

# 类星体宇宙学距离： 光学干涉测量

王建民<sup>1</sup> 宋盛雨央<sup>1</sup> 上官晋沂<sup>2</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所; 2. 德国马克斯·普朗克地外物理研究所)

灿烂的星空总能唤起人们各种遐想：浩瀚的宇宙到底有多浩渺？闪烁繁星如何镶嵌在这宇宙之中又如何运动？宇宙的几何形状如何？几千年来，从古老的最高智慧到现代最精密的仪器和设备都始终为回答这些带有明显哲学性质的自然科学命题付出着无限的热情和努力：正当快要接近答案时，它却又戏剧般地飘然而去，其中充满了从渴望、绝望到兴奋的螺旋式循环。本地测量与从微波背景得到宇宙膨胀率是两条完全不同的观测宇宙学之路。在这个令人激动的“精确宇宙学时代”，它们没有殊途同归，却乍现“哈勃常数危机”的严峻挑战。这是黎明前的黑暗吗？这一危机虽令人不安，却又是一种强大的动力。光学干涉技术提供了利用类星体高精度测量宇宙学距离的几何方法，可以有效将延伸至很高红移的宇宙之中。人们期待着利用这一新工具揭示宇宙动力学背后的基本物理规律。

距离测量是天文学研究中的一项基本但十分艰难的工作，特别是对宇宙学距离的测量直接决定了对宇宙几何和膨胀历史的测量。以直接的三角视差方法测量银河系内天体距离为基础，天文学家利用天体物理性质发明了多种测量方法。涉及不同距离尺度时，测距的方法也不尽相同，同时精度各异。天文学家由此建立了十分实用的“距离阶梯”。然而，因难于消除误差传递，导致其精度受到严重限制。在今天“精确宇宙学时代”传统方法已难于满足要求。本文主要介绍如何测量宇宙学距离，这是观测宇宙学的基本工作之一。

## 一、造父变星：最短的量天尺

1920年4月，美国天文学界发生了一次著名的大辩论，焦点之一是关于宇宙的结构和涡状星云的本质。曾任哈佛大学天文台台长的H. Shapley认为涡状星云是离我们不远的气体云，而整个宇宙是由一个单一的星系(银河系)组成，而时任台长的H. Curtis则推测涡状星云是遥远的恒星系统，而我们宇宙则是由大量这样的“岛宇宙”组成的。双方都提出了很多观测证据来支持自己的论点，但辩论最终仍未得到决定性的结论。如果能够测量出涡状星云与地球的距离，再把它与银河系的尺度比较，那么这个难题便能迎刃而解。这项工作最终由年轻的天文学家哈勃(E. Hubble)利用造父变星这一工具完成。“天外有天”作为超越哲学概念的观测事实被首次发现，是20世纪最伟大的天文发现，人类的视野也终于超越了自身居住的“银河系”。至此，河外天文和作为科学的宇宙学时代才到来。

造父变星是一类具有准确周期性光变的经典变星，是大质量恒星演化到晚期的特殊阶段因脉动而产生的现象，辐射光度高达一千到十万倍的太阳光度。20世纪初，哈佛大学天文台的李维特(H. Leavitt)在研究大小麦哲伦星云的照相底片时，找出了47个造父变星，并且发现它们的亮度和光变周期存在很强的正相关。由于这47个造父变星都在同样的星云中，它们与地球的距离都大致相同，因此造父变星的内禀光度也应当和光变周期成正比。这就是著名的造父变星周光关系，后来发展的恒星

结构理论可以完美地证明这个经验关系。对于其他的星云,如果能测出其中造父变星的光变周期,即可得到它的绝对光度,再结合观测到的光子流量,因依赖于距离,从而可实现距离测量。造父变星因此成为天文学家用来测距的“标准量天尺”。1924年,哈勃在威尔逊山天文台使用当时世界上最大的望远镜—Hooker望远镜观测了室女座星云(M31)和三角座星云(M33)中的造父变星,并测出它们的距离分别为90万光年和85万光年,这远远超出了银河系的尺度。由此确证,这些涡状星云其实是其他星系而非银河系的一部分。这一重要发现彻底改变了人类对宇宙结构和尺度的认知,使人类第一次认识到银河系外的天体。

然而,造父变星这一测距工具带来的震撼远不止于此。当哈勃利用造父变星测量更多河外星系的距离时,他发现几乎所有的星系都正在远离我们。星系的运动在观测中反映为光谱向其静止波长的红端或蓝端移动。这是由于天体远离或朝向我们运动时的多普勒效应造成的。天体远离我们的速度越快,红移越大<sup>①②</sup>。哈勃发现,距离我们越

远的星系退行速度越快,整个宇宙看起来正在膨胀。这彻底打破了爱因斯坦试图建立的宇宙的“静态模型”。“宇宙正在膨胀”这一诗境般的宇宙观,催生了“宇宙大爆炸”图景的诞生,彻底改变了人类对宇宙的认识。人类对宇宙学的研究由此拉开了帷幕。

把不同星系的距离和退行速度(或红移)画在一张图上就得到了著名的哈勃图。它反映的是在到我们不同距离处的宇宙的膨胀速度,即距离—红移关系。描述宇宙膨胀的重要参量是哈勃图中比例系数,如今称为哈勃常数,代表了宇宙当前的膨胀速度。“造父变星”在经历了90多年之后仍然是测量宇宙膨胀率的主要工具。在这个漫长的进程中经历了对造父变星观测性质更为细致和深刻的研究,例如认识到类别差异、不同波段性质差异以及对金属丰度的依赖等重要性质,使得测量精度不断提高<sup>③</sup>。著称于世的“哈勃望远镜”的主要任务就是确定“哈勃常数”。天文学家经过近十年的努力,花费了哈勃望远镜大量观测时间,测量出这个常数大约趋于 $72 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。这一持续长达半个世纪之久的难题由此得以平息,许多悖论得以解释。完成这一测

