

黑洞的前世今生

郑雪莹 赵雪杉 苟利军 廖振玄 董艳婷 刘纪任

(中国科学院国家天文台 中国科学院大学天文与空间学院 100101)

虽然人类所体验过的最强的引力,仅仅是地球所提供的指向地心的吸引力,但是引力最极端的形式却指引我们察觉了一类奇异而超常的天体的存在。黑洞以最优美简洁的形式解释了质量和时空之间相互呼应的规律,并持续地吸引着科学界的注意力。

近年来,尽管人们对于天文学未来的预判不尽相同,但接踵而至的大事件一次又一次的推进了认识的边界,更多曾经互不关联的领域开始了彼此交叉和融合,萌生出新的科学分支。在颠覆了人们的科学观念的同时,有关黑洞这一奇特的主题的进展,也带来了现代天体物理的飨宴。

我们所赖以生存的地球,提供了人类所需要的一切绝妙的平衡,但在黑洞的内部和周围,所有的理所当然的平衡会被打破,一种新的但违反传统直

觉的平衡又被建立,人们对它总是有无穷的好奇和猜测。得益于视觉媒体的传播,现如今,黑洞的基本概念几乎已经妇孺皆知。1979年的电影《黑洞》就大胆地把故事舞台放在了视界面的附近:宇宙飞船的船员们误入某个巨大黑洞的边缘地带,发现了二十年前失踪的“天鹅”号飞船,并在无人能逃脱的时空深渊附近的展开了一段诡秘冒险;而1997年上映的《黑洞表面》里,科学极境的诡异和骇人令观众深感畏惧,黑洞一时间成了科幻恐怖片的常客。到了21世纪,科幻片如《星际穿越》、《勇敢者的游戏》等等,更加冷静且细致地考虑了真实的科学情景,同时以复杂的角度切入了人类的情感,着墨于那些平时我们习以为常,但在视界面附近却形式迥然的现象,掀起了全民观影和科学普及的热潮。

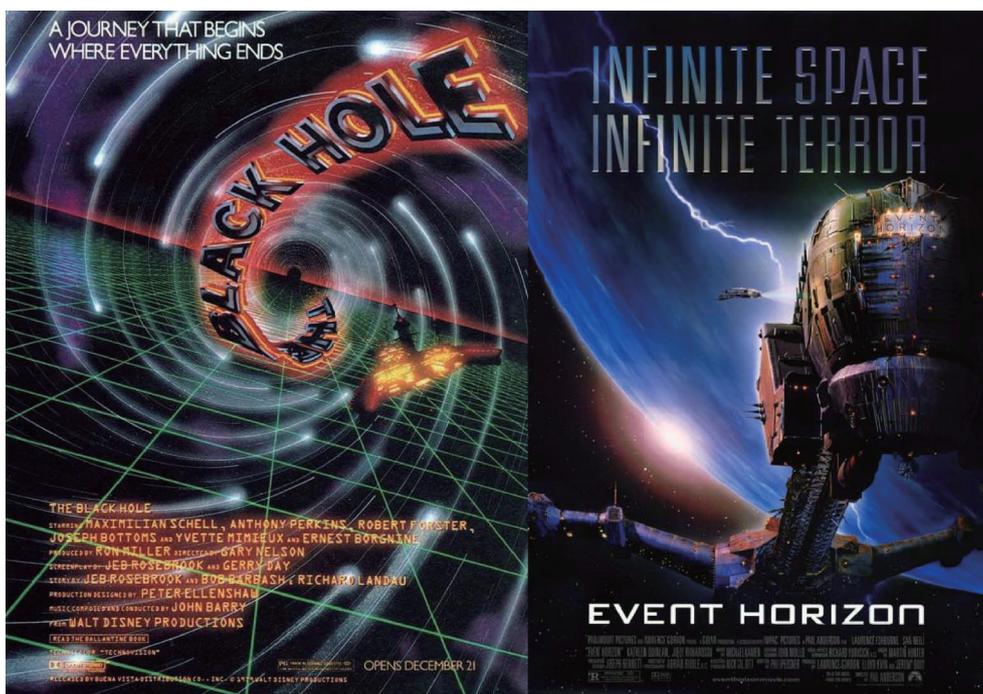


图1 影视中的黑洞(图片来源:网络)

黑洞不是突然被发现的,它的轮廓越发清晰地浮现在人们眼前的过程,与整个现代物理学的发展同步。300多年前,牛顿首先向世人展示了经典的引力理论,质量导致引力的原因虽然不详,但它们的规律终于能被公式所描述。

