



哈勃常数

——一个难有确定值的重要参量

许梅

何常同志的文章
《哈勃常数

战和宇宙命运》，本刊 1994 年第 4 期 11—14 页)介绍了测定河外星系的几种方法、哈勃常数 50 与 100 之争^①，以及哈勃常数与宇宙命运的关系。本文旨在向读者介绍哈勃常数值演变的历史、近年来用不同方法测定的哈勃常数值以及对此问题的几点小结。

一、50 与 100 之争的由来

本世纪 20 年代后期，美国天文学家哈勃 (Edwin Hubble) 利用加利福尼亚州威尔逊山上口径 1.5 米和 2.5 米的望远镜，对十几亿光年范围内的星系进行了研究。当时有 46 个河外星系的视向速度可资利用，而其中已推算出距离的有 24 个。他利用这 24 个星系发现了一个有趣的事实：河外星系的退行速度 V 与距离 D 成比例。 $V = KD$ ，并测定出这一比值 $K = 530$ ，后来，人们为了纪念他，称其为哈勃常数，并改用符号 H ，其单位为公里·秒⁻¹·兆秒差距⁻¹。1931 年，哈勃与哈马逊 (M.L. Humason) 第二次测定 H 为 558，后来又订正为 526。哈勃测定 H 时，应用了造父变星和星系中的最亮星来标定距离。1952 年，巴德 (W. Baade) 指出，仙女星系 M31 中造父变星的星等零点应变动 1.5 等，由此，哈勃常数应修订为 260。1958 年，桑德奇 (A. Sandage) 指出：哈勃所说的最亮星实际上位于电离氢 (HII) 区，因此要再加上 1.8 等的星等改正，从而将哈勃常数降为 $H = 75$ 。1974—1976 年，桑德奇和塔曼 (G.A. Tammann) 又用 7 种距离指标的方法重新修订哈勃常数，得到 $H = 50$ ，只及哈勃当年测定值的 1/10。

H 是否是一个常数，过去的 H 和现时的 H (常用 H_0 表示) 是不是同一值，它与我们所观测的星系的方向有无关系等，都是值得探讨的问题。例如，沃库勒 (G. de Vaucouleurs) 就曾指出：桑德奇和塔曼只用造父变星作为测定星系距离的第一指示天体，对 100 个星系进行了观测。而沃库勒用了新星、造父变星、天琴座 RR 型变星、超巨星和食变星五种天体作为“标准烛光”，对 300 个星系进行了观测，他得到的 $H_0 = 100$ 。范登堡 (S. van den Bergh) 用 9 种距离指标也得到接近于沃库勒所得值： $H_0 = 95$ 。

1984 年，霍奇 (Paul Hodge) 在一篇总结性的文章中介绍了自 1975 年至 1983 年 27 个人和小组用不同方法测定的 H_0 之值，基本上都位于 50 与 100 之间。这一情况使霍奇认为：人们应当集中精力更好地去理解这一问题症结之所在。

二、室女星系团的距离

室女星系团距离的测定是一个至关重要的问题。首先，它是距离我们最近的星系团，对于比该星系团为近的星系距离的测量都要受到我们银河系和近邻星系引力作用的影响，这一引力拖曳作用干扰了局部宇宙的均匀膨胀，使测得的哈勃常数值欠真实；其次，准确的室女星系团的距离是测量更远星系团距离的基础，室女星系团中最亮的成员星系可用作更远星系团中最亮星系比较用的“标准烛光”。下面介绍通过几种不同方法测定的室女星系团的距离和哈勃常数值，其中以观测到该星系团内两个旋涡星系中的造父变星尤为引人注目。

^① 单位为公里·秒⁻¹·兆秒差距⁻¹，1 秒差距 = 3.26 光年。

T-F 关系 1977年,夏威夷大学的塔利(Brent Tully)和美国国立射电天文台的费希尔(Richard Fisher)发现:旋涡星系的本身光度(或绝对星等)和其外围的旋转速度之间有正比关系(两者都是由星系的质量决定的),此后该关系即以两位发现者的姓氏命名称之为Tully-Fisher关系,简称T-F关系.星系外围的旋转速度可以从测量星系21厘米氢(HI)谱线的多普勒宽度得到.特别是对于那些旋臂张得较开的S₀旋涡星系这一正比关系显得更好.近年来,测量星系的红外辐射进一步避免了星系内尘埃的消光影响.因此,通过测量旋涡星系21厘米射电谱线的宽度便能准确地测量星系的本身红外光度,只要能测得星系的视红外流量便能运用反平方律直接得出星系的距离.1992年,用红外T-F关系测出室女星系团的距离为4900万光年,得到哈勃常数 $H_0 \approx 75$.