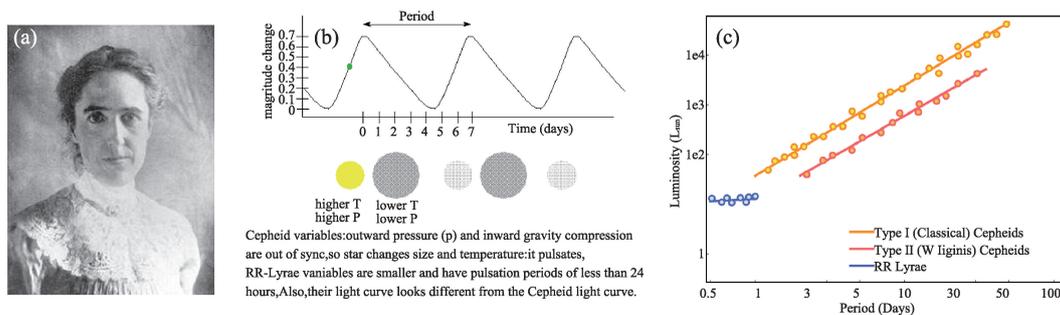


图1 (a)美国女天文学家H. Leavitt,在20世纪第1个10年发现了造父变星和周期-光度关系,奠定了宇宙学研究的观测工具;(b)周期-光度关系动画图;(c)存在两类造父变星,两者的相关性

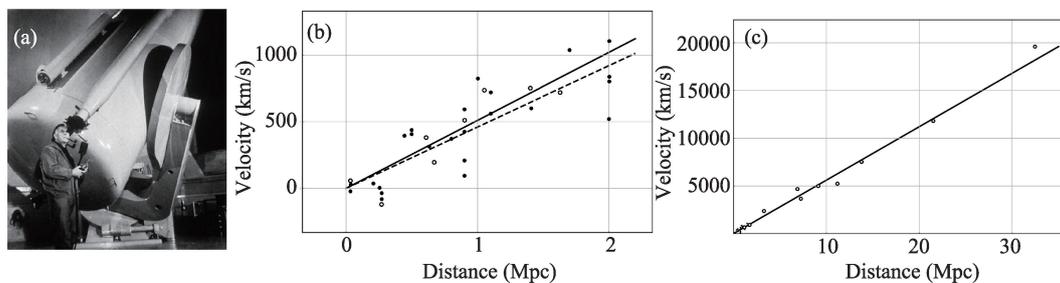


图2 天文学家哈勃正在进行观测(a),(b)和(c)是哈勃图1929版<sup>①</sup>和1931年版<sup>②</sup>,显示出哈勃定律在更大距离上同样成立

量的美国天文学家 W. Freedman, R. Kennicutt 和澳大利亚天文学家 J. Mould 三位教授共享 2000 年国际天文学联合会宇宙学最高大奖 Grube 奖。然而,随着精确宇宙学的到来,满怀欣喜和自信的宇宙学家却迎来了更为严重的危机。

一般来说单一造父变星的测量精度大约在 10% 左右,依赖于观测波段以及金属丰度等因素。虽然“造父变星”只能测量一亿光年以内的天体距离,它仍然是目前最为精确的量天尺,特别是在距离阶梯校准中起着“不可替代”的作用,也依然活跃在邻近宇宙学前沿。但毫无疑问,它已不能满足天文学家对宇宙结构和动力学的热切求知欲了。

## 二、Ia 型超新星: 完成了历史使命的距离阶梯?

一直以来,静态宇宙的观念在人们心中根深蒂固,以致爱因斯坦在他的引力场方程中加上了一个代表斥力的宇宙常数项来平衡引力,期望得到宇宙的一个静态解。哈勃定律的发现使爱因斯坦意识到了自己“一生中最大的错误”,于是将宇宙学常数驱逐了出去,但半个多世纪后它将以全新的面目回归。根据引力场方程的预言,宇宙膨胀的速度不是恒定不变的,物质之间的引力会使膨胀减速,而宇宙最终是会永远膨胀下去还是会重新收缩则取决于宇宙的平均物质密度是否达到临界密度。要了

解宇宙未来的命运,必须回溯宇宙的历史。好在光的传播需要时间,只要我们能观测到更远宇宙的距离与红移关系,就能了解宇宙的膨胀历史,进而预言未来。但是,在距离超过 1 亿光年外的星系中,造父变星就会因为太暗而无法被现有的设备观测到。要想丈量更大的尺度,就必需寻找更亮的标准烛光。

幸运的是,以著名的钱德拉塞卡(S. Chandrasekhar)白矮星质量极限为理论基础,A. Sandage 在 20 世纪 60 年代就认为 Ia 型超新星可以作为“标准烛光”。但是直到大约 30 年后,他的同事 M. Phillips 才发现标准化后的 Ia 型超新星方可作为精确的标准烛光使用,为测量更远的宇宙学距离打开了新大门。Ia 型超新星爆发前是密近双星中的一颗子星,在演化末期形成由碳、氧组成的白矮星。当它们从伴星吸积物质超过钱德拉塞卡极限(约为太阳质量的 1.44 倍)后,白矮星中由于泡利不相容原理而产生的电子简并压将不再能够抗衡引力,引起瞬间的塌缩和爆发。由于发生坍缩的临界质量是固定的,Ia 型超新星的光度基本接近,约为太阳光度的 100 亿倍,可以作为标准烛光测量数十亿光年的距离。1998 年,超新星宇宙学计划和高红移超新星搜寻两个团队公布了他们利用超新星测量的距离——红移关系,发现一定红移处的超新星比预计的更暗,换句话说,宇宙过去的膨胀速度比当今要慢,



图 3 (a) 印裔美国天体物理学家钱德拉塞卡教授,在赴英国剑桥大学的轮船上首次应用电子简并压讨论恒星结构发现了白矮星质量极限; (b)、(c) 为吸积白矮星超越此极限产生 Ia 型超新星艺术图,以及与其他类型的真实光谱。由于存在质量上限,经过 Phillips 标准化关系修正后,可以作为宇宙标准烛光测距,由此发现了宇宙加速膨胀



图4 宇宙加速膨胀的发现者(a);21年前超新星测量结果,距离模数测量显示出宇宙加速膨胀现象<sup>④⑤</sup>(b)

宇宙正在加速而非减速膨胀!这项发现进一步表明宇宙中存在着某种未知的斥力,称之为“暗能量”。两个团队的中 S. Perlmutter, B. Schmidt 和 A. Riess 也因该发现在 13 年后获得了诺贝尔物理学奖。