“他以几乎神一般的思维能力,最先说明了行星的运动和图像、彗星的轨道和大海的潮汐”。西敏寺牛顿墓碑上的这一段铭,是对他卓越贡献的赞美。“万有引力”告诉我们,一个有质量的物体,会对周围的物体产生吸引力。如果小天体的动能不足以填补它在引力势中所处的深度时,就会深陷其中而无法远离,这就是引力的束缚作用。反之而言,增加速度提高动能,就有可能挣脱大天体的引力束缚。以一个停留在地球表面的物体为例,它所需要的逃逸速度约是11.2 km/s。但是当星体引力非常强时,要求的逃逸速度可能会大到不可思议,以至于最终超过宇宙的最快速度——光速,事情在此时将会变得十分离奇:既然连光都无法离开,我们就不可能接受到来自表面的光子,这意味着这个天体将是不可见的。

18世纪的数学家拉普拉斯,以及与他同时代的约翰米歇尔和皮埃尔-西蒙拉普拉斯,就已经在牛顿力学的背景下讨论了,这种超致密的天体存在的

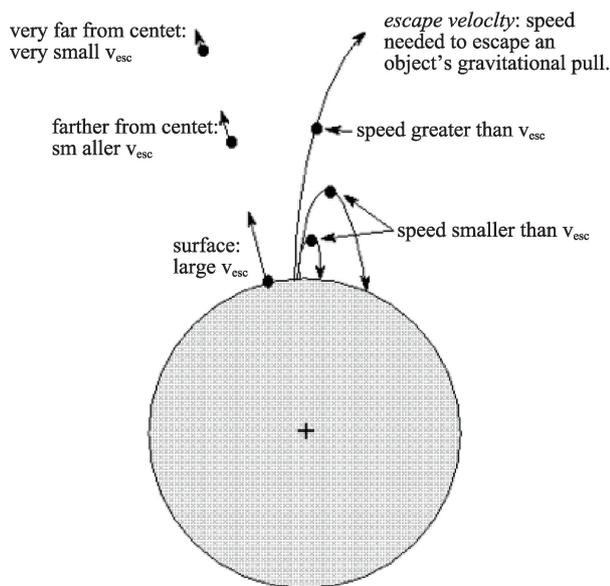


图2 逃离引力束缚(图片来源:网络)

可能性:中心天体的质量始终可以不断积累,逃逸速度最终会超越“极限”,从而阻止光的逃逸;通过这种思想实验,我们粗略地窥探到了黑洞最深入人心的概念:不可见。

之所以说是粗略,是因为尽管在牛顿时代,我们就可以预见到黑洞概念的雏形,但并不能真的使用牛顿理论来描述它。牛顿理论在平直的时空中几乎完美,能解决差不多所有经典运动问题,但当视线离开地球时,人们发现水星绕太阳的运动的进动和牛顿的万有引力定律的预言存在微小差别,正是这一点小小的差异,开启了通往相对论物理定律的大门。运用广义相对论,我们才能正确和清晰地了解黑洞附近到底发生着什么。

1915年爱因斯坦最终写出爱因斯坦方程^①,搭建出广义相对论的框架。与狭义相对论不同,广义相对论中时间和空间不再孤立,而是共同构成了一个复杂变换的舞台:质量对时空产生影响,时空反过来影响质量的运动。引力成为了一种“伪力”,它作为力的形式产生的加速度,实际上是物体在弯曲的时空中沿所谓测地线运动的趋势。如果将这种时空和物质之间相互反馈的效果可视化,时空就会类似于一张网膜,时空中的质量造成象征着引力势阱的凹陷。而像黑洞这么致密的天体可以对时空膜造成剧烈的形变,时间的流逝、光的路径都与平直时空中全然不同。

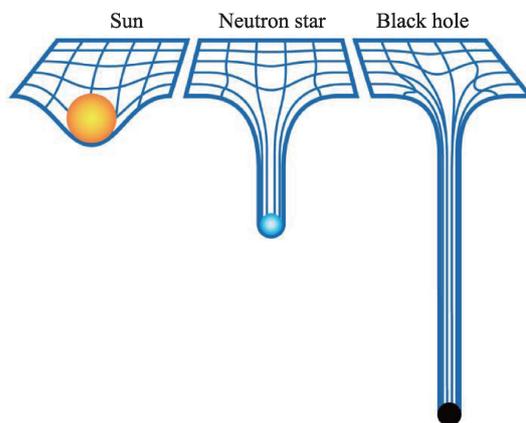


图3 不同天体造成的引力势阱(图片来源:
<https://physics.stackexchange.com/questions/158537/spacetime-geometry-around-two-black-holes>)

