

三角视差在天体物理研究中的应用

赵卉青 万 籁 赵君亮

提 要

白矮星、红矮星、O型和B型星、Herbig Ae/Be星、Ap和Am星是一些具有重要天体物理意义的恒星，精确测定它们的一些基本参数以及在HR图上的位置，对于研究这类恒星的物理特性和演化规律起着重要的作用。高精度的恒星三角视差将为这方面的研究提供值得信赖的资料。

一、引 言

三角视差法是太阳系以外的所有天体距离测定的唯一直接方法。众所周知，天体距离是天文学研究领域中最基本的参量之一。而且，天文研究中经常使用的许多重要参量如恒星光度、恒星质量、恒星半径等都需要用到精确的距离。因此，随着人们对各类天体的起源和演化研究的深入，了解对这些研究起着至关重要作用的特殊天体的各种物理及化学特性便显得十分必要和迫切。在这个背景下，三角视差在天体物理研究中有了更加广泛的应用领域。

二、暗星的研究

这里所谓的暗星指白矮星和红矮星。

白矮星是指一些低光度、高温、高密度的简并态恒星。它们的绝对星等 M_V 一般为 10^m-16^m ，密度为 10^5-10^7g/cm^3 ，甚至高达 10^{10}g/cm^3 ，温度大致在 $10000\text{K}-30000\text{K}$ 。对白矮星的连续辐射及氢线的圆偏振观测表明，白矮星的磁场强度高达 10^5-10^7 高斯。白矮星大致可分为DA、DB、DC、DF、DG五种，其中DA占90%左右，其余大多数为DB型。

Barnes和Evans^[1]曾指出恒星的视表面亮度参数同恒星的色指数是密切相关的。在天体物理领域中，这一关系有着非常广泛的应用^[2]。比如利用这一关系确定主序星的绝对星等和线半径，建立新星、食双星、经典造父变星的独立的距离尺度，以及确立白矮星的线半径等^[2,3]。Moffett^[4]等人利用VLBI测光资料以及视表面亮度关系对71颗已知三角视差的DA型白矮星进行了研究，得到其平均半径为 $0.0132 \pm 0.0005R_\odot$ 。这一结果同Shipman等人的结果 $0.012R_\odot$ ^[5-8]符合得相当好。作为特例，他们把这一结果应用到40Eri B这颗星，直接估计其质量为 $0.37M_\odot$ ，进一步导出密度为 $2.0 \times 10^5\text{g/cm}^3$ ，同Hamada和Salpeter^[9]的理论推算结果及利用引力红移导出的结果十分吻合。我们知道，视表面亮度关系仅仅是一个经验公式，其物理实质目

前仍不清楚。另外，这一关系是建立在用恒星的角半径定标的基础上的。因此，对各种光度、光谱型的三角视差的测定，将有助于我们理解视表面亮度关系所包含的物理本质，以及直接用精确的三角视差来取代近距离上的视表面亮度关系。

Weidemann^[10]用424颗白矮星的测光资料加上理论推算的白矮星的冷却时间 10^9 年，得出白矮星的总诞生率为 $2 \times 10^{-12}/\text{pc}^3 \cdot \text{yr}$ 。另一方面，Oke^[11]观测了30颗DB星的分光视差，估算出DB星的空间分布为 $4.5 \times 10^{-5} \text{DB}/\text{pc}^3$ ，从而推算出其诞生率为 $2.2 \times 10^{-13} \text{DB}/\text{pc}^3 \text{yr}$ ，正好是Weidemann结果的1/10，同理论预计的DB星占总的白矮星的1/10相符甚好。由此可以看到，如果我们精确测定了大量白矮星的距离，将在更高精度的水平上得到有关白矮星的实际情况的结果，并检验已有的有关白矮星的理论。

由于星等的限制，目前对于白矮星在HR图上的确切位置还了解甚少。Greenstein和Eggen^[12]曾指出过，白矮星序列可能存在着分叉现象，也即可能如Luyten^[13]指出的那样，存在着极暗的另一白矮星序列。美国海军天文台Dahn等用他们测定的55颗具有高精度三角视差的白矮星及其B、V测光资料，得到白矮星的HR图，结果见图1^[14]。尽管目前样本不是很大，但从图1可以明显看到白矮星已有一个序列，上述的理论并不成立。

对白矮星的物理特征及其演化途径的研究有着重要的天体物理意义。由于其本身光度较低，只有很少的白矮星才能得到高质量的光谱，因此对其深入的研究受到了限制。

高精度的三角视差测定将使我们可能越过这一障碍。利用三角视差，可以直接推算其线半径、绝对星等，进一步导出其他重要的物理参数，其精度和可信度完全建立在三角视差的测定精度之上，要比目前通过其他途径推得的结果高得多。