但是直到发现暗能量 20 年后的今天,人类对暗能量本质的认识仍无实质性进展。这个宇宙学项究竟是常数还是会随时间演化?暗能量的状态方程如何描述?它和宇宙中的其他物质是如何相互作用的?只有将距离——红移关系在更大的红移范围内测量得更为精确,才能将不同的理论预言予以甄别,发现新物理。但当红移大于 1 时, Ia 型超新星的数目变得极为稀少<sup>⑥</sup>,而且精度完全不足于测量出宇宙学性质;另外超新星的亮度还会受到星际介质消光的影响,这些因素都限制了超新星作为标准烛光的能力。在精确宇宙学时代,从新技术角度拓展测距工具对宇宙学研究极为重要。

### 三、哈勃常数危机:宇宙学新纪元的开始?

通过测量星系的退行速度与距离之比直接得到宇宙膨胀率。从哈勃时代至今,实验物理学史上从来没有一个常数的测量像哈勃常数这样用时之长、困难之大、争议之大。关键问题就在于距离的测量精度太低。哈勃最初测量的膨胀率高达  $500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,到现在的测量值大约  $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  左右。在长达 90 年的测量中,不同的测距方法得到了显著不同的哈勃常数。令人惊诧的是,尽管最初与最近值相差几乎一个量级,哈勃定律却仍然成立!

直到 2017 年,著名宇宙学家 W. Freedman 使用造父变星红外性质使测量精度达到了空前的 2%,人们才相信了通过造父变星和距离阶梯测量哈勃常数的可靠性。但同时,令人隐约不安的是,这一结果与微波背景辐射测量似乎有明显的差别。

宇宙大爆炸假说直接预言了爆炸之后的残留辐射,形成了如今观测到的温度大约 3K 的微波背景。它记录了宇宙从大爆炸仅 38 万年之后到现在的整个演化历史,因此对宇宙背景辐射的测量可以推算出宇宙的动力学过程,进而可以得到依赖于宇宙学模型的哈勃常数。从 20 世纪 90 年代的 COBE 卫星、21 世纪初的 WMAP 卫星,直到最新的 Planck 卫星的观测已经使宇宙学进入到“精确宇宙学时代”。从宇宙微波背景辐射测量得到的哈勃常数为  $H_0=68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。令人惊诧的是,它与造父变星测量结果差别高达测量误差的 4.4 倍。这成为当前宇宙学研究的重大疑难,被称为“哈勃常数危机”。表明从假设的初始条件推算的宇宙演化结果与本地测量难于一致<sup>⑦</sup>。这可能是由于本地测量时存在未知的干扰因素,也可能是标准宇宙学模型之外的某些未知过程所致,新物理似乎正在朦胧中出现。

在这样一个十字路口,天文学家亟需高精度的新工具把高低两端的宇宙膨胀率光滑连在一起。这个新工具应该既不依赖于传统工具需要的消光改正、标准化修正和距离阶梯,也不依赖于标准宇宙学模型,测量精度还要高于造父变星。日益严重的“哈勃常数危机”,意味着目前对高红移宇宙中的基本物理过程可能缺乏理解,同时低红移距离测量存在难以避免的误差。目前距离测量的精度和深

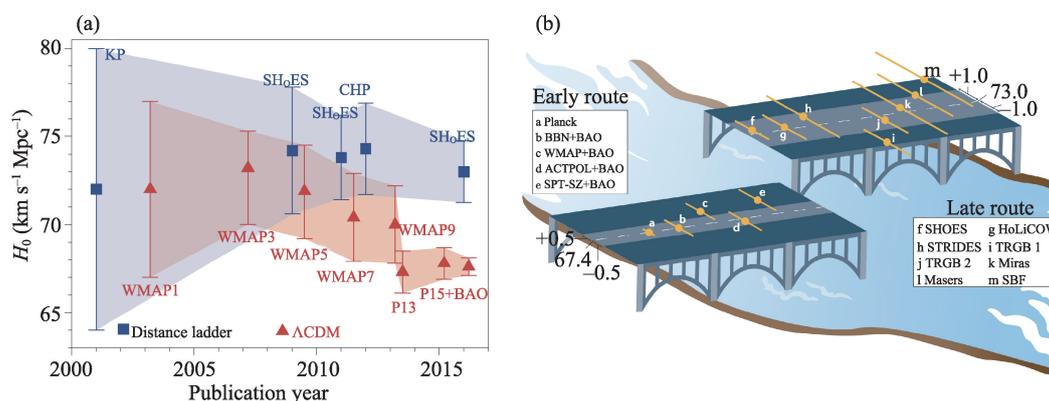


图5 (a)著名观测宇宙学家W. Freedman总结哈勃常数测量<sup>③</sup>,已出现令人不安的端倪,在随后的几年内迅速变成“哈勃常数危机”(b)取自<sup>④</sup>,两条不同的观测宇宙学之路无缘搭建过河之桥,凸显测量基础的深刻缺陷。然而,贯通宇宙之路十分艰难

度尚未达到对现有理论进行检验的要求,难以产生新理论来理解“暗能量”。在宇宙学距离上持续时间最长而且最亮的天体就只有类星体了,事实上,从类星体发现不久,天文学家就不断提出利用其奇特的性质用于宇宙学研究。但是,由于对类星体内秉性质缺乏充分了解,直到现在仍然处于艰难的探索之中。但随着高空间分辨率观测技术发展,干涉测量作为新工具已经初步显示了强大的能力。

#### 四、类星体距离:挑战与机遇

20世纪60年代是天文学史上的“井喷式”时期,四大发现奠定了现代天文研究大厦的基石。其中类星体于1963年由加州理工学院的M. Schmidt博士发现<sup>⑤</sup>。他用Wilson山天文台的Palomar5米望远镜拍摄3C273的光谱,它陌生的发射线曾令天文学家目瞪口呆。直到Schmidt把光谱的波长压缩了1.158,才发现所有谱线均可解释为氢原子的Balmer发射线。在当时,这是从未见过的大红移。在这四大发现中,只有类星体这一发现从未被理论家预言过。有关类星体发现曾经有一段有趣的历史,还有类星体证认工作也经历了一段漫长的发展,有兴趣者可以参阅何香涛教授撰写的有关文章<sup>⑥</sup>。这个巨大的红移意味着3C273的辐射功率高达 $10^{13}$ 倍太阳辐射功率,而快速光变表明辐射区域大约在光天量级。在如此之小辐射区域内辐射出比星系还亮百倍的能量,令人难以置信。类星体的红移本质与类