黑洞最为特异的一点或许就在于,连光这种宇宙中速度最快的粒子,也不能逃脱它的束缚,这也等同于说,任何物质都不能从黑洞的边界处逃脱。因为缺少信息的媒介,它看起来会是一个黑暗无光的球,在宇宙星光遍迹的幕布上犹如一处空洞,所以被称作黑洞。我们不能够用电磁波的手段来探测黑洞内部或表面的图景,尽管对于现代黑洞理论各人都有着不同的理解和认识,但黑洞存在的事实已得到广泛认同。

借助广义相对论,黑洞内部时空的一些特征可以被刻画出来。它没有由物质组成的表面,但是可以定义出所谓的边界,所谓的视界面。视界面是一个任何物质一旦进入就无法离开的虚拟界面。因此进入视界的观测者无法向外界发信号,而外界也无从得知内部发生的事情。一类特征的视界面的半径公式表达为 $R_{sch}=2GM/c^2$, 也称史瓦西半径^②。隐藏在视界面之下,黑洞的最深处存在着奇点,它是一个极小的区域,理论上,在那里二维的时空被潮汐力压缩成一条线,使得任何物质都无法存在。广义相对论认为,稳态的奇点是没有大小且密度无穷大的,而冉冉上升的量子引力论则试图告诉我们,奇点或许是尺度极小的量子泡沫。但无论怎样,外界无从得知黑洞内部的信息,奇点到底是怎样的存在还远没有盖棺定论,又或许等待着我们的并非起点,而是科幻常客:虫洞,理论上,它也可以

作为黑洞的内边界代替奇点出现。但是虫洞开闭非常之快,几乎不可能通过。而且,如果考虑到黑洞的形成过程(后文将提到),很难相信事情会有这么巧合,一个黑洞的虫洞刚好能够和另一个黑洞的虫洞对接,架起时空隧道。

黑洞的形式只与几个特定的物理量有关:质量、角动量和电荷。在这三个量都给定的情况下,时空就只会按同一种形式弯曲。视界面的形状是高度的几何对称,既没有鼓包也没有沟陷。人类可以用身高、体重或五官面貌相互区别,头发也许可以称得上是最为变化多端的一项特征,没有头发可以直接避免描述发型的困难。类比之,黑洞由三个基本参数完全确定这一事实,被幽默地称作了黑洞没有头发(或称无毛定理或三毛定理)^{③④⑤}。上文中所提到,以史瓦西半径 R_{sch} 标记视界面位置的黑洞,是一种角动量和电荷量为0的经典黑洞,也被称为史瓦西黑洞;自转黑洞则是克尔黑洞;既自旋又带电的黑洞则是克尔-纽曼黑洞。它们都由各自的度规方程描述。现实宇宙中存在的天文黑洞,甚至可以丢掉电荷这个参数。由于天文黑洞的周围遍布着带电荷的物质,它们会在很短的时间内中和掉黑洞本身的电荷量,因此在实际的天文应用中,一般便不再考虑电荷量对时空的影响。

漆黑的夜空中满布着黑洞,但究竟在哪里能找到它们,哪些星光下隐藏着黑洞呢。黑洞虽然不可见,但是环绕运动的物质和气体却可以暴露它的存在。如果小天体本身携带角动量,那么它会被引力拖拽着围绕黑洞旋转,这种挣扎可以延缓它被吞没的命运。相互摩擦作用使原本不同轨道倾角的物质逐渐降至同一平面,积聚成了一个热的吸积盘,因此黑洞视界面虽然一片漆黑,这些吸积盘却能够辐射热光子。2015年热映的电影《星际穿越》中向大众展示出的黑洞“卡冈图雅”,正展现了吸积盘映衬下黑洞的影像。电影中的黑洞瑰丽壮观:黑洞本身一片漆黑,环绕着它的吸积盘则发出明亮的光芒,此外,由于黑洞强大的引力,来自于黑洞后方吸积盘的光线发生扭曲。光的行进路线的偏折实际

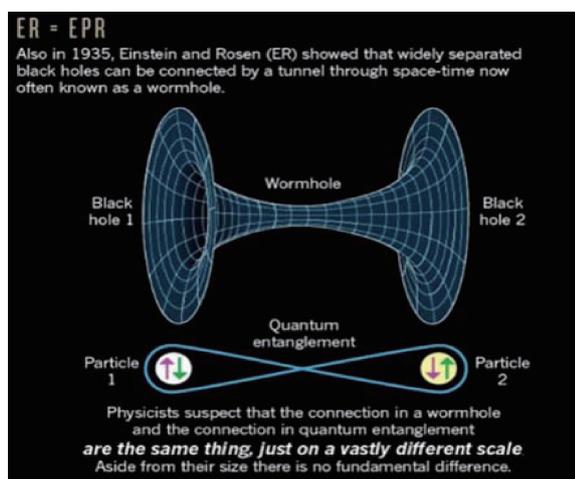


图4 神秘的时空隧道——“虫洞”(图片来源: <https://resonance.is/traversable-wormhole-key-quantum-teleportation/>)

