

恒星自转的测量

谭徽松 潘开科

(中国科学院云南天文台, 昆明 650011)

提 要

本文简述了恒星自转测量的历史, 综述了目前世界上使用的几种主要的自转测量方法: 包括旋转调制法, 视向速度曲线法, 谱线轮廓分析法和测光曲线法。对我国在这方面的的工作也进行了概述。

自转速度是恒星的基本物理量之一, 对研究恒星的结构、演化, 对讨论双星的潮汐作用、物质、能量和角动量的交换, 都起着重要的作用。因此, 更准确、更大量地测定各类恒星的自转速度是一项很基本的天体物理实测工作, 它将推动恒星自转理论、角动量起源问题、双星的同步自转理论等方面的研究。本文就恒星自转的测量方法进行评述。

一、恒星自转测定的历史

太阳作为最近的一颗恒星, 其自转观测的历史几乎同望远镜的历史一样悠久, Tassoul 对此作过综述^[1]。早在1610年, 伽利略就观测到黑子在日面上运动, 1611年, 德国人 Febricius 认为黑子是太阳的组成部分, 其运动是由于太阳的轴旋转引起的, 这是最早从观测上得出的太阳自转的概念。

1871年, Vogel 提出太阳的自转能够通过太阳视圆面上两个相对边缘处谱线的相对多普勒位移来测定, 从而开辟了用谱线测定自转的新途径。

和许多其他领域一样, 恒星的研究往往借鉴在太阳上取得的知识 and 结果。恒星自转的测定也是如此。Builland 于1667年提出了黑子调制模型的猜想, 这一猜想就是自转测定的基本方法之一: 旋转调制法的基础。

1877年, Abney^[2]提出, 自转可能使确定的恒星吸收线加宽。这一观点因受到当时的权威 Vogel^[3]的反对而压制了十几年, 直到 Vogel 本人修正了自己的错误。

1893年, Holt 提出, 对于像大陵五型变星, 其光亮的减少可能是由于一个较暗伴星的遮掩所致, 由于在掩食的开始和结束时刻是恒星边缘的不同部分被遮挡, 由于自转的影响, 其视向速度可能有畸变。Schlesinger^[4]在 δ Lib 和 T Tau 分光双星系统中观测到了这种现象; 1924年, Rossiter^[5]准确地测出了 β Lyr 系统食期间由自转引起的视向速度畸变值为 $26\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 这是除太阳以外的恒星自转速度的首次准确测定。这些事实无可辩驳地证明: 恒星确实在自转, 从而在本世纪三、四十年代出现了第一次恒星自转研究的高潮, 提出和完

善了用谱线轮廓来测自转的方法，这是使用最普遍的一种方法。其奠基人是苏联天文学家 Shajn 和美国天文学家 Struve^[6]。

随着探测器和计算机的发展，70 年代后期，相继出现了一些更准确、更方便的恒星自转测量方法。

尽管恒星自转的测量有悠久的历史和多种方法，但绝大多数的恒星仍未进行过自转测量，1982 年 Uesugi, A. 和 Fukuda, I. 编辑的“恒星自转修订星表” (Kyoto 大学出版) 中，只有 6 472 颗星的自转参数，绝大多数只有一次测量值，其精度并不高，相对误差平均大约 20%，均方绝对误差为 $\pm 12.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。1982 年新编的“亮星星表” (D. Hoffleit, C. Jaschek 编, Yale 大学天文台出版) 中共有 9 096 颗恒星，只有 3 914 颗 (占 43%) 有自转参数，特别是低速自转的晚型星，几乎还是空白。近十年虽又增加了一些自转测量值，但并未改变上述基本状况。

二、几种主要的自转速度测量方法

恒星自转速度的测量方法有十余种，但从基本原理上可归纳为四类：旋转调制法，视向速度曲线法，谱线轮廓分析法，双星测光曲线法。在 1984 年举行的“基本恒星参量的定标”会议上，Slettebak 对前三种方法作过一些综述^[7]。下面我们对这些方法分别评述于后。