星体辐射能源机制立即成为天文学研究焦点。观测技术的快速发展极大地促进了类星体大样本的发现。包括美国斯隆计划在内的数字巡天项目到现在大约发现了近50万颗类星体,最高红移也达到了7.5左右。人们已经广泛意识到,类星体是宇宙中十分常见的天体。

图6给出了类星体的典型光谱。在诸多类型的天体中,类星体的光谱极容易证认和测量。其特点就是具有丰富的从光学到紫外波段的宽发射线,轮廓宽度高达 $10^3 \sim 10^4 \text{ km s}^{-1}$ 。而恒星的光谱吸收线宽度只有 $10 \text{ km s}^{-1}$ ,典型星系的光谱为 $100 \sim 200 \text{ km s}^{-1}$ 。这意味着在辐射区域存在着一个强大的引力势阱。基于3C273仅有的光谱特征,两位著名的理论天体物理学家—美国Salpeter教授和前苏联Z'eldovich教授很快就提出了超大质量黑洞吸积是类星体的能源机制,稍后剑桥大学Lynden-Bell教授定量研究了吸积辐射光度和能谱。在类星体能源研究中人们提出了数个模型,包括超新星等模型,而巨型黑洞吸积模型最终得到了一致公认,成为标准模型。这一过程经历了很长的一段时间,直到1984年著名理论天体物理学家Rees教授总结和评述了黑洞吸积模型的优点。然而,类星体的内部结构,特别是宽发射线辐射区的气体起源,到现在仍然是一个十分活跃的前沿课题。尽管如此,这些电离气体所携带的动力学信息已经为揭示黑洞的许多秘密提供了很多线索;更令人振奋的是,我们也可借助宽发

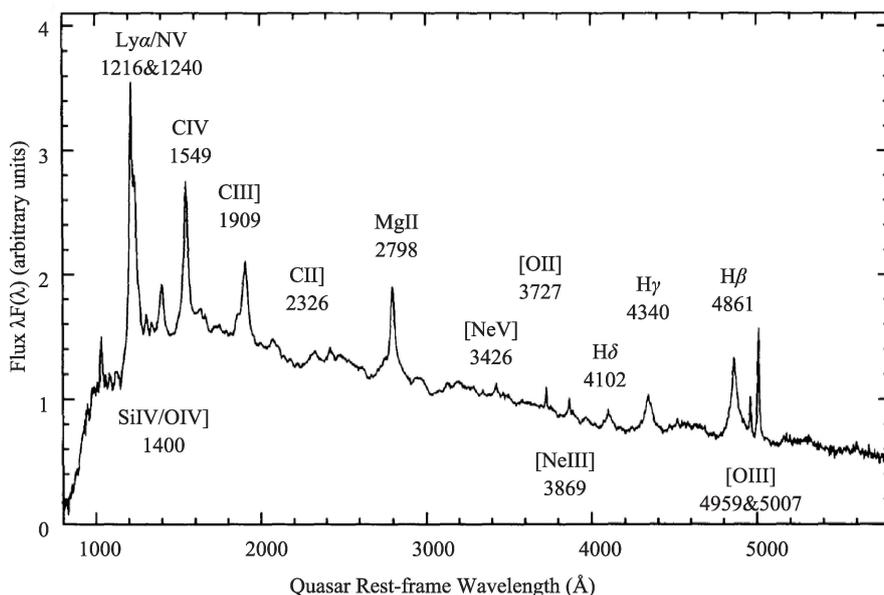


图6 类星体典型光谱。这些轮廓分明的发射线传递着类星体内部结构的丰富信息,特别是中心巨型黑洞的质量及其吸积率。这些宽发射线的辐射区域称为宽线区,其几何结构、尺度( $\Delta R$ )和动力学可由反响映射观测测量

射线区域的动力学与几何结构对宇宙膨胀动力学进行精确测量。

类星体一经发现即刻就被考虑用于宇宙学基本参数的测量。早年在利用类星体性质研究宇宙学的方案中有两类方法有较大的影响。在20世纪70年代,天文学家们,包括剑桥大学的Lynden-Bell, Burbige, Longair等著名教授提出了利用射电源的形态测量角距离,最好结果可以参考美国著名射电天文学家K. I. Kellerman<sup>①</sup>。由于各异的形态使得这类方法测量得十分粗糙,难于对宇宙学给出精确限制。另一项是利用光学紫外性质,其中有较大影响的是美国著名天文学家J. Baldwin发现的并以其名字命名的Baldwin效应,即紫外光谱中CIV $\lambda$  1549 Å发射线的等值宽度与紫外连续谱光度具有很强的相关性。由于等值宽度很容易测量,这个关系立刻被用于研究宇宙学参数<sup>②</sup>。Baldwin效应一度被认为是很有用的宇宙学工具,直到美国斯隆数字巡天计划获得大样本类星体之后,人们发现这个效应虽然存在但弥散很大,很难给出任何宇宙学信息,才算彻底放弃。而在此同一时期,数字巡天的优势使得Ia型超新星的发现变得相对容易,特别是美国天文学

家M. Phillips发现了根据光变曲线实现标准化的方法之后,超新星就成为研究宇宙学的主要测量距离工具。

然而,随着对类星体的深入理解,利用类星体测量宇宙学参数又被重新提出,特别是对宽发射线辐射性质的理解,通过观测它们的光变行为与电离连续谱的关系,形成了一套完善的测量宽线区动力学和几何的方法,称为“反响映射”。中国科学院高能物理研究所王建民团队首次提出了利用处于超Eddington吸积状态的类星体(简称“超爱黑洞”)测量宇宙学距离<sup>③</sup>。由于它们具有饱和光度且正比于黑洞质量,而测量黑洞质量不依赖于任何宇宙学模

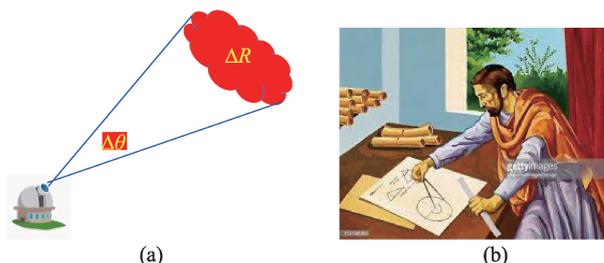


图7 (a)几何方法测量距离原理示意图,需要同时测量天体角 $\Delta\theta$ 和几何尺度 $\Delta R$ 。 $\Delta\theta$ 由GRAVITY测量, $\Delta R$ 由反响映射观测测量;  
(b)Euclid (C.330-270BC)与几何学