上是由于光沿着零测地线移动的结果,零测地线在平直的时空中也是平直的,但在曲率的时空中呈现为弯曲。因此我们从前侧也能看见原本位于黑洞后方的吸积盘。

时间流逝的快慢与空间伸缩的程度有着直接的关系,因此黑洞可以改变时间的流逝速率。这一性质令科学家和大众都为之深深着迷,在此之前,我们的物理规律都建立在一个均匀的时空背景下,但时空与时间本身是可以被调整的,而且这种调整的手段实际上就是加入一个大质量的物体,广义相对论颠覆了以往的认知。可以猜想,在黑洞视界周围生活的生物一定会过着与我们截然不同的生活:对于离黑洞不同距离处的生物所经历的时间流逝速度是不同的,越靠近黑洞,时空越弯曲,时间流速越慢。电影《星际穿越》中,Cooper在Miller星球上待了3个小时,对于母舰(和地球上)则意味着21年,时间的流逝速度相差6万倍,这说明Miller星球已然和黑洞视界非常接近,且这个中心黑洞以接近最大自旋值转动。Cooper在经历黑洞视界处的漂流后,就如同仿佛被冻龄了,地球上的岁月在不察之间流逝了20年。这一幕竟与中国神话中的“天上一日,地上一年的”有些异曲同工之妙。

科学发展的历史往往曲折复杂,但即使最开天辟地的理论回溯到最初,也往往有迹可循。

通过回溯黑洞的认识历史,我们对它合理性的认同感会增加。早期,连爱因斯坦本人也对黑洞的

存在充满怀疑,尽管那时史瓦西已经解得了史瓦西解,但黑洞解表现出来的奇异性与人类对时空的传统认识太大相径庭,相信黑洞的学者寥寥,争论的焦点集中在,既然在视界面上时间的停止如此令人担忧,是否会有某种机制,能够阻止质量聚集到形成黑洞的程度呢,是否物质的密度存在一个不容突破的临界点?

而一切都无所不在爱因斯坦场方程 $G_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}/c^4$ 的掌控之中。在很短的时间里,史瓦西就得到了无自旋的静态黑洞解^⑥,奥本海默表明恒星坍缩可以是形成黑洞的原因^⑦,科尔得到自旋黑洞解^⑧,霍金预言霍金辐射,哈德·根舍证明了银河系中心超大质量黑洞的存在^⑨,贾斯计算出了银河系中心黑洞的质量^⑩,证实了人们长久以来的猜想。站在这些巨人的肩膀上,黑洞的秘密才得以被我们窥见一斑。

到了今天,情况已经发生了完全的变化,黑洞的存在已经被科学共同体的绝大多数科学家所接



图5 《星际穿越》中的黑洞“卡冈图雅”(图片来源:网络)

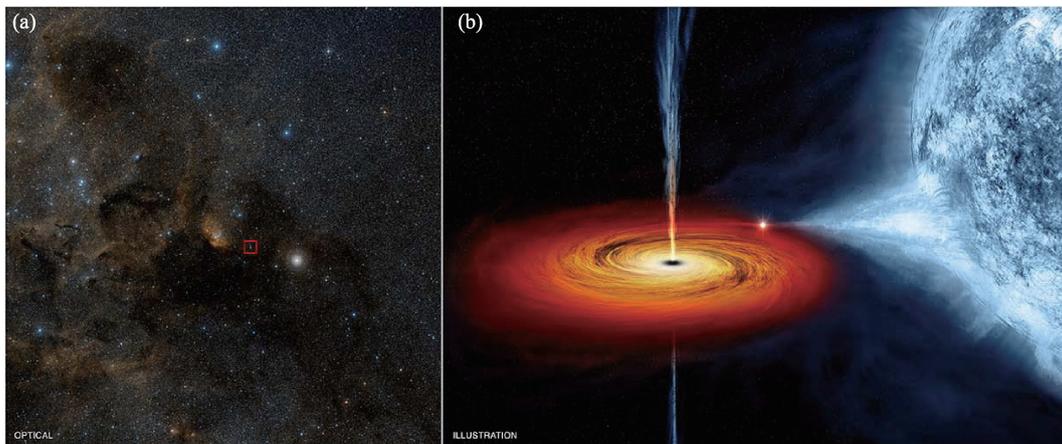


图6 恒星级黑洞 (a)光学波段下的天鹅座X-1;(b)恒星级黑洞的科研想象图(图片来源:https://chandra.harvard.edu/photo/2011/cygn1/)