另一类暗星就是红矮星，也即HR图中主序的下部。这是一类光度、质量都很小的恒星，目前对这些恒星的了解甚少，尤其是它们在HR图主序的下部是如何延伸的还很不清楚。三角视差的测定将为这方面的研究提供有价值的信息。另外，对这些恒星的三角视差测定可以进一步了解恒星的光度函数。Upgren和Armardroff^[15]利用Gliese^[16,17]的近距星表及其补编所作的研究表明，在距太阳22pc的距离内，所有亮于 $M_V = 9^m$ 的主序星、亚巨星、巨星的空间分布都是均匀的。Wielen^[18]还证实了在绝对星等 $6^m - 9^m$ 之间光度函数呈现一个低谷。在更大的范围上以及对那些较暗的恒星，其空间分布及其光度函数的真实情况如何，都是值得深入研究的课题。

Dahn^[14]等人利用海军天文台测定的265颗白矮星和红矮星的三角视差而导出的绝对星等及BV测光资料，研究了这两个恒星序列。用最小二乘拟合得到这两个星序的回归曲线分别为：

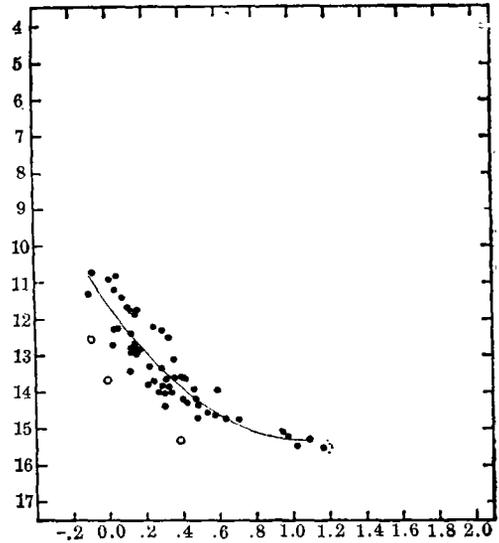


图1 白矮星的 M_V 与 $B-V$ 图

$$\text{白矮星: } M_V = (-3.44 \pm 0.55) + (9.56 \pm 0.33)(B - V) \quad (1)$$

$$\text{红矮星: } M_V = (11.43 \pm 0.16) + (7.25 \pm 0.75)(B - V) \\ - (3.42 \pm 0.68)(B - V)^2 \quad (2)$$

弥散度分别为 $\pm 0.62^m$ 和 $\pm 0.54^m$ 。

迄今为止, 暗星的三角视差工作刚刚开始, 利用这些天体测量数据来开展天体物理工作可以说还是空白。大型望远镜、CCD及空间测量等新技术的应用, 将给这方面的研究带来大的飞跃。

三、亮星的研究

这里所谓亮星是指那些光谱型较早、位于HR图上主序或主序上部的恒星, 他们都具有一些特殊的天体物理现象而引起人们的关注。

1. O、B型恒星基本参数的测定

O、B星的一些基本参数, 如绝对星等、有效温度等只有在少数情况下才能直接加以测定。而且, 它们必须由其他观测量来进行定标。Chalonge和Divan^[19]建立了一个BCD系统, 引入了两个观测量 λ_1 和 D 。这两个参数描述了在Balmer跳变附近能量连续分布情况, 其中 D 表示这个跳变的值, λ_1 是同跳变位置有关的参数。 D 和 λ_1 都是由恒星的表面引力和有效温度决定的, 恒星的距离和星际红化对它们的测定值没有影响。

Chalonge和Divan用已经发表的距离、已知的星团中的恒星对 (λ_1, D) 图进行了绝对星等定标, 从对具有相同的 (λ_1, D) 但属于不同星团的恒星作的定标来看, 不存在任何的系统差, 最大的误差源是可能存在的绝对星等的零点移动, 因而用三角视差来直接检验这个零点移动显得十分重要。另外, 只要有足够数量的O、B星的三角视差, 或许可以给这样一个重要问题带来光明, 即解决参数 (λ_1, D) 是否足够用来唯一地确定O、B星的绝对星等的问题。

