

银河系中心超大质量黑洞的探索历程*

李志远[†]

(南京大学天文与空间科学学院 南京 210023)

2020-12-14收到

[†] email: lizy@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210103

Milestones in the search for the supermassive black hole in our Galactic center

LI Zhi-Yuan[†]

(School of Astronomy & Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

摘要 经过逾半个世纪的探索,天文学家确认在我们银河系的中心存在一个4百万倍太阳质量的致密天体,很可能是爱因斯坦广义相对论所预言的黑洞。文章简要回顾了探索这个大质量致密天体过程中的若干里程碑。

关键词 广义相对论, 银河系中心, 超大质量黑洞

Abstract Einstein's theory of general relativity predicts the existence of black holes in the universe. It is now established that a compact object of four million solar masses resides at the very center of our Milky Way galaxy, which is considered as the most convincing case of an astrophysical black hole. This article aims to highlight some of the milestones toward the discovery of this massive compact object.

Keywords general relativity, Galactic center, supermassive black hole

1 引言

2020年10月6日,瑞典皇家科学院宣布,本年度的诺贝尔物理学奖授予三位在黑洞研究领域作出了杰出贡献的科学家,包括:获得奖项一半的英国理论物理学家罗杰·彭罗斯(Roger Penrose),他证明了黑洞形成是广义相对论的坚实预言;分享奖项另一半的德国天文学家莱因哈德·根泽尔(Reinhard Genzel)和美国天文学家安德里亚·格兹(Andrea Ghez),他们独立发现了银河系中心存在一个超大质量致密天体。文章将聚焦银河系中心(下文简称银心)超大质量致密天体(极可能是广义相对论所预言的黑洞)的发现,简要回顾这一逾半个世纪的探索历程中的一些重要里程碑。

2 类星体的启示

第二次世界大战结束之后,天文学研究重新回到迅速发展的轨道上来。二战过程中基于军事用途发展起来的大量先进技术被英美等发达国家以极低的成本引入到天文观测上来,这其中便包括由雷达技术发展而来的射电天文望远镜(其他例子包括由火箭技术催生的空间天文学、由夜视探测技术催生的红外天文学等)。1950年代,位于英国剑桥的Mullard射电天文台开展了米波段的北天球巡天,探测到了数百个明亮射电源,并编制了著名的3C射电源表^[1]。为了理解这些射电源的本质,熟悉可见光波段的传统天文学家与射电天文学家联手,力图寻找这些射电源在光学波段的对应体。很快,人们便发现这些射电源大多具有致密的对应体,它们在光学图像上的轮廓与恒

* 国家重点研发计划(2017YFA0402703)资助项目

星类似，因而得名“类星体”(Quasi-stellar object, 简称 Quasar)。

1960年，美国卡内基天文台的桑德奇(Allan Sandage)利用帕洛马山上口径200英寸的海尔望远镜获取了射电源3C48的光学光谱。出乎意料的是，3C48的光谱呈现了与彼时人们所熟知的恒星光谱很不一致的特征，特别是光谱中存在若干显著的发射线，但落在了完全陌生的波长上。破译这些奇异的发射线成为理解类星体本质的关键。1963年初，桑德奇在卡内基天文台的同事、荷兰裔天文学家施密特(Martin Schmidt)获取了类星体3C273的光谱。这一光谱中也存在陌生位置上的若干发射线，却又有别于3C48中发射线的波长。苦苦思索后的灵光闪现使施密特意识到，这些发射线实际上是氢原子的巴耳末线系，只不过它们在光谱中的位置以相同的比例往波长更长的方向移动了(即“红移”)^[2]。发射线位置的疑难于是迎刃而解。随即，在更多类星体光谱中证认了红移的巴耳末线系以及其他原子的跃迁发射线，尽管不同类星体呈现的红移量各不相同。

