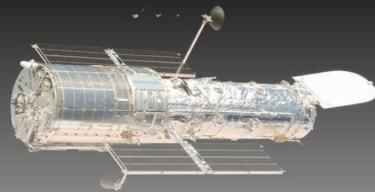


测量哈勃常数

(中国科学院国家天文台 邹振隆、秦波 编译自 Mario Livio, Adam G.

Riess. *Physics Today*, 2013, (10): 41, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)



天体退行速度与到我们距离之比这一宇宙学基本参数，或许蕴含着有关宇宙的年龄、组成和结构的信息。

2011年爆发了一场充满激情的辩论：宇宙膨胀的发现应该归功于谁？背景如下。截止1922年2月，美国天文学家斯莱弗已测得了41个星系的红移。1924年，瑞典天文学家伦德马克提供了宇宙膨胀的初步定性证据。然而，他的结果并无太大分量，因为他引入了所有星系直径相同这一并不太靠谱的假设。

更强的证据来自比利时人勒梅特。1927年，他用法文发表了一篇论文，用斯莱弗的结果提出了试探性的“哈勃定律” $v = H_0 d$ ，即距离 d 和速度 v 成线性关系。勒梅特得出的 H_0 值为 $625 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。但该文并未受人关注。两年后，哈勃(见图1)发表了他的开创性论文，以某些类型的恒星亮度为基础改进了距离测定。他得到的退行速度和距离的线性关系更为明显和有说服力，被公认为是发现宇宙膨胀的开山之作。

最近争论的主要动因在于，1931年面世的勒梅特论文的英译本省略了某些段落。本文作者之一(Livio)经过广泛的研究，发现有确凿的证据表明，在哈勃更精确的结果发表之后，勒梅特出于谦逊，在英译版中删除了那些他认为已被哈勃的工作所超越的段落。简言之，伦德马克最先提供了宇宙膨胀的观测证据，勒梅特尝试性地把理论和观测联系起来，哈勃和他的助手赫

马森在一系列的论文中提供了最好的观测证明，而所有人都受惠于斯莱弗的红移观测结果。

早期测量

哈勃常数 H_0 直接描述了今天宇宙的膨胀速率，是确定宇宙年龄 t_0 的关键参数： $t_0 \propto H_0^{-1}$ 。一些物理过程，如宇宙结构的生长及轻同位素的核合成，均与宇宙膨胀速率相关，从而依赖于 H_0 值。因此， H_0 的测定一直是90年来天文学的一个主要目标。

哈勃当年测定的 H_0 值约 $500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ，其测量不确定性被相当幼稚地估计为10%的量级。20年后，巴德认识到哈勃混淆了用于距离定标的两类脉动变星，经他修订后的距离增加约2倍，则 H_0 减小一半。50年代后期，桑德奇证明哈勃当年将电离氢区误认为亮星，则修订后的哈勃常数进一步下降到 $H_0 \approx 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ，其不确定性与本身的数值相当。

在随后的30年中，天文学家发表的 H_0 测量值一直在约2倍的范围内变动。其中由桑德奇领导的小组一直声称该值为 $50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \pm 10\%$ ，而

由德沃古勒领导的另一组则坚持该值为 $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \pm 10\%$ 。这些结果令人困惑有两个原因。一者，其给出的误差显然太小，不可能两个值都对。再者，如果取其平均，推算出的宇宙年龄竟然小于当时计算出的最老星团的年龄！后来，伊巴谷卫星的精确距离测量使恒星的计算年龄降低，而宇宙加速膨胀的发现意味着宇宙年龄更老。这样，之前的宇宙年龄矛盾才最终得到解决。

要测量哈勃常数，需确定足够远天体的红移(视向速度)和距离，以消除天体本动的影响。尽管遥远的天体一般很暗，但得到红移还不算太难，挑战主要来自精确的天文距离测定。

造父变星——天文学家的量天尺

最简单和最可靠的距离测量，



图1 埃德温·哈勃拿着一张星系的图像。哈勃找到令人信服的证据，表明星系以离我们的距离成比例的速度在退行

是以地球绕日轨道直径为基线的三角视差。可惜这种几何方法大体只能测到银河系内约达 1 kpc 的范围。因此，必须寻找其他方法来确定远至几十到几百 Mpc 的河外星系。

这些方法得到的实际上是相对距离，需由三角视差范围内的近距天体来定标，这类天体称为一级示距天体。二级示距天体离我们很远。由于原本就稀少，其最近者也在视差范围以外，因此其距离要由一级示距天体校准。如此循序渐进形成一个距离阶梯，达到宇宙平滑膨胀运动(哈勃流)远超天体局部本动的区域。 H_0 的测量误差也相应地沿着这个距离阶梯传导下去。

