

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.03.03

# 造父变星周光关系之实测研究进展

赵君亮<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 上海师范大学, 上海 200233)

**摘要:** 造父变星周光 (PL) 关系对于宇宙距离尺度研究和哈勃常数测定具有重要意义, 所涉及的内容颇为广泛, 可包括两类不同星族造父变星的 PL 关系, PL 关系的绝对定标, 周光色 (PLC) 关系, PL 关系的金属度效应, 多波段 PL 关系, 极大光度 PL 关系和多相 PL 关系, 以及非线性形式的 PL 关系, 等等。

**关键词:** 脉动变星, 造父变星; 周光关系; 周光色关系; 金属度效应

**中图分类号:** P145.2      **文献标识码:** A

## 1 引 言

造父变星对于确定河外星系距离尺度有着极为重要的作用, 它们得以广泛应用的原因在于同时具有以下特性: (1) 有确定的 PL 关系, 可用于推算目标天体的光度距离, 且精度很高; (2) 特有的光变性质使得该类变星不难确认, 且不会误判; (3) 这是一些高光度的超巨星, 即使在很远的地方也能观测到, 最远测距范围可达约 20 Mpc(室女星系团范围); (4) 它们在银河系(包括太阳附近天区)和一些河外星系中都普遍存在<sup>[1]</sup>。

1908 年, 美国女天文学家 Leavitt<sup>[2]</sup>首次注意到在小麦云 (SMC) 中, 造父变星的光变周期越长, 变星的亮度越大, 样本变星为 16 颗。4 年后, SMC 内 25 颗造父变星的观测资料再次证实了这一点: 恒星光变周期  $P$  与视星等  $m$  之间存在简单的线性关系  $m \propto \lg P$ , 即后人所称的 PL 关系<sup>[3]</sup>。鉴于 PL 关系对星系和宇宙学研究(包括哈勃常数的确定)之重要性, 在 2008 年 11 月于哈佛史密松天体物理中心 (CFA) 举行的纪念 Leavitt 上述发现 100 周年的专题讨论会上, 会议组织者提议把造父变星的 PL 关系称为 Leavitt 定律<sup>[4]</sup>。

事实上, 当年 Leavitt 的发现只是给出了 PL 关系的斜率, 并未对视星等  $m$  作绝对定标。1913 年 Hertzsprung<sup>[5,6]</sup>利用银河系内 13 颗造父变星的自行, 确定了样本变星的统计视差(即平均距离), 得出光变周期为 6.6 d 的变星之绝对目视星等为  $M_V = -2.2 \text{ mag}$ , 并借助

收稿日期: 2013-01-22; 修回日期: 2013-03-19

资助项目: 国家自然科学基金 (10778003)

Leavitt 得到的斜率给出了以下 PL 关系:

$$\langle M_V \rangle = -2.11 \lg P - 0.6, \quad (1)$$

$\langle M_V \rangle$  为变星的平均绝对目视星等, 而 Hertzsprung 还据此推算了 SMC 的距离。不久, Hubble<sup>[7-9]</sup> 便利用造父变星的 PL 关系确定了若干近星系的距离。

继 Hertzsprung 之后, 直至最近, 人们对 PL 关系的绝对定标 (包括斜率和零点) 做了大量的工作<sup>[10-16]</sup>, 并对涉及 PL 关系的一些重要问题, 从多方面进行了探究和评述<sup>[4,6,13,17]</sup>, 如两类不同星族造父变星的 PL 关系<sup>[10,13,18-20]</sup>, 周光色 (PLC) 关系<sup>[4,11,17,21-25]</sup>, 非线性形式的 PL 关系<sup>[6,26-29]</sup>, 多波段 PL 关系<sup>[24,28-32]</sup>, 极大光度 (而不是平均光度) 的 PL 关系<sup>[21,33-35]</sup>, PL 关系的金属度效应<sup>[36,43]</sup>, 等等。

作为一类极为重要的标距天体, 造父变星不仅在历史上享有盛誉, 即使在今天, 对于距离定标, 以至哈勃常数  $H_0$  的测定仍然起着十分重要的作用, 近年来涉及造父变星 PL 关系的大量工作充分说明了这一点。另一方面, 如比较多种途径所测得的同一目标天体的距离, 则往往以造父变星 PL 关系得出的光度距离最为准确, 而这正是人们重视造父变星 PL 关系研究的主要原因。

对于一个科学问题来说, 随着研究工作的深入, 问题的解决常常会变得越来越复杂。一开始, 人们对问题的最初认识可以开辟出一个研究领域, 而随着观测资料的不断累积, 这种早期认识往往会被后来的认识所取代, 造父变星作为标距天体的问题, 情况也是如此。鉴于相关内容非常丰富, 本文仅择要予以综述。

顺便指出, 除造父变星外, 其他一些变星 (如 Mira 变星) 的 PL 关系亦可用于光度距离测定<sup>[44-46]</sup>, 但适用范围远不如造父变星。

## 2 不同星族造父变星 PL 关系的零点差

造父变星 PL 关系通常可用下式表示:

$$\langle M \rangle = a \lg P + c, \quad (2)$$

式中  $\langle M \rangle$  为变星的平均绝对星等,  $P$  为光变周期, 而  $a$  和  $c$  分别是 PL 关系的斜率和零点。通常认为, 对经典造父变星有  $-2 > \langle M_V \rangle > -6 \text{ mag}$  和  $2 < P < 100 \text{ d}$ <sup>[4]</sup>。

1944 年 Baade<sup>[47]</sup> 提出, 恒星可以依据它们的观测特征和物理性质区分为星族 I 和星族 II 两大类。1956 年, Baade<sup>[10]</sup> 确认造父变星应分为星族 I (I 型) 造父变星 (亦称经典造父变星) 和星族 II (II 型) 造父变星两类, 它们各有不同的 PL 关系零点, 零点差为  $c_{II} - c_I \approx 1.5 \text{ mag}$ , 即对同样光变周期的星族 I 和星族 II 造父变星, 前者的平均绝对星等要比后者约小 (即亮) 1.5 mag (实际上 Baade 在 1952 年罗马 IAU 大会上已经报告了他的这一结果)。这一发现 (称为 PL 关系之零点改正) 至关重要, 它说明对于不同星族的造父变星必须采用不同的 PL 关系, 否则将会给目标天体的距离模数带来 1.5 mag 的误差, 使天体的距离测定值较实际数值大 1 倍或减小一半, 并会沿着宇宙距离阶梯进而影响到哈勃常数  $H_0$  的测定值。

最著名的例子便是 Hubble<sup>[7]</sup>关于仙女星系 (M31) 的距离测定。在这项工作中 Hubble 用了 Shapley<sup>[48]</sup>给出的造父变星 PL 关系曲线, 而这是依据对球状星团中星族 II 造父变星的观测经分析后得出的。另一方面, Hubble 所观测到的 M31 中的造父变星则是一些星族 I 天体。PL 关系的错误应用, 使 Hubble 得出的 M31 的距离 (285 kpc) 比实际数值小了一半, 而在此基础上推算出的哈勃常数则大了一倍。PL 关系及其准确定标对天体距离测定, 以至对宇宙学研究的重要性由此可见一斑。

在 20 世纪 50 年代, 因 Baade 的上述发现促使人们对 PL 关系的零点做了广泛的探究<sup>[6]</sup>。1954 年, Blaauw 和 Morgan<sup>[49]</sup>利用 18 颗星族 I 造父变星 (光变周期  $P = 1.95 \sim 35.53$  d) 的自行及其统计视差, 在考虑了星际消光改正后, 得出 PL 关系的零点改正为  $(-1.4 \pm 0.4)$  mag, 与 Baade 的结果相一致。

