

· 科技评述:2020年诺贝尔奖评述 ·

银河系中心黑洞及其物理意义

王建民*

中国科学院高能物理研究所,北京 100049

2020年10月6日瑞典诺贝尔奖委员会宣布,英国牛津大学 Penrose R. 教授,德国马普地外物理研究所 Genzel R. 教授和美国加州大学洛杉矶分校 Ghez A. 教授。因对黑洞研究分享本年度诺贝尔物理学奖。其中表彰 Penrose 教授证明了黑洞是广义相对论的必然结果;而 Genzel 教授和 Ghez 教授在银河系中心发现超大质量致密天体(即银河系中心的超大质量黑洞)。物理学家和天文学家均认为这是名至实归。新闻发布会上诺贝尔物理学奖评委会主席戴维·哈维兰德谈到“今年获奖者的发现为研究致密和超大质量天体开辟了新天地。但这些奇特的物体仍然提出了许多有待进一步解答的问题,并激发未来的研究”。天文学家认为大质量黑洞研究正处于方兴未艾的初创阶段,关于它们在宇宙中如何形成与演化以及在宇宙演化中的重要作用等重大问题的探索才刚刚拉开帷幕。

广义相对论是爱因斯坦在1915年创立的全新引力理论。他在等效原理的基础上,通过将引力几何化建立引力场方程,使牛顿力学体系发生了革命性变化。与牛顿时空观完全不同,广义相对论产生了三大革命性预言:黑洞、宇宙学动力学和引力波。



图1 三位诺贝尔奖获得者,左起 Penrose R., 中为 Genzel R., 右为 Ghez A.。



王建民 博士,中国科学院高能物理研究所研究员,国家杰出青年科学基金获得者,入选中国科学院“百人计划”。长期从事超大质量黑洞和类星体的理论与观测研究,通过反响映射测量其质量和角动量;并结合光学干涉观测,提出了几何距离测量方法及哈勃常数;大质量双黑洞观测特征、轨道参数和低频引力波性质检验。曾主持国家自然科学基金重大项目“超大质量黑洞的反响映射观测与理论”,2020年获得第四届中国天文学会黄润乾天体物理学奖。

宇宙加速膨胀现象已经被发现,三位领衔天文学家 Perlmutter S.、Riess A. 和 Schmidt B. 因此于2011年获得了诺贝尔物理学奖;LIGO合作组于2015年首次探测到引力波,Weiss R.、Barish B. 和 Thorne K. 三位教授获得了2017年度物理学奖;令人振奋的是作为天文学主要研究方向的黑洞形成与银河系中心大质量黑洞观测又获得2020年度物理学奖。这些里程碑式的发现和进展极大地鼓舞着人们继续探索宇宙之谜。然而,在探索宇宙的道路上,对大质量黑洞研究充满了挑战和艰辛。

受1963年 Schmidt M. 类星体发现的启发, Penrose 开始考虑黑洞形成问题,并于1964年底完成奇点定理证明^[1],揭示出黑洞是广义相对论的必然结果。这是对爱因斯坦发表引力场方程之后广义相对论中最重要的贡献。前苏联著名天体物理学家 Zel'dovich Y. 教授和美国康奈尔大学 Salpeter E. 教授在类星体发现之后不到一年的时间里,就提出超大质量黑洞存在于星系中心,吸积周围气体才释放出大量能量,形成类星体。在河外星系观测启发下,一个自然的问题是银河系中心是否存在黑洞?虽然早在百年前哈佛大学 Shapley H. 教授就已经确立了银河系中心位置。但是要精密检测这个位置,首先需要克服三大困难:(1)通过红外观测避免在光子穿越中心区域所经历的十分严重的气体 and 尘

