



距离阶梯与哈勃常数危机

陈孝钊^{1,2,3*}, 王舒¹

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 北京师范大学天文与天体物理前沿所, 北京 102206;

3. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

*联系人, E-mail: chenxiaodian@nao.cas.cn

收稿日期: 2024-06-04; 接受日期: 2024-07-31; 网络出版日期: 2024-09-10

国家自然科学基金(编号: 12322306, 12173047)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2022YFF0503404)资助项目

摘要 哈勃常数是天文学中的一个重要参数. 当前最前沿的两项观测证据在哈勃常数上出现了5倍标准差的差异, 即“哈勃常数危机”. 本文总结了基于距离阶梯测量哈勃常数方法中的几种常用量天尺, 包括几何距离、造父变星、红巨星顶点恒星和Ia型超新星; 分析了它们的优缺点、潜在问题以及未来的优化预期. 同时, 介绍了几种潜在的量天尺. 它们能帮助检查常用量天尺并独立测量哈勃常数. 未来五年内, 随着Gaia DR4的释放和视差零点的优化、詹姆斯韦伯望远镜的数据累积、中国空间站巡天望远镜的发射和观测及数据释放, 天文学家将有望给出当前“哈勃常数危机”的答案.

关键词 哈勃常数, 经典造父变星, 红巨星顶点恒星, Ia型超新星, 几何距离

PACS: 98.80.Es, 97.10.Sj, 97.10.Vm, 97.20.Li, 97.60.Bw

1 引言

哈勃常数是宇宙学的一个重要基本参数, 表征了当前宇宙膨胀的速度. 它的观测结果直接影响宇宙的可观测范围和膨胀年龄. 在近场宇宙, 哈勃常数近似等于天体的退行速度除以距离. 由于退行速度可以相对容易而准确地从谱线红移测得, 哈勃常数测量的难点就在于河外天体距离的准确测量. 哈勃常数的测量已有近百年的历史, 一直是天文学和物理学研究重大问题之一.

哈勃常数的研究历史大致可分为4个阶段, 分别为初步阶段、分歧阶段、一致阶段和危机阶段. 在初步

阶段, Leavitt和Pickering^[1]分析大小麦哲伦云中的造父变星, 发现造父变星的对数周期和光度之间存在线性关系, 即造父变星周光关系(也称Leavitt Law). 随后, 埃德温·哈勃^[2]将该关系用于测量M31和M33星系的距离, 确定了河外星系的存在. 1929年, 哈勃^[3]确定了星系红移与距离的线性关系, 并首次得到哈勃常数, 其值为 $500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. 该值远大于当前已知的哈勃常数, 其主要原因是使用了二型造父变星的周光关系, 导致了星系距离的低估. 此后, 随着观测技术的进步, 哈勃常数的研究非常火热, 测量值也开始下降. 哈勃常数的分歧阶段出现在20世纪70–80年代, Sandage和Tam-

引用格式: 陈孝钊, 王舒. 距离阶梯与哈勃常数危机. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 119501

Chen X D, Wang S. Distance ladders and the Hubble constant crisis (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 119501, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0210

mann^[4-6]支持较小的哈勃常数, 约为 $50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, 而de Vaucouleurs^[7,8]支持更大的哈勃常数, 约为 $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. 两个结果不同的主要原因在于前者主要使用造父变星的测距方法, 而后者主要使用星系的测距方法. 此后哈勃常数分歧一直持续到21世纪初.

解决哈勃常数分歧的工作出现在2001年. 基于哈勃空间望远镜近10年的数据, Freedman等人^[9]将哈勃常数值确认为 $72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, 误差约10%. 这项工作表明造父变星+Ia型超新星是最好的距离阶梯, 而该测距方法也一直沿用至今. 这项工作也敲开了哈勃常数精确测量之门. 当时主要的误差包括大麦哲伦云距离误差、金属丰度效应带来的误差、密集星场误差. 随后10多年里, 由于几何测距方法更为准确以及红外波段的使用^[10], 哈勃常数的误差逐年下降. 2016年, 亚当·里斯^[11]将哈勃常数的误差降低到2.4%. 该结果与Planck卫星测量的宇宙微波背景辐射所推导的哈勃常数相差3.4个标准差, 哈勃常数又一次出现分歧. 这次的分歧点在于是支持基于宇宙早期观测得出的 $66 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ^[12], 还是支持基于宇宙晚期观测得出的 $72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

此后, 亚当·里斯等人不断提高距离阶梯测量哈勃常数的精度, 哈勃常数的分歧逐渐演变为哈勃常数危机. 2022年年底, 亚当·里斯^[13]整理了哈勃空间望远镜过去20多年的观测数据, 结合更新的Gaia第三次早期释放数据(Early Data Release 3, EDR3)的视差等优质几何距离^[14], 将距离阶梯方法测量的哈勃常数误差降低到1.4%, 其值为 $73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. 该值与宇宙微波背景辐射测量的哈勃常数已相差5个标准差. 如果这两项测量结果是真实的, 那么在统计学上, 哈勃常数仍是常数的概率只有不到百万分之一. 如果该差异被证实, 就意味着标准宇宙学模型中需要引入新的物理, 因此哈勃常数危机再次成为天文学和物理学领域重点关注的问题. 为了解决哈勃常数危机, 天文学家尝试寻找新的证据, 其中比较成功的是利用红巨星顶点恒星(Tip of the Red Giant Branch, TRGB)代替造父变星, 再与Ia型超新星联合来测量哈勃常数, 误差约为2%, 其值为 $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ^[15,16]. TRGB的哈勃常数结果在造父变星和宇宙微波背景辐射结果之间, 一定程度上缓解了哈勃常数危机, 支持哈勃常数的测量仍需要更细致和周到地考虑误差. 当然, 关于TRGB测量的哈勃常数也有一定的争议, 需要进一步检查. 除了TRGB方

法, 强引力透镜^[17]和引力波标准汽笛方法^[18]也是非常具有潜力的哈勃常数测量方法.