鉴于平均而言星族 I 造父变星较星族 II 变星约亮 1.5 mag, 它们可以在更远的距离上被观测到, 测距应用范围更为广泛。但是, 星族 I 变星位于星系盘中, 受星际消光的影响较严重, 定标过程更须仔细考虑视星等的消光改正。

### 3 PL 关系的绝对定标

所谓 PL 关系的 (绝对) 定标, 就是要利用能借助 (PL 关系之外的) 其他途径已得知距离 (也就是绝对星等  $M$ ) 的那些造父变星, 来确定 PL 关系 (见式 (2)) 中的两个参数——斜率  $a$  和零点  $c$ 。造父变星的距离可以通过多种途径来加以测定, 如统计视差法、主序拟合法、移动星团视差、巴特-威塞林克 (Baade-Wesselink, BW) 方法、角直径干涉测量、三角视差等。

#### 3.1 统计视差

从历史上看, 最早用于 PL 关系定标的是统计视差法, 所得出的是样本变星的平均距离, 而不是各别变星的距离, 如 Hertzsprung<sup>[5]</sup>及 Blaauw 和 Morgan<sup>[49]</sup>的工作即属此类。由统计视差法所得结果的可靠性受制于当时精度并不高的自行资料, 且天体的距离越远, 自行误差的影响越大, 很快被弃置不用。

#### 3.2 主序拟合法

自 1955 年 Irwin<sup>[50]</sup>确认了疏散星团中的造父变星后, 人们开始利用主序拟合法取得星团 (亦即团内造父变星) 的距离, 并由星团、星协中的造父变星来对 PL 关系进行定标。这条途径的好处是, 由高精度多色测光资料, 可确定星团 (以及星协等) 和团内造父变星的红化和距离。Sandage<sup>[17]</sup>是由银河系疏散星团造父变星对 PL 关系进行定标的第一人, 他曾得出  $\langle M_V \rangle = -2.5 \lg P - 1.77$ 。之后, 直到最近, 星团造父变星用于 PL 关系的定标, 在相关工作中一直占有颇为重要的地位<sup>[11,12,14,22,51,52]</sup>。例如, 2010 年 Turner<sup>[14]</sup>由 19 个银河系疏散星团造父变星 (光变周期范围  $1.9 < P \leq 45.1$  d), 得出

$$\langle M_V \rangle = (-2.78 \pm 0.12) \lg P - (1.29 \pm 0.10) \quad , \quad (3)$$

可见 PL 关系中参数的确定精度相当高。

### 3.3 三角视差

空间天体测量计划实施之前, 鉴于银河系内造父变星的距离均约大于 100 pc, 人们无法测得它们的三角视差以确定其距离。1989 年 8 月依巴谷卫星的成功发射使这一状况得以改变, 它可以测定亮于 10 mag 恒星的三角视差, 包括 200 多颗经典造父变星, 其中约半数有较高的视差测定精度<sup>[14]</sup>。1997 年, Feast 和 Catchpole<sup>[55]</sup>首次讨论了利用此类造父变星确定 PL 关系零点的问题, 并由 26 颗视差测定精度最高的变星得出  $\langle M_V \rangle = -2.81 \lg P - 1.43$ , 其中斜率取自大麦云 (LMC) 造父变星的相应值。

在上述依巴谷资料中, 有 10 颗经典造父变星通过 HST 观测取得了更高精度的三角视差值<sup>[4,53,54]</sup>, 这些变星之光变周期的范围为 3.728 ~ 35.551 d。2010 年, Turner<sup>[14]</sup>利用这些有 HST 视差的造父变星样本对 PL 关系进行定标, 所得结果与式 (3) 符合得非常好 (参见图 1)。在这方面值得一提的同类工作还有 Feast<sup>[56]</sup>于 2003 年得出的  $\langle M_V \rangle = -2.81 \lg P - 1.35$ , 以及 Turner<sup>[16]</sup>最近综合利用星团造父变星和有 HST 视差的造父变星, 给出了  $\langle M_V \rangle = -2.92 \lg P - 1.20$ 。

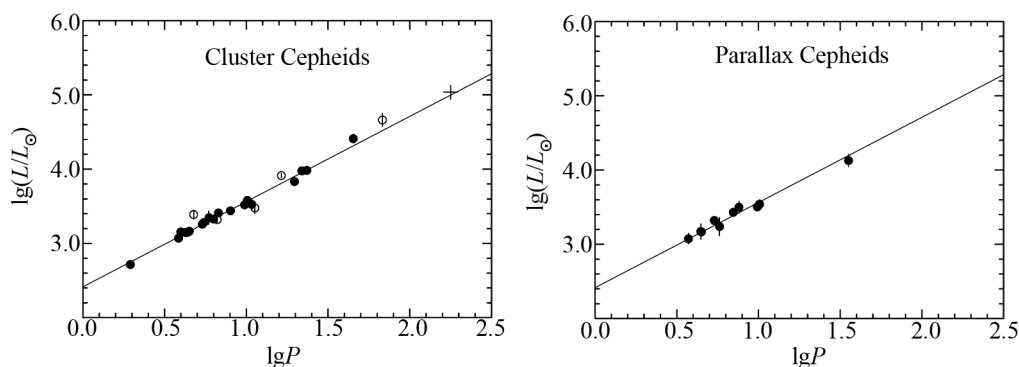


图 1 由疏散星团造父变星 (左) 和有 HST 视差造父变星 (右) 所确定的 PL 关系之比较, 两者符合得非常好<sup>[14]</sup>

### 3.4 BW 方法 (脉动视差)

20 世纪 20—40 年代提出的 BW 方法亦称 BBW 方法<sup>[57-59]</sup>。这一方法的基本原理是, 造父变星的观测视向速度会因变星大气的脉动而呈现周期性变化, 只要对之作一段较长时间的监测, 就不难推算出变星的线半径  $R$ , 然后便可按公式  $L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$  确定变星的光度  $L$  (即绝对星等) 和光度距离<sup>[4]</sup>。1976 年, Barnes 和 Evans<sup>[60]</sup>提出了由 BW 方法变化而来的另一种测定造父变星距离的方法, 其中需要监测变星的视向速度以及多色测光资料。正如 Tammann 等人<sup>[62]</sup>所指出的那样, 由 BE (或 BW) 方法得出的 PL 关系, 与星团造父变星得出的 PL 关系, 两者是互相独立的, 因而对 PL 关系的定标具有重要意义。

1998 年, Gieren 等人<sup>[61]</sup>由 28 颗银河系造父变星的观测资料, 按 BE 方法得出  $\langle M_V \rangle = (-3.04 \pm 0.14) \lg P - (1.02 \pm 0.14)$ 。2003 年, Tammann 等人<sup>[62]</sup>通过详细的讨论和比较后认为, 由 BE 方法和星团造父变星得出的 PL 关系, 两者的斜率符合得很好, 零点差则小于 0.12 mag。

除上述方法外, 测定造父变星距离的途径还有移动星团视差<sup>[63]</sup>和角直径干涉测量<sup>[64]</sup>等, 不过它们的应用远不如上述几种方法来得广泛, 故本文不作详细展开。

### 3.5 多种方法的综合利用

在近年来的一些工作中,人们往往综合利用一种以上的方法,来对 PL 关系进行定标<sup>[13,15,16,51,52]</sup>。例如,在 Ngeow 和 Kanbur<sup>[51]</sup>2004 年的一项工作中用到了 4 种方法——主序拟合法、BE 方法、干涉测量和 HST 视差,所得到的 PL 关系是  $\langle M_V \rangle = (-3.00 \pm 0.10)\lg P - (1.00 \pm 0.11)$ 。2006 年 Sandage 和 Tammann<sup>[13]</sup>由 BW 方法和主序拟合法得出  $\langle M_V \rangle = (-3.09 \pm 0.08)\lg P - (0.91 \pm 0.10)$ ; 2007 年 Fouqué 等人<sup>[52]</sup>用 5 种方法得到  $\langle M_V \rangle = (-2.678 \pm 0.076)\lg P - (1.275 \pm 0.023)$ 。