1. 旋转调制法

一个亮度不均匀的旋转星应该产生周期性的光变。测定的这种光变周期即是恒星的自转周期。显然，这一方法主要适用于黑子、谱斑很强 (通常比太阳黑子谱斑强一两个量级) 的星，比如 By Dra 型，RSCVn 型和 FK Com 型星。本世纪 60 年代，Chugainov^[8]，Krzeminski 和 Kraft^[9] 等用光电测光方法首先在几颗 BY Dra 型星中观测到这种光变，无法用食或脉动来解释，最好的解释是黑子旋转调制模型。1973 年，Bopp^[10] 等人以自转轴倾角、黑子存在的经纬度和面积、临边昏暗系数、黑子与周围环境的温差为变量，构成了完整的恒星黑子旋转调制的数学模型，并用以解释 BY Dra, CC Eri 的光变。Petterson^[11] 把它用于 EX Lac，测出其自转速度为 $V \sin i = 4.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

以前认为 RS CVn 型变星有同步自转性^[12]，但谭徽松和刘学富^[13] 的研究表明，并非所有的 RS CVn 型星都同步，由黑子测出的周期不一定是轨道周期，从而使黑子形成的亮度减弱，在光变曲线上的位置发生变化，产生所谓的迁移波，迁移波周期就是轨道周期与由黑子得出的自转周期的最小公倍数。与 BY Dra 和 RS CVn 型星类似，对 FK Com 型星的光变，Bopp 和 Stencel^[14] Holtzman 和 Nations^[15] 认为，黑子调制模型是这类星光变的最好解释。此外，某些作者把这一模型应用于昴星团中的晚 G 和早型 K 星、Ap 星和 Be 星，都取得了一定的成功。Vrba 等人的研究^[16]，找到了 T Tau 型星光变的自转调制证据。

旋转调制不仅引起某些恒星亮度上的周期性变化，而且在一些晚于 F5 型星中，引起色球线 (例如 Ca II · H、K 线) 强度周期变化，这一周期也就是恒星的自转周期。Stimets 和 Giles^[17]，Vogt^[18]，Lambert 和 O'Brien^[19]，Radick^[20] 等在这方面进行了研究和测量。

旋转调制法的最大优点是直接得到了自转周期，如果能知道恒星的半径 (比如是食双星

而且有分光轨道解)的话, 则能得出十分准确的自转速度。但可惜, 大多数恒星的半径都不知道, 只能通过其他方法去估计, 这就必然引进大的误差。其次本方法只能用于黑子、色球活动很强的星, 适用范围很有限。

2. 视向速度曲线法

Holt^[21]在一百年前推测, 由于恒星自转的影响, 食双星系统的视向速度曲线将发生畸变。这一畸变现象被很多人观测证实^[4,5]。人们自然会设想, 能否反过来, 利用这种畸变资料来测定双星的自转呢? Forbes^[22]第一个提出这种思路。Mclaughlin^[23,24], Kopal^[25]等考虑了观测时刻可见面积到圆面中心的距离, 以及临边昏暗效应的影响等因素, 从而使得到的值(应小于实际自转速度)经过修正后接近实际。

很显然, 这一方法只能用于食双星系统, 一般说来, 通过测光解可求出轨道倾角 i , 从而能得出赤道自转速度 V_e , 而不仅仅是 $V_e \sin i$ 。