(λ_1, D) 图上的有效温度定标和热星等定标, 到目前为止还仅仅是针对光度级V~III作出的, 因为这些定标需要部分地依赖于模型; 可是现有的模型不能很好地描述超巨星的能量分布。在对 (λ_1, D) 图的有效温度和热星等定标的基础上, 通过测定各光谱次型所对应的 λ_1 、 D 的平均值, 就可导出相应的热星等和有效温度。^[20] Habets和Heintz^[21]利用目视双星和食双星, 同时又是分光双星的可靠数据, 导出对光度级分别为V和III恒星的光谱型与有效温度的经验关系, 以及光度级V恒星的热星等同光谱型的经验关系。用 (λ_1, D) 得到的结果同Habets和Heintz得到的结果比较相符甚好。因此, 用三角视差对其他光度型的这类定标进行检验是具有实际意义的。一旦这些定标得到检验, 将可由此导出大量恒星的距离, 联合光谱观测和大气模型的理论计算, 可以得出恒星精确的角半径, 进一步推出诸如恒星的线半径、质量、热星等等基本参数。

有一些B型星, 其光谱中呈现氢发射线, 被称为Be星, 即B型发射星。Be星的发射线是由中心星之外的一个延伸包层产生的, 而且在不断的变化, 有时甚至完全消失, 一段时间以后又重新出现。尽管目前对Be星的研究已十分广泛, 但对其现象的根源尚未搞清。Be星是否是处在演化阶段的B型星? 显然这涉及到精确地确定Be星在HR图上的位置。我们知道, B型

星是一些内禀很亮的天体,绝大多数离太阳很远,迄今为止未能用三角视差确定其绝对星等。其他确定Be星的绝对星等的方法有星团或星协的成员星^[23-25],恒星在星系中的分布^[26,27],运动学方法^[28,29],双星系统的成员^[30]及测光方法^[31]。所有这些方法都会遇到种种困难。因Be星的谱线和连续谱经常受到发射线的难以改正的扰变,用测光方法确定其绝对星等显得十分不利。Be星的高速旋转和发射线的存在,会对其进行光谱分类时引进较大的误差,而目前尚没有很好的方法来改正这一误差。在用统计方法来确定Be星绝对星等时,由于其发射线特征的多样性和可变性,选择的样本很可能是不同质的或者样本与样本之间是不相似的。这些困难导致上述各种方法得出的结果之间存在很大的差异,甚至于互相矛盾^[32]。随着三角视差测定精度的提高,利用三角视差确定Be星在HR图上相对于B型星的位置,对了解这些天体的物理特征及演化过程意义重大。

2. Herbig Ae/Be星的研究

Herbig Ae/Be星是一些位于银面附近行星状星云成协的年轻天体,光谱中呈现发射线和强的IR色余,通常解释为是由尘埃壳的热辐射造成。它们往往同金牛T型星成协,处于恒星形成和演化的早期阶段,年龄 10^5-10^6 年。一般认为,恒星的主序前演化序列是从Herbig Ae/Be星开始,过渡到金牛T型星,最后到达主序。至今没有这类恒星的精确的距离测定。

由于同金牛T型星成协且具有相似的特征,Herbig Ae/Be星通常被认为是主序前恒星(PMS)。为了了解这些PMS恒星的亚光球包层结构,我们需要尽可能精确地知道它们在HR图上的位置,即它们在PMS的演化阶段已处于哪一点。作为很有可能是稳定的A、B主序星的前身,Herbig Ae/Be恒星对了解主序A、B星的早期演化起着关键性作用。对Herbig Ae/Be星外部壳层的研究,即色球层、过渡区星域的现象,以及恒星风、尘埃的出现这些对了解它们的演化起重要作用的特征的研究,同样需要知道它们在HR图上的精确位置。

Larson^[36,37]的理论研究指出,Herbig Ae/Be星正处于主序前的辐射准静态收缩阶段。粗略的比较即可看出,这个理论同观测事实存在着严重的分歧^[38]。Larson的理论认为,只有在它们几乎到达主序的时候,这些原恒星才透过母物质发出光来。然而有许多Herbig Ae/Be星在早期即是可见的。Tjin A Djie等人^[39,40]用IVE的红外分光观测发现Herbig Ae/B星有强烈的色球活动,这表明在它们的大气中可能存在高温区域和较强的恒星风。如果在理论计算时考虑到这些观测事实,上面提到的矛盾可望得到解决。为了这一目的,Herbig Ae/Be星在HR图上的确切位置也是必须弄清楚的。