型,这样即可测量出黑洞的宇宙学距离,进而实现测量高红移宇宙动力学。他们与中国科学院云南天文台、北京大学、中国科学技术大学等单位密切合作,从2012年开始在丽江2.4米望远镜上进行光谱监测,积累了大量数据发表了一系列论文,发现了超爱黑洞的奇特性质,特别是从观测上证明了饱和光度的性质,将“超爱黑洞测距”的想法变成了有坚实观测基础的实施方案。高能物理研究所独立和主导完成了从观测、数据处理、物理模型与解释和大规模模拟计算的所有软件,形成了一套完整的反响映射测量黑洞质量的系统工具,为干涉测量距离打好所有必需的物理和观测基础。

## 五、类星体光学干涉:精确宇宙学测量

在过去100年中,天文学家发展了大量基于恒星或者星系物理性质的经验关系,建立许多测距方法,使得宇宙距离阶梯逐渐通往宇宙深处。在众多新的测距方法中,除了对临近恒星的三角视差法测

量之外,几乎都依赖于天体的统计性质而建立的经验关系。这类方法以造父变星, Ia型超新星为代表。与此不同的是几何方法,它同时对天体的物理尺度( $\Delta R$ )和对观测者的张角( $\Delta\theta$ )进行测量,这样得到距离  $D_\lambda = \Delta R / \Delta\theta$ , 无须经典方法中的各种修改。但是,几何方法在过去的百年中完全没有应用到银河系以外的天体(除了NGC4151)。这是因为在宇宙学尺度上很难找到能够同时测量( $\Delta R, \Delta\theta$ )的天体。对那些大角径的天体却难以测量物理尺度,例如星系易于测量 $\Delta\theta$ ,但 $\Delta R$ 难测;反之亦然。现有传统设备的空间分辨率没能达到测量小角径的能力。实际上,在现有已知的宇宙学距离上,只有类星体和活动星系核的宽发射线区域正好是角径和物理尺度都能同时测量的天体,是实现几何测量宇宙学的最好选择: $\Delta R$ 容易通过反响映射测量,而随着光学干涉高空间分辨技术的发展已经能够精确测量 $\Delta\theta$ ,特别是最近欧洲南方天文台甚大望远镜干涉阵列(Very Large Telescope Interferometry: VLTI)配备的GRAVITY仪器,实现了10微角秒空间分辨

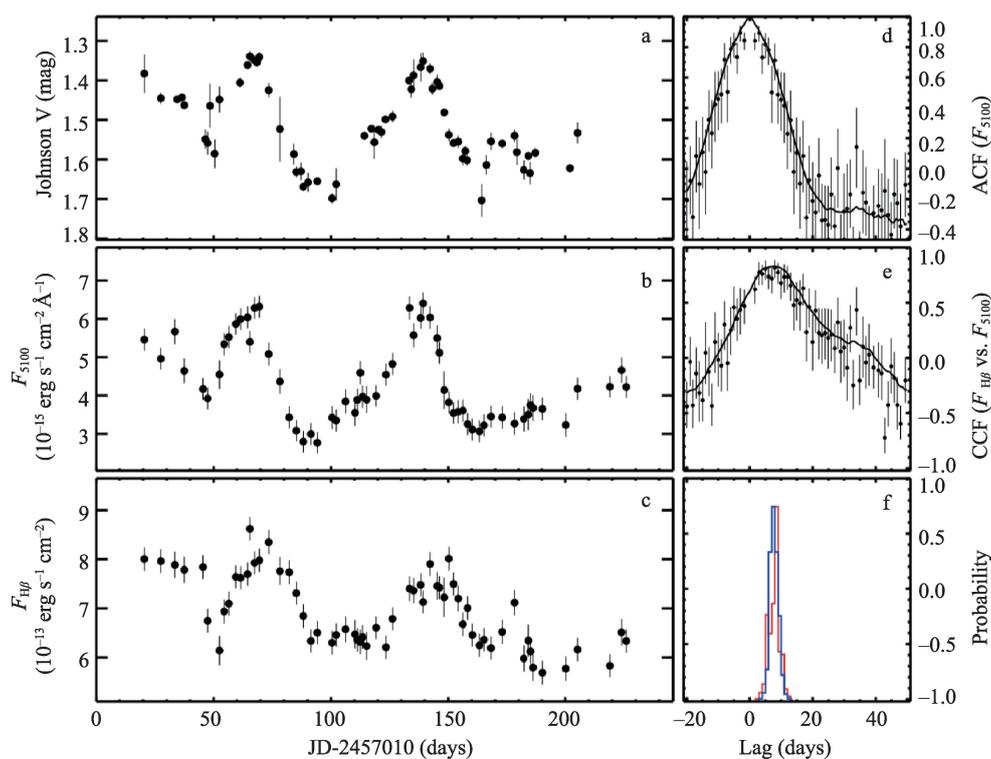


图8 中国科学院云南天文台丽江2.4米望远镜光谱监测活动星系核NGC5548的观测结果以及简单交叉相关分析,取自Lu et al. (2016)<sup>③</sup>

率<sup>®</sup>,使得几何方法直接测量宇宙学距离成为可能,有望彻底解决宇宙学距离( $D_A$ )测量的难题。

$\Delta R$ 测量可通过对宽线区的光谱监测完成。围绕黑洞旋转的气体被黑洞吸积盘的辐射光致电离,产生原子辐射光谱。由于气体绕黑洞的高速运动,发射线光子经过多普勒效应之后到达观测者,有蓝移也有红移,整个区域叠加的结果就形成了很宽的发射线,谱线轮廓宽度一般在 $10^3\sim 10^4$  km/s。黑洞吸积盘由于种种原因引起的辐射变化较为剧烈,一般变化幅度为10%~100%,这随即引起了周围气体的谱线强度的变化。电离光源光子与发射线光子经过不同的路径后到达观测者,所以经过连续性监测光谱变化,得到连续谱和发射线两条形状相似的光变曲线,很容易判断发射线对连续谱变化有一定时间延迟。这个现象通常称为“反响映射”<sup>®</sup>。这一时间延迟实际上反映了宽线区的几何结构和大小。此外,发射线轮廓中不同速度成分有不同响应,这反映出了宽线区域的速度场。因此,通过监测类星体光谱变化,还可以得到黑洞电离气体的动力学从而全面揭示黑洞物理性质。图8显示了丽江2.4米望远镜对著名活动星系核NGC5548观测的具体例子。通过交叉相关分析可以精确得到时间延迟从而得到宽线区大小。