3. 谱线轮廓分析法

这是最重要的、使用最广泛的方法, 已有自转数据的 90% 都是用这种方法得到的。这一方法虽是 Abney 1877 年提出的, 但由于实测中的很多问题未能深入系统地加以研究, 从而没有取得满意的结果。直到 1929 年, Shajn 和 Struve^[26]为谱线轮廓分析方法提出了第一个完整具体的方法: 图解法。Elvey^[27]进一步发展、完善, 使之成为广泛应用的方法: 用平行于自转轴的线把恒星圆面分成若干部分, 每部分的权重等于该部分占整个面积的比例, 且每部分的自转速度是不同的常数, 各部分叠加起来就是自转星的谱线轮廓; 把理论计算的轮廓与实际观测的轮廓进行比较和模拟, 就得出被测星的自转速度。这一方法首先使早型星的自转观测研究变得十分活跃。因为一般说来早型星自转快、光度大, 更适合测量。Abt 和 Moyd^[28]对晚型矮星、Balona^[29]对南半球的 O 和 B 型星, Buscombe 和 Stoeckley^[30]对 O、B 和 A 型主序星、Wolff 和 Preston^[31]对晚 B 型星, Wolff^[32] 等对早 B 型星等都做了较系统的研究。特别是 Slettebak 等^[33]把理论上计算的自转展宽轮廓与观测轮廓作比较, 在全天确定了光谱型 O9 至 F9 的 217 颗亮的标准星。由于晚型星自转慢, 需要高色散才能测出其自转速度, 因而起步较晚。重要的测量研究是近二十几年进行的。比如 Kraft^[34]用色散 $4.5-5 \text{ \AA} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的折轴光谱测定类太阳星的自转, 其分辨的极限是 $6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Soderblom^[35]用比较计算轮廓与观测轮廓的方法测太阳型恒星, 可以测到低至 $1.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的自转速度。Vogt^[36] 等用同样方法研究了 BY Dra 型星的自转。尽管在这方面进展较快, 但在亮星星表上^[37]绝大多数晚型星的自转仍是空白, 或者只给出一个上限值。

随着计算机的广泛应用, 新的接收系统的出现, 以谱线轮廓分析为基本出发点的许多新方法相继出现。以下是几种主要的新方法。

首先是谱线轮廓的傅里叶分析法。这一方法最早由 Carroll^[38]提出, 但是真正发展得比较完善是在应用了电子扫描或数字化的探测器以及广泛应用了计算机以后, Gray^{[39][40]}、Smith^[41] 等人做出了杰出的贡献。这一方法的基本原理如下: 假定观测到的谱线轮廓 $O(\lambda)$ 是谱线的本征轮廓 $F(\lambda)$ 、自转轮廓 $R(\lambda)$ 、宏观湍流轮廓 $M(\lambda)$ 和仪器轮廓 $I(\lambda)$ 的综合结果, 即

$$O(\lambda) = F(\lambda) * R(\lambda) * M(\lambda) * I(\lambda), \quad (1)$$

该式对应的傅利叶变换为:

$$O(S) = f(s) \cdot r(s) \cdot m(s) \cdot i(s) \quad (2)$$

其中自转轮廓可表示为

$$\begin{aligned} R(\Delta\lambda) &= \frac{2(1-\varepsilon)[1 - (\Delta\lambda/\Delta\lambda_L)^2]^{1/2} + \frac{1}{2}\pi\varepsilon[1 - (\Delta\lambda/\Delta\lambda_L)^2]}{\pi\Delta\lambda_L(1-\varepsilon/3)} \\ &= a\left[\frac{2}{\pi}(1-x^2)^{1/2} + \frac{1}{2b}(1-x^2)\right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中 ε 为临边昏暗系数, $x = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_L}$, $b = \varepsilon/(1-\varepsilon)$, $a = \frac{1}{\Delta\lambda_L} \cdot \frac{3}{3+2b}$, $\Delta\lambda_L = \frac{\lambda V e \sin i}{c}$

(3)式对应的傅利叶变换为

$$r(s) = \frac{a}{\pi s} J_1(2\pi s) - \frac{2a\beta}{(2\pi s)^2} \cos(2\pi s) + \frac{2a\beta}{(2\pi s)^3} \sin(2\pi s) \quad (4)$$

式中 J_1 为一阶白塞尔函数。 $r(s) = 0$ 有许多实根, 前四个根为 $s_1 = 0.66$, $s_2 = 1.162$, $s_3 = 1.661$, $s_4 = 2.160$ 。宏观湍流、谱线的本征轮廓可由其他理论和模型获得; 观测轮廓和仪器轮廓通过实测而得, 从而用退卷积方法, 通过拟合得到恒星的自转速度。de Jager 和 Neven^[42], Ebbets^[43], Vogel 和 Kuhl^[44] 等利用这一技术研究了一些恒星的自转。Gray 和 Toner 对亮巨星^[45]和超巨星^[46]的研究, 分别得出它们的宏观湍流速度与自转速度。

最近 Ramella^[47] 等人对 49 颗低自转速度的 A0 主序星的自转进行了测定, 得到一些有趣的结论。还有一些作者采用傅里叶变换的变化形式, 比如 Deeming^[48] 利用白塞尔变换技术获得成功。