最初，天文学家对类星体的红移提出了三种可能的解释：(1)类星体是在本地宇宙中快速移动的恒星，其红移是多普勒效应；(2)引力红移；(3)类星体是遥远距离上的天体，其红移是宇宙膨胀效应。随着类星体观测资料的快速增加，多数天文学家对第三种解释达成了共识，即类星体是遥远距离上的天体。由此立即带来一个惊人的推论：类星体的本征光度达到了银河系整个星系总光度的上百倍甚至更高！

类星体这一超乎寻常的光度要求一个极强且稳定的能源，由此带来了新的疑难并吸引了众多理论学家的注意。其中，美国天体物理学家Edward Salpeter和前苏联物理学家Yakov Zel'dovich以深邃的洞察力与过人的物理直觉分别独立地提出了一个假想：类星体的能源是一个大质量坍缩天体，巨大引力使得周围的介质被源源不断地吸引下落到该天体上，在此过程中引力势能被有效转化为介质的动能与内能，介质迅速升温并产生大量的热辐射，使其即便在遥远的距离上也能被探测到^[3, 4]。值得指出的是，这一后来成为类星体标准理论的假想在问世之初并未受到天

文学家的足够重视，主要原因是该理论的核心——大质量坍缩天体，其在自然界的存在性并未被人们普遍接受。幸运的是，仍有不少物理学家受到了类星体能源问题的启发，彭罗斯便是其中之一，他由此考虑了广义相对论所预言黑洞的形成问题，并率先证明了在相当宽泛的初始条件下大质量天体可以通过坍缩形成黑洞^[5]。

到了1970年前后，类星体由大质量坍缩天体供能的物理图像逐渐成为多数研究者的共识。这一模型的确立在一定程度上得益于若干其他领域的进展：(1)美国物理学家惠勒(John Wheeler)与他的同事们于数年前发明并大力推广了“黑洞”的概念；(2)英国射电天文学家Jocelyn Bell和休伊什(Antony Hewish)于1967年发现了脉冲星，即高速自转的中子星；(3)1970年发射的史上第一颗X射线天文卫星“Uhuru”(该卫星项目的领导者、美国天体物理学家贾科尼(Riccardo Giacconi)因为在宇宙X射线探测上的开创性贡献分享了2002年的诺贝尔物理学奖)，对位于天鹅座方向的强X射线源Cyg X-1的观测，有力地表明该源是一个双星系统，其中一个“看不见”的天体质量显著超过了中子星质量上限(约3倍太阳质量)，因此极可能是个恒星级黑洞。脉冲星与X射线双星的发现促使天文学家认识到，理论物理学家预言的致密天体真实存在于宇宙中。因此，越来越多的天文学家转而严肃地考虑位于星系中心的大质量黑洞吸积周围介质形成类星体的物理图像。其中，英国理论天体物理学家Donald Lynden-Bell根据绝大多数类星体位于宇宙学距离上这一统计事实，提出了富有洞察力的假想：本地宇宙中普遍存在着“熄灭了的类星体”(dead quasars)，即质量吸积率极大降低了的大质量黑洞^[6]；他和另一位英国理论天体物理学家Martin Rees进而提出，在我们银河系的中心也存在一个这样的大质量黑洞，并对其可观测性质作出了定量的预言^[7]。

对银心黑洞的探索由此正式拉开了帷幕，接下来将由天文学家登场大展拳脚，他们的工作主要沿着两条路线进行：一是探测Lynden-Bell和Rees所预言的银心致密射电源；二是寻找被约束在银心黑洞引力势阱里的介质或恒星的运动学效应。