顺便指出,关于周光关系中的平均绝对星等  $\langle M \rangle$ ,早期通常取一个光变周期内变星星等的中位值<sup>[6]</sup>。1960 年 Kraft<sup>[65]</sup>指出,最好的做法应该是先把星等转换为光度,取光变周期内光度的平均值,然后再换算成  $\langle M \rangle$ ,这时的  $\langle M \rangle$  也就是变星的辐射强度平均值。

## 4 星族 II 造父变星

星族 II 造父变星是一些老年变星,它们分布于球状星团、厚盘、核球和星系晕中,在薄盘和旋臂中则不存在。该类变星按其性质大体上又可分为 3 类,即武仙 BL 型星 (光变周期  $P < 7$  d),室女 W 型星 ( $7 < P < 20$  d),以及金牛 RV 型星 ( $P > 20$  d)<sup>[66]</sup>。不过,这种按周期分类的判据并非是绝对的,如也有人用 2 d 和 20 d 把样本星族 II 造父变星划分为 3 组<sup>[20]</sup>等。

早期,Shapley<sup>[48]</sup>由银河系球状星团给出的便是星族 II 造父变星的 PL 关系。鉴于该类变星的光度比同样周期经典造父变星来得暗,加之它们的 PL 关系形式可能并非唯一的,因而较少为人们所关注<sup>[67]</sup>。例如,1995 年 McNamara<sup>[68]</sup>由约 40 颗球状星团星族 II 造父变星得出  $\langle M_V \rangle = -1.81\lg P - 0.01$ 。他同时又发现,  $P > 10$  d 的变星之 PL 关系斜率显然要比  $P < 10$  d 的变星来得陡,两类变星的 PL 关系分别为  $\langle M_V \rangle = -4.17\lg P + 3.06$  和  $\langle M_V \rangle = -1.61\lg P - 0.05$ ; 在 B 波段, PL 关系亦有类似的斜率变化 (参见图 2)。另一方面,2003 年 Pritzl 等人<sup>[69]</sup>的同类工作却没能证实这一斜率变化特征,并认为上述表象可能缘自早期照相测光资料的低精度。

20 世纪 70 年代以来随着对星族 II 造父变星观测研究工作的展开<sup>[68-72]</sup>,特别是相关星表的发表<sup>[73]</sup>和近红外波段观测资料的取得<sup>[66]</sup>,对该类造父变星 PL 关系的探究亦渐趋深入。

2003 年, Pritzl 等人<sup>[69]</sup>通过球状星团 NGC 6388 和 NGC 6341 中的 11 颗星族 II 造父变星 (其中 10 颗有 V 星等测光资料,  $0.98 < P < 21.4$  d) 的观测资料,得出

$$\langle M_V \rangle = (-1.64 \pm 0.05)\lg P - (0.05 \pm 0.05) \quad (4)$$

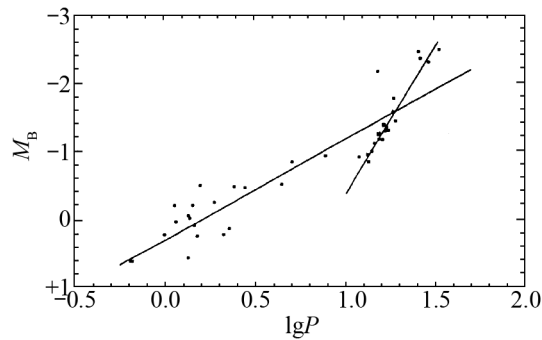


图 2 星族 II 造父变星的 PL 关系  
长线为所有变量的拟合结果,短线为  $P > 10$  d 变量的拟合结果<sup>[68]</sup>。

至于这两个星团的距离,均以金属度  $[Fe/H] = -2.0$  之天琴 RR 型变星的平均绝对星等  $\langle M_V \rangle_{RR} = +0.48 \text{ mag}$  作为标准烛光取得。2006 年, Sandage 和 Tammann<sup>[13]</sup>对  $\langle M_V \rangle_{RR}$  与金属度的关系做了较细致的讨论后认为, Pritzl 等人<sup>[69]</sup>的 PL 关系式 (4) 应修正为  $\langle M_V \rangle = -1.64 \lg P - 0.14$ 。不难看出,星族 II 造父变星 PL 关系的斜率 ( $a_{II} \approx -1.6$ ),与星族 I 造父变星的相应值 ( $a_I \approx -3.0$ ) 有显著差异,或者说在  $\lg P - M$  图上它们的 PL 关系彼此是不平行的。

除了可见光波段的工作外,2006 年 Matsunaga 等人<sup>[66]</sup>首次探究了近红外波段星族 II 造父变星的 PL 关系。样本变星共计 46 颗 ( $1.18 < P \leq 87.5 \text{ d}$ ),它们位于 26 个球状星团中,而观测波段为 J、H、 $K_s$ 。在充分考虑了消光改正后,他们得出:

$$\begin{aligned} \langle M_J \rangle &= (-2.23 \pm 0.05)(\lg P - 1.2) - (3.54 \pm 0.03) ; \\ \langle M_H \rangle &= (-2.34 \pm 0.05)(\lg P - 1.2) - (3.94 \pm 0.02) ; \\ \langle M_{K_s} \rangle &= (-2.41 \pm 0.05)(\lg P - 1.2) - (4.00 \pm 0.02) . \end{aligned} \quad (5)$$

由式 (5) 和图 3 可以看出,星族 II 造父变星在近红外波段有着相当好的 PL 关系,弥散度分别为 0.16 mag、0.15 mag 和 0.14 mag。

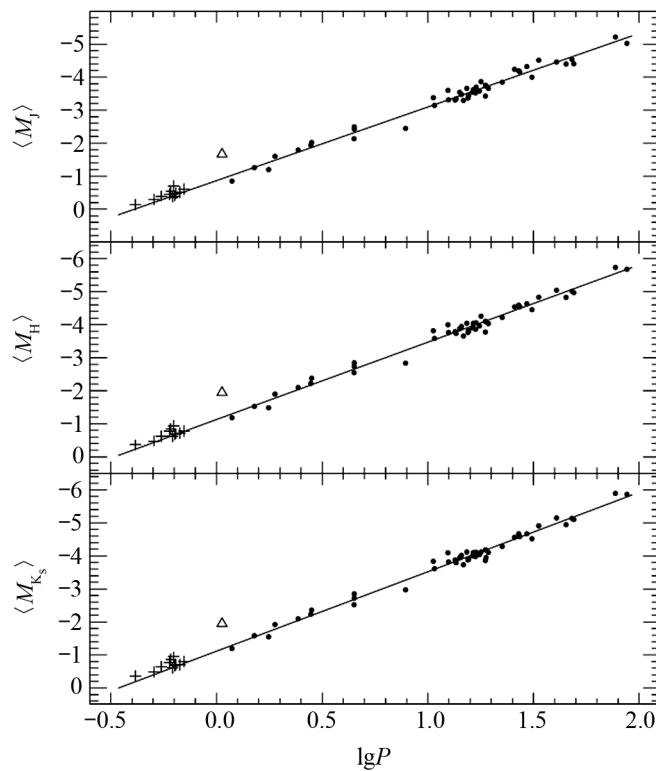


图 3 星族 II 造父变星在 J、H、 $K_s$  波段的 PL 关系<sup>[66]</sup>

## 5 PLC 关系

1958 年, Sandage<sup>[17]</sup>在用疏散星团造父变星对 PL 关系进行定标的工作中, 指出了颜色项对 PL 关系定标的重要性, 从而引入了 PLC 关系的概念。事实上, 在 Sandage<sup>[17]</sup>之前, 已有人注意到了造父变星光变周期与颜色之间可能存在的关系 (PC 关系)<sup>[48,74]</sup>。