反响映射观测对望远镜口径要求不高,中等2米即可。光谱仪分辨率 $\lambda/\Delta\lambda\approx 1000$ 就可以获得高质量的速度分辨光变曲线。测量的关键在于流量定标,其精度决定了最后测量精度。幸运的是,丽江2.4米望远镜视场较大,可以在目标旁边找到一颗用于定标的恒星,所以能高精度地实施反响映射观测研究。从20世纪80年代开始,天文学家就开始了邻近活动星系核的光谱监测,但是由于需要大量观测时间和相对均匀采样,同时受到天气条件限制等因素,需要多个单位望远镜的协调观测才能完成。在至今大约40年时间里,总共成功监测100个类星体和活动星系核,其中大约有40个来自丽江观测。在这些数据中大约有10个左右的目标源有较好的光谱分辨率,可以得到发射线区域精确的动力

学和几何结构。在早期的反响映射分析中,能够得到时间延迟就是成功观测。人们进一步发现,大部分AGN宽线区具有盘状结构和维里化的动力学。由于动力学受控于黑洞引力场,原则上能可靠地测量黑洞质量。进一步深入分析宽线区的几何和动力学模型,采用大规模MCMC (Markov Chain Monte Carlo)模拟计算,然后获得宽线区的空间和动力学结构,从而可靠地测量黑洞质量,目前最好的精度可以达到40%~50%。

但是, $\Delta\theta$ 测量极为复杂和困难。由于望远镜空间分辨率取决于口径大小,受到瑞里衍射极限限制,提高高空间分辨率的方法就是增加口径。受到工程建造的实际限制,现在最大的口径只有10米。即使是正在建造的欧洲南方天文台的39米望远镜也不能直接空间分解类星体的内部结构。把位于不同位置的光学望远镜有效连起来,通过干涉技术可以实现大孔径效果,提高空间分辨率。射电望远镜在这方面已经很成熟,然而光学干涉受到大气扰动影响,保持天体光的位相是一件非常困难的事情,而且随着波长变短难度越来越大。天文学家从20世纪50年代就开始研究这类技术,直到在过去的十年中,欧洲南方天文台和德国马克思·普朗克研究所等多家单位耗资近亿欧元完成了终端仪器GRAVITY<sup>®</sup>,装配在甚大望远镜干涉阵(VLTI)上,在近红外波段实现了高达10微角秒的空间分辨率。GRAVITY将来自四台八米望远镜的光两两进行干涉,可以同时得到6个“基线”的近红外(2.0至2.4微米)干涉数据。GRAVITY团队成功实现了条纹追踪技术,可以快速改正大气抖动造成的光程差,将曝光时间从大气抖动的毫秒量级的特征时标延长到了分钟量级,从而大大扩展了光学干涉的研究范围。在观测时望远镜的自适应光学技术能将尽可能多的光汇聚到GRAVITY的探测器上,实现稳定的条纹追踪。GRAVITY干涉观测等效于口径为130米左右的望远镜,其定位分辨率高达10微角秒,相当于在地球上可以看到月亮上的一个酒杯,是目前世界上分辨率最高的光学红外设备。

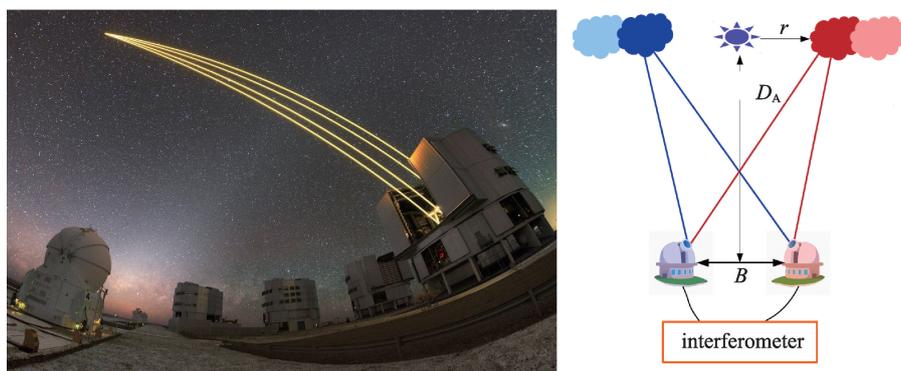


图9 欧洲南方天文台 VLTI (Very Large Telescope Interferometry) 和测量较差位相原理。  
类星体宽线区的不同云块产生相位差, 因此可测量电离气体的几何和动力学

GRAVITY 为几何方法高精度测量宇宙学距离提供了难得机遇。其首要科学目标是观测银河系中心的超大质量黑洞的吸积过程及其附近的恒星运动。目前 GRAVITY 团队已经发表了基于恒星轨道测量银河系中心黑洞的质量<sup>⑩</sup>、引力红移<sup>⑪</sup>和相对论进动<sup>⑫</sup>, 以及黑洞吸积闪耀过程<sup>⑬</sup>等一系列研究论文。除此之外, GRAVITY 还被用于太阳系外行星的轨道和光谱的探测<sup>⑭</sup>, 首次空间分辨出微引力透镜系统, 以及银河系外其他星系中心活动星系核的热尘埃的分布<sup>⑮-⑰</sup>。2019年6月在德国慕尼黑天文重镇 Garching 召开的“VLTI-2030 展望”会议上, 澳大利亚著名宇宙学家、英国皇家科学院院士 M. Colless 教授在其报告中指出<sup>⑱</sup>, VLT 在设计建造之初就涵盖了通过研究宇宙大尺度结构等手段进行宇宙学研究的科学目标, 但至今尚未看到有影响力的观测结果。令人欣慰的是, GRAVITY 的科学能力超出设计者的原定科学目标, 在精确宇宙学的今天, 在光学干涉达到高空间分辨率的时代, 将发挥不可替代的作用。