面亮度起伏 1988年,美国麻省理工学院的汤里(John Tonry)指出:用电荷耦合器件(CCD)照相机拍摄星系的像时,像的“粗糙度”反比于星系与我们的距离.这是由于该粗糙度决定于CCD上每个象素(pixel)拍摄的恒星数,近邻星系中的恒星要比较远星系中的恒星容易分辨,因此,近邻星系的CCD像显得斑斑点点而较远星系的CCD像显得光滑些(每个象素含有的恒星数较多).具有相同视直径但位于不同距离的星系将由CCD每个象素的不同粗糙度反映出来.汤里小组测量了室女星系团中13个椭圆星系CCD像的斑驳程度,与已知距离的本星系群中的椭圆星系M32的CCD像比较,测定室女团的距离为5180万光年,并得到哈勃常数 H_0 为84.

新星 新星是爆发变星的一种,它的亮度可以在几天的时间里突然增亮9个星等以上,然后在几个月到若干年的时间内有起伏地下降到爆发前的亮度,而且所有新星的绝对星等的变化范围不大,故可先取它们的平均值作为一切新星的绝对星等,再把它同观测到的最大视星等相比较,便可定出该新星所在星

系的距离.1985年,普里切特(Chris Pritchett)和范登堡在室女星系团的巨椭圆星系M87中发现了新星,后来又在该星系团的另外三个椭圆星系M49、M60及NGC4365中发现新星.他们的观测数据表明室女星系团的距离为6360万光年,相应的哈勃常数为69.

行星状星云 1988年,美国国立光学天文台的雅各比(George H. Jacoby)等人提出用行星状星云做为指示天体.他们在仙女星系M31、椭圆星系M32及旋涡星系M81等近邻星系中辨认出了两千多个行星状星云,并发现最亮行星状星云的绝对星等约为-4.4.这一亮度上限意味着在所有星系中最亮的行星状星云具有近似的光度,这就有利于我们较准确地估计光源与地球的距离.在各类星系中都能找到行星状星云,而大质量恒星和造父变星在椭圆星系及透镜状星系中却很少见,其次,造父变星大都位于旋涡星系尘埃较多的旋臂内,而行星状星云在星系各处都有,如利用位于星系盘上、下无尘埃区的行星状星云测定星系距离时还可避免尘埃红化效应带来的星云光度的误差.雅各比小组用此方法测出室女星系团中心巨椭圆星系M87距离地球约为6200万光年,相应的哈勃常数为70.

造父变星 勒维特(H. S. Leavitt)女士1917年开始使用的造父变星至今仍然是沿用着的测定星系距离的标准烛光之一.这是因为造父变星具有较强的本身亮度,在近邻星系中为数也较多,其迅速变亮的特征有助于人们将其与其他变星区别开来,而最主要的是天文学家基本上掌握了它们的光变特性.但多年来由于难以测定星际尘埃的消光影响和在拥挤的星场中难以拍摄到一颗造父变星的真实光度,致使这一观测手段被蒙上了一层阴影.美国卡内基天文台的弗里德曼(Wendy L. Freedman)女士及其同事们在80年代初期便开始钻研这两个问题,近年来,由于采用了CCD探测技术和计算机软件的改进,使她的小组能做到分别测量造父变星和其近邻恒星的亮度,能精确测定造父变星亮度变化的全过程.她用在不同波段

(BVRI)①观测造父变星的不同光变以校正星际尘埃的消光作用,从而深化了天体物理学家们对造父变星周光关系的了解.这样,就有可能通过哈勃空间望远镜用此方法获得室女星系团内星系中造父变星的周光关系,从而更精确地测定室女团的距离.1994年,弗里德曼小组分析了哈勃空间望远镜拍摄的室女团中M100星系内20颗造父变星的光变数据(光变周期从20天到65天,光变幅度从25星等到27星等)得出M100距离我们为 56 ± 6 兆光年,结合该星系的退行速度(在校正了银河系落向室女星系团的速度后)得出哈勃常数 $H_0 = 80 \pm 17$.