### 5.1 PLC 关系的绝对定标

通常, PLC 关系可取以下线性形式<sup>[4]</sup>:

$$\langle M_V \rangle = a \lg P + b(B - V)_0 + c, \quad (6)$$

$(B - V)_0$  为变星的平均内禀色指数, 而相应的观测色指数为  $(B - V)$ 。

继 Sandage<sup>[17]</sup>之后, 20 世纪 60 年代初 Kraft<sup>[65,75-78]</sup>在他的系列工作中讨论了造父变星的 PC 关系和 PL 关系, 并用以对星团造父变星的 PLC 关系进行定标。不久, Fernie<sup>[25]</sup>在指出 Kraft 上述工作之缺陷的基础上, 由 8 颗银河系经典造父变星 (光变周期的范围为  $3.1 < P \leq 41.4$  d, 其中 6 颗为星团、星协成员, 2 颗为远距双星成员) 得出以下 PLC 关系:

$$\langle M_V \rangle = -2.79 \lg P + 2.0(B - V)_0 - 2.54; \quad (7)$$

或者进而考虑  $(B - V)^2$  项后则有:

$$\langle M_V \rangle = -2.85 \lg P + 2.73(B - V)_0 - 1.60(B - V)_0^2 - 2.55. \quad (8)$$

20 世纪 60 年代末前后, Sandage 和 Tammann<sup>[21,79,80]</sup>以及 Sandage<sup>[22]</sup>利用银河系和若干近距河外星系中 60 颗经典造父变星资料, 就该类变星的观测性质做了一系列研究, 其中包括它们的 PLC 关系, 并得出<sup>[22]</sup>:

$$\langle M_V \rangle = -3.425 \lg P + 2.52(B - V)_0 - 2.459, \quad (9)$$

以及

$$\langle M_B \rangle = -3.425 \lg P + 3.52(B - V)_0 - 2.459, \quad (10)$$

弥散度为 0.14 mag, 光变周期的范围为  $2 < P \leq 42$  d。

不同作者所得出的 PLC 关系不尽相同, 如 1983 年 Caldwell<sup>[11]</sup>由 22 颗银河系经典造父变星样本 ( $3 < P < 68$  d) 得到的 PLC 关系为:

$$\langle M_V \rangle = -3.80 \lg P + 2.70(B - V)_0 - 2.46, \quad (11)$$

与 Martin 等人<sup>[81]</sup>的结果  $\langle M_V \rangle = -3.80 \lg P + 2.70(B - V)_0 - 2.39$  符合得很好, 而与 Feast 和 Walker<sup>[82]</sup>所得结果  $\langle M_V \rangle = -3.53 \lg P + 2.13(B - V)_0 - 2.13$  以及 Opolski 和 Ciurla<sup>[83]</sup>的结果  $\langle M_V \rangle = -3.55 \lg P + 2.00(B - V)_0 - 2.64$  稍有差异, 而究其原因除红化改正带来的误差外, 另一个因素可能缘自样本变星金属度的不同 (见下文)。

总之, PLC 关系的研究不如 PL 关系来得深入, 近期相应的工作也较少。

## 5.2 与 PL 关系的比较

1967 年, Fernie<sup>[25]</sup>对他所得到的 PL 关系和 PLC 关系进行了比较和分析。考虑到 PLC 关系式 (8) 中  $(B - V)_0$  的一阶项和二阶项的系数反号, 当  $(B - V)_0$  取某个值 ( $\approx 0.85$ ) 时, 该式中颜色项的净效应为零, 所对应的光变周期为  $P \approx 18$  d。也就是说, 对于  $P \approx 18$  d 的变星而言, PLC 关系退化为 PL 关系, 即 PLC 关系不具有任何优越性。他还进一步指出, 根据当时已得到的 PC 关系<sup>[84]</sup>, 不难推算出因为用了 PL (而不是 PLC) 关系所引起的  $\langle M_V \rangle$  的最大偏差为:

$$\Delta M_V = \pm[0.41 - 0.48(B - V)_0] ,$$

在极端情况下有  $|\Delta M_V| < 0.2$  mag, 平均偏差更小于 0.1 mag。另一方面, 恒星内禀色指数  $(B - V)_0$  的误差亦可达到 0.1 mag。据此 Fernie<sup>[25]</sup>认为, 除非  $(B - V)_0$  能测得非常准, 且需要很高的精度, 否则用 PLC 关系取代 PL 关系, 对距离测定并无实质性的改进。

在这个问题上, 1979 年 Martin 等人<sup>[81]</sup>对 LMC 经典造父变星的一项研究却得出了与之相反的结论。对于样本中的全部 77 颗变星, 他们得到的 PL 关系和 PLC 关系分别为:

$$\langle V \rangle_0 = (-2.59 \pm 0.07)\lg P - (17.22 \pm 0.09) ; \quad (12)$$

$$\langle V \rangle_0 = (-3.45 \pm 0.08)\lg P + (2.21 \pm 0.17)(B - V)_0 - (16.46 \pm 0.08) . \quad (13)$$

式中  $\langle V \rangle_0$  是经红化改正后变星的 V 波段的平均视星等, 而相应的弥散度分别为 0.26 mag 和 0.14 mag; 图 4 是式 (12) 中两个关系的图示比较。

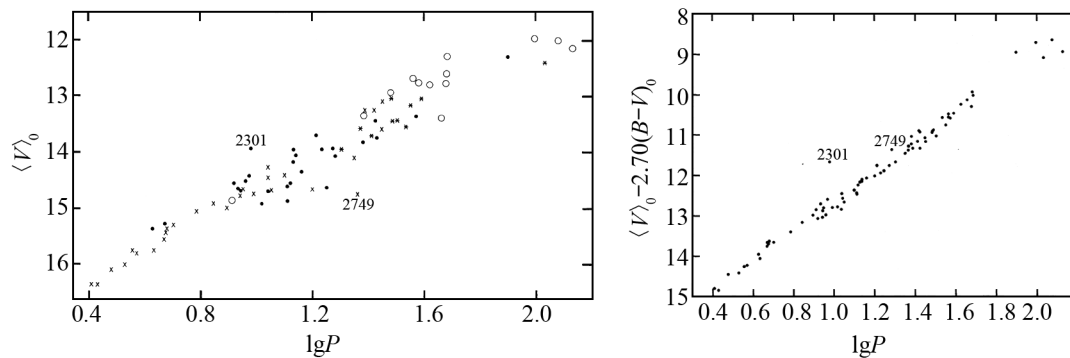


图 4 LMC 造父变星之 PL 关系 (左) 和 PLC 关系 (右) 的比较<sup>[81]</sup>

Martin 等人<sup>[81]</sup>指出, 鉴于颜色项的引入, 至少对  $0.9 < \lg P < 1.7$  (即  $7.9 < P < 50.1$  d) 范围内的变星而言, 采用 PLC 关系可以对 PL 关系以明显的改善, 观测值的拟合弥散度近乎减小一半。考虑到各别恒星的星际红化改正系由 BVI 测光资料导出, Martin 等人<sup>[82]</sup>认为式 (13) 中的颜色项反映了样本变星的内禀性质, 而不是缘自较差星际红化。