纳,观测天文学的贡献不可或缺。一个纯理论的造物,最终获得了实测证据的支持。第一个震惊学界的黑洞候选体,天鹅座 X-1,1964年由 Aerobee 发现^①。这个黑洞位于天鹅座的脖颈处,距离太阳系 7800 光年^②,是持续最久的银河系内强 X 射线源;它的质量为 15 倍 M_{\odot} ^③,远超奥本海默极限,因此不再可能是一颗中子星,而应该是更加致密的天体,可能的最简单的解释就是黑洞。

后来的观测表明,宇宙中黑洞并不稀少。按照黑洞的质量,可以将其简单分为两类:恒星级黑洞 ($\sim 10 M_{\odot} < 100 M_{\odot}$)^④和超大质量黑洞 ($> 10^6 M_{\odot}$)^⑤。这两者之间的质量相差约 5 个数量级,受它们控制之下的时空也有所差异。对于恒星级质量的这一类黑洞而言,它们常常与单独正常恒星伴随出现,与单颗恒星相互作用,通过吸积来自伴星的物质产生辐射;而超大质量黑洞往往潜伏在星系的中央,同时与数千亿颗恒星相互作用,对整个星系的过去和未来造成影响。不论是哪一种黑洞,只要周围有物质存在,那么黑洞就会被物质组成的吸积盘所环绕;此外,部分气体可能会在磁场的作用下沿着黑洞转动的轴线方向抛射出去,形成宇宙中蔚为壮观的喷流。

那么黑洞究竟是怎么形成的? 普通黑洞并

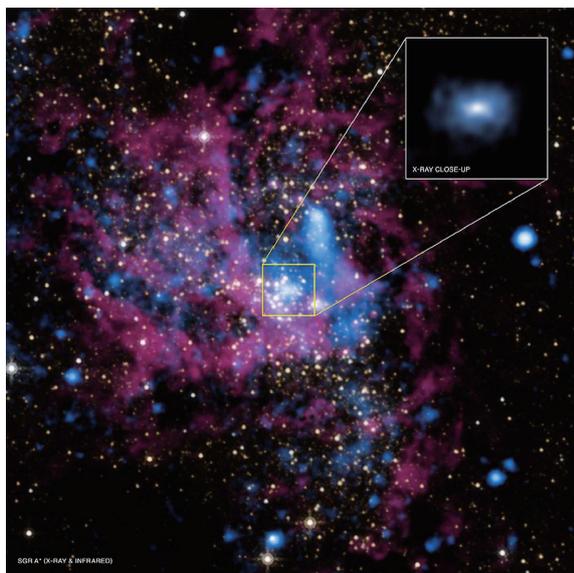


图7 银河系中心的超大质量黑洞人马座 A*
(图片来源: <https://apod.nasa.gov/apod/ap130906.html>)

不是天然存在的,它们也曾经是一颗“普通”恒星。恒星的演化经历不同的阶段,氢核点火标志主序恒星的正式形成,进入被称为主序阶段的生命。主序阶段在恒星演化中所占的时间最长,在这个阶段,恒星进行核聚变反应,辐射压和引力相互平衡,但在核燃料燃尽后,辐射压就不再能支撑引力向内的压力,恒星由此脱离了主序。之后的命运取决于它所累积的质量:如果恒星的质量小于 $8 M_{\odot}$ (不同的演化模型会给出不同的结果,一般认为在 $8 \sim 10 M_{\odot}$),脱离主序后它会首先膨胀为红巨星,然后经历一次爆发,外层物质被抛出形成行星状星云,内层物质则坍缩成为白矮星;如果恒星的质量大于 $8 M_{\odot}$,那么它会膨胀为红超巨星,再发生剧烈的超新星爆发现象。在红超巨星阶段,质量约在 8 到 25 倍 M_{\odot} 之间的恒星将最终成为中子星,而那些更重的恒星的宿命是形成恒星质量的黑洞。

超大质量黑洞的形成过程不如恒星质量的黑洞那么清晰,人们曾认为,它们是由小质量黑洞不断地吸积与相互并合,形成较大质量黑洞,最终通过长时间吞噬气体和恒星成长为庞然大物的。但