3 来自银心的脉动——射电源 Sagittarius A* 的发现

彼时，天文学家已基本确定了银河系中心在天球上的方位，大约位于人马座与天蝎座相接的天区。弄清楚这一点实际上并不容易，这是因为，从银心发出的电磁波在传播到地球的途中无可避免地要穿过大量星际介质，星际介质对电磁波的吸收与散射作用(统称“消光”)使得可见光波段上的信息完全被屏蔽掉了(实际上，来自银心的波长在1 nm以上的X射线与紫外光都会被完全屏蔽)。如此一来，用传统的光学观测手段就无法判断银心的准确位置。带来突破的仍然是射电望远镜。1951年，澳大利亚天文学家 Jack Piddington 和 Harry Minnett 利用一架工作在1210 MHz频段上的18英尺射电望远镜探测到了来自人马座方向的一个强射电源^[8]。3年后，该源又在400 MHz频段上被探测到^[9]，并被命名为人马座(Sagittarius)A(即该星座方向的头号射电源)，简称为 Sgr A。随着射电望远镜角分辨率的进一步提升，Sgr A 被进一步解构为两个独立的空间成分，Sgr A East 和 Sgr A West。今天一般认为，Sgr A East 是一个超新星遗迹，实际位于距离银心黑洞约10—20光年的距离上；Sgr A West 则是位于银心黑洞数光年内的一个电离氢区，主要由三股处于高度电离状态的气体环流组成(图1)。

到了1960年代，由英国天文学家赖尔(Martin Ryle)等发展的射电综合孔径技术(赖尔凭此贡献与前述脉冲星发现者之一休伊什共同分享了1974年的诺贝尔物理学奖)，在世界范围内得到了积极的应用。天文学家从此在射电波段上实现了亚角秒级的角分辨率(正比于波长而反比于望远镜有效口径)，事实证明，这将成为探测银心黑洞电磁对应体的关键。1974年，两位美国天文学家 Bruce Balick 和 Robert Brown，利用位于西弗吉尼亚州 Green Bank 和 Huntersville 两地的射电望远镜构造了一个基线达35 km的干涉阵(此即为著

名的美国国家射电天文台射电干涉阵列甚大阵(Very Large Array)的雏形)，在11 cm和3.7 cm两个波段上分别达到了0.7角秒和0.3角秒的极佳分辨率。当 Balick 和 Brown 将此干涉阵瞄准 Sgr A 时，他们惊喜地发现，一个延展不超过1角秒的致密射电源在 Sgr A West 中呈现出来，位置恰在三股气体环流中间。在报告此发现的论文中，Balick 和 Brown 写到^[10]：“这一亚角秒结构在位置上重合于银河系最中央的1秒差距(秒差距是天文学常用长度单位，约等于3.26光年或日地距离的20万倍)，强烈地表明了此源与银河系中心的物理联系(实际上，它定义了银河系的中心)”。Brown 为这个射电源取名 Sagittarius A* (简称 Sgr A*)，这里的星号是受到了原子物理学中对激发态原子命名的启发，Brown 和其他一些天文学家当时认为，Sgr A West 中的电离气体正是被 Sgr A* 激发产生的^[11]。

Sgr A* 的发现立即引起了研究者的强烈关注。首先需要明确的问题是，是否确如 Balick 和 Brown 所判断的，Sgr A* 严格位于银河系的中心？对这个射电源的长时间跟踪观测给出了肯定的答案，因为它在天空中的轨迹基本反映了太阳在银河系盘面上围绕银心的公转^[12]，就好比地球自转造成日月星辰东升西落的轨迹。最近发表的测量结果表明^[13]，在扣除了太阳公转运动效应后，Sgr A* 在天球上的二维投影运动速度为：沿

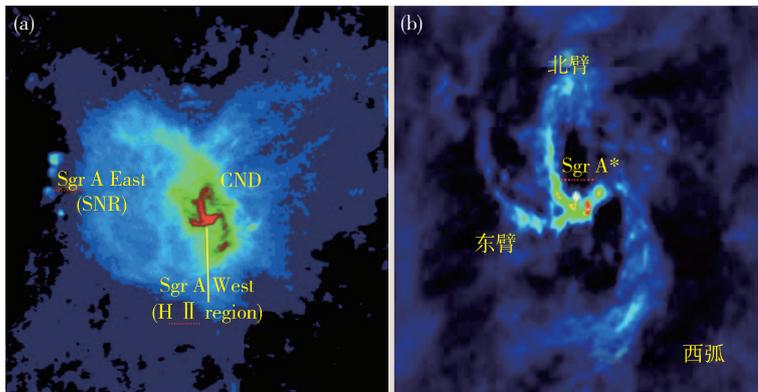


图1 (a)银心射电源 Sgr A 示意图。在高分辨率射电图像里，Sgr A 被解析为 Sgr A East 和 Sgr A west 两个不同的空间成分；(b) Sgr A West 内部结构示意图。银心黑洞 Sgr A*(白色亮点)位于 Sgr A West 的三条气体环流(东臂、北臂和西弧)中间