3. Ap、Am恒星的有关参数

Ap星是具有异常强且可变的Ca II、Si II、Cr II、Sr II、Eu II以及其他一种或几种稀土元素电离谱线的一类恒星。Am星是具有(与氢和钙的K线相比)相当强的金属线光谱的恒星。它们都具有很强的磁场,一般为1000高斯。高的可达34000高斯。现在普遍认为这些星在作缓慢的自转,且其自转轴与磁轴并不重合,由此导致这些星呈现显著的特殊性,这种特殊性严重地影响其颜色和光谱,因而用天体测量方法而不是天体物理方法确定其距离显得十分重要^[41]。

确定Am星的绝对星等可用测光方法、统计方法和疏散星团成员星方法,对Ap星只有统计方法^[42,43]。目前尚没有这些恒星的三角视差结果。所以事实上,尽管拥有大量的测光资

料, 对这些星的绝对星等仍是知之甚少。它们究竟是位于主序上还是主序之上呢? 这一点对了解这些天体的演化过程是至关重要的。

除绝对星等外, 半径是另一个对确定Ap和Am星的年龄以及研究其演化状态十分有用的基本参数。经典方法无法正确地测定Ap和Am星的半径。Heintze^[44]使用了如下的基本关系来确定半径:

$$\lg(R/R_{\odot}) = 8.483 - 2\lg Te - 0.2M_{bol} \quad (3)$$

其中有效温度和热星等都受到了这些星的特殊性的影响, 所以由这一方法确定的半径其可靠性很差。Preston^[45]基于这些星是倾斜的旋转天体这一事实, 发展了另一种求半径的方法:

$$R/R_{\odot} = \frac{P\nu}{50.6} \quad (4)$$

其中P是旋转周期, ν 是旋转速度。由于旋转轴同视线的倾角*i*并不知道, 所以得到的实际是 $\sin i \cdot R/R_{\odot}$ 。用这一方法只能对这些恒星的半径分布作出统计估计。

最好的确定半径的方法就是假设恒星发出的能源为 F_{λ} , 地面上接受到的是 f_{λ} , 则:

$$R/R_{\odot} = 4.434 \times 10^7 (f_{\lambda}/F_{\lambda})^{1/2} \pi - 1 \quad (5)$$

其中 π 为视差^[46]。此方法的精度取决于视差的测定精度。另一问题就是如何建立恰当的大气模型以得到正确的 F_{λ} 。就这一问题, Barnes和Evans^[2,4,47]提出用近红外色余取代 f_{λ} 的方法。

四、结 束 语

由于三角视差法是测定天体距离的唯一直接方法, 且这一方法不受天体的任何物理及化学性质的影响, 因此三角视差的测定将为那些具有特殊性质的天体提供唯一可信的距离尺度。再进一步, 对于那些遥远的恒星、星系及整个宇宙距离尺度的确定, 都直接或间接地要利用三角视差来进行定标, 三角视差的测定精度直接地决定了天体物理以及宇宙学研究中所得结果的可信度。

在目前世界上从事三角视差测定的许多天文台中, 美国海军天文台对白矮星和红矮星的工作是令人瞩目的。他们的工作为检验有关白矮星和红矮星的理论推算提供了有力的判据, 并为这方面的更深入的研究提供了大量的资料。

对暗星测定三角视差的同时, 对那些具有重要天体物理意义的亮星的三角视差测定也提到了议事日程。对O、B型年轻恒星以及Ae/Bc等PMS天体的三角视差测定, 将为研究这些天体的物理、化学特征及演化途径提供最直接的数据, 从而可以更好地了解整个恒星的演化规律。

新的技术给三角视差测定工作带来突破性的进展。利用CCD加上大型望远镜可以在2分钟内观测到18^m的恒星^[48]。另外, 空间的天体测量计划可以获得最高精度的三角视差结果。这些都将为天体物理研究提供大量更加遥远恒星的高精度距离, 其工作的意义必将越来越引起人们的关注。

参 考 文 献

- [1] Barnes, T. G. and Evans, D. S., *M. N. R. A. S.*, 174 (1976), 489.
- [2] Barnes, T. G. et al., *M. N. R. A. S.*, 183 (1978), 285.
- [3] Warner, B., *M. N. R. A. S.*, 160 (1972), 435.
- [4] Moffet, T. J. et al., *A. J.*, 83 (1978), 820.
- [5] Shipman, H. L., *Ap. J.*, 177 (1972), 723.
- [6] Shipman, H. J., *Ap. J.*, 213 (1977), 138.
- [7] Young, A. and Lanning, H. H., *P. A. S. P.*, 87 (1975), 461.
- [8] Greenstain, J. L., *A. J.*, 81 (1976), 327.
- [9] Hamada, T. and Salpeter, E. E., *Ap. J.*, 134 (1961), 683.
- [10] Weidemann, V., *A. Ap.*, 61 (1977), L 27.
- [11] Oke, J. B., *Progress In Astronomy*, 5 (1987), 74.
- [12] Greenstain, J. L. and Eggen, O. J., *Vistas in Astron.*, 8 (1966), 33.
- [13] Luyten, W. J., *Pub. Obs. Minnesota*, 3 (1963), No. 11.
- [14] Dahn, C. C. et al., *A. J.*, 87 (1982), 419.
- [15] Uppgren, A. R. and Armandroff, T. E., *A. J.*, 86 (1981), 1898.
- [16] Gliese, W., *Veroffeutl Astron. Rechen-Inst.*, No. 22(1969).
- [17] Gliese, W. and Jahreiss, H., *A. Ap. Suppl.*, 38 (1979), 423.
- [18] Wielen, R., *IAU Highlights of Astronomy*, 3 (1974), 395.
- [19] Chalonge, D. and Divan, L., *A. Ap.*, 23 (1973), 69.
- [20] Divan, L. and Zorec, J., *The Scientific Aspects of the HIPPARCOS Mission*, (1982), 101.
- [21] Habets, G. M. H. J. et al., *A. Ap. Suppl.*, 46 (1981), 193.
- [22] Underhill, A. B. et al., *M. N. R. A. S.*, 189 (1979), 601.
- [23] Bond, H. E., *P. A. S. P.*, 85 (1973), 405.
- [24] Schild, R. and Romenishin, W., *Ap. J.*, 204 (1976), 493.
- [25] Mermilliod, J. C., in *IAU Symp.*, No. 98, p. 23, (1981).
- [26] Jung, J., *A. Ap.*, 4 (1970), 53.
- [27] Merrill, P. W., *P. A. S. P.*, 45 (1933), 198.
- [28] Smith, B., *Ap. J.*, 105 (1947), 489.
- [29] Wilson, R. E., *Ap. J.*, 94 (1941), 12.
- [30] Meisel, D. D., *A. J.*, 73 (1968), 350.
- [31] Feinstein, A. and Marraco, H. G., *A. J.*, 84 (1979), 1713.
- [32] Broit, D. and Hubert-Delplace, A. M., *The Scientific Aspects of the HIPPARCOS Mission*, (1982), 107.
- [33] Herbig, G. H., *Ap. J., Suppl.*, 4 (1960), 337.
- [34] Strom, S. E. et al., *Ap. J.*, 17 (1972), 353.
- [35] The, P. S. and Tjin A Djie, H. R. E., *The Scientific Aspects of the HIPPARCOS Mission*, (1982), 105.
- [36] Larson, R. B., *M. N. R. A. S.*, 157 (1972), 121.
- [37] Larson, R. B., in *IAU Symp.*, No. 75, p. 249, (1977).
- [38] Lynden Bell, D., in *IAU Symp.*, No. 75, p. 291, (1977).
- [39] Tjin A Djie, H. R. E. et al., *A. Ap.*, 106 (1982), 98.
- [40] Praderie, F. et al., *Ap. J.*, 254 (1982), 658.
- [41] Gerbaldi, M. et al., *The Scientific Aspects of the HIPPARCOS Mission*, (1982), 111.
- [42] Eggen, O., *P. A. S. P.*, 88 (1976), 402.
- [43] Hanck, B. and Curchod, A., *A. Ap.*, 92 (1980) 289.
- [44] Heintze, J., in *IAU Symp.*, No. 54, p. 231, (1973).
- [45] Preston, G. W., in *IAU Coll.*, No. 4, p. 254. (1970).
- [46] Gray, D., *Ap. J.*, 149 (1967), 317.

- [47] Barnes, T. G. et al., *M. N. R. A. S.*, 174 (1976) 503.
[48] Monet, D. G. and Dahn, C. C., *A. J.*, 88 (1983) 1489.

(责任编辑 刘金铭)

Astrophysical Applications of Stellar Trigonometric Parallaxes

Zhao Huiqing Wan Lai Zhao Junliang

(Shanghai Observatory Academia Sinica)

Abstract

Accurate stellar trigonometric parallaxes may provide reliable data for studies on the physical properties and evolutionary status of stars such as white dwarfs, red dwarfs, O and B stars, Herbig Ae and Be stars, and Ap and Am stars. Some fundamental parameters like absolute magnitude, effective temperature and radii of these stars and their positions in the HR diagram are of great importance in astronomical researches.