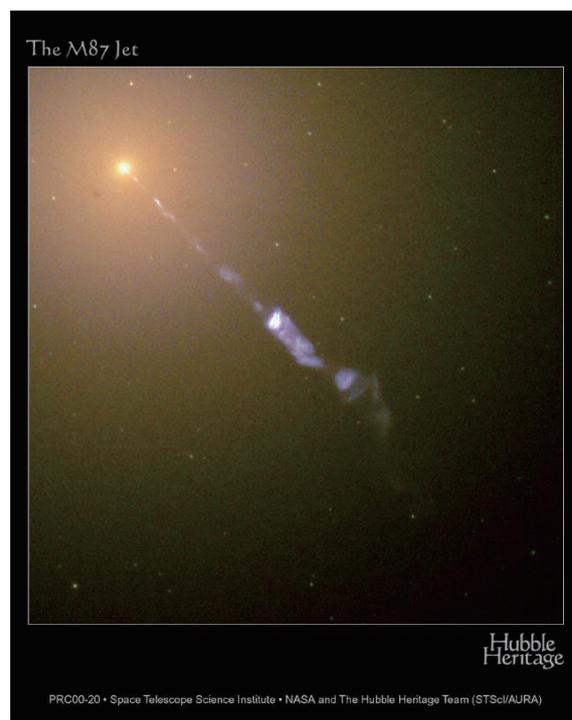


图8 从 M87 中心发出的喷流
(图片来源: <https://apod.nasa.gov/apod/ap000706.html>)

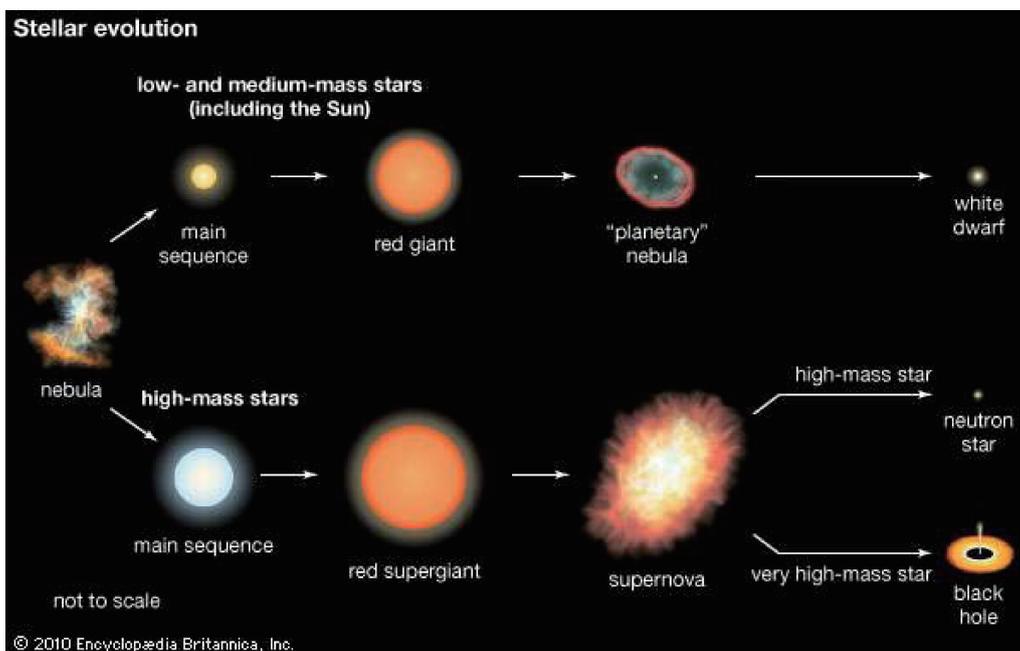


图9 恒星演化的轨迹(图片来源:<https://www.britannica.com/science/star-astronomy/Star-formation-and-evolution>)

是近些年的一些观测似乎否定了这种简单的猜想,早在百亿年前就已经存在数十亿倍太阳质量的星系级黑洞了^⑥。在如此短的形成时间里,仅仅依靠吸积的速度远不足以解释如此大的质量,因此有一些理论认为存在大质量的暗星并合加速了这一过程。也有一些观点认为是,超大质量的气体团块直接坍缩形成的几百倍太阳质量的“种子黑洞”^⑦。

夜晚的银河闪耀着淡淡的光辉,在那里藏着距离我们最近的超大质量黑洞。高分辨率成像的出现,使我们能够跟踪银河系中心附近的恒星运行的轨道,贾斯领导的银河系中心组在对银河系中心进行了为期十多年的监测后,获得了银心的超大质量黑洞的有力证据。他们测量黑洞的方法被称为动力学方法,根据跟踪恒星绕着看不见的引力轨道运转的动力学规律,可以计算黑洞质量。在银河系中心黑洞附近星群和气体十分密集,分辨同一颗恒星并持续测量它的轨道并不简单,贾斯团队使用了世界上最大的光学望远镜之一的凯克望远镜,并辅以自适应光学技术,在长达十年的观测后,于2008年发布了银心附近恒星轨迹图,展示了周围恒星在黑洞引力之下受到牵引而环绕的动态,得到中心黑洞

质量大约为430万 M_{\odot} ,从测量上证明了银心黑洞的存在。

得益于X射线天文望远镜在近40多年间的发展,我们对于黑洞的认识和观测已经取得了很大的发展。如今我们已经确定了20余个恒星量级的黑洞候系统,19个位于银河系之内。它们绝大多数分布于质量分布较为致密的银盘上。也认为几乎在每