着银盘转动方向 -0.58 ± 2.23 km/s, 指向北银极方向 -0.85 ± 2.23 km/s。换言之, 在低于1 km/s的水平上Sgr A*是固定不动的, 可以认为它就是银河系的运动学中心。同时, Sgr A*的本征光度很低, 如此看来, Sgr A*很可能正是Lynden-Bell和Rees所预言的熄灭了的类星体!

对Sgr A*跟踪观测的另一个重要发现是, 它的射电辐射强度在不同时标上存在着显著变化^[14]。进入21世纪以后, 随着近红外波段和X射线波段观测的角分辨率也实现了亚角秒级水平, Sgr A*在这些更短波长上的辐射也相继被探测到了。人们发现, Sgr A*在射电、红外和X射线波段都存在着“耀变”的现象, 其流量能在短短数分钟时间内从宁静状态上升数倍乃至上百倍然后又快速回落至宁静状态^[15, 16]。假设产生耀变区域的物理尺度小于光在耀变时标内的传播距离(否则此区域内不同位置的辐射没有因果联系, 任意时刻的流量变化倾向于互相抵消, 总流量将不会有显著变化), 简单计算表明, 此区域小于1个天文单位(即日地平均距离, 约等于 1.5×10^8 km), 接近一个数百万太阳质量黑洞的施瓦西半径。今天一般认为, Sgr A*的耀变辐射来自于黑洞视界附近强磁场中的高能电子的同步加速辐射与来自于康普顿散射, 但产生这些高能电子的物理机制仍未有定论。

毫米波段的高分辨率观测结果对Sgr A*的物理尺度给出了更直接的限制。特别需要指出的是, 尽管射电干涉阵的角分辨率原则上只取决于波长与基线长度, 但Sgr A*在图像上的像斑大小还严重依赖于一个物理效应: 从银心向太阳系传播过程中, 银盘上的星际介质会对电磁波产生散射, 其净效果是视像被放大了, 其大小反比于波长的平方。因此, 对Sgr A*而言, 只有在毫米波段上散射效应才不显著。目前已公开发表的最佳限制来自1.7 mm波段, 扣除了散射效应后, Sgr A*的实际像斑大小不超过37微角秒, 在银心距离上(约8100秒差距), 这相当于不超过0.3个天文单位的物理区域^[17]。

4 与“暗”质量共舞的恒星

如前所述, 确认银心黑洞存在的另一种(也许更直接的)思路是, 通过测定试验粒子在强引力场

中的运动来实现对引力质量的精确测量。充当试验粒子的可以是黑洞周围的气体或者恒星。

早在1960—70年代, 天文学家已确知银心附近存在为数不少的恒星。最早的证据来自美国天文学家Eric Becklin和他的同事们在近红外波段对银心的观测^[18](Becklin凭借在红外天文学领域的先驱工作获得了2017年度美国天文学会Henry Norris Russell奖)。在近红外波段, 银盘上星际介质的消光作用相对于可见光波段大大减弱了, 以 $2.2\ \mu\text{m}$ 为例, 来自银心恒星的辐射有大约10%能够透过银盘与地球大气, 这足以使得Becklin成功地探测到银心最中央数光年区域内的十余颗恒星^[19]。这些恒星绝大部分是红巨星(red giant star)或渐近巨星支星(asymptotic giant branch star), 在演化序列上均属于晚年的恒星, 此时它们的半径膨胀得极大而表面温度相对较低, 因此红外光度非常高, 最容易被探测到。这些恒星中的部分成员同时还是射电脉泽源, 因此, 它们与Sgr A*一样会同时出现在红外与射电图像上。以它们的位置为基准点, 天文学家就能以极高的精度确定Sgr A*与其他恒星的相对位置, 这对确认Sgr A*与将要在下文登场的“暗”质量在空间上高度重合起到了关键的作用^[20]。