本文将对距离阶梯测量哈勃常数的前沿研究进行总结, 主要分为几何距离、造父变星、TRGB、Ia型超新星、其他潜在量天尺5个小节. 本文将详细介绍不同量天尺方法并总结它们的优化方向. 关于宇宙微波背景辐射测量哈勃常数以及宇宙学模型修改的介绍可查阅文献^[19]. 最常用的距离阶梯测量哈勃常数公式如下, 其中 M 为绝对星等, m 为视星等, μ 为距离模数, c 为光速, z 为红移, a, b, d 为周光关系的系数, P 为造父变星以天为单位的脉动周期, 但该公式未考虑消光. 若考虑消光, 每个视星等都要减去消光量 A . 该公式也没考虑减速因子, 如果使用更高红移的Ia型超新星, 则需修改 cz 项. 对于其他量天尺, 我们可以之代替造父变星或者Ia型超新星, 类似地给出计算哈勃常数的公式.

$$\begin{aligned} M_{\text{造父变星}} &= m_{\text{造父变星}} - \mu_{\text{几何距离}}, \\ M_{\text{造父变星}} &= a \log P + b[\text{Fe}/\text{H}] + d, \\ \mu_{\text{星系距离}} &= m_{\text{星系造父变星}} - (a \log P + b[\text{Fe}/\text{H}] + d), \\ M_{\text{Ia型超新星}} &= m_{\text{Ia型超新星}} - \mu_{\text{星系距离}}, \\ \log H_0 &= 0.2(M_{\text{Ia型超新星}} - m_{\text{远场Ia型超新星}}) + \log cz + 5. \end{aligned} \quad (1)$$

2 几何距离测量

作为距离阶梯的基准, 几何距离扮演着最重要的角色. 在距离阶梯中, 误差会一级一级地由近至远传播, 第零级阶梯就显得尤为重要, 因此我们常常使用误差最可控的方法. 几何距离的优势在于它主要基于数学和简单的模型, 不需要物理假设. 天文学最常使用的几何距离方法主要分为视差距离法和角直径距离法.

视差法是以日地距离作为基线, 随着地球公转, 在不同时间观测天体位置的变化. 在依巴谷卫星时代, 视差的误差为2–4毫角秒^[20], 只能对100 pc处的恒星提供较为可靠的视差, 因此对距离阶梯的帮助有限. Benedict等人^[21]利用哈勃空间望远镜的精细导星感测器观测了10颗造父变星的视差, 并利用这些造父变星来校准造父变星周光关系的零点, 误差为1.7%. 该量天尺随后被用于在红外波段测量哈勃常数^[10], 误差被降低到2.8%. 哈勃空间望远镜精细导星感测器测量的视差

误差约为0.2毫角秒, 为了确保每颗造父变星的距离误差在10%以内, 该方法只适合于距离在500秒差距以内的造父变星. 这些造父变星周期一般短于10天, 可能与河外星系造父变星存在差异. 为了进一步降低视差误差, Riess团队^[22,23]提出了利用哈勃空间望远镜的位移扫描模式来观测造父变星. 该模式通过沿着探测器Y轴进行扫描, 将统计采样率提高1000倍, 从而能获得误差约为30微角秒的视差. 使用该方法, Riess等人基于8颗周期大于10天的造父变星, 获得了零点误差约为2%的造父变星周光关系. 相比于Benedict等人获得的周光关系, Riess等人得到的周光关系更适用于河外星系.

空前准确的视差来自Gaia望远镜, 尤其是2021年释放的EDR3数据^[14]. 对于大多数4 kpc内恒星来说, 视差的误差约为20微角秒. Riess等人^[24]利用距离最近的75颗造父变星的视差, 校准了造父变星的周光关系, 零点误差约为1.0%. 随后, 该结果被用于与另外2种角直径距离相结合, 从而得到了误差为0.7%的造父变星周光关系^[13], 成为将哈勃常数优化到1.4%的关键. 在高精度下, Gaia视差被发现存在一定的零点偏差. 对于改正后的视差, 零点偏差约为0–20微角秒^[25,26]. 该零点偏差的降低将能极大地帮助优化造父变星量天尺和哈勃常数. 天文学家尝试利用星团中的造父变星建立周光关系^[27,28], 其优势是可以利用上百颗星团成员星的视差来校准造父变星周光关系. 由于数目多了近10倍, Gaia视差零点和造父变星周光关系同时得到了很好的限制. 随着未来Gaia DR4的释放, 视差的零点偏差将会得到更好的限制, 届时将有望基于视差测量的造父变星量天尺的误差缩小到0.5%以下.

角直径距离法是另一种几何测距的方法. 如果知道了天体的角直径和线直径, 就可以通过两者之比得到距离. 两种最成功的角直径距离测量的例子分别是利用食双星测量大麦哲伦云距离和基于水脉泽测量NGC 4258的距离.

对于食双星, 如果能同时测量它们的光变曲线和视向速度曲线, 就可以解出两颗子星的质量、半径、温度等恒星物理参数, 并且误差能优化到1%^[29–31]. 有了半径, 我们需要得到角半径. 对于同一类型的恒星, 它的角半径和表面亮度之间存在紧密的关系. 天文学家使用VLTI的光干涉方法测量近邻恒星的角直径, 再与视星等和颜色组合起来建立适用于不同恒星的线性关系^[32]. 该关系更适用于早型星和演化后恒星, 相比

晚型恒星更加紧密. 基于该关系, 人们就可以得到更远的各类恒星的角直径. 正是基于该思路, Pietrzyński等人^[33]观测了20颗大麦哲伦云中食双星的光变曲线和视向速度曲线, 进而得到了它们准确的恒星参数. 这些恒星均是演化后的红团簇星. 结合恒星半径和角半径, 他们得到了大麦哲伦云距离, 误差为1.1%. 该距离是一个重要的宇宙距离基石, 被广泛应用于星系和宇宙的距离测量.

关于脉泽测距, NGC 4258的中心区域存在强烈的水脉泽辐射. 通过甚长基线干涉(Very Long Baseline Interferometry)的观测, 可以获得不同脉泽源距离中心的角距离和视向速度, 从而发现这些脉泽源的速度很好地满足开普勒盘分布. 通过多历元的观测, 就能得到脉泽源的平均向心加速度和线速度, 接着就可以计算出线半径, 而线半径与角距离之比即可得到NGC 4258的距离. Herrnstein等人^[34]首先使用4个历元的VLBI观测, 得到NGC 4258的距离为7.2 Mpc, 误差为7%. Reid等人^[35]利用18个历元的VLBI观测, 使用MCMC方法, 并将空间位置和速度的误差均作为参数带入MCMC分析. 利用这种完全基于数据的方法, 他们得到NGC 4258的距离为7.58 Mpc, 误差为1.5%.

在以上三种几何距离测量方法中, Gaia视差的提升空间最大, 而另2种几何距离方法的提升需要使用更大的望远镜, 并应用于更多的星系.