## 5.3 Wesenheit 函数

内禀色指数  $(B - V)_0$  与观测色指数  $(B - V)$  有以下关系:

$$(B - V)_0 = (B - V) - E_{B-V} , \quad (14)$$



其中  $E_{B-V}$  为  $(B-V)$  的色余, 亦即红化改正。如经消光改正后的 V 波段视星等为  $V_0$ , 则有

$$V = V_0 + A_V, \quad (15)$$

$A_V = R_V E_{B-V}$  为 V 波段消光改正, 而  $R_V \approx 3.1$  是 V 波段的消光比率。

所谓 Wesenheit 函数由下式定义<sup>[85]</sup>:

$$W(BV) = V - R_V(B - V). \quad (16)$$

把式 (14) 和 (15) 代入上式不难得出:

$$W(BV) = V - R_V(B - V) = V_0 - R_V(B - V)_0. \quad (17)$$

可见  $W$  也就是无红化视星等。Madore<sup>[85]</sup>1982 年关于 LMC 造父变星的工作表明,  $W(BV) - \lg P$  关系的线性相关性显然好于  $V - \lg P$  关系 (参见文献 [85] 的图 1 和图 2)。

为把  $W(BV)$  引入 PLC 关系式 (6), 可设

$$M_{W(BV)} = \langle M_V \rangle - E_{B-V}(B - V)_0,$$

则式 (6) 可改写为

$$M_{W(BV)} = a \lg P + (b - R_V)(B - V)_0 + c, \quad (18)$$

这就是已考虑了红化改正因素后的 PLC 关系<sup>[86]</sup>。与上式对应的 PL 关系为

$$M_{W(BV)} = a \lg P + c. \quad (19)$$

比较式 (18) 和式 (6) 可以看出, 前者  $(B - V)_0$  项系数  $(b - R_V)$  的绝对值, 要比后者的相应系数  $b$  小得多: 如取式 (11) 给出的  $b = 2.7$ , 则  $|b - R_V| \approx 0.5$ 。可见,  $(B - V)_0$  测定误差对式 (18) 之定标或用于测距的影响要比对式 (6) 的影响小得多。

Wesenheit 函数的概念由 van den Bergh<sup>[87]</sup>于 1975 年提出, 人们随即对之进行了多方面的讨论<sup>[85,88]</sup>, 而 Madore 和 Freedman<sup>[86]</sup>关于银河系造父变星 VI 波段的工作再次表明  $M_{W(VI)} - \lg P$  关系的弥散度明显小于  $M_V - \lg P$  的弥散度 (参见文献 [86] 中的图 3)。

近年来, 关于 Wesenheit 函数用于 PL 关系研究的讨论相当多, 其中有的工作用到了 OGLE(Optical Gravitational Lensing Experiment) 资料, 且涉及 I 波段观测和星族 II 造父变星, 并有若干结果发表<sup>[14,18,24,86,89,90]</sup>。如 2010 年 Turner<sup>[14]</sup>由 24 颗银河系内星团造父变星 (光变周期的大致范围为  $1.95 < P < 45.1$  d) 的 BV 波段工作, 得到  $M_{W(BV)} = (-4.18 \pm 0.10) \lg P - (2.26 \pm 0.08)$ 。

在结束本节之时, 也许应该提一下所谓脉动方程 (pulsation equation):

$$P \sqrt{\bar{\rho}/\bar{\rho}_\odot} = Q, \quad (20)$$

式中  $\bar{\rho}$  和  $\bar{\rho}_\odot$  分别为脉动星体和太阳的平均密度,  $Q$  称为脉动常数, 约等于 1 h, 仅随恒星质径比的不同而稍有变化<sup>[1,23]</sup>。由式 (20) 出发, 可以推导出半理论 PLC 关系<sup>[6,17]</sup>, 可看作上述经验 PLC 关系的物理基础。

## 6 金属度效应

长期以来,金属度是否会影响到造父变星的 PL 关系(包括 PLC 关系),即 PL 关系是否存在金属度效应或丰度效应,始终是一个颇有争议的问题。这个问题对于 PL 关系的定标和测距应用都至关重要,因而受到人们的广泛关注。

### 6.1 PL 关系的金属度效应

早期,一些天文学家认为单一的平均 PL 关系可以适用于不同星系中的所有造父变星,如 1968 年 Sandage 和 Tammann<sup>[21]</sup>就是综合利用银河系、M31、大小麦云和 NGC 6822 的观测资料,得出了一个合成 PL 关系(参见文献 [21] 中的图 1),其零点和斜率对不同星系都是相同的。不久,他们又得出所谓“普适” PLC 关系  $\langle M_V \rangle = -3.42 \lg P + 2.52(B - V)_0 - 2.46$ ,并用以推算目标天体的绝对星等<sup>[79]</sup>。1972 年, Sandage<sup>[22]</sup>再次提出造父变星 PL 关系零点的金属度效应不可能很大,其理由是在相当宽的金属度范围内 PL 关系的斜率并无显著变化。

差不多同一时期,另一些天文学家则对之持不同的观点,他们认为河外星系(特别是麦哲伦云)中的造父变星也许并不遵循这种普适 PL 关系或 PLC 关系<sup>[91-93]</sup>。1974 年 Gascoigne<sup>[93]</sup>明确指出,造父变星的光度与其金属丰度有关,对不同金属丰度  $Z$  的造父变星他得出以下不同的 PL 关系:

$$\begin{aligned} \langle M_V \rangle &= -2.98 \lg P - 1.38 \quad (Z = 0.02, \text{约相当银河系的金属丰度}), \\ \langle M_V \rangle &= -2.82 \lg P - 1.38 \quad (Z = 0.005, \text{约相当小麦云的金属丰度}); \end{aligned}$$

两者相差  $0.16 \lg P$ ,对于多数造父变星这一差值约为  $0.1 \sim 0.2 \text{ mag}$ 。

理论上的争议还在持续,并渐趋深入。一年后, Iben 和 Tuggle<sup>[94]</sup>的纯理论研究支持了 PL 关系对不同星系具有普适性的观点,并得到 Iben 和 Renzini<sup>[95]</sup>工作的认同,而后者的看法是,作为一种非常好的近似,可认为理论 PL 关系与变星的物质组成无关。不久, Stothers<sup>[36]</sup>的一项理论研究得出

$$\Delta M_V(\text{PL}) = 0.5 \Delta Y - 2.8 \Delta Z, \quad (21)$$

其中  $Y$  为氦丰度,而差值  $\Delta$  的含义是“变星-太阳”。对于  $Z = 0.02$  的变星,其光度比相同光变周期  $Z = 0.005$  的变星大约只高了  $0.04 \text{ mag}$ 。Stothers<sup>[36]</sup>认为,尽管从观测上考虑,目视波段 PL 关系零点的金属度效应可以忽略不计,但两者并非完全不相关,只是其相关程度远小于 Gascoigne<sup>[93]</sup>的预期——这似乎像是一类“折衷”的结果。不过 Stothers<sup>[36]</sup>还发现, B(蓝色)波段的金属度效应比 V 波段的 PL 关系要显著得多。

1990 年, Freedman 和 Madore<sup>[96]</sup>率先通过多波段 (BVRI) 实测来探究 PL 关系的金属度效应。目标天体是位于 M31 星系盘中 3 个小天区内 38 颗造父变星,其中心距分别为 3、10 和 20 kpc,相应的  $Z/Z_\odot$  值为 1.7、1.15 和 0.3; 3 个天区中造父变星的个数分别为 14、16 和 8 颗,光变周期范围为  $3 \sim 45 \text{ d}$ 。在仔细考虑了红化改正等因素后他们发现,尽管这 3 个天区的最大、最小  $Z/Z_\odot$  值之比已超过 5 倍,但由样本造父变星所推算出 M31 的距离模数分别为  $24.33 \pm 0.12$ 、 $24.41 \pm 0.09$  和  $24.58 \pm 0.12$ ,可见结果并无显著差异。然而, Sasselov 等

人<sup>[37]</sup>认为, Laney 和 Stobie<sup>[97]</sup> 于 1994 年所做的一项工作并没有支持这一结论, 后者用到了银河系、LMC 和 SMC 中 136 颗造父变星 ( $3 < P < 100$  d) 的 VJHK 波段观测资料。