从 2009 年到 2018 年, 中国科学院云南天文台的丽江 2.4 米望远镜和美国斯图沃德天文台 (Steward Observatory) 的 Bok 2.3 米望远镜对类星体 3C273 进行了连续十年的反响映射监测, 获得了氢发射线和 V 波段连续谱的高质量光变曲线, 并测得两者间的延迟为 146 天, 即宽线区的大小为  $\Delta R = 146$  光天 (0.4 光年)<sup>⑲</sup>。3C273 是人类发现的第一颗

类星体, 在天文学史上具有里程碑式的意义。在 2017~2018 年, GRAVITY 团队选定第一个目标是类星体 3C273, 由于红移为 0.158, 观测谱线为 Paschen  $\alpha$ 。他们进行了四次观测, 成功测得它的宽线区张角为  $\Delta\theta = 46$  微角秒<sup>⑳</sup>。GRAVITY 能够测量不同波长的光的干涉相位, 因而能够分辨出红移云块和蓝移云块在空间上的微小差别, 测出整个区域在天空中的张角。几何测量距离的原理是  $D_A = \Delta R / \Delta\theta$ , 但具体测量涉及到建立模型, 然后进行大规模模拟计算得到宇宙学距离。

中国科学院高能物理研究所团队敏锐地捉住这一难得机遇, 利用了 GRAVITY 和两米望远镜测量两者的互补优势, 实现距离测量<sup>㉑</sup>。反响映射测量敏感于宽线区平行于观测者视线方向的气体分布, 而光学干涉测量敏感于垂直方向, 这样大大消除了模型参数之间的简并。两米望远镜和世界上最大的望远镜实现了珠联璧合的合作。该团队利用自己的大规模计算程序在天津国家超算中心的天河 II 上进行了大量计算, 完成了联合分析, 最终测得 3C273 的角距离为  $551.5_{-78.7}^{+97.3}$  Mpc (约 18 亿光年), 哈勃常数为  $71.5_{-10.6}^{+11.9}$   $\text{kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ 。这一测量精度就达到了 16%。如果对  $N$  个类星体采用这一几何方法进行距离测量, 则  $H_0$  测量精度将达到  $16\% / \sqrt{N}$ 。目前造父变星对  $H_0$  的测量精度约 2% 左右, 宇宙微波背景辐射测量精度为 0.7%。因此如果大约有 50 个活动星系核可以作为 GRAVITY—反响映射协同观

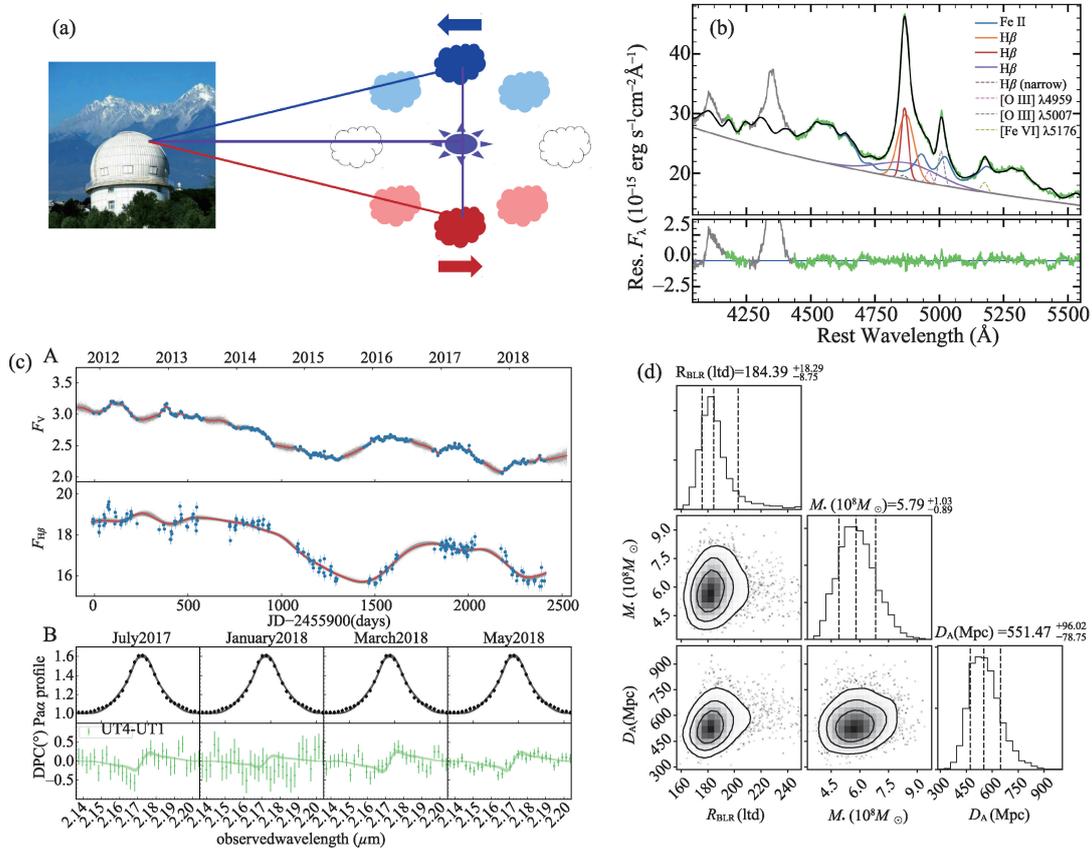


图 10 (a)丽江 2.4 米望远镜观测 3C273 通过反反映射测量宽发射线辐射区域物理尺度;(b)丽江观测 3C273 光谱;(c)丽江 2.4 米和  
美国 Bok2.3 米望远镜 10 年监测光变曲线以及 GRAVITY 观测数据拟合结果;(d)黑洞质量和距离测量结果,取自文献<sup>[27]</sup>

测目标就可以达到目前造父变星的精度。目前澳大利亚国立大学正与高能物理研究所一起观测南天一些 GRAVITY 目标,在未来几年内有望将哈勃常数的测量精度提高到 2% 左右,为解决“哈勃常数危机”提供独立和精确的测量。