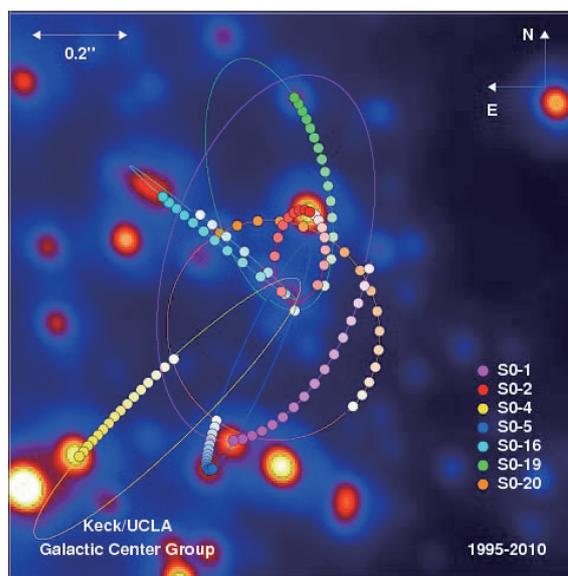


图10 银心附近的恒星运动轨迹
(图片来源:<http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/science.html>)

一个星系中心都存在着一个超大质量黑洞的存在。

2015年9月14日,aLIGO团队探测到了双黑洞并合释放出的引力波^⑧。这件令全世界瞩目的科学事件揭开了黑洞研究的新篇章。2016年2月12日美国新闻发布会现场,aLIGO确认探测到了第一例引力波事件,广义相对论的最后一项预言得到证

实,同时黑洞自身的存在也得以再次确认。在此之后,在第二次运行期间,总共探测到了10多起引力波事件,尤其还探测到了一次距离我们1.3亿光年的双中子星合并事情,几乎全球可能利用的望远镜都参与了此次事件的观测,也开启了多信使引力波天文学的研究序幕。

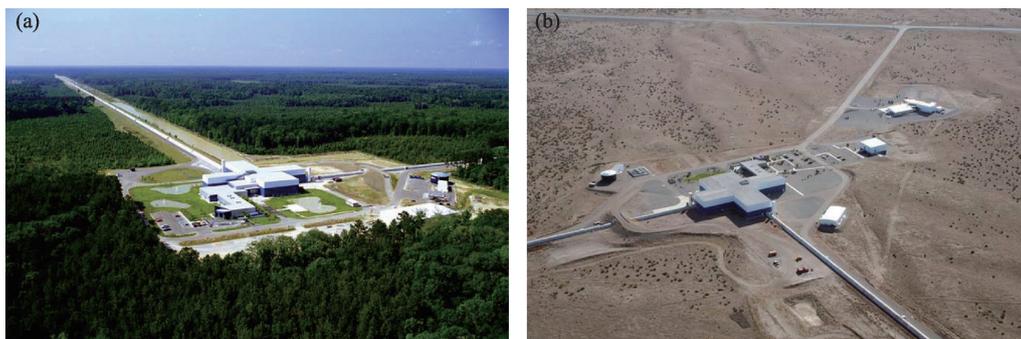


图11 庞大的引力波探测器 (a)LIGO利文斯顿;(b)LIGO汉福德(图片来源:<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20150731d>)

而在2017年4月,全球300多位科学家又利用位于8个不同的望远镜连成一个虚拟的口径达到上万千米的望远镜,对我们银河系中心的黑洞和距离我们5500万光年的M87星系中心的黑洞进行了观测。经过将近两年的数据处理和分析,最终在2019年4月10日晚,在全球6个不同地方召开了新闻发布会,公布了星系M87中心黑洞的第一张照片。这是人类在等待了几十年之后,终于第一次看到了神秘黑洞的真面目^⑨。

尽管如此,黑洞还是充满了众多的神秘之感。爱因斯坦说:“物理学家的无上考验在于达到那些普适性的基本规律,再从它演绎出宇宙。”人类观察

银河已经经过了亘古的岁月,但了解到银河最亮的部分究竟是什么,才是近几十年来才发生的事。为什么要探索黑洞,不同的学者会给出不同的答案。甚至从不同的方面看待,都会得到不同的初衷,但是我们能给出最为恳切的答案,也许可以用英国探险家乔治·马路里的一句话来简括。基础科学不会失去代表人类本质的向往,无他,“因为山在那里”。