早期的银心红外波段观测还发现了本征波长在 $12.8\ \mu\text{m}$ 的一次电离氖原子(Ne^{I})的一条禁戒跃迁发射线, 其产生的位置与Sgr A West高度重合, 很可能就来自射电波段上探测到的三股电离气体环流。由于氖原子的一次电离能约为21.6 eV, 远高于电离氢所需的13.6 eV, 因此它的存在同样可以示踪电离气体。发射线的重要性在于, 示踪气体的运动可以通过多普勒效应呈现出来。事实上, 天文学家正是通过这条 Ne^{I} 发射线获得了银心引力质量的第一个强限制: 银心中央1秒差距范围内包含了大约4百万倍太阳质量^[21]。这一估算采用了简单的物理原理, 即气体粒子的运动由引力决定。上述数值已非常接近目前采用的银心黑洞质量, 但需要指出的是, 这只是一定程度上的巧合: 银心1秒差距内除了黑洞以外, 还包含了相当数量的恒星, 它们也对动力学质量有所贡献; 此

外, 气体的运动除了受到引力作用外, 还可能受到其他作用的影响(例如磁场、激波、湍流等), 这将对动力学质量的测量带来系统性的误差(在此为读者提供一个后验的事实: Sgr A West 的三股电离气体环流的运动, 实际上很好地符合银心黑洞引力主导下的开普勒运动轨迹^[22])。

相对而言, 恒星的运动不易受到引力以外的其他作用的影响, 是更理想的试验粒子。进入 1980 年代后, 随着红外探测器的灵敏度与有效视场的显著提升, 天文学家很快便将注意力转移到银心黑洞周围的恒星运动学效应, 通过红外光谱获得了恒星整体视向速度(本质上是测得的某谱线线心波长与其本征波长的差别)与速度弥散度(本质上是某谱线的线宽)的精确测量。假设这些恒星的运动完全由恒星分布范围以内的引力决定, 并且已达到了动力学平衡状态, 天文学家测得银心 0.1 秒差距(在银心距离上, 投影半径约为 2.5 角秒)以内分布着 2.5×10^6 太阳质量^[23]。这是一个比上述基于气体运动得到的引力质量要强很多的限制, 但仍不足以严格排除由大量恒星共同贡献的质量。

显而易见, 为了得到更强的银心质量密度的限制, 更高的空间分辨率是关键。进入 90 年代, 对银心的高分辨率红外观测迎来了重要突破, 这首先归功于引进了“散斑图像”技术的欧洲南方天文台的 3.5 m 口径新技术望远镜(New Technology Telescope)。这一技术能够有效地降低大气湍流引起的星像抖动, 在近红外波段实现衍射极限下的角分辨率。凭借这样的角分辨率, 德国天文学家 Andreas Eckart 和根泽尔率先测量了银心 0.015 秒差距(相当于投影半径 0.4 角秒)以内的引力质量, 并推断其对应的质量密度不低于 6.5×10^9 太阳质量/立方秒差距^[24]。这一质量密度(下限)实际上已远高于由正常恒星组成星团的质量密度, 但若耍较真的话, 仍然不能完全排除一个由成千上万颗恒星级黑洞(平均质量为太阳的数倍至数十倍)组成的“星团”。

然而, 每一帧有效“散斑图像”的获取要以极短的曝光时间为代价, 因此这种方法的效率较低并且只适用于最明亮的银心恒星。从 90 年代末开始,

“自适应光学”技术就取代了“散斑图像”技术成为获取近红外波段银心高分辨率图像的标准手段。顾名思义, “自适应光学”系统通过实时改正大气湍流抖动效应来获得衍射极限下的图像^[25]。尽管这一技术的雏形早在 1953 年便被提出, 但直至 1980 年代末才终于成功地应用到天文观测上。