与此同时,美国印第安纳大学的皮尔斯(Michael Pierce)及其合作者在1994年9月29日的一期Nature上发表了他们用加拿大-法国-夏威夷望远镜及加在该望远镜终端的高分辨照相机(该相机可校正由于地球大气抖动所导致的星像畸变)所拍摄到的室女团内旋涡星系NGC4571中的三颗造父变星的像,这三颗星的视亮度为24星等,光变周期50—90天,从而测得NGC4571的距离为 48.6 ± 3.9 兆光年,得到 $H_0 = 87 \pm 7$.

作为哈勃的传人,桑德奇利用造父变星测定河外星系的距离已积累了几十年的经验.他认为,M100也好,NGC4571也罢,均不在室女团的中心(室女星系团是一个狭长的星系团,沿我们的视线延伸4千万至1亿光年,距中心约8百万至2千万光年,但团的中心多为椭圆星系,没有造父变星,把用造父变星和I_a型超新星两者结合起来得到的 H_0 值才较为可靠.下文将介绍两者结合的初步成果,但尚与室女团无关.

三、对更远距离的探测

I_a型超新星 1984年,桑德奇和塔曼提出用I_a型超新星做为标准烛光测定星系的距离,因为有充分的理由可以相信所有I_a型超新星均由同样的过程产生的:双星系统中的白矮星爆发产生的.其次,理论模型预测,所有I_a型超新星的亮度均达到相同的峰值,而且比造父变星亮1万倍,故可利用它们来测定更远的宇宙

距离.但由于人们只能获得超新星爆发后其视亮度下降的数据,其绝对亮度的峰值需要根据这些数据倒推出来.

IC4182是猎犬座的一个暗弱旋涡星系,1993年,桑德奇小组通过哈勃空间望远镜在其中发现28颗造父变星,测出该星系距离地球约1600万光年,将此距离应用于该星系中1937年爆发的I_a型超新星,获得其本身光度的峰值为 -19.72 ± 0.13 星等,从而得到 $H_0 = 52 \pm 9$.但皮尔斯指出,IC4182中有大量的尘埃,它们将使造父变星显得较暗使估得的星系的距离较大,而哈勃望远镜光学系统的毛病对所测造父变星的光度也有影响.他用上述自制的CCD相机测得IC4182的距离仅有800万光年,从而得到 $H_0 = 86 \pm 12$.

桑德奇小组还通过哈勃空间望远镜在不规则星系NGC5253中发现了14颗造父变星,从而获得了在该星系中爆发的两颗I_a型超新星1895B和1972E的本身光度的峰值,得到 $H_0 = 54 \pm 8$.人们从众多I_a型超新星的光变曲线发现,亮者的光度下降较慢而较暗者的光度下降较快.哈佛-施密松天体物理中心的基尔希奈耳(Robert P. Kirshner)等三人考虑到这个因素,校正了自近而远的13颗超新星的距离(最远的达十亿光年),将所得它们的哈勃图(超新星所在星系的退行速度为纵坐标、星系距离为横坐标所得的一条直线)应用到NGC5253中的超新星1972E,得到 $H_0 = 67 \pm 7$.与此同时,以智利托洛洛山美洲天文台的哈迈(Mario Hamuy)女士为首的小组利用该台望远镜的CCD照相机获得了13个I_a型超新星(红移值在0.01与0.1之间)的光度下降数据,制做成它们的哈勃图,在制做该图时,她们注意到去除CCD相片上背景光的污染,还利用叠加在这些光度下降趋势上的模板(template)光变曲线,从而较准确地推定了I_a型超新星的亮度峰值.应用到NGC5253中的超新星1972E,将桑

①各波段平均波长为: V 4220埃, B 4880埃, R 7190埃, I 10300埃.

德奇等人所得的 $H_0 = 54 \pm 8$ 更改为 67 ± 11 .