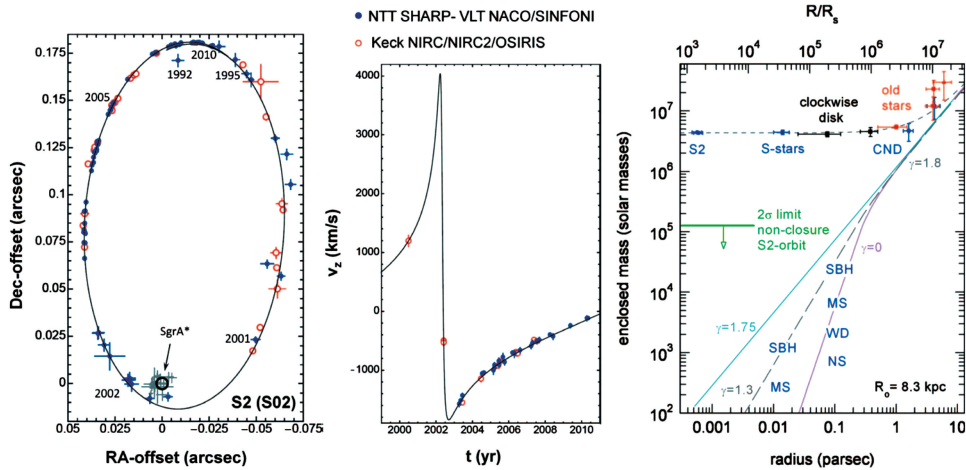


图 2 左图为周期最短的恒星 S2 轨道; 中图为该恒星投影速度随轨道变化; 右图为随着空间分辨率的提高, 分辨半径以内的天体质量不再发生变化, 取自文献^[4]。

埃消光及吸收; (2) 需要高空间分辨率的观测设备, 即大口径望远镜; (3) 必须消除或者极大减弱地球大气扰动的影响, 然后才能观测中心区域的物质分布和时空。银河系中心的观测研究大致经历了五个主要阶段: (1) 中心气体动力学观测, 在 1970 年代美国 Berkeley 团队发现银心气体的运动速度很快, 高达 200 km/s, 意味着大质量引力势的存在。(2) 1990 年后, 德国马普地外物理研究所 Genzel 团队利用欧洲南方天文台的 3.5 米 NTT (新技术望远镜) 获得进展, 他们发现中心恒星速度弥散满足 $v \propto R^{-1/2}$, 进一步观测证明了大质量点状引力势的存在^[2]。(3) 稍后几年, 美国天文学家 Ghez A. 利用 10 米 Keck 望远镜通过光斑干涉技术分辨出银心存在若干个恒星^[3]。(4) 从 2000 年后, Keck 装配了自适应光学系统之后, 大气扰动得到了极大改善, 能够清晰分辨并测量出恒星轨道。由于已知的周期最短的 S2 恒星为 16 年, 从 1995 年开始直到 2020 年为止, 大约经历了 2 个轨道周期, 对轨道的精确测量获得了精度在 5% 的可靠黑洞质量 $M = 4.3 \pm 0.20 \pm 0.30 \times 10^6 M_{\odot}$ 。在能够空间分辨的最小半径内, 即在 125 个日地距离内的密度为 $5 \times 10^{15} M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ ^[4], 在已知的大尺度天体中如此高的密度只能是黑洞, 各种如此高密度的星团都会在很短的时间内塌缩成而变成黑洞。(5) 2018 年马普地外物理所 Genzel 团队花费大约 8 000 万欧元成功研制出 GRAVITY 并利用这台设备装配在欧洲南方天文台甚大望远镜干涉阵列 (VLTI) 上, 精确测量了 S2 光谱的引力红移为 6.7×10^{-4} (相当于速度为 200 km/s)^[5], 更为可贵的是还高精度测量了 S2 轨道的 Schwarzschild

进动速度为 $\delta\mathcal{O} = 12' / \text{周期}$ ^[6]。比太阳系水星进动幅度 $43'' / \text{世纪}$ 大 100 倍。这两项观测毫无争议地证实了黑洞存在及其广义相对论效应。第五阶段的工作最终促成了这个崇高荣誉。特别值得注意的是, 目前尚未确定银河系中心是否有还有质量比低于大黑洞 10^{-3} 的小黑洞, 组成一个引力束缚的双黑洞系统。如果存在, 那么银河系中心就会变成理想的引力波实验室。时下有关理论研究是一个热点课题。