进入 21 世纪, 银心恒星的观测迎来了又一个里程碑, 其标志是配备了自适应光学系统的 8—10 m 口径大型望远镜的投入使用, 获取衍射极限达到 0.05 角秒的图像成为了天文学家的常规操作。两个相互竞争而又相互促进的团队: 在根泽尔领导下的德国马普地外物理研究所(MPE)团队, 使用的是位于智利的欧洲南方天文台甚大望远镜(Very Large Telescope), 以及在格兹领导下的美国加州大学洛杉矶分校(UCLA)团队, 使用的是位于夏威夷的凯克望远镜(Keck Telescope), 他们将近红外波段的银心观测推向了一个新的高度。这些高分辨率观测在银心最中心区域探测到了越来越多的恒星, 对它们的光谱分析表明, 这些“新朋友”中的大部分是年轻的大质量恒星。其中, 有数十颗光谱型为 B 型的恒星出现在距离 Sgr A* 仅仅不到 0.2 光年的范围内, MPE 团队和 UCLA 团队分别为它们取名为 S-星团和 S0-星团

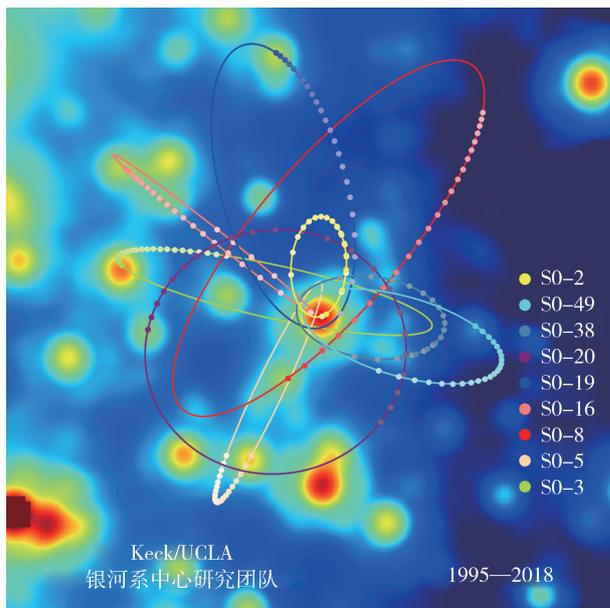


图 2 20 多年的跟踪监测显示了银心黑洞周围恒星的椭圆运动轨迹。这些椭圆轨迹有一个共同焦点, 位置与射电源 Sgr A* 高度吻合(取自 UCLA 银河系中心研究团队公开资料)

(这并非天文学家为同一类天体/天象取不同名字的孤例,这更彰显了两个团队的激烈竞争!)。

MPE团队和UCLA团队都意识到,原则上对S-星团的长期监测可以将它们在空间中的运动轨迹,包括二维投影位置、视向速度、二维投影速度乃至加速度都精确地测量出来,这无疑将对银心黑洞的引力效应给出最强的限制,并且这一限制将随着监测时间的积累变得越来越强。的确,在不到十年的时间里,MPE团队和UCLA团队便成功测量到了多颗S-星团恒星的运动轨迹^[26, 27],发现它们无一例外地符合椭圆曲线,并且这些椭圆有着一个共同的焦点,其位置与Sgr A*高度重合(图2)!这正是人们熟悉的引力约束下二体运动的开普勒定律(让我们暂时忽略广义相对论效应),由此可以很容易推算出位于焦点上的“暗”质量(这一质量与恒星质量相比要大得多,因此后者可以完全忽略)。值得一提的是,S星团中具有最短轨道周期的恒星——S2(或S02),它绕“暗”质量一周仅需要16年左右,从被发现至今已先后两次经过了近心点(最近一次是在2018年)^[28, 29],当时距椭圆焦点仅有120天文单位,这个距离也是引力质量分布范围的严格上限。迄今为止最精确的测量显示,位于椭圆焦点的引力质量为 $4.152(\pm 0.014) \times 10^6$ 太阳质量^[30]。令人惊叹的是,这一数值的相对误差已不到千分之五,由对银心距离估计的误差传递而来(将恒星轨道的投影角距换算成物理尺度,需要引进银心