参考文献

- ① A. Einstein, *Annalen Phys.* 49, 769 (1916) [*Annalen Phys.* 14, 517 (2005)]
- ② D. Finkelstein, *Phys. Rev.* 1958, **110**, 965.
- ③ W. Israel, *Phys. Rev.* 164, 1776 (1967)
- ④ B. Carter, *Phys. Rev. Lett.* 26, 331 (1971)
- ⑤ D. C. Robinson, *Phys. Rev. Lett.* 34, 905 (1975)
- ⑥ K. Schwarzschild, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.)* 1916, **1916**, 189 [physics/9905030].
- ⑦ J. R. Oppenheimer and G. M. Volkoff, *Phys. Rev.* 55, 374 (1939)
- ⑧ R. P. Kerr, *Phys. Rev. Lett.* 11, 237 (1963)
- ⑨ Genzel, R., Eckart, A., Ott, T. and Eisenhauer, F, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 291-234, 219 (1997)
- ⑩ Ghez A. M., Morris M., Becklin E. E., Tanner A. and Kremenek T. 2000 *Natur* 407, 349
- ⑪ Bowyer, S., Byram, E. T., Chubb, T. A., & Friedman, H. 1965, *Sci-*

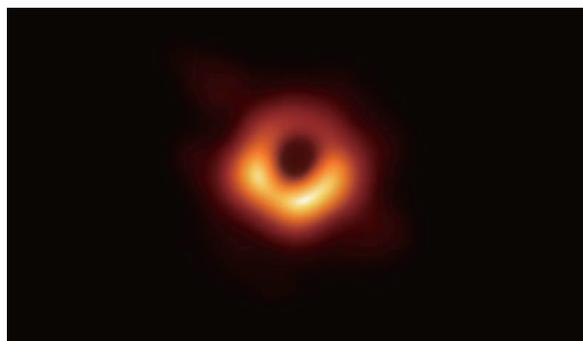


图12 M87星系中心的黑洞(图片来源:<https://eventhorizontelescope.org/>)

- ence, 147, 394
- ⑫ Reid, M. J., McClintock, J. E., Narayan, R., et al. 2011, *ApJ*, 742, 83
- ⑬ Orosz, J. A., McClintock, J. E., Aufdenberg, J. P., et al. 2011, *ApJ*, 742, 84
- ⑭ R. A. Remillard and J. E. McClintock, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 44, 49 (2006) [astro-ph/0606352]
- ⑮ J. Kormendy and D. Richstone, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 33, 581 (1995)
- ⑯ X.-B. Wu et al., *Nature* 518, 512 (2015)
- ⑰ M. Volonteri, *Astron. Astrophys. Rev.* 2010, **18**, 279 [arXiv:1003.4404 [astro-ph.CO]]
- ⑱ B. P. Abbott et al. [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016) [arXiv:1602.03837 [gr-qc]]
- ⑲ K. Akiyama et al. [Event Horizon Telescope Collaboration], *Astrophys. J.* 875, L1 (2019)



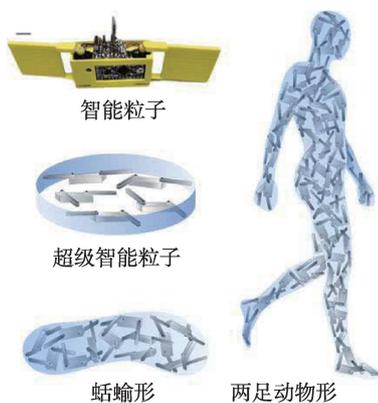
科苑快讯

用机器人组装机器人

对于一直渴望参与大事业的那些无助的小机器人来说,这是个好消息。研究人员发现了一个用机器人制造机器人的方法,虽然单个部件不能自行移动,但是组装的机器人却可以四处移动。

为了创造这个机器人部落,研究人员设计了几台大约和 iPhone 差不多大小的机器,叫做“智能粒子 (smarticles)”——smart particle 的缩写——可以上下摆动他们的小胳膊,却不能自行从一个地方移动到另一个地方。他们把 5 个智能粒子放在一个塑料环中。这组被科学家称为“超级智能粒子 (supersmarticles)”的机器人,在独立的智能粒子互相碰撞时,可以自行朝任意方向移动。

研究组随后创造了一种算法,允许超级智能粒子作为一个群体朝光源移动。每个智能粒子都装有光传感器,使它们在光线太亮时能够停止移动。当前面最接近灯泡的机器人停止移动时,那些在前面机器人阴影下的后面的机器人会不断摆动手臂,互相碰撞,它们最终会将整个群体推向光源。研究人员在《科学



• 机器人学》(*Science Robotics*)上做了报告。

研究人员表示,理解这些智能粒子在没有中心控制源的情况下一起移动的方式,将有助于科学家设计出复杂的机器人系统,即使其中一个部件损坏,整个系统仍能正常工作——有朝一日甚至可以用许多这样独立的微小部件制造类人机器人。

(高凌云编译自 2019 年 9 月 18 日 www.sciencemag.org)