Penrose R. 教授专长于理论物理, 早年在剑桥大学受过系统和良好的数学训练, 做出过很多重要工作, 例如提出如何提取黑洞转动动能形成高度相对论喷流的 Penrose 过程, 这是一个新的能源机制, 目前成为类星体、伽马射线爆发等天体的标准模型。Genzel R. 教授在德国 Bonn 大学获得博士学位, 之后在美国加州大学 Berkeley 分校从事博士后研究, 开始转移到银河系中心气体动力学研究。他还从事高红移星系形成与演化等重大科学问题研究。他在很长一段时期担任马普地外物理研究所的所长, 负责红外观测团队。Ghez A. 教授早年毕业于美国麻省理工学院物理系, 在加州理工学院获得博士学位, 早年从事光斑干涉研究分辨银河系中心恒星, 获得突破性进展。Genzel 和 Ghez 在均为仪器设计和观测方面均是行家里手, 他们也都具有长期坚持不懈的专注品质, 造就了今天辉煌的学术成就。

由于我国缺乏大型观测设备, 尚无人从事银河系中心黑洞的恒星轨道观测研究。但是我国拥有大型射电望远镜, 而且已经加入国际长极限干涉阵列

网,上海天文台的沈志强研究员团队曾经取得过阶段性的重要成果,测得过大约 10 倍史瓦西半径处的射电辐射性质。我国目前是 EHT(Event Horizon Telescope)成员,正在积极开展银河系中心黑洞射电观测研究。但成为这个领域的领导者尚需时日,那时需要中国拥有自己的大型望远镜。

大质量黑洞普遍存在于河外星系之中,对星系的形成与演化具有关键作用。在星系并合中,大质量双黑洞如何形成与演化?它们产生的低频引力波辐射有待发现和观测检验,大质量黑洞在宇宙早期如何形成和演化?在宇宙再电离过程中扮演何种角色?我国学者这个研究领域人数众多,他们分布在四大天文台等研究单位和大约 10~20 个大学内,正式研究人员可能在百人以上。我国学者发表了大量研究成果,但原创性成果有待加强。我国自然科学基金委去年前瞻性地部署了一个重大项目“超大质量黑洞的反响映射观测与理论研究”。其科学目标是测量河外超大质量黑洞质量以及几何距离、研究大质量双黑洞观测特征及其轨道参数。这将使我们

能够精确测量宇宙膨胀历史以及检验纳赫兹引力波观测性质。我们期待着中国学者取得更多原创性成果。

参 考 文 献

- [1] Penrose R. Gravitational collapse and space-time singularities. *Physical Review Letters*, 1965, 14(3): 57.
- [2] Eckart A, Genzel R. Stellar proper motions in the central 0.1pc of the Galaxy. *MNRAS*, 1997, 284: 576—598.
- [3] Ghez AM, Klein BL, Morris M, et al. High proper-motion stars in the vicinity of sagittarius A *: evidence for a supermassive black hole at the center of our galaxy. *The Astrophysical Journal*, 1998.
- [4] Genzel R, Eisenhauer F, Gillessen S. The galactic center massive black hole and nuclear star cluster. *Reviews of Modern Physics*, 2010, 82(4): 3121—3195.
- [5] Gravity Collaboration. Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the galactic centre massive black hole. *Astronomy and Astrophysics*, 2018, 615: L15
- [6] Gravity Collaboration. Detection of the schwarzschild precession in the orbit of the star S2 near the galactic centre massive black hole. *Astronomy and Astrophysics*, 2020, 636: L5

The Supermassive Black Hole in the Galactic Center and Its Implications

Wang Jianmin*

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

(责任编辑 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: wangjm@ihep.ac.cn