度透镜以实现大数值孔径,这对镀膜其表面的深紫外薄膜提出了极高的要求。

与平面光学元件相比,大陡度透镜表面上的薄膜生长特性更为复杂,需考虑膜层折射率非均匀性和厚度非均匀性等问题,而研究大陡度透镜表面膜层均匀性,是提升其元件光学性能及稳定性的前提。

近十年来,张伟丽研究组围绕提升大陡度透镜表面膜层性能方面开展了系统研究,建立了大陡度透镜表面膜层沉积角度变化计算模型,揭示了大陡度透镜表面膜层生长特性与沉积角度和曲率半径的依赖关系,发展了基于温度-转速的折射率非均匀性调控技术,设计了宽角宽带增透膜系,有效提升了大陡度透镜表面膜层折射率均匀性,实现了大口径大陡度复杂曲面薄膜元件光谱均匀性优于公开报道水平。

(吕璇/整理)



《中国激光》由中国科学院上海光学精密机械研究所主办、中国激光杂志社出版