距离这一参数)。

不难计算,S2轨道内质量密度的下限达到了惊人的 5×10^{15} 太阳质量/立方秒差距,这个数值已基本排除包括恒星级黑洞“星团”在内的任何已知物态组成的稳定结构。如果再进一步,利用引力质量与Sgr A*重合且后者的尺度小于0.3天文单位的这一事实,质量密度的下限将被提高到 1.5×10^{24} 太阳质量/立方秒差距,这个数值距离一个4百万倍太阳质量施瓦西黑洞的质量密度(1.7×10^{25} 太阳质量/立方秒差距)已相去不远。在这个意义上,银心存在着一个广义相对论所预言的黑洞成为令人信服的事实。

5 结语

今天,银河系中心乃至大多数星系的中心存在着一个超大质量黑洞已成为天文与天体物理学工作者的共识。回顾半个多世纪的探索历程,几代研究者展现了深邃的物理洞察力与高超的实验技巧,更有不朽的雄心与不懈的坚持。关于黑洞的研究无疑将继续对21世纪的天体物理学带来深刻的影响。

致谢 感谢加州大学洛杉矶分校Mark Morris教授、上海天文台袁峰研究员的有益讨论,以及南京大学天文与空间科学学院博士研究生侯美存对文稿的建议。

参考文献

- [1] Edge D O *et al.* *Memories of the Royal Astronomical Society*, 1959, 68: 37
- [2] Schmidt M. *Nature*, 1963, 197: 1040
- [3] Salpeter E E. *ApJ*, 1964, 140: 796
- [4] Zeldovich Y B. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1964, 155: 47
- [5] Penrose R. *Physical Review Letters*, 1965, 14: 57
- [6] Lynden-Bell D. *Nature*, 1969, 223: 690
- [7] Lynden-Bell D, Rees M J. *MNRAS*, 1971, 152: 461
- [8] Piddington J H, Minnett H C. *Aust. J. Sci. Res.*, 1951, A4: 495
- [9] McGee R X, Bolton J G. *Nature*, 1954, 173: 985
- [10] Balick B, Brown R L. *ApJ*, 1974, 194: 265
- [11] Brown R L. *ApJ*, 1982, 262: 110
- [12] Backer D C, Sramek R A. *ApJ*, 1982, 260: 512
- [13] Reid M J, Brunthaler A. *ApJ*, 2020, 892: 39
- [14] Brown R L, Lo K Y. *ApJ*, 1982, 253: 108
- [15] Baganoff F K *et al.* *Nature*, 2001, 413: 45
- [16] Genzel R *et al.* *Nature*, 2003, 425: 934
- [17] Doeleman S S *et al.* *Nature*, 2008, 455: 78
- [18] Becklin E E, Neugebauer G. *ApJ*, 1968, 151: 145
- [19] Becklin E E, Neugebauer G. *ApJ*, 1975, 200: L71
- [20] Reid M J, Brunthaler A. *ApJ*, 2004, 616: 872
- [21] Wollman E R *et al.* *ApJ*, 1976, 205: L5
- [22] Zhao J H *et al.* *ApJ*, 2009, 699: 186
- [23] McGinn M T *et al.* *ApJ*, 1989, 338: 824
- [24] Eckart A, Genzel R. *Nature*, 1996, 383: 415
- [25] Beckers J M. *ARA&A*, 1993, 31: 13
- [26] Ghez A M *et al.* *ApJ*, 2008, 689: 1044
- [27] Gillessen S *et al.* *ApJ*, 2009, 692: 1075
- [28] Gravity Collaboration. *A&A*, 2018, 615: L15
- [29] Do T *et al.* *Science*, 2019, 365: 664
- [30] Gravity Collaboration. *A&A*, 2019, 625: L10