PEPSIOS 干涉仪法^[49] 是 70 年代出现的, 由三个法布里-泊罗标准具组成的 PEPSIOS 干涉仪观测了大犬 α 星的 Ba II 6 497 Å 线, 得出其 $V \sin i = 16 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于该干涉仪有一参考光源, 观测受视宁度和薄云等的影响很小。

仿照 Griffin^[50] 测视向速度的方法, Benz 和 Mayor^[51] 用交叉相关的方法。交叉相关曲线下沉段的位置反映出视向速度大小, 而其宽反映出 $V \sin i$ 。从原理上, 相关曲线的下沉段形状近似于一个 Gauss 轮廓, 可表示为:

$$C(V, V \sin i) = \frac{1}{A} \int_s ds I(u, \lambda_j) \cdot F(\lambda_j) \cdot N(\lambda_j) \times C_p(p, V_p, V, \lambda_j) \quad (5)$$

式中 A 为归一化常数, 通过 $C(\alpha, V \sin i) = 1$ 确定。 $I(u, \lambda_j)$ 为临边昏暗定律, $F(\lambda_j)$ 为仪器轮廓, $N(\lambda_j)$ 是以光子数形式表示的恒星光谱分布, ds 为恒星表面元。 $C_p(p, V_p, V, \lambda_j)$ 为恒星表面上 p 点所对应的局部相关函数, 其表达式为 Gauss 形式:

$$C_p(p, V_p, V, \lambda_j) = 1 - H_p(u, \lambda_j) \exp\left[\frac{-(V - V_p)^2}{2\delta p^2(u, \lambda_j)}\right] \quad (6)$$

(6)中 V_p 是 p 点的视向速度, $H_p(u, \lambda_j)$ 和 $\delta(u, \lambda_j)$ 为 C_p 的下沉段深度和宽度, V 描述恒星光谱与模板之间的相对运动。实际上, 要准确地测出相关函数 $C(V, V \sin i)$ 的数学形式是非常困难的。通常是用一批标准星得出 $\delta(u, \lambda_j)$ 与 $V \sin i$ 的定标曲线, 由被测星的 δ 值来查出 $V \sin i$ 来。Benz 和 Mayor 得出的结果与傅利叶分析法所得结果很好地一致, 声

称精度可达 $\pm 1\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

干涉仪法和交叉相关法的基础仍是谱线轮廓分析方法,这两种方法的精度都比较高,但由于受到不少因素的制约,真正应用还非常有限。

4. 双星测光曲线法

自转使恒星形状偏离球对称,而使恒星成扁平体;同时,由于引力昏暗效应,自转也将改变恒星表面的亮度分布,这两者都会影响双星系统的光变曲线。Wilson^[52,53]等人在这方面做了大量的研究。其基本结论是,对快速自转的 Algol 型双星的主星,该方法是可行的。Wilson 和 Plavec^[54]与 Mukherjee^[55]合作应用于某些 Algol 型星的研究,取得了一定的结果。

三、国内恒星自转测量情况

我国在恒星自转测量方面的工作起步较晚,1954年,美籍华人黄授书先生和他的合作者 Struve 向《天文学报》投来了“恒星的自转”^[56]的论文,这是我国刊登的第一篇恒星自转方面的文章,该文的英文发表于巴黎出版的 *Annale d' Astrophysique*, 17 (1954), 85。也许黄先生想以此推动国内这方面的研究。1986年高为是等^[57]利用谱线半宽的方法获得了 53 颗 Be 星的自转,高为是偶然地不幸被过早地夺去了生命,也终止了他对恒星自转方面的贡献。

1985年,谭徽松^[58], Tomkin 和谭徽松^[59]根据自转星的辐射流轮廓可表示为一非自转星的辐射流轮廓与“转致轮廓”之卷积的原理^[40],用数字化探测器(Reticon 或 CCD)观测的标准星(非自转星)的谱线轮廓与“转致轮廓”直接卷积,转致轮廓与傅利叶分析法中的(3)式具有相同的形式。但是,由于所选用的标准星与被测星的光谱光度型相同或相近,而且是在同一仪器条件下观测的,所以可以认为,仪器轮廓和除自转以外的其他致宽因素是相同的,从而处理快。谭徽松^[60]、谭徽松和刘学富^[61]、谭徽松、汪间浩、潘开科^[62]用这一方法获得了一些有价值的结果。安装在云南天文台一米望远镜折轴摄谱仪上的厚片 CCD 光谱系统^[63],能提供高色散、高信噪比的光谱资料,从而能测非常低速的自转。潘开科改进了自转测量处理程序,计算机自动调整参数(不需要每次画出图来后人工比对),直到最后得出自转结果,从而使数据处理更加迅速。这些基本条件的建立为国内的恒星自转观测创造了条件,相信会有更多的观测研究成果出现。

参 考 文 献

- [1] Tassoul, J. -L., in *Theory of Rotating Stars*, ed. by Ostriker, J. P., p. 3, Princeton University Press, New Jersey, (1978).
- [2] Abney, W. de W., *M. N. R. A. S.*, 37 (1877), 278.
- [3] Vogel, H., *Astron. Nachr.*, 90 (1877), 71.
- [4] Schlesinger, F., *M. N. R. A. S.*, 71 (1911), 719.
- [5] Rossiter, R. A., *Ap. J.*, 60 (1924), 15.
- [6] Shajn, G.A. and Struve, O., *M. N. R. A. S.*, 89 (1929), 222.
- [7] Slettebak, A. in *IAU Symposium No. 111*, P. 163, (1985).
- [8] Chugainov, P. F., *I. B. V. S.*, 122 (1966), 1.

- [9] Krzeminski, W. and Kraft, R. P., *A. J.*, 72 (1967), 307.
- [10] Bopp, W. and Evans, D. S., *M. N. R. A. S.*, 164 (1973), 343.
- [11] Petterson, B. R., *A. J.*, 85 (1980), 871.
- [12] Hall, D. S., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 84 (1972), 323.
- [13] 谭徽松, 刘学富, *Astron. Astrophys.*, 172 (1987), 74.
- [14] Boop, B. W. and Stencel, E. R., *Ap. J.*, 247 (1981), L131.
- [15] Holtzman, J. A. and Nations, H. L., *A. J.*, 89 (1984), 391.
- [16] Vrba, F. J., Rydgren, A. E., Chugainov, P. F., Shakovskaya, N. I. and Zak, D. S., *Ap. J.*, 306 (1986), 199.
- [17] Stimits, R. W. and Giles, R. H., *Ap. J.*, 242 (1980), L37.
- [18] Vogt, S. S., *Ap. J.*, 247 (1981), 975.
- [19] Lambert, D. L. and O'Brien, G. T., *Astron. Astrophys.*, 128 (1983), 110.
- [20] Radick, R. R., Lockwood, G. W., Thomson, D. T. et al., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 95 (1983), 621.
- [21] Holt, J. R., *Astron. Astrophys.*, 12 (1993), 646.
- [22] Forbes, G., *M. N. R. A. S.*, 71 (1911), 578.
- [23] McLaughlin, D. B., *Publ. Obs. Univ. Michigan*, 5 (1933), 91.
- [24] McLaughlin, D. B., *Publ. Obs. Univ. Michigan*, 6 (1934), 3.
- [25] Kopal, Z., *Ap. J.*, 96 (1942), 299.
- [26] Shajn, G. and Struve, O., *M. N. R. A. S.*, 89 (1929), 222.
- [27] Elvey, C. T., *Ap. J.*, 71 (1930), 221.
- [28] Abt, H. A. and Moyd, K. I., *A. J.*, 182 (1973), 809.
- [29] Balona, L. A., *Mem. Roy. Astron. Soc.*, 78 (1975), 51.
- [30] Buscombe, W. and Stoeckley, T. R., *Astrophys. Space Sci.*, 37 (1975), 197.
- [31] Wolff, S. C. and Preston, G. W., *Ap. J. Suppl.*, 37 (1978), 371.
- [32] Wolff, S. C. Edwards, S. and Preston, G. W., *Ap. J.*, 252 (1982), 322.
- [33] Slettebak, A., Collins, G. W., II, Boyce, P. B., White, N. M. and Parkinson, T. D., *Ap. J. Suppl.*, 29 (1975), 137.
- [34] Kraft R. P., *Ap. J.*, 150 (1967), 551.
- [35] Soderblom D. R., *Ap. J.*, 263 (1982), 239.
- [36] Vogt, S. S., Soderblom, D. R. and period, G. D., *Ap. J.*, 269 (1987), 250.
- [37] Hoffleit, D. and Taschek, C., *The Bright Stars Catalogue*, 4th edition, Yule Univ. Obs., New Haven, Connecticut, (1982).
- [38] Carroll, J. A., *M. N. R. A. S.*, 93 (1933), 478.
- [39] Gray, D. F., *Ap. J.*, 184 (1973), 461.
- [40] Gray, D. F., in *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres*, New York, Wiley, Chaps. 2 and 17, (1976).
- [41] Smith, M. A., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 91 (1979), 737.
- [42] de Jager, C. and Neven, L., *Astrophys. Space Sci.*, 84 (1982), 297.
- [43] Ebbets, D., *Ap. J.*, 227 (1979), 510.
- [44] Vogel, S. N. and Kuhl, L. V., *Ap. J.*, 245 (1981), 960.
- [45] Gray, D. F. and Toner, C. G., *Ap. J.*, 310 (1986), 277.
- [46] Gray, D. F. and Toner, C. G., *Ap. J.*, 322 (1987), 360.
- [47] Ramella, M., Gerbaldi, M., Faraggiana, R. and Bohm, C., *Astron. Astrophys.*, 209 (1989), 233.
- [48] Deeming, T. J., *Astrophys. Space Sci.*, 46 (1977), 13.
- [49] Kurucz, R. L., Wesley, A. T., Carleton, N. P. and Lester, J. B., *Ap. J.*, 217 (1977), 771.
- [50] Griffin, R. F., *Ap. J.*, 148 (1967), 465.
- [51] Benz, W. and Mayor, M., *Astron. Astrophys.*, 93 (1981), 235.
- [52] Wilson, R. E., *Ap. J.*, 234 (1979), 1054.
- [53] Wilson, R. E., *IAU Colloq. No. 137, Algols*, ed by A. Batten, p235, (1989).
- [54] Wilson, R. E. and Plavec, M. J., *A. J.*, 95 (1988), 1829.
- [55] Wilson, R. E. and Mukherjee, J. D., *A. J.*, 96 (1988), 744.
- [56] Hung, S. -s. and Struve, O., *Acta Astronomy Sinica*, 2 (1954), 137.
- [57] 高为是, 曹慧来, *天体物理学报*, 6 (1986), 143.
- [58] 谭徽松, *天文学报*, 26 (1985), 226.
- [59] Tomkin, J. and Tan Huisong, *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 97 (1985), 51.

- [60] 谭徽松, 天体物理学报, 6 (1986), 154.
[61] Tan Huisong and Liu Xuefu, *Astron. Astrophys.*, 172 (1987), 74.
[62] 谭徽松, 汪洵浩, 潘开科, 天文学报, 32 (1991), 145.
[63] 赵昭旺, 许俊, 谭徽松, 云南天文台台刊, (1991), 总 No. 41, 45.

(责任编辑 刘金铭)

The Methods for Measuring Stellar Rotation

Tan Huisong Pan Kaike

(Yunnan Observatory, Academia Sinica, Kunming 650011)

Abstract

The history of the measurement of solar and stellar rotation is described briefly. The basic methods for measuring stellar rotation are reviewed. The methods can be summarized into four kinds. They are, (1) method of rotation modulation, measuring the period changes in brightness or/and in the strength of the emission line, (2) method of measuring the distortion in the radial velocity curves, which is useful for BY Dra, BS CVn, and FK Com type stars, (3) method of analysing the line profile, which is the most important one and with which 90% $V \sin i$ are measured, and (4) photometric light curve method.

A method for measuring stellar rotation developed by the authors is also given. We obtain the rotation of the program star by means of a comparison between the observed profile of a standard star (nonrotating) convolved with the rotation profile and the observed profile of the program star.