## 6.2 金属度参数

随着多波段空间观测资料的取得, 人们对其他近距河外星系中的造父变星也开展了相应的研究, 如 M33<sup>[43]</sup>、M101<sup>[35]</sup>、NGC 4258<sup>[98]</sup> 以及 LMC 和 SMC<sup>[41,42,99]</sup> 等。在这些工作中, 常用下式给出的参数  $\gamma$  来定量表征金属度 (以 [Fe/H] 为例) 效应对距离模数  $(m - M)_0$  影响之大小:

$$\gamma = \partial(m - M)_0 / \partial[\text{Fe}/\text{H}] \quad , \quad (22)$$

$\gamma$  称为金属度 (改正) 参数, 其量纲为  $\text{mag-dex}^{-1}$ 。

表 1 金属度参数的测定结果

年份	目标星系	观测波段	金属度	$\gamma$	文献号
1994	M31	BVRI	[Fe/H]	$-0.88 \pm 0.16$	[100]
1994	M31	BVI	[Fe/H]	$-0.56 \pm 0.20$	[100]
1997	大小麦云	VR	[Fe/H]	$-0.44^{+0.1}_{-0.2}$	[37]
1997	17 个星系	VI	[O/H]	$-0.14 \pm 0.14$	[101]
1998	M101	VI	[O/H]	$-0.24 \pm 0.16$	[35]
2003	17 个星系	VI	[O/H]	$-0.25 \pm 0.05$	[102]
2004	MW 和 SMC	VW <sub>V1</sub> IK	[Fe/H]	$-0.27 \pm 0.08$	[103]
2004	17 个星系	VI	[O/H]	$-0.24 \pm 0.05$	[40]
2006	NGC 4258	BVI	[O/H]	$-0.29 \pm 0.10$	[97]
2009	M33	BVI <sub>c</sub>	[O/H]	$-0.29 \pm 0.11$	[43]

注: MW——银河系, W<sub>V1</sub>——Wesenheit 星等。

表 1 给出近 20 年来涉及  $\gamma$  值测定的一些主要结果。由表列数字可以看出, 自 21 世纪初以来,  $\gamma$  的测定精度明显提高,  $-\gamma$  大致稳定在  $0.25 \sim 0.30 \text{ mag-dex}^{-1}$  范围内, 不同结果之间并无显著差异。由此可见, 与同样光变周期的贫金属造父变星相比, 富金属变星的温度较低 (更红), 但更为明亮<sup>[101]</sup>。

## 6.3 PLC 关系的金属度效应

Gascoigne<sup>[93]</sup> 在 1974 年的一项工作中指出, PLC 关系的金属度效应比 PL 关系来得显著, 对于  $Z = 0.02$  和  $Z = 0.005$  两种金属丰度, 他给出下列 PLC 关系:

$$\langle M_V \rangle = -3.64 \lg P + 2.55(B - V)_0 - 2.60 \quad (Z = 0.02),$$

$$\langle M_V \rangle = -3.64 \lg P - 3.14(B - V)_0 - 2.51 \quad (Z = 0.005).$$

如取典型值  $(B - V)_0 \approx 0.5$ , 则可知富金属 ( $Z = 0.02$ ) 变星的光度比相同光变周期贫金属 ( $Z = 0.005$ ) 变星约高  $0.4 \text{ mag}$ , 而对于 PL 关系的相应差值仅为  $0.1 \sim 0.2 \text{ mag}$ , 可见 PLC 关系的金属度效应较为显著。翌年, Iben 和 Tuggle<sup>[94]</sup> 的纯理论工作支持了这一观点。1988

年, Stothers<sup>[36]</sup>的理论工作发现:

$$\Delta M_V(\text{PLC}) = 2.7\Delta Y - 36.9\Delta Z, \quad (23)$$

与式 (21) 相比不难看出, BV 波段 PLC 关系的金属度效应要比 PL 关系显著得多。Stothers 认为, 这一结果的主要原因是有效温度  $T_e$  与内禀  $(B - V)_0$  颜色间的转换与金属丰度强相关, 而在 PL 关系中是不含颜色项的。

1995 年 Di Benedetto<sup>[99]</sup>在这个问题上却持相反的意见。他认为上述理论研究的结果在很大程度上取决于造父变星的热性质, 而在观测上对之却知之甚少。他通过对 (具有正常金属丰度的) 银河系造父变星与 (贫金属的) 麦哲伦云造父变星的实测研究, 其中包括有关变星热性质的讨论, 发现 V 波段 PL 关系的金属度效应颇为显著, 而 BV 波段 PLC 关系的金属度效应则相对较小 (参见文献 [99] 中的公式 (11) 和表 1、表 3)。

上述两种观点无疑需要更深入的研究来加以判认。以笔者愚见, 实际情况可能比较复杂。例如, 在 Di Benedetto<sup>[99]</sup>的工作中, 麦哲伦云样本所有变星的周期均有  $P > 10 \text{ d}$ , 而在银河系样本中则有近 40% 变星的周期  $P < 10 \text{ d}$ 。那么, 金属度效应是否会与变星的周期 (或者还有色指数等) 有关? 此类问题很值得人们进一步的思考、解决 (又可参见下文)。

## 7 若干相关问题

限于篇幅, 以下问题仅给以简要的综述, 但它们并非是造父变星 PL 关系研究领域中最不重要的内容。

### 7.1 多波段 PL 关系

早期, 鉴于观测设备的限制, 关于造父变星 PL (含 PLC) 关系的实测研究仅基于 V(BV) 波段。然而, 可见光波段的观测受星际消光、变星表面温度和金属度效应等不确定因素的影响较为显著, 使视星等测定值带有较大不确定性。20 世纪 80 年代初, McGonegal 等人<sup>[104,105]</sup>经详细分析后指出, 在近红外波段所有这些不利因素的影响均能得到有效的削弱, 从而能提高 PL 关系绝对定标以及用于河外星系测距的精度。他们利用 LMC 造父变星 J(1.27  $\mu\text{m}$ )、H(1.65  $\mu\text{m}$ )、K(2.2  $\mu\text{m}$ ) 波段的测光资料, 得到相应的近红外 PL 关系, 如 H 波段的 PL 关系为

$$\langle M_H \rangle = (-2.95 \pm 0.14)\lg P - (2.84 \pm 0.14), \quad (24)$$

而拟合弥散度还不到 B 波段相应值的一半 (参见文献 [104] 之图 1)。

嗣后, 关于造父变星近红外波段, 以至多波段 PL 关系的观测研究工作渐而增多<sup>[24,30,32,52,61,106-108]</sup>, 并用于测定近距星系的距离。例如, 1998 年 Gieren 等人<sup>[61]</sup>利用银河系中 28 颗造父变星所确定的 VIJHK 波段 PL 关系, 得出 LMC 的距离模数为  $(m - M)_0 = 18.46 \pm 0.02$ , 其内符精度相当高。近期, Fouqué 等人<sup>[52]</sup>的工作更涉及到 59 颗银河系造父变星和 BVR<sub>c</sub>I<sub>c</sub>JHK<sub>s</sub> 共 7 个波段的观测, 他们经详细分析后认定, LMC 距离模数的上限为 18.50。

随着 Spitzer 空间望远镜计划的成功实施, 使造父变星 PL 关系的中红外波段观测研究成

为可能,而这能进一步减小上述不利因素对变星视星等测定的影响,例如,中红外波段的星际消光量要比可见光波段近乎小 2 个量级。

2008 年, Freedman 等人<sup>[108]</sup>首次发表了中红外波段 PL 关系的研究结果,观测样本含 LMC 中的 70 颗造父变星,光变周期范围  $6.8 < P < 47.9$  d,观测波段为 3.6、4.5、5.8 和 8.0  $\mu\text{m}$ 。他们发现这 4 个波段之 PL 关系参数的确定精度都非常高,如 3.6  $\mu\text{m}$ 波段的 PL 关系为

$$\langle M_{3.6} \rangle = (-3.34 \pm 0.02) \lg P - (2.53 \pm 0.03) ,$$

其他波段的的情况与之类同,而 4 个波段的拟合弥散度均为 0.16 mag,且与周期的长短无关。另外,综合利用他人的结果后发现,随着观测波段的变长,PL 关系的斜率  $a$  渐而变得更陡,并最终表现为趋于某个渐近值  $-3.4$ (参见图 5)<sup>[108]</sup>。2012 年, Ngeow 和 Kanbur<sup>[109]</sup>由 Spitzer 的小麦云资料得出相应的渐近值约为  $-3.2$ 。