最常见的示距天体由其几何性质、物理性质或各种相关性而成为标准烛光。标准烛光的基本概念是辐射流量按平方反比定律减少。适用的标准烛光候选天体或光度恒定，或光度与距离无关而与某些可测特性(如振荡周期或光变曲线的衰减律)相关联。它们非常明亮，因此可以从远处被看到。

最知名的标准烛光是被称为造父变星的脉动超巨星。它们光度高(太阳的 10^4 — 10^5 倍)，物理机制清楚，因而成为最可靠的一级示距天体。

将距离阶梯伸向宇宙深处

Ia 型超新星产生于碳氧白矮星吸积质量超过钱德拉塞卡极限而导致的热核爆炸。它们的峰值光度非常高，比造父变星明亮百万倍，而彼此差异相对较小，且与其光变曲线的形状密切相关。经过光变曲线改正和尘埃消光改正之后，统计弥散在光学波段约 15%，在近红外约 10%。Ia 型超新星的高光度和低弥散使其成为最理想的远程标准烛光，测量距离的范围可达 40—5000

Mpc。

巨脉泽方法首次应用于活动星系 NGC 4258，已被证明是一种在本星系群以外进行直接距离测量的有效手段。对活动星系绕中心黑洞转动的盘上的水脉泽辐射，进行亚毫角秒级的超分辨率成像和监测，可以测出它们在中央黑洞的引力作用下的转动速度 v 和向心加速度 a ，因此距离就可准确测定了。

当宇宙中的两个星系与观测者恰好排成接近三点一线时，强引力透镜效应可能产生源的多重像。如果碰巧源是可变的，通过仔细监测光变曲线可以精确测量不同像之间的时间延迟。再结合引力透镜的质量分布模型，就可以用时间延迟把角距离转换成绝对距离。

哈勃常数和暗能量

过去 15 年间建立起来的新的标准宇宙学模型表明，宇宙由两个我们知之甚少的成分——暗物质和暗能量所主导。驱使宇宙加速膨胀的暗能量是更大的谜团。它可能是真空能，也可能是某种标量场，但该场随时间的变化仍然是悬而未决的问题。

理解暗能量的经验方法是测量其状态方程的参数， $w = P/\rho c^2$ ，其中 P 是压强， ρ 是密度， c 是光速。如果暗能量是真空能(等价于爱因斯坦宇宙学常数)，则 $w = -1$ 。如果暗能量是一个衰变的标量场，则我们可能探测到 w 的时间依赖性。

规划中的各种超精密宇宙学测量有可能揭示暗能量的本质。哈勃常数的测量与其它更高红移的宇宙测量手段可形成互补。对红移 0.1 范围内的近邻宇宙的 H_0 测量，其精度有望接近 1%。而结合 WMAP、阿塔卡马宇宙望远镜、南极望远镜和

普朗克卫星对宇宙微波背景辐射的精确观测， w 的测量精度可能达到 2% 左右。

通往更精确测量之路

近年来，随着一系列重大改进，连接几何距离与造父变星和 Ia 型超新星的距离阶梯有可能达到 1% 的预期精度。哈勃望远镜上的新仪器，特别是先进巡天相机和宽视场相机(WFC3)，使其探测距离翻了一番，从而使借助造父变星来校准超新星的机会增加了 8 倍。SHOES 组(状态方程超新星 H_0)正在用这些新仪器校准 17 颗理想的 Ia 型超新星。

在对 NGC 4258 的水脉泽进行了 10 年射电观测后，天文学家测定该星系的距离为 7.60 Mpc，不确定性为 3%。哈勃望远镜的新仪器能在该星系内发现数以百计的造父变星并校准它们的光度。用相同仪器观测超新星宿主星系和 NGC 4258 中周期在给定范围内的造父变星，可以消除流量定标中的误差，将 H_0 的不确定性降低到 3%。银河系中造父变星的三角视差原则上可以固定距离阶梯到 1% 的精度。使用哈勃望远镜搭载的精细导向传感器，测量了 10 颗最近的造父变星的视差，平均误差为 3%。2020 年之前，欧洲航天局的盖亚卫星也将提供造父视差至 10 kpc。造父变星新近的中红外校准，作为卡内基哈勃计划的一部分，可进一步提高局地范围距离阶梯的可靠性。近红外测量可以使 H_0 的测量精度达到 1% 以内。当这个新的阶梯在哈勃望远镜的第三个(也可能是最后一个)十年期内完成时，它将是一个强大无比的工具，足以探知标准宇宙学模型中的未解之谜。