II型超新星 具有浓厚氢层的大质量星爆发后形成II型超新星.以美国哈佛-施密特天体物理中心的施密特(Brian P.Schmidt)为首的天文小组近年来发展了一项测定II型超新星距离的新技术:膨胀光球层技术(Expanding Photosphere Method,简称EPM),该技术可从超新星的温度及其遗迹膨胀气壳的大小推导出超新星真实的亮度.超新星的颜色表明其温度:高温物质显示出蓝色,低温物质则为红色.膨胀气壳的大小可从超新星爆发时刻和气壳物质外逸速度推导出来,而外逸速度可从超新星光谱线的宽度得知:谱线越宽速度越大.有一个联系从任一表面辐射出的能量与其温度的标准公式,因此,知道了超新星的温度与其膨胀气壳的大小,便能计算出超新星的真实亮度,将其与所测超新星的视亮度比较,便可获得超新星的距离,这也就是该星所在星系的距离.从所得距离和星系的红移值便可计算出 H_0 .

1992年7月,在鲸鱼星座一红移值为0.048的星系内发现了一颗光谱中有强的氢发射线的超新星,故确认它是II型超新星,并命名为SN1992am.施密特小组用EPM得出SN1992am的距离为5.9亿光年,误差为 $\pm 15\%$,由此得出 $H_0 = 81 \pm 12$.施密特认为该星系距我们较远,其退行速度不受较近星系引力的影响,而且用EPM直接测量一遥远星系的距离,不包含使用近邻星系的距离等中间环节,故所得 H_0 之值应当是较准确的.他们计划将EPM应用到发生在其他遥远星系中的II型超新星,提供更好的 H_0 值.

引力透镜效应 利用引力透镜效应测定的哈勃常数可避免目前通用的一些“标准烛光”方法所带来的所有不确定因素,如对指示天体具有相同的本身亮度的假设等等.例如,大熊星座的类星体0957+561,因介于地球与该类星体之间的中介星系的引力透镜效应而将其显示为两个像.以美国布劳戴斯大学天文系罗伯茨(David Roberts)为首的小组通过甚大天线阵射电望远镜,利用许多射电“快拍”和巧妙的数

据处理技术,获得了两像亮度变化的时间差为1.40年,在测得两像角距后,从这两个数据计算出的 H_0 之值在46与69之间,较低值说明透镜星系中不含暗物质,较高值意味着中介星系内含有暗物质.

S-Z效应 1992年以来,英国天文学家桑德斯(Richard Saunders)等13人小组用位于英国剑桥的赖尔综合孔径射电望远镜绘制星系团Abell2218的S-Z效应图(当人们透过围绕着星系团的气体观测宇宙背景辐射时,发现该辐射的温度稍有下降,这就是S-Z效应,因两位前苏联科学家Sunyaev和Zel'dovich的发现而得名),S-Z效应的大小,标志着宇宙背景辐射穿越的气体的厚度.桑德斯小组假设Abell2218星系团是球形的,气云厚度给出了星系团真实的宽度或大小.气云还发射X射线,故在X射线波长探测星系团可获得星系团的表观尺寸.比较这两个尺寸便可获得星系团与我们的距离,结合已知的此星系团的红移值0.2,他们得到 H_0 接近于50.

四、几点小结

1. 直接测量远方星系距离的问题.

从上文可见;欲得到较准确的哈勃常数之值,关键之一在于星系距离的测定.于是有人考虑是否有可能用三角视差法直接测量远方星系的距离?以室女星系团中心的巨椭圆星系M87(距地球约6千万光年)为例,用现代甚长基线干涉法(VLBI)测量小于1%角秒的视差是有困难的,即使我们在不久的将来用绕地球外层空间运行的更长基线的VLBI和其他新技术能把测角精度提高10倍甚至100倍,专家们计算也要等待100年,待地球随太阳绕银河系中心在空间运行很大一段距离后才能测出可觉察的M87的视差变化.由此可见,用三角视差法直接测定更远星系的距离是难以做到的.

2. 分析测量中的误差,寻求较佳的 H_0 之值.

英国天文学家罗旺-罗宾逊(Michael Rowan-Robinson)曾花费了几年的时间,仔细分析研究了桑德奇小组和沃库勒小组测得的

H_0 值之所以相差 1 倍的原因以及哪一个值较接近于“真值”。例如,他发现,透过银极天区观测远方的星系时,桑德奇小组忽视了所接收到的来自这些星系的光的强度被视线中的尘埃稍微减弱了的效应,而沃库勒小组也忽视了不同颜色的造父变星有稍微不同的周光关系这个事实,等等。罗旺-罗宾逊发现,对于近邻星系的距离,两个小组的测量结果就已相差达 30% 以上,对于更远的星系,两者的差异自然就更大了。他认为造父变星的周光关系是建立在我們了解得很透彻的恒星结构理论的基础之上的,其次是新星和超新星,它们的光变曲线也都有较牢靠的理论根据,以这三类天体做“标准烛光”测得的星系的距离是较可靠的。取这些数据,他得出的 H_0 之值既不是 50 也非 100 而是 67 ± 15 。对星系 M100 中的射电超新星 1979C 用 VLBI 测得的 $H_0 = 65$ 间接支持了罗旺-罗宾逊对 H_0 分析的可信性,本文从星系 NGC5253 中超新星 1972E 得到的 H_0 之值与罗旺-罗宾逊所得 H_0 之值可以说完全一致。

弗里德曼女士领导的小组下一步准备用哈勃空间望远镜测量天炉座星系团中的造父变星,该星系团星系的分布较紧密,比室女团简单,距离我们估计与室女团差不多但位于相反的方向。她们小组还准备测量其他星系中的造父变星,以校准各种距离测量技术得到的 H_0 之值,希望用 3—4 年的时间获得误差在 10% 以内的 H_0 的最佳值。

3. 红移-距离关系问题。

从本文开头所述的 $V = HD$ 关系可见,即使测准了星系的距离 D , H 值的准确程度还有赖于星系退行速度 $V = cZ \equiv c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ 的测定,这里 c 为光速, Z 是星系的红移值: 星系光谱

中波长为 λ 的某一谱线相对于实验室光源的比較光谱中同一谱线(波长为 λ_0) 向红端的位移 ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$)。除少数几个靠近我们银河系的星系的谱线呈现向蓝端位移 ($\Delta\lambda < 0, Z < 0$) 外,其他星系的光谱都呈现红移 ($\Delta\lambda > 0, Z > 0$)。但这一红移 - 距离线性关系仅适用于退行速度不太大即 $\frac{V}{c}$ 或 $Z \ll 1$ 的较近的星系,对于远方的退行速度较大的星系则要考虑到相对论性效应和时 - 空的弯曲以及星系分布的不均匀情况,因此,不少人认为 H 不可能有定值,随被测星系的距离和星系所在方向而有所不同。

从 1972 年起,美国亚利桑那大学的狄夫特 (W.G.Tifft) 就开始研究星系红移的分布问题,他发现:若视红移为星系的退行速度,则它们基本上是按每秒 72 公里的 $1/6, 1/3, 1/2$ 以及整数倍数的间隔分布的,这就是所谓的星系红移的量子化现象。1991 年以来,英国爱丁堡皇家天文台的格思里 (B.N.G.Guthrie) 和牛津大学的内皮尔 (Bill Napier) 分析研究了距银河系 1.63 亿光年以内的 100 个星系的红移,即达到了本超星系团的边沿,最大退行速度达每秒 2600 公里的星系,发现这些星系以间隔为每秒 37.6 ± 2 公里的退行速度分布,进一步证实了狄夫特的论断。这一观测事实对宇宙学家提出了严峻的挑战:如果星系的红移与其距离存在着简单的线性关系,宇宙学家就必须设法阐明星系是如何有选择地按一定的间隔形成的;如果在星系内部进行着某些很不平常的事件从而改变了它们红移的多普勒位移的性质,则现在流行的星系红移与距离的关系便值得怀疑,人们也就不可能获得一致的哈勃常数值了。

发现宇称不守恒 40 年

今年是李政道和杨振宁提出弱作用中宇称不守恒理论 (Phys.Rev, 104 (1956) 254) 40 周年。本部尚有《高能物理》1986 年特刊——1957 年李政道和杨振宁获得诺贝尔奖金时的讲演。欲购者请寄 2 元(含邮资)至北京 918 信箱现代物理知识编辑部。