随着造父变星观测样本的增大,对中红外波段 PL 关系的研究渐趋深入,如讨论不同周期造父变星的 PL 关系和 PL 关系的非线性形式<sup>[28,110]</sup>, SMC 造父变星中红外波段的观测研究<sup>[111]</sup>,以及多相 PL 关系(见下文)等,而人们正期待利用未来的 James Webb 空间望远镜能做出更好的工作<sup>[110]</sup>。

## 7.2 极大光度 PL 关系和多相 PL 关系

在涉及造父变星 PL(含 PLC)关系研究的大多数工作中,所考虑的总是“平均星等”——变星绝对星等在一个光变周期内的强度平均值。不过,早在 40 多年前已有人开始探究变星极大光度 ( $M_{\text{max}}$ ) 时的 PL 关系(记为  $\text{PL}_{\text{max}}$  关系)。近年来更进而讨论整个脉动周期内,各别位相处的 PL 关系,后者称之为多相 (multi-phase) PL 关系。

1968 年 Sandage 和 Tammann<sup>[21]</sup>指出,对于远距离(比如  $m - M > 25$  mag)的造父变星,需要用到极大光度时的 PL 关系,因为在非极大光度时段目标变星可能是观测不到的,也就无法取得平均星等  $\langle M \rangle$ 。他们利用银河系等 5 个星系的观测资料率先讨论了这个问题,并发现样本变星 BV 波段的  $\text{PL}_{\text{max}}$  关系与 PL 关系非常类似,且拟合弥散度近乎相等,只是零点约相差 0.5 mag(参见文献 [21] 之图 1 和图 5)。

1996 年, Kanbur 和 Hendry<sup>[34]</sup>利用 LMC 中 39 颗造父变星 BV 波段的观测资料做了一项较为详细的比对研究,包括 PL 关系与 PLC 关系的比较,以及它们与  $\text{PL}_{\text{max}}$  关系和  $\text{PLC}_{\text{max}}$  关系的比较。如果以  $\sigma$ (并附以相应的下标)表示测点与上述诸关系的拟合弥散度,他们发现  $\sigma_{\text{PL}} \approx \sigma_{\text{PL}_{\text{max}}}$  以及  $\sigma_{\text{PL}} > \sigma_{\text{PLC}} > \sigma_{\text{PLC}_{\text{max}}}$ , 且有  $\sigma_{\text{PLC}_{\text{max}}} \approx 0.9\sigma_{\text{PLC}}$ 。Kanbur 和 Hendry<sup>[34]</sup>还指出,要是同时利用  $\langle M \rangle$  和  $M_{\text{max}}$  来构筑 PLC 关系,那么只要有足够多(大于 30 颗)的样本变

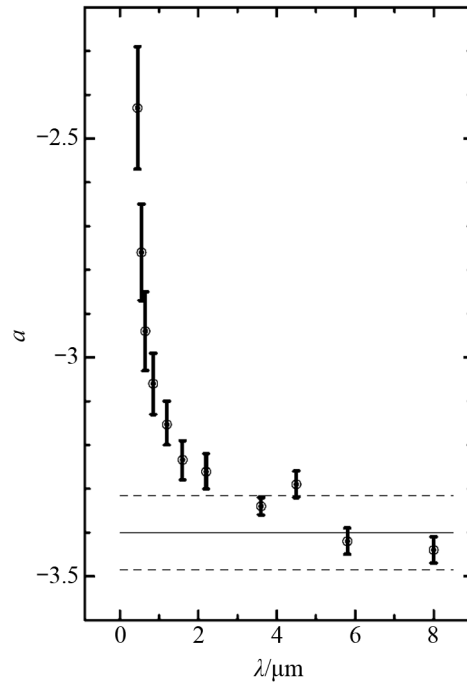


图 5 PL 关系斜率与波长的关系<sup>[108]</sup>

星, 拟合弥散度更可以进一步减小一半左右。不过, 尚不知上述结果对不同星系的造父变星是否具有普适性。

Aaronson 和 Mould<sup>[112]</sup>曾指出, 作为一种理想的标距天体需满足 5 个判据, 其中之一是它们应有小的拟合弥散度  $\sigma$ 。最近, 为了探求用于造父变星测距的最佳 PL 关系, Ngeow 和 Kanbur<sup>[109]</sup>在他们前期一些工作<sup>[27,113]</sup>的基础上, 利用 LMC 的 Spitzer 中红外观测资料, 讨论了造父变星的多相 PL 关系。他们发现, 对于 VIW 三种波段,  $\sigma$  出现极小值时的位相分别约为 0.55、0.59 和 0.14(参见文献 [109] 中的图 7)。而且, 这一极小弥散度与平均星等 PL 关系的弥散度近乎相等, 两者的最大差异仅约为 4%(在 W 波段)。有意思的是, 对于 VI 波段,  $\sigma$  的极大值出现在变星极大光度处, 或者说  $PL_{\max}$  关系的弥散度最大。如果这一结果能得以证实, 那么就应该尽可能由平均星等 PL 关系(而不是  $PL_{\max}$  关系)来确定变星的距离。

### 7.3 非线性形式的 PL 关系

早在 20 世纪 60 年代, 已有人发现造父变星 PL 关系的斜率可能因变星光变周期的不同而不同。例如, 1960 年 Arp<sup>[91]</sup>由 69 颗 SMC 造父变星观测资料, 得出 V 星等 PL 关系的斜率为  $a = -2.54$ , 样本中  $P < 10$  d 的变星占大多数(49 颗)。1965 年, Gascoigne 和 Kron<sup>[114]</sup>利用大小麦云中 27 颗造父变星得出相应值为  $a = -2.97$ , 样本中  $P < 10$  d 的变星仅为 3 颗(均为 SMC 变星)。不久, Fernie<sup>[25]</sup>从式(8)出发导出以下形式的非线性 PL 关系:

$$\langle M_V \rangle = -1.89 \lg P - 0.38(\lg P)^2 - 1.99, \quad (25)$$

由上式可推知, 随着光变周期的变长, 斜率从  $a = -2.12$  ( $P = 2$  d) 渐而变陡为  $a = -3.18$  ( $P = 50$  d), 与 Arp<sup>[91]</sup>以及 Gascoigne 和 Kron<sup>[114]</sup>的结果相符。不过, 正如 Fernie<sup>[6]</sup>后来所指出的那样, 式(25)给出的 PL 关系曲线之曲率其实是很小的, 与线性 PL 关系<sup>[79]</sup>所预期的  $M_V$  值之差, 在周期  $P = 2.3 \sim 87$  d 范围内均不超过 0.2 mag。

2002 年 Fiorentino 等人<sup>[115]</sup>的一项理论研究看来也支持这一观点。他们就不同波段(BVRJJK), 对 6 种不同化学组成 ( $Z = 0.004 \sim 0.02$ ,  $Y = 0.25 \sim 0.31$ ) 造父变星的两类 PL 关系  $\langle M \rangle = a \lg P + c$  和  $\langle M \rangle = a \lg P + b(\lg P)^2 + c$  做了详细的讨论。不同情况下拟合弥散度  $\sigma$  的数值表明: (1) 波长越长  $\sigma$  越小, 即长波段的 PL 关系可以有更好的拟合精度; (2) 除个别情况外,  $\sigma$  值与变星的化学组成无关; (3)  $\sigma$  值与 PL 关系取线性形式抑或非线性形式无关。