3 造父变星测距

经典造父变星是中等质量或者大质量恒星(通常大于4个太阳质量)演化中穿过脉动不稳定带而形成的一类脉动变星^[36,37]. 当恒星核心的氢元素燃烧殆尽之后, 就会发生内部结构的变化, 包括核心收缩和外包层膨胀. 此过程中, 恒星表面温度降低, 在赫罗图上恒星离开主序来到了红端. 随着氦核开始燃烧, 恒星包层开始收缩, 温度升高, 恒星在赫罗图上向蓝端移动, 此过程被称为蓝回绕. 当氦核燃烧耗尽后, 恒星再次向红端移动. 在以上过程中恒星三次穿过脉动不稳定带, 均可能会形成造父变星, 而更大质量的恒星甚至能超过三次穿过脉动不稳定带. 其中时标最长的是第二次穿过脉动不稳定带, 也就是蓝回绕过程. 不同于经典造父变星, 二型造父变星是演化到AGB阶段的小质量恒星^[38], 与经典造父变星在物理性质上差别很大. 为了

简洁, 后文中的造父变星默认为经典造父变星。

造父变星主要以径向基频或者一阶谐频的模式脉动。对于径向基频, 恒星会整体地膨胀或者收缩; 而对于一阶谐频, 恒星内部在径向存在一层不动的节点, 节点内外做方向相反的运动。造父变星的脉动在观测上表现为亮度随着时间发生周期性的变化, 变化的幅度在V波段通常为0.2–1.5星等, 周期一般在1–100天^[39]。正是因为变幅和周期的特点, 造父变星很容易被发现, 一般只需要10多次不同时间的测光(总时间跨度大于造父变星周期)就能识别一颗造父变星, 并能通过拟合模板的方法准确地测量周期。另外, 由于造父变星的明亮特性(绝对星等约为–6 – –2等), 它们在近邻星系中很容易被发现。在近邻河外星系中, 如果一颗恒星的变化周期在1天以上, 且光变曲线呈平滑的锯齿状, 那么它很可能就是经典造父变星或者二型造父变星。如果测光质量较好或者测光次数较多, 就能获得更确定的经典造父变星。经典造父变星的年龄为几百万年到几亿年, 因此它们只存在于年轻的漩涡星系或者不规则星系中。在银河系内, 它们主要存在于银盘和疏散星团中^[40]。

造父变星通常和几何距离相结合来搭建第一级距离阶梯。造父变星周光关系自从被发现后已有长达百年的优化历史。其中主要的优化包括弥散的降低、消光改正的引入、金属丰度的处理、混淆效应的考虑和几何距离的利用。

20世纪, 主要的测光波段是可见光波段。在这些波段, 造父变星周光关系无法达到很高精度, 其中既有弥散大, 又有非线性和截断的问题。为了降低这些问题的影响, 常用的关系是“周期内禀颜色光度关系”^[41,42], 其中内禀颜色是观测颜色减去红化。Madore^[43]首次提出了Wenssenheit星等的方法, 通过2–3个波段的组合达到一个近红外波段的效果, 其中组合的系数来自观测或者消光规律, 该方法一直被沿用至今。由于Wenssenheit星等至少有2个波段, 相当于既考虑了星等又考虑了颜色, 它的弥散要比可见光小, 和近红外波段相当。除了弥散小, 该星等还能有效减小消光的影响, 我们在下一段主要讨论消光的影响。当前人们已经知道在完全没有消光情况下, 造父变星周光关系的弥散从紫外到近红外随着波段的有效波长增加而降低。在B波段, 弥散约为0.20星等^[44](单颗造父变星测距误差为9%), 而在3.4 μm , 弥散约为0.06星等^[45](测距误差为3%)。所以造父变星测距通常会使用红外波段, 或者多组可见光波段。

使用红外波段除了可以降低周光关系弥散以提高距离精度, 还能有效地降低消光的影响。根据消光规律, 近红外波段的消光约为V波段消光的十分之一^[46,47]。以哈勃空间望远镜观测的造父变星宿主星系为例, 它们的平均消光约为 $A_V = 0.5$ 等。如果使用近红外的 K_S 波段, 平均消光约为 $A_{K_S} = 0.05$ 等。如果考虑V波段消光的误差为10%, K_S 波段消光的误差为20%, 那么它们给绝对星等或者距离模数带来的误差分别为0.05等和0.01等, 由此可见红外波段的优势。这是对锚定周光关系或者距离测量的影响, 同样较差消光还会增加周光关系的弥散。如果考虑较差消光1个标准差的弥散为20%, 则会给V波段和 K_S 波段的观测周光关系增加0.10等和0.01等的弥散。

金属丰度的处理是造父变星周光关系优化的最大障碍。基于恒星大气模型理论, 我们知道金属丰度会改变不透明度, 从而影响恒星的光度。对于造父变星某一波段的周光关系, 金属丰度会通过影响光度和热改正来最终影响绝对星等。因此, 为了得到高精度的距离测量, 需要使用的是“周期金属丰度光度”关系。然而金属丰度对周光关系影响的检查需要对河外造父变星获取中高分辨率光谱, 因此难度较大。Romaniello等人^[48]测量了68颗银河系和麦哲伦云造父变星的高分辨率光谱, 得到在 K_S 波段金属丰度对造父变星周光关系的影响系数为 $r \sim 0.0 \text{ mag/dex}$, 也就是不同金属丰度的造父变星会满足相同的周光关系。如果该结果是可靠的, 那么造父变星测距将会非常方便。然而, 当把不同金属丰度星系和矮星系组合在一起分析时, 天文学家发现在近红外波段 r 通常在–0.20 mag/dex左右^[49], 也就是说金属丰度越富有的造父变星, 在同一周期上会更亮。为什么两种方法得到的金属丰度效应不同? 其主要原因可能是同一个星系中的造父变星金属丰度差异很小, 得到的金属丰度效应误差较大(0.10 mag/dex), 很难通过有限的样本测量较小的金属丰度效应($r \sim -0.20 \text{ mag/dex}$)。例如银河系中观测到的造父变星金属丰度主要集中在 $[\text{Fe}/\text{H}] = 0 \text{ dex}$ 附近, 金属丰度更贫的样本数量很少, 这样拟合的金属丰度效应很容易受样本完备性的影响。相反, 大小麦哲伦云中造父变星的金属丰度则整体比银河系要低约0.4和0.7 dex。合并使用不同星系或矮星系, 金属丰度的跨度更大, 得到的金属丰度效应误差较小(0.05 mag/dex), 能测量较小的金属丰度效应。当前, 理论和观测的工作都支持在红外

波段, 造父变星周光关系存在负的金属丰度影响^[50,51]. 当然, 当前金属丰度效应的误差仍然较大, 并且样本有限, 这使得金属丰度的影响仍然不能够确定. 未来, 随着Gaia视差的优化, 将使得仅基于银河系内造父变星测量金属丰度效应成为可能, 从而更好地检验金属丰度的影响.

当研究密集星场或者河外星系中的造父变星时, 混淆效应是一个必须要考虑的问题. 由于存在望远镜角分辨率的极限, 同样的角距离对于越远的天体来说, 线距离会更大, 包含的除造父变星以外的星就越多. 这些星会增加造父变星的亮度, 从而使得测量的距离系统性偏小, 哈勃常数偏大. 混淆效应的影响可以通过移植银河系内同样星族环境来估算, 例如选取一块同样恒星密度的星场, 将它放到河外星系的距离, 估计恒星的混淆效应. 而更好的对混淆效应进行估算的方法是假星测试, 也就是重复将一颗星生成在星系图像上, 重新测量它的亮度, 从统计上估计该星亮度会增亮多少, 然后改正偏移并在距离中考虑误差.

以上两种方法可以估算混淆效应带来的误差, 但要减小误差, 则需要角分辨率更高的设备. Riess等人^[52]利用詹姆斯韦伯望远镜检查了哈勃空间望远镜红外波段观测的6个星系, 确认了基于哈勃空间望远镜计算的混淆效应是合理的. 哈勃空间望远镜在红外波段的角分辨率约为0.1角秒, 不如詹姆斯韦伯望远镜的0.03角秒. 基于詹姆斯韦伯望远镜观测的造父变星, 他们在8.2个标准差显著度上排除了混淆效应解释哈勃常数危机的可能.

在讨论以上造父变星测距误差后, 我们最后讨论打造造父变星量天尺的关键, 也就是如何选择几何测距作为基准. 当前, 合并Gaia视差、哈勃望远镜扫描模式视差、大麦哲伦云距离、NGC 4258距离可以得到一个基于哈勃空间望远镜波段的、距离系统误差只有0.7%的造父变星量天尺^[13], 该误差会经由Ia型超新星传递到哈勃常数. 当前利用哈勃空间望远镜测量哈勃常数的工作使用了37个存在Ia型超新星的宿主星系, 它们中包含2100多颗造父变星. 而如果对于Gaia波段或者其他地面波段, 可以仅结合Gaia视差和大麦哲伦云距离来打造造父变星量天尺, 此时甚至能获得距离系统误差只有0.6%的造父变星周期金属丰度光度关系. 随着未来Gaia视差数据的释放, 造父变星量天尺的总系统误差将有望小于0.5%.

4 红巨星顶点恒星测距

TRGB是小质量恒星(质量小于约2倍太阳质量)演化到主序后, 在赫罗图上到达红巨星支的顶部. 在红巨星支, 小质量恒星的核心质量过小不足以点燃氦核, 它会进行包层氢燃烧, 从而增长核心质量, 而这一过程会持续几亿到十亿年. 由于存在时间较长, 因此形成了概率密度较大的红巨星支. 随着包层的燃烧, 核心质量逐渐增加, 包层逐渐外移, 红巨星也逐渐膨胀变亮. 在这个过程中, 红巨星在赫罗图上沿着红巨星支逐渐上升, 当核心达到约0.46个太阳质量就会解除氦核简并, 也就是发生“氦闪”. 此后发生内部结构变化, 红巨星变暗变热, 到达了水平分支. 因此, TRGB有一个质量相同的核心, 在观测和理论上它们的光度在I波段近乎一致, 在其他波段的光度亦可通过颜色修正来标准化.

在颜色星等图上, 可以看到在同一个颜色, TRGB光度之上的恒星数目陡降. 中等质量以上的恒星和渐近巨星支的恒星是主要的污染源, 但它们在红端存留的时标很短, 且颜色与红巨星顶点恒星有一定区别. 因此, 在星系的颜色星等图中, TRGB是非常显著和易于辨别的.

基于以上的分析, 我们可以在已知距离的星系中测量TRGB的绝对星等, 然后在未知距离的星系中对比TRGB的视星等和绝对星等, 从而计算该星系的距离. 20世纪90年代, TRGB就被应用于测量星系或矮星系的距离^[53-55], 但广泛应用于测量哈勃常数的工作出现在2016年以后. Freedman团队^[15,56-60]将TRGB用于测量近20个Ia型超新星宿主星系, 并得到了误差为2.4%的哈勃常数. 该系列工作成功的基础在于对TRGB的性质有了更好的理解. 在高测光精度的条件下, 为了将TRGB绝对星等误差优化到0.1星等以下, 需要仔细考虑金属丰度和年龄的影响. 他们通过对理论模型的分析, 发现I波段是受金属丰度影响最小的波段. 也就是当金属丰度在-2.0到-1.0 dex之间时, I波段绝对星等在-4.04左右. 在年龄上, 只要年龄大于40亿年, TRGB的绝对星等就非常一致. 为了得到绝对星等更一致的TRGB, 天文学家需要避开星系的盘区域, 选择离中心更远的晕区域.

利用TRGB测量的哈勃常数值为 $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, 恰好位于造父变星和宇宙背景辐射的结果之间, 一定程度上缓解了哈勃常数危机. 相比于造父变星, TRGB

的优点在于它既适合年轻的星系又适合年老的星系, 而且不需要长时间跨度的多次测光. 它的缺点在于I波段仍会受到显著的消光影响, 无论是锚星系还是目标星系的消光都会影响其距离的准确性. 另外, 对TRGB方法的准确性需要进行更广泛的检验. Yuan等人^[61]曾质疑Freedman等人在2019年的工作中, 由于使用了精度不够的测光数据从而高估了大麦哲伦云消光. 如果将I波段消光降低0.07等, TRGB的绝对星等会变暗, 哈勃常数也会增大到 $72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. 随后, Freedman等人^[62]在2020年的工作中否认了这一点. 他们发展了多波段方法, 可以同时解出TRGB的绝对星等和宿主星系的消光. 他们发现 $A_I=0.17$ 等更为合理. 随后, 他们更新了TRGB测量哈勃常数的误差, 优化到1.7%.

作为第一级阶梯, 造父变星和TRGB量天尺的相互检验十分重要. 在近期的一项工作中, Madore和Freedman^[63]对比了28个星系的造父变星和TRGB距离, 发现在较近的21个星系中, 两者的一致性较好. 但在较远的7个星系中, 造父变星测量的距离模数比TRGB小于0.07等, 但误差也较大(约为0.06等). 未来詹姆斯韦伯望远镜、中国空间站巡天望远镜等将能观测更多同时存在造父变星和TRGB的星系, 届时将能更好地确定这两种量天尺的一致性, 从而验证距离阶梯测量哈勃常数方法是否存在误差低估.

5 Ia型超新星测距

Ia型超新星产生于白矮星的双星系统中, 当白矮星吸积伴星物质或者并合发生热核爆炸就产生了Ia型超新星. Ia型超新星的亮度在爆发初期增加非常迅速, 通常在几天内达到峰值; 此后, 它的亮度会在最高点保持一段时间, 随后开始逐渐下降. Ia型超新星的光变曲线具有相对一致的形状, 但为了高精度测量距离, 仍需要对光变曲线进一步标准化. Phillips^[64]发现Ia型超新星的峰值亮度与光变曲线下降速度之间存在关联, 即峰值亮度越暗的源, 光变曲线下降速度越快. 基于Phillips发现的关系, Ia型超新星量天尺的距离精度为6%–10%^[13,65,66]. Ia型超新星最亮时刻的绝对星等约为–19.3等(B波段), 比恒星要亮至少上千倍. 它在20世纪90年代被用于发现宇宙正处于加速膨胀^[67,68], 随后也被用于搭建距离阶梯, 测量哈勃常数.

Ia型超新星是距离阶梯中的第二级, 这意味着人

们无法直接测量它们宿主星系的距离. 它们的亮度必须用其他标准烛光来校准, 比如造父变星或TRGB. 超新星的优势在于它们非常明亮, 人们可以在很大的距离范围(从万分之几红移到红移约为1)内观测到Ia型超新星, 而且近邻的超新星和高红移超新星的光变曲线非常相似. 而缺点则是具有现代观测数据的近邻Ia型超新星数目太少, 当前用于组建第二级距离阶梯的Ia型超新星数目只有42颗, 这也导致Ia型超新星的绝对星等零点误差达到0.9%^[13], 该误差会最终传递到哈勃常数. 所以, 当前基于Ia型超新星的哈勃常数误差下限约为0.9%. 近邻Ia型超新星每年约有1–2例. 若想要进一步优化Ia型超新星绝对星等, 则需要等待10年左右.

Ia型超新星除了作为第二级距离阶梯, 还是最终测量哈勃常数的量天尺. 远场Ia型超新星的数目比近邻Ia型超新星的数目要多上百倍. 通过测量这些遥远Ia型超新星的视星等, 可以得到这些星系的距离; 进而与红移建立关系就可以得到哈勃常数. 为了避免引入减速因子, Riess等人^[13]测量哈勃常数时使用的是低红移Ia型超新星($z < 0.15$). 该样本包括200多个Ia型超新星, 数目已经足够显著降低统计误差. 他们也使用更高红移的Ia型超新星进行验证, 得到的哈勃常数仍为 $73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 左右, 与低红移Ia型超新星的结果一致.

6 其他潜在量天尺

为了更好地确定距离阶梯方法所测量的哈勃常数, 天文学家们尽可能地考虑了各项可能的误差. 但像选择效应, 以及尚未了解的恒星物理细节等因素带来的误差很难估计. 因此, 寻找更多独立的手段来测量哈勃常数是一条可能的出路.

Huang等人^[69,70]利用Mira变星, 测量了M101, NGC 1559等星系的距离, 并得到误差为4.1%的哈勃常数, 其值为 $72.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Mira是演化到渐近巨星支的恒星, 它们的亮度以几百天为周期进行脉动, 在可见光波段变幅为2–6等, 在红外波段变幅通常也在0.5等以上. Mira同样满足周光关系, 只是相比造父变星其周光关系的弥散更大. Mira因颜色不同可分为富氧型Mira和富碳型Mira. 其中富氧型Mira的周光关系弥散较小, 对应的距离误差约为6%^[71]. 相比于造父变星, Mira的优点在于它在红外 K_s 波段比造父变星亮2星等,

因此利用詹姆斯韦伯望远镜, 能测量远到100 Mpc的星系距离. 在缺点方面, Mira周期很长, 对观测的时间跨度要求很高; 另外, 由于Mira体积巨大(与日地距离相当)和表面亮度分布不均匀且变化, 其几何中心与光学中心有明显偏离^[72], Mira周光关系的校准暂时无法使用Gaia视差, 只能使用大麦哲伦云和NGC 4258. 此外, Mira周光关系的金属丰度效应需要深入的研究.

强引力透镜是完全独立于距离阶梯测量哈勃常数的方法. 强引力透镜是由于天体的光线经过前场的星系发生弯曲而形成多重像, 通过测量多重像的时间延迟就可以得到延迟距离. 再测量透镜星系和背景源的红移, 以及它们之间的角距离, 就可以得到哈勃常数. Suyu等人^[73]利用2个强引力透镜源得到了误差为4.0%的哈勃常数. 此后, 基于7个强引力透镜源, 哈勃常数被优化到误差2.4%, 其值为 $73.3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ^[74], 该结果与造父变星结果非常一致, 与宇宙微波背景辐射结果相差3个标准差. 但如果仔细考虑强引力透镜测距的误差且不假设标准的透镜星系质量分布, 哈勃常数的误差将会增加到8.0%. 未来仍需要数目上百的强引力透镜样本, 通过分层框架的方法得到误差为1%的哈勃常数^[17].

引力波标准汽笛是一个近年来新兴的测量哈勃常数的方法, 它同样独立于距离阶梯方法. 对于双中子星或黑洞合并事件, 它们的引力波振幅与距离有关, 而波形特征与系统质量、轨道有关. 如果有其他证据获得观测倾角, 就能较好地得到引力波源的距离. 而如果存在电磁辐射, 进而测量到红移, 就能测量哈勃常数. Hotokezaka等人^[18]基于GW170817测得误差为7%、值为 $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 的哈勃常数. 该方法能够避开光度测距的多项误差, 只需要足够的数量就能降低误差, 检验哈勃常数危机. 由于当前仍只有这一例能很好确定哈勃常数的标准汽笛, 天文学家也开始尝试使用“暗汽笛”的方法来测量哈勃常数. 所谓暗汽笛就是没有电磁对应体的引力波事件, 这时需要对可能天区范围内的星系红移进行概率分析, 得到哈勃常数. Alfradique等人^[75]对10例暗汽笛进行分析, 得到了误差为20%、值为 $76 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 的哈勃常数. 引力波标准汽笛方法仍然需要更大的样本来降低统计误差.

双周期天琴座RR型变星是近期发现的绝佳量天尺^[76]. 由于金属丰度和2个周期存在很强的相关性, 双周期天琴座RR型变星的周光关系基本不受金属丰度的影响, 消光和混淆效应的误差也较小, 因此系统偏差

主要来自于几何距离, Gaia的视差和大麦哲伦云距离均可用于锚定双周期天琴座RR型变星周光关系. 当前, 双周期天琴座RR型变星的系统偏差为1.0%, 未来基于优化的视差和更大的样本, 双周期天琴座RR型变星的系统偏差很有可能会小于造父变星. 它们将被用于检测造父变星和TRGB的量天尺, 或者建立基于双周期天琴座RR型变星+TRGB+Ia型超新星的新距离阶梯, 从而多手段确定哈勃常数的误差.

图1对比了不同测距天体1倍标准差的弥散, 它们反映了基于一颗标准烛光能得到的天体距离精度. 图2总结了当前不同哈勃常数观测值的概率分布, 可以

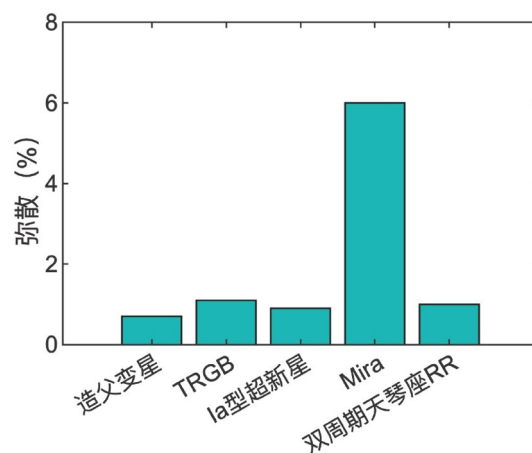


图1 (网络版彩图)不同标准烛光1倍标准差弥散的比较, 它代表了使用1颗标准烛光测量天体距离的误差

Figure 1 (Color online) Comparison of one sigma standard deviation dispersion of different standard candles, which represents the error in measuring object distance using one standard candle.

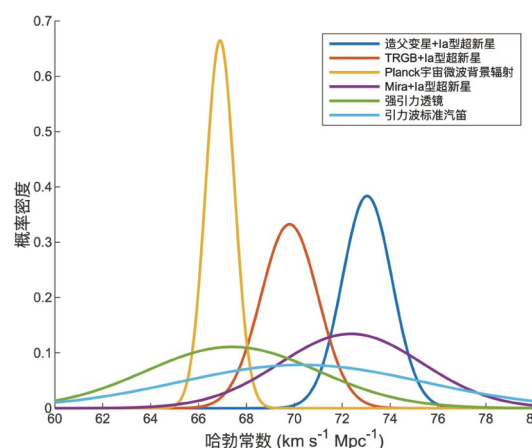


图2 (网络版彩图)不同方法测量哈勃常数的概率密度分布

Figure 2 (Color online) Probability density distributions of the Hubble constant measured by different methods.

看到三种主流的测量方法存在明显的分歧, 而其他潜在的测量方法需要进一步优化.

7 总结

本文介绍了多种量天尺, 比较了它们的优缺点以及未来的优化方向, 并介绍了如何将这些量天尺组合成距离阶梯来测量哈勃常数. 当前基于造父变星和Ia型超新星的距离阶梯方法和Planck宇宙微波背景辐射

方法测量的哈勃常数相差5倍标准差, 而TRGB测量的结果位于它们之间. 未来五年内, 随着Gaia DR4的发布, 第一级距离阶梯将会得到非常好的交叉验证. 而随着詹姆斯韦伯望远镜、欧几里德望远镜、维拉·鲁宾天文台、中国空间站巡天望远镜的观测, 第一级距离阶梯的标准烛光数目将增加10倍左右. 天文学家们将能得到一个0.3%误差的第一级距离阶梯. 通过与更大样本的近邻Ia型超新星相结合, 天文学家们将有望能就当前哈勃常数危机给出一个答案.

参考文献

- Leavitt H S, Pickering E C. Periods of 25 variable stars in the small magellanic cloud. *Harvard Coll Observ Circ*, 1912, 173: 1–3
- Hubble E P. Extragalactic nebulae. *Astrophys J*, 1926, 64: 321–369
- Hubble E. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1929, 15: 168–173
- Sandage A, Tammann G A. Steps toward the Hubble constant. V—The Hubble constant from nearby galaxies and the regularity of the local velocity field. *Astrophys J*, 1975, 196: 313–328
- Sandage A, Tammann G A. Steps toward the Hubble constant. VIII—The global value. *Astrophys J*, 1982, 256: 339–345
- Sandage A, Saha A, Tammann G A, et al. Cepheid calibration of the peak brightness of Type Ia supernovae: Calibration of SN 1990N in NGC 4639 averaged with six earlier Type Ia supernova calibrations to give H_0 directly. *Astrophys J*, 1996, 460: L15
- de Vaucouleurs G. Distances of the Virgo, Fornax and Hydra clusters of galaxies and the local value of the Hubble ratio. *Nature*, 1977, 266: 126–129
- de Vaucouleurs G, Peters W L, Bottinelli L, et al. Hubble ratio and solar motion from 300 spirals having distances derived from H I line widths. *Astrophys J*, 1981, 248: 408–422
- Freedman W L, Madore B F, Gibson B K, et al. Final results from the *Hubble Space Telescope* key project to measure the Hubble constant. *Astrophys J*, 2001, 553: 47–72
- Freedman W L, Madore B F, Scowcroft V, et al. Carnegie Hubble program: A mid-infrared calibration of the Hubble constant. *Astrophys J*, 2012, 758: 24
- Riess A G, Macri L M, Hoffmann S L, et al. A 2.4% determination of the local value of the Hubble constant. *Astrophys J*, 2016, 826: 56
- Ade P A R, Aghanim N, Arnaud M, et al. *Planck* 2015 results. XIII. Cosmological parameters. *Astron Astrophys*, 2016, 594: A13
- Riess A G, Yuan W, Macri L M, et al. A comprehensive measurement of the local value of the Hubble constant with $1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES team. *Astrophys J Lett*, 2022, 934: L7
- Lindegren L, Bastian U, Biermann M, et al. *Gaia* Early Data Release 3. Parallax bias versus magnitude, colour, and position. *Astron Astrophys*, 2021, 649: A4
- Freedman W L, Madore B F, Hatt D, et al. The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An independent determination of the Hubble constant based on the Tip of the Red Giant Branch. *Astrophys J*, 2019, 882: 34
- Freedman W L. Measurements of the Hubble constant: Tensions in perspective. *Astrophys J*, 2021, 919: 16
- Birrer S, Treu T. TDCOSMO. V. Strategies for precise and accurate measurements of the Hubble constant with strong lensing. *Astron Astrophys*, 2021, 649: A61
- Hotokezaka K, Nakar E, Gottlieb O, et al. A Hubble constant measurement from superluminal motion of the jet in GW170817. *Nat Astron*, 2019, 3: 940–944
- Cai R G, Li L, Wang S J. Hubble-constant crisis (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2023, 72: 239801 [蔡荣根, 李理, 王少江. 哈勃常数危机. 物理学报, 2023, 72: 239801]
- Perryman M A C, Lindegren L, Kovalevsky J, et al. The HIPPARCOS catalogue. *Astron Astrophys*, 1997, 323: L49–L52

- 21 Benedict G F, McArthur B E, Feast M W, et al. *Hubble Space Telescope* fine guidance sensor parallaxes of galactic cepheid variable stars: Period-luminosity relations. [Astron J](#), 2007, 133: 1810–1827
- 22 Casertano S, Riess A G, Anderson J, et al. Parallax of galactic Cepheids from spatially scanning the wide field camera 3 on the Hubble Space Telescope: The case of *ss canis majoris*. [Astrophys J](#), 2016, 825: 11
- 23 Riess A G, Casertano S, Yuan W, et al. New parallaxes of galactic Cepheids from spatially scanning the Hubble Space Telescope: Implications for the Hubble constant. [Astrophys J](#), 2018, 855: 136
- 24 Riess A G, Casertano S, Yuan W, et al. Cosmic distances calibrated to 1% precision with Gaia EDR3 parallaxes and Hubble Space Telescope photometry of 75 Milky Way Cepheids confirm tension with Λ CDM. [Astrophys J Lett](#), 2021, 908: L6
- 25 Ren F, Chen X, Zhang H, et al. Gaia EDR3 parallax zero-point offset based on W Ursae majoris-type eclipsing binaries. [Astrophys J Lett](#), 2021, 911: L20
- 26 Zinn J C. Validation of the Gaia Early Data Release 3 parallax zero-point model with asteroseismology. [Astron J](#), 2021, 161: 214
- 27 Riess A G, Breuval L, Yuan W, et al. Cluster Cepheids with high precision Gaia parallaxes, low zero-point uncertainties, and Hubble Space Telescope photometry. [Astrophys J](#), 2022, 938: 36
- 28 Reyes M C, Anderson R I. A 0.9% calibration of the Galactic Cepheid luminosity scale based on *Gaia* DR3 data of open clusters and Cepheids. [Astron Astrophys](#), 2023, 672: A85
- 29 Torres G, Claret A, Young P A. Binary orbit, physical properties, and evolutionary state of capella (α aurigae). [Astrophys J](#), 2009, 700: 1349–1381
- 30 Gallenne A, Pietrzyński G, Graczyk D, et al. The Araucaria Project: High-precision orbital parallax and masses of the eclipsing binary TZ Fornacis. [Astron Astrophys](#), 2016, 586: A35
- 31 Gallenne A, Kervella P, Evans N R, et al. A geometrical 1% distance to the short-period binary Cepheid V1334 Cygni. [Astrophys J](#), 2018, 867: 121
- 32 Di Benedetto G P. Predicting accurate stellar angular diameters by the near-infrared surface brightness technique. [Mon Not R Astron Soc](#), 2005, 357: 174–190
- 33 Pietrzyński G, Graczyk D, Gallenne A, et al. A distance to the Large Magellanic Cloud that is precise to one per cent. [Nature](#), 2019, 567: 200–203
- 34 Herrnstein J R, Moran J M, Greenhill L J, et al. A geometric distance to the galaxy NGC4258 from orbital motions in a nuclear gas disk. [Nature](#), 1999, 400: 539–541
- 35 Reid M J, Pesce D W, Riess A G. An improved distance to NGC 4258 and its implications for the Hubble constant. [Astrophys J Lett](#), 2019, 886: L27
- 36 Bono G, Marconi M, Cassisi S, et al. Classical Cepheid pulsation models. X. The period-age relation. [Astrophys J](#), 2005, 621: 966–977
- 37 De Somma G, Marconi M, Cassisi S, et al. Updated theoretical period-age and period-age-colour relations for Galactic Classical Cepheids: An application to the Gaia DR2 sample. [Mon Not R Astron Soc](#), 2020, 496: 5039–5051
- 38 Bono G, Braga V F, Fiorentino G, et al. Evolutionary and pulsation properties of Type II Cepheids. [Astron Astrophys](#), 2020, 644: A96
- 39 Chen X, Wang S, Deng L, et al. The Zwicky Transient Facility catalog of periodic variable stars. [Astrophys J Suppl Ser](#), 2020, 249: 18
- 40 Chen X, Wang S, Deng L, et al. An intuitive 3D map of the Galactic warp's precession traced by classical Cepheids. [Nat Astron](#), 2019, 3: 320–325
- 41 Udalski A, Szymanski M, Kubiak M, et al. The optical gravitational lensing experiment. Cepheids in the magellanic clouds. III. Period-luminosity-color and period-luminosity relations of classical cepheids. [Acta Astron](#), 1999, 49: 201–221
- 42 Tammann G A, Sandage A, Reindl B. New period-luminosity and period-color relations of classical Cepheids: I. Cepheids in the galaxy. [Astron Astrophys](#), 2003, 404: 423–448
- 43 Madore B F. The period-luminosity relation. IV Intrinsic relations and reddenings for the Large Magellanic Cloud Cepheids. [Astrophys J](#), 1982, 253: 575–579
- 44 Fouqué P, Arriagada P, Storm J, et al. A new calibration of Galactic Cepheid period-luminosity relations from B to K bands, and a comparison to LMC relations. [Astron Astrophys](#), 2007, 476: 73–81
- 45 Wang S, Chen X, de Grijs R, et al. The near-infrared optimal distances method applied to galactic classical Cepheids tightly constrains mid-infrared period-uminosity relations. [Astrophys J](#), 2018, 852: 78
- 46 Wang S, Chen X. The optical to mid-infrared extinction law based on the APOGEE, Gaia DR2, Pan-STARRS1, SDSS, APASS, 2MASS, and

- WISE surveys. *Astrophys J*, 2019, 877: 116
- 47 Wang S, Chen X. The optical to infrared extinction law of magellanic clouds based on red supergiants and classical cepheids. *Astrophys J*, 2023, 946: 43
- 48 Romaniello M, Primas F, Mottini M, et al. The influence of chemical composition on the properties of Cepheid stars. *Astron Astrophys*, 2008, 488: 731–747
- 49 Breuval L, Riess A G, Kervella P, et al. An improved calibration of the wavelength dependence of metallicity on the cepheid leavitt law. *Astrophys J*, 2022, 939: 89
- 50 Anderson R I, Saio H, Ekström S, et al. On the effect of rotation on populations of classical Cepheids. II. Pulsation analysis for metallicities 0.014, 0.006, and 0.002. *Astron Astrophys*, 2016, 591: A8
- 51 De Somma G, Marconi M, Molinaro R, et al. An updated metal-dependent theoretical scenario for classical cepheids. *Astrophys J Suppl Ser*, 2022, 262: 25
- 52 Riess A G, Anand G S, Yuan W, et al. JWST observations reject unrecognized crowding of Cepheid photometry as an explanation for the Hubble tension at 8σ confidence. *Astrophys J Lett*, 2024, 962: L17
- 53 Lee M G, Freedman W L, Madore B F. The tip of the red giant branch as a distance indicator for resolved galaxies. *Astrophys J*, 1993, 417: 553
- 54 Madore B F, Freedman W L. The tip of the red giant branch as a distance indicator for resolved galaxies. 2: Computer simulations. *Astron J*, 1995, 109: 1645
- 55 Sakai S, Madore B F, Freedman W L. Tip of the red giant branch distances to galaxies. III. The dwarf galaxy sextans A. *Astrophys J*, 1996, 461: 713
- 56 Beaton R L, Freedman W L, Madore B F, et al. The Carnegie-Chicago Hubble Program. I. An independent approach to the extragalactic distance scale using only population II distance indicators. *Astrophys J*, 2016, 832: 210
- 57 Hatt D, Beaton R L, Freedman W L, et al. The Carnegie-Chicago Hubble Program. II. The distance to IC 1613: The tip of the red giant branch and RR Lyrae period-luminosity relations. *Astrophys J*, 2017, 845: 146
- 58 Jang I S, Hatt D, Beaton R L, et al. The Carnegie-Chicago Hubble Program. III. The Distance to NGC 1365 via the tip of the red giant branch. *Astrophys J*, 2018, 852: 60
- 59 Hatt D, Freedman W L, Madore B F, et al. The Carnegie-Chicago Hubble Program. IV. The distance to NGC 4424, NGC 4526, and NGC 4356 via the tip of the red giant branch. *Astrophys J*, 2018, 861: 104
- 60 Hatt D, Freedman W L, Madore B F, et al. The Carnegie-Chicago Hubble Program. V. The distances to NGC 1448 and NGC 1316 via the tip of the red giant branch. *Astrophys J*, 2018, 866: 145
- 61 Yuan W, Riess A G, Macri L M, et al. Consistent calibration of the Tip of the Red Giant Branch in the large magellanic cloud on the Hubble Space Telescope photometric system and a redetermination of the Hubble constant. *Astrophys J*, 2019, 886: 61
- 62 Freedman W L, Madore B F, Hoyt T, et al. Calibration of the tip of the red giant branch. *Astrophys J*, 2020, 891: 57
- 63 Madore B F, Freedman W L. Systematics in the Cepheid and TRGB distance scales: Metallicity sensitivity of the Wesenheit Leavitt Law. *Astrophys J*, 2024, 961: 166
- 64 Phillips M M. The absolute magnitudes of Type Ia supernovae. *Astrophys J*, 1993, 413: L105
- 65 Hicken M, Wood-Vasey W M, Blondin S, et al. Improved dark energy constraints from ~ 100 NEW CfA supernova type Ia light curves. *Astrophys J*, 2009, 700: 1097–1140
- 66 Folatelli G, Phillips M M, Burns C R, et al. The Carnegie Supernova Project: Analysis of the first sample of low-redshift Type-Ia supernovae. *Astron J*, 2010, 139: 120–144
- 67 Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *Astron J*, 1998, 116: 1009–1038
- 68 Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et al. Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae. *Astrophys J*, 1999, 517: 565–586
- 69 Huang C D, Riess A G, Yuan W, et al. Hubble Space Telescope observations of Mira variables in the SN Ia Host NGC 1559: An alternative candle to measure the Hubble constant. *Astrophys J*, 2020, 889: 5
- 70 Huang C D, Yuan W, Riess A G, et al. The Mira distance to M101 and a 4% measurement of H_0 . *Astrophys J*, 2024, 963: 83
- 71 Huang C D, Riess A G, Hoffmann S L, et al. A near-infrared period-luminosity relation for Miras in NGC 4258, an anchor for a new distance ladder. *Astrophys J*, 2018, 857: 67

- 72 Andriantsaralaza M, Ramstedt S, Vlemmings W H T, et al. Distance estimates for AGB stars from parallax measurements. *Astron Astrophys*, 2022, 667: A74
- 73 Suyu S H, Auger M W, Hilbert S, et al. Two accurate time-delay distances from strong lensing: Implications for cosmology. *Astrophys J*, 2013, 766: 70
- 74 Wong K C, Suyu S H, Chen G C F, et al. H0LiCOW—XIII. A 2.4 per cent measurement of H0 from lensed quasars: 5.3 σ tension between early- and late-Universe probes. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 498: 1420–1439
- 75 Alfradique V, Bom C R, Palmese A, et al. A dark siren measurement of the Hubble constant using gravitational wave events from the first three LIGO/Virgo observing runs and DELVE. *Mon Not R Astron Soc*, 2024, 528: 3249–3259
- 76 Chen X, Zhang J, Wang S, et al. The use of double-mode RR Lyrae stars as robust distance and metallicity indicators. *Nat Astron*, 2023, 7: 1081–1089

Distance ladders and the Hubble constant crisis

CHEN XiaoDian^{1,2,3*} & WANG Shu¹

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Institute for Frontiers in Astronomy and Astrophysics, Beijing Normal University, Beijing 102206, China;

³ School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding author (email: chenxiaodian@nao.cas.cn)

The Hubble constant is an important parameter in astronomy, and recent observational evidences reveal a 5 σ discrepancy in its measurements, known as the “Hubble constant crisis”. In this review, we summarize several commonly used distance ladder methods for measuring the Hubble constant, including geometric distances, classical Cepheid distances, tip of red giant branch star (TRGB) distances, and type Ia supernova distances. We introduce and discuss their strengths, weaknesses, potential problems, and expectations for future optimization. The most accurate geometric distances include the Gaia parallax, the eclipsing binary distance measurement of the Large Magellanic Cloud, and the water maser distance measurement of NGC 4258, with the Gaia parallax showing the most promising for further optimization. By combining these three geometric distances, the distance errors based on Cepheids and TRGBs are 0.7% and 1.1%, respectively, and they are used to calibrate type Ia supernovae in the nearby galaxies. Cepheids were used to calibrate the absolute magnitude of 42 nearby type Ia supernovae with an error of 0.9%, while TRGBs were used to calibrate the absolute magnitude of 18 nearby type Ia supernovae with an error of 1.3%. The Hubble constant can be measured using the apparent magnitudes and redshifts of more distant type Ia supernovae. The Hubble constant based on Cepheids + type Ia supernovae is 73 km s⁻¹ Mpc⁻¹ with an error of 1.4%, while that based on TRGB + type Ia supernovae are 70 km s⁻¹ Mpc⁻¹ with an error of 1.7%. Additionally, we introduce several potential methods for distance measurement that can help verify commonly used distance ladders or measure the Hubble constant independently. In the next five years, with the optimization of the Gaia parallax, the accumulation of data from the James Webb Telescope, and the launch of the Chinese Space Station Telescope, astronomers are expected to resolve the current “Hubble Constant Crisis”.

Hubble constant, classical Cepheids, tip of red giant branch stars, type Ia supernovae, geometric distances

PACS: 98.80.Es, 97.10.Sj, 97.10.Vm, 97.20.Li, 97.60.Bw

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0210](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0210)