## 六、展望

GRAVITY 虽然迈出成功测量 3C273 的宽线区角径的第一步,但是系统开展哈勃常数的测量需要扩大观测样本。为此,一方面亟待提高 GRAVITY 观测的极限星等实现测量一般类星体,另一方面由于工作波长限制,对低红移类星体只能观测 Brackett  $\gamma$  发射线,此谱线比 Paschen  $\alpha$  弱十倍以上,因此需要拓宽工作波长。德国马克斯·普朗克地外物理研究所团队正在雄心勃勃地推进 GRAVITY 的升级改造。这涉及甚大望远镜干涉阵的自适应光学系统、

GRAVITY 探测器及条纹追踪器的升级,改造后的 GRAVITY+性能可实现两个数量级的提升。届时将能够对红移 2 以上(光度距离 500 亿光年外)的类星体进行直接观测。我们不仅可以测量黑洞质量,也将按照几何方法对这些高红移类星体进行距离测量,建立宽红移范围的  $z$ - $D_A$  关系。这将使我们能够直接测量宇宙的几何结构、膨胀历史包括动力学的演化,同时以高精度限制宇宙学模型、更为深刻地认识暗能量的性质。

近年来还现出了其他两个很有希望的新工具。利用强引力透镜的几何方法测得哈勃常数为  $H_0 = 82.4^{+8.4}_{-8.3} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。这一结果与背景辐射测量差别更大<sup>[28]</sup>,最新的结果综合 6 个强引力透镜事件的观测,得到  $H_0 = 73.3 \pm 1.7 - 1.8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,即将发表<sup>[29]</sup>。但应意识到,它涉及暗物质晕质量分布等假设;此外,把恒星级黑洞-致密天体并合产生的引力

波作为“标准汽笛”的方法也有了初步结果<sup>⑩</sup>,利用LIGO的观测结果,给出了哈勃常数的独立测量结果  $H_0 = 70.0_{-8.0}^{+12.0} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。但这一方法面临倾角与距离简并以及信号微弱等挑战。令人向往的是,把这些独立方法结合在一起,对广义相对论与宇宙学独立进行检验,或许能产生出乎意料的结果。这可能将对探索新物理做出重要的贡献。

## 参考文献

- ① Hubble, E. 1929, PNAS, 15, 168, A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae
- ② Hubble, E. & Humason, M.L. 1931, ApJ, 74, 43, The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae
- ③ Freedman, W. 2017, Nature Astronomy, 1, 169, Cosmology at a crossroads
- ④ Riess, A. et al. 1998, ApJ, 116, 1009, Observational evidence from supernovae for an accelerating Universe and a cosmological constant
- ⑤ Perlmutter, S. et al. 1999, ApJ, 517, 565, Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high-redshift supernovae
- ⑥ Astier, P. et al. 2014, A&A 572, A80, Extending the supernova Hubble diagram to  $z \sim 1.5$  with the Euclid space mission
- ⑦ Riess, A., 2019, Nature Physics Review, 2, 10, The expansion of the Universe is faster than expected
- ⑧ Schmidt, M. 1963, Nature, 197, 1040, 3C 273 : A star-like object with large red-shift
- ⑨ 何香涛, 自然杂志, 2014, 36卷, 3期, 218-224 页: 宇宙中最神秘的天体——类星体 (一): 发现类星体
- ⑩ Kellerman, K. I. 1993, Nature, 361, 134, The cosmological deceleration parameter estimated from the angular-size/redshift relation for compact radio sources
- ⑪ Baldwin, J.A. et al. 1978, Nature, 273, 431, Relative quasar luminosities determined from emission line strengths.
- ⑫ Wang, J.-M., et al. 2013, Phys. Rev. Lett. 110, 081301, Super-Eddington accreting massive black holes as long-lived cosmological standards.
- ⑬ Lu, K.-X. et al. 2017, ApJ, 827, 118, Reverberation Mapping of the Broad-line Region in NGC 5548: Evidence for Radiation Pressure?
- ⑭ Peterson, B. 1993, PASP, 105, 247, Reverberation mapping of active galactic nuclei
- ⑮ GRAVITY Collaboration, et al. 2017, A&A, 602, A94, First light for GRAVITY: Phase referencing optical interferometry for the Very Large Telescope Interferometer
- ⑯ GRAVITY Collaboration, 2019, A&A, 625, L10, A geometric distance measurement to the Galactic center black hole with 0.3% uncertainty
- ⑰ GRAVITY Collaboration, et al. 2018, A&A, 615, L15, Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole
- ⑱ Gravity Collaboration, et al. 2020, A&A, 636, L5, Detection of the Schwarzschild precession in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole
- ⑲ GRAVITY Collaboration, et al. 2018, A&A, 618, L10, Detection of orbital motions near the last stable circular orbit of the massive black hole Sgr A\*
- ⑳ GRAVITY Collaboration, et al. 2020, A&A, 635, A143, Modeling the orbital motion of Sgr A\*'s near-infrared flares
- ㉑ GRAVITY Collaboration, et al. 2019, A&A, 623, L11, First direct detection of an exoplanet by optical interferometry. Astrometry and K-band spectroscopy of HR 8799e
- ㉒ GRAVITY Collaboration, et al. 2020, A&A, 633, A110, Peering into the formation history of  $\beta$  Pictoris b with VLTI/GRAVITY long-baseline interferometry
- ㉓ GRAVITY Collaboration, et al. 2020, A&A, 634, A1, An image of the dust sublimation region in the nucleus of NGC 1068
- ㉔ GRAVITY Collaboration, et al. 2020, A&A, 635, A92, The resolved size and structure of hot dust in the immediate vicinity of AGN
- ㉕ <https://zenodo.org/record/3356216#.XohNpi277zI>
- ㉖ Zhang, Z.-X. et al. 2019, ApJ, 876, 49, Kinematics of the broad-line region of 3C 273 from a 10 yr reverberation mapping campaign.
- ㉗ GRAVITY Collaboration, et al. 2018, Nature, 563, 657, Spatially resolved rotation of the broad-line region of a quasar at sub-parsec scale
- ㉘ Wang, J.-M., et al. 2020, Nature Astronomy, 4, 517, A parallax distance to 3C 273 through spectroastrometry and reverberation mapping
- ㉙ Jee, I., Suyu, S. H., Komatsu, E. 2019, Science, 365, 1134, A measurement of the Hubble constant from angular diameter distances to two gravitational lenses.
- ㉚ Wong, K.C. et al, 2020, MNRAS, in Press
- ㉛ The LIGO Scientific Collaboration, et al., 2017, Nature, 551, 85, A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant.