

测量天体距离的 4 把尺

李国祥 余嵘华 邓铁如

(合肥工业大学理学院 安徽 230009)

距离是天体最重要的参数,自古以来对恒星的距离有着多种猜测,真正能有根有据地说出它来还是近两百年的事。其间经过曲折探索,主要发展了 4 种方法,或者说用了 4 把“量天尺”,由近及远地量出了天体的距离。

一、三角视差

几何学有一条定理,已知三角形两角夹一边便可求解该三角形。三角视差法便是基于这一定理。早在 1672 年,法国人卡西尼使用此法测出了火星的距离。对于遥远的恒星,顶角极小,为了提高精度应尽量扩大底边。在地面上测量,最大的基线是地球公转轨道直径(图 1 中 $AB=2\text{AU}$, AU 是太阳系内使用的距离单位,叫天文学单位,等于日地平均距离。 $1\text{AU}=1.49\times 10^{11}\text{m}$)。1AU 在恒星处的张角 π 定义为恒星 C 的周年视差, π 可由测量 $\angle A$ 与 $\angle B$ 算出。哥白尼提出日心说后近 3 百年内,许多天文学家就试图发现恒星的周年视差,但都没有成功,其中也包括著名的第谷,以致有人开始怀疑哥白尼学说的正确性。直到 1839 年德国人贝塞尔才测出最

近(从而视差也最大)的半人马座 α 星的 π 约等于 $3/4$ 角秒($1''=1^\circ/3600$, 相当于 2 千米之外看一枚分币的张角)。不难算出距离 D

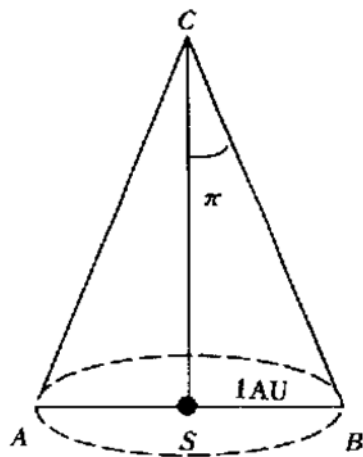


图 1

$$D \sin \pi \approx D \pi \approx 1\text{AU}; D = \frac{206265}{\pi(\text{用角秒表示})} \text{AU}$$

可见即使用 AU 为单位,恒星距离也是一个很大数值,必须使用新的单位。三角视差法是迄今最直接、

1947 年圣诞节前夕晶体管的发明通常被认为是现代半导体技术发展的开端,威廉·肖克利,约翰·巴丁和沃尔特·布拉顿因此荣获了 1956 年度诺贝尔物理学奖。采用比电子管更小、更可靠、而且能耗更低的晶体管作为电子元件,使得电子管失去了它原先的重要性。在电子仪器中使用越来越多的电子管增加了系统的复杂性,因此,系统中所使用的电子管的数目是有限制的,最高限度大约是 1000 个。而采用晶体管代替电子管,把许多晶体管焊接在一块印刷电路板上,可使系统的晶体管数目增加到 1 万个以上。但是,印刷电路板上晶体管的数目仍然是计算机产业发展的制约因素。早在 50 年代初,就有人建议在组合半导体块中制造晶体管、电阻器和电容

器,形成所谓的“集成电路”。后来,两位年轻的工程师杰克·基尔比和罗伯特·诺伊斯各自独立地研制成功了这种集成电路。

集成电路研制的成功不仅导致了半导体技术的飞速发展,而且促进了信息技术的发展。基尔比和诺伊斯都被认为是集成电路的发明者,但是诺贝尔物理学奖只授予了基尔比,这可能是因为基尔比首先申请了专利,被认为是制造第一个集成电路的人,加上诺贝尔物理学奖获得者一次从未超过 3 人,而诺伊斯又于 1990 年去世。实际上,诺伊斯在以集成电路为奠基石的信息技术发展中起过十分重要的作用,曾被誉为硅谷最重要的缔造者之一。

(全文终)

现代物理知识

也最可信的测距方法, 其他方法都是以它为基础的, 所以在天文学中十分重要, 以致天文学家定义了一个新的距离单位——秒差距: 在 1 秒差距之外看, 1AU 的张角是 1 角秒, 记作 $1\text{Ps} = 3.261y$ 。后一单位是光年的记号。

随着大口径望远镜投入使用, 三角视差法的适用范围大大扩展了。1969 年已公布了距离在 20Ps 之内的 1 千多颗近距恒星的视差, 目前这一数字又扩大到 6 千颗, 距离扩大到 100Ps, 即 300 光年左右。对 300 光年远的恒星, 观测误差已达到视差自身的量级, 一般认为这是三角视差法的适用极限了。从天文学观点看, 这个范围太小, 还得寻求新的“量天尺”。

二、分光视差

将恒星大小比作分币, 平均一个省那么大的范围才 1~2 个, 可以认为星际间不存在吸收物质。假定所有恒星光度相同(将它们移到同一距离时, 都一样亮), 其视亮度应按距离的平方反比律下降。果真这样的话, 测出视亮度便可算出距离的相对值, 而近距的恒星已由三角视差法测出距离绝对值, 这样便可将测距范围延伸很远。许多测距方法都属这一思路, 本文先介绍一种。

其实光度 L 不必相同, 只要知道远恒星 B 与近恒星 A 光度之比 L_B/L_A , 就可由其视亮度之比 W_B/W_A 算出距离。

$$W \propto \frac{L}{D^2}; \quad \frac{W_B}{W_A} = \frac{L_B}{L_A} \left(\frac{D_A}{D_B} \right)^2; \quad D_B = D_A \sqrt{\frac{L_B W_A}{L_A W_B}}$$

将已用三角视差法测出距离的几千近距恒星绘成标准赫罗图, 并将主序星带所反映的谱型与光度关系推广到远距恒星(等于认为, 主序星不论远近都是相似的)。只要获得远距星 B 的光谱并确定其谱型, 便可通过标准赫罗图找出它在主星序带上的位

置, 从而得出与近距恒星 A 的光度比, 代入上式便可求出 D_B 。这种方法适用范围可扩大到 10 万光年(银河系边缘)。这是人类第二把“量天尺”。这一方法虽然不是去测视差, 但由于要靠三角视差法来标定, 加上主要靠光谱确定谱型, 故称为分光视差法。

三、脉动变星的周光关系

大质量恒星演化到晚期会呈现不稳定的脉动, 其光度亦作同周期变化, 称为脉动变星。造父变星是其中光度高、周期长而规则的一类, 很容易辨认和测出周期。造父变星中最典型也是最先发现的一颗, 在我国古代称为“造父一”, 因而得名。20 世纪初发现造父变星的光变周期 P 与其光度 L 有密切关系, P 越大 L 也越大, P 与 L 的函数关系称为周光关系(图 2)。这一关系最初是在大、小麦哲伦星云中发现的。实际上这是距银河系最近的两个伴星系, 大麦哲伦系 16 万光年, 小麦哲伦系 19 万光年。处于这两个星系中的造父变星由于距离相差无几, 视亮度与周期的相关性便反映了光度与周期的关系。很快天文学家便意识到, 只要用独立方法标定一颗造父变星的光度, 便可由 $P-L$ 关系曲线确定所有的造父变星光度, 结合视亮度便可算出距离。光度周期测量比获得光谱并确定谱型容易而且准确, 故造父变星被称为第三把“量天尺”。

由于所有造父变星都很远, 无法用三角视差法定; 又由于不属于主序星, 无法用分光视差法定, 因此存在所谓“零点问题”。类似于我们可以量出距离为尺子的几倍, 但不知尺子本身的长度。这一问题 50 年代由德国人巴德突破性地解决了。他用刚投入使用的美国帕洛玛山上 5 米望远镜完成了这一标定, 使我们不仅量出了银河系的大小, 河外星系的距离, 甚至宇宙大小的测量也要靠这把尺子来接力。当距

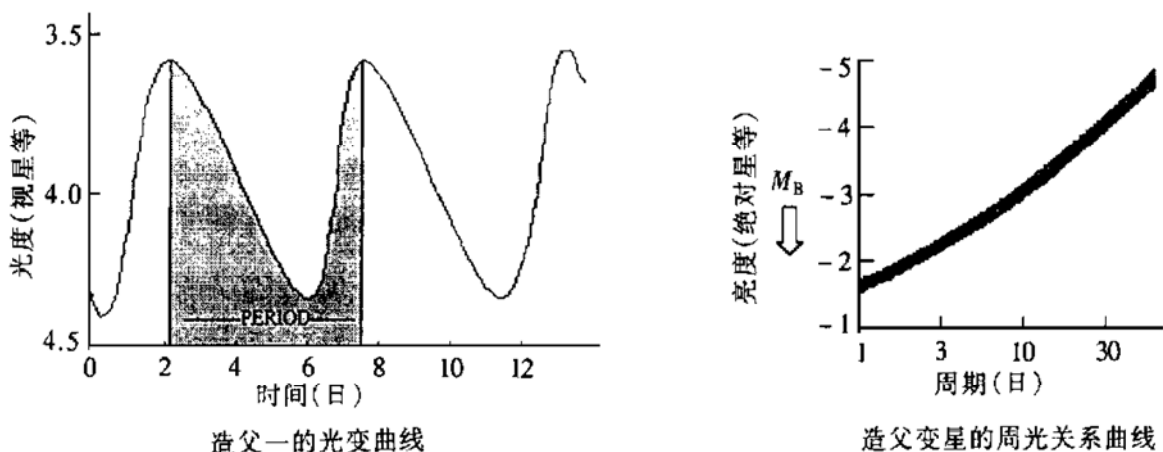


图 2

离超出几百万光年之外, 望远镜已难以分辨单个变星了, 造父变星这把“量天尺”就开始失效。

四、哈勃原理

20 世纪初大型望远镜问世, 为河外天体的系统观测创造了条件。从 20 年代起, 已对河外星系的光谱(数百万光年之外, 那么微弱的信号, 还要用光栅展开成光谱, 现代天文观测技术水平之高超可见一斑)做了大量观测, 积累了丰富的资料。斯里菲尔发现, 星系谱线波长与地面上对应谱线相比, 有系统的红移现象。即红移 $Z = (\lambda_0 - \lambda) / \lambda$ 恒为正值。式中 λ 与 λ_0 分别为同一谱线在地面上与星系光谱中测得的波长。在此基础上, 美国科学家哈勃走出关键的一步: 由于当时并不清楚河外星系的距离, 哈勃用星系视亮度与其谱线红移值进行统计分析, 发现两者存在很强的统计关系——亮度愈小, 红移愈大。就统计观点而言, 视亮度越小表明距离越大。这一发现的含义是离我们愈远的星系, 红移值越大。假定这些红移是多普勒效应, 即退行引起的, 从光的多普勒效应公式可知:

$$Z = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} - 1 \approx \beta = u/c; \quad u = Zc$$

式中 u 是星系的视向速率, 以远离为正, c 为光速。1929 年, 当时仅对 29 个河外星系估计了距离, 哈勃通过上式算出退行速率, 绘出了速度—距离关系图(图 3)。如果说由于距离估计的出入, 加之样本局限于较近星系, 使速度—距离关系在这幅原始图上还不十分明显的话; 那么, 校准过的距离, 以及将样本扩大到更远的星系(几十亿光年)所绘的图

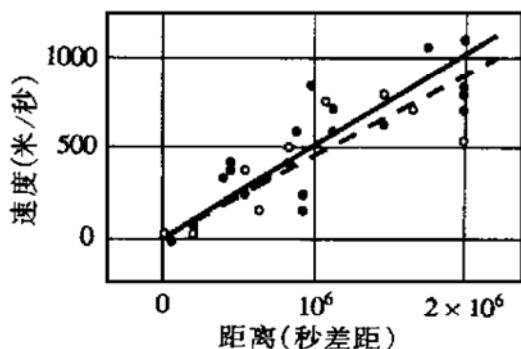


图 3 哈勃的首幅河外星系的速—距离关系图。黑点和实线代表用单个星系求出的解。圆圈和虚线则代表将星系组合成群求出的解

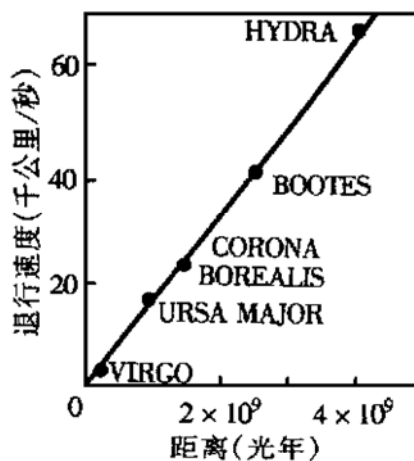


图 4 距离扩展到 36 亿光年的星系哈勃图。横坐标为距离, 纵坐标为退行速度

(图 4), 便明确无误地显示了正比关系: $u = H_0 D$, 这便是著名的哈勃定律。式中 H_0 称为哈勃常数。利用红移与退行速率关系还可将哈勃定律表示为: $Z = H_0 D / c$ 或 $D = cZ / H_0$ 。由于所有星系谱线都有红移, 表明了它们都在远离我们而去。哈勃定律指出, 愈远的星系逃离我们的速率也愈大, 这就描绘出一幅正在膨胀着的宇宙图像。到目前为止, 所有的天文观测事实都支持这一宇宙图像。由于 Z 比较容易测出, 所以较远的河外星系距离以致宇宙半径都可依 $D = cZ / H_0$ 算出。这一方法的关键是标定 H_0 。哈勃常数的测定必须用独立于哈勃定律的方法, 只能通过三角视差、分光视差、造父变星这 3 把“量天尺”一步一步量过去。方案的不同带来 H_0 的不同值。1936 年哈勃自己得出的是 $H_0 = 526 \text{ km} \cdot \text{S}^{-1} / \text{MPs}$ 。1952 年巴德宣布的是 $H_0 = 260 \text{ km} \cdot \text{S}^{-1} / \text{MPs}$ 。1989 年最新结果为 $H_0 = 67 \pm 8 \text{ km} \cdot \text{S}^{-1} / \text{MPs}$ 。由于 H_0 的值愈定愈小, 导致对宇宙半径的估计也愈来愈大。目前的估计是宇宙半径为 150~ 200 亿光年。更远之处由于光向我们靠近抵不过因宇宙膨胀而增加的距离, 从而与我们不可能发生任何交流(包括信息)。

不论哈勃常数有多大的不确定度, 哈勃定律仍是 20 世纪天体物理学最伟大的发现之一, 它架起了天文学与物理学的桥梁。更准确可信的测定哈勃常数在天体物理研究中居于首位。随着以哈勃命名的太空望远镜升天, 可能在近期能得出更可信的数据。