近期对这一问题实测研究的结果又不尽相同。2009 年, Ngeow 等人<sup>[28]</sup>利用取自 OGLE 和 Spitzer 的空间观测资料, 对 LMC 造父变星 PL 关系进行了仔细的实测研究, 样本变星共 1796 颗, 涉及的波段有 VIJHKW 以及中红外波段的 3.6、4.5、5.8 和 8.0  $\mu\text{m}$ 。经严格的统计检验后他们认为, VIJH 波段的 PL 关系是非线性的, 而其余波段的 PL 关系则是线性的, 并对前期一些同类工作<sup>[110,116-118]</sup>中的不同结果给出了解释, 如样本变星所涉及的光变周期范围不同等<sup>[28]</sup>。

### 7.4 PL 关系的“10 天跳变”

与上述讨论有关的是, 在光变周期  $P \approx 10$  d 处, 造父变星 PL 关系是否存在所谓“10 天跳变(break)”的问题。21 世纪初的若干研究表明, LMC 造父变星的 PL 关系在  $P \approx 10$  d 处出现跳变<sup>[116,117,119-123]</sup>。最早注意到这一现象的是 Tammann 和 Reindl<sup>[119,120]</sup>, 他们由大麦云中大

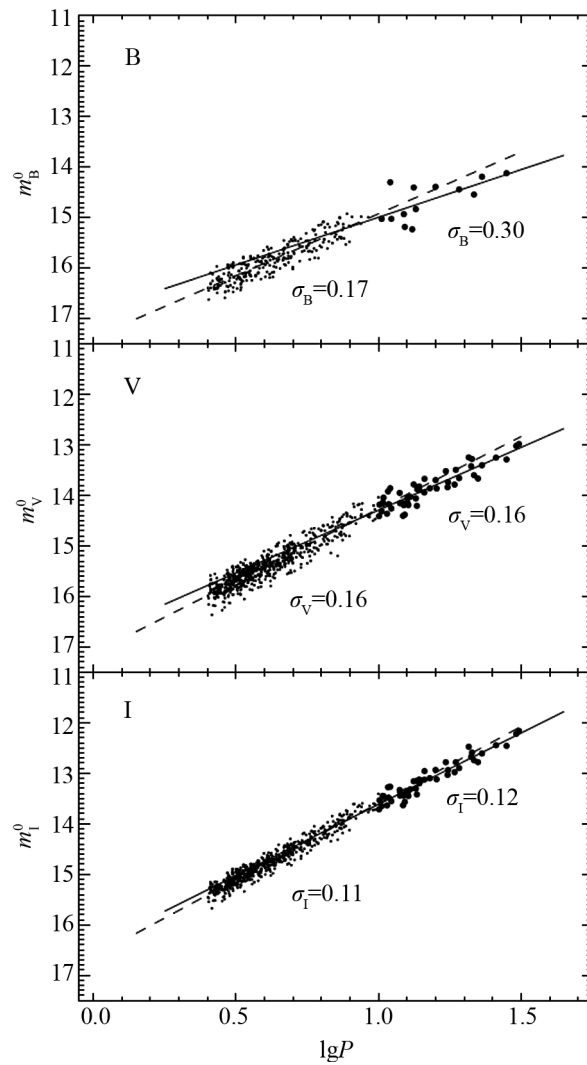


图 6 BVI 波段大麦云造父变星 PL 关系之 10 天跳变<sup>[119]</sup>  
 小黑点为  $P < 10$  d 的变星, 大黑点是  $P > 10$  d 的变星。

样本造父变星的 BVI 波段观测资料得出:

$$\langle M_V \rangle = (-2.862 \pm 0.002)\lg P - (1.43 \pm 0.001) \quad (P < 10 \text{ d}),$$

$$\langle M_V \rangle = (-2.487 \pm 0.025)\lg P - (1.79 \pm 0.030) \quad (P > 10 \text{ d}).$$

可见, 上述 PL 关系的斜率和零点有着显著的差异。对于 B 和 I 波段情况是类似的; 不过, 随着波长变长, 不同周期范围两类变星 PL 关系参数的差异渐而变得较不明显。图 6 分别给出了 B、V、I 波段 PL 关系的“10 天跳变”现象, 其中细虚线为短周期变星的 PL 关系, 粗实线是长周期变星的 PL 关系。由图可见, 在波长最短的 B 波段, “10 天跳变”最为显著, I 波段的

跳变则最不明显,而这种变化趋势实质上与 Ngeow 等人<sup>[28]</sup>的结果是一致的。

同一时期的另一些工作则对此提出质疑<sup>[13,124,125]</sup>,如 Sandage 和 Tammann<sup>[13]</sup>认为,尽管 LMC 造父变星明显表现出有“10 天跳变”,但对于银河系造父变星却并不呈现此类跳变。看来,造父变星 PL 关系的“10 天跳变”是否确实存在,是否具有普适性,它与观测波段以及变星母星系的关系,尚需更多更细致的观测研究来予以确认。

造父变星 PL 关系的“10 天跳变”如果的确存在,那么究其原因很可能与观测星等的红化改正有关。例如, Sandage 等人<sup>[122]</sup>2004 年的工作结果尽管证实了 B、V、I 波段的“10 天跳变”现象,但同时又发现对于任何一种无红化的 Wesenheit 星等,这种跳变并不存在。

## 8 结 语

造父变星 PL 关系的研究内容甚为丰富,本文仅就其若干实测方面的探索和进展给以简要的综述性介绍。在拙文所引用的 125 篇文献中,近 5 年中发表的有 22 篇(约占 18%),21 世纪发表的计有 53 篇(约占 42%)——这些数字从一个侧面说明了该领域研究工作之活跃程度和重要性。

### 参考文献:

- [1] Binney J, Merrifield M. Galactic Astronomy, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1998: 415
- [2] Leavitt H S. Ann. Harv. Coll. Obs. 1908, 60: 87
- [3] Leavitt H S, Pickering E C. Harv. Coll. Obs. Circ. 1912, 173: 1
- [4] Freedman W L, Madore B F. ARA&A, 2010, 48: 673
- [5] Hertzsprung E. AN, 1913, 196: 201
- [6] Fernie J D. PASP, 1969, 81: 707
- [7] Hubble E. Obs. 1925, 48: 139
- [8] Hubble E. ApJ, 1925, 62: 409
- [9] Hubble E. ApJ, 1926, 63: 236
- [10] Baade W. PASP, 1956, 68: 5
- [11] Caldwell J A R. Obs. 1983, 103: 244
- [12] Turner D G, Burke J F. AJ, 2002, 124: 2931
- [13] Sandage A, Tammann G A. ARA&A, 2006, 44: 93
- [14] Turner D G. Ap&SS, 2010, 326: 219
- [15] Turner D G, Majaess D J, Lane D J, et al. OAP, 2010, 23: 119
- [16] Turner D G. JAAVSO, 2012, 40: 502
- [17] Sandage A. ApJ, 1958, 127: 513
- [18] Majaess D, Turner D, Lane D. Acta Astronomica, 2009, 59: 403
- [19] Majaess D A. JAAVSO, 2010, 38: 100
- [20] Matsunaga N, Feast M W, Soszyński I. MNRAS, 2011, 413: 223
- [21] Sandage A, Tammann G A. ApJ, 1968, 151: 531
- [22] Sandage A. QJRAS, 1972, 13: 202
- [23] Brager M, Bragman J N. ApJ, 1975, 200: 343



- [24] Madore B F, Freedman W L. *PASP*, 1991, 103: 933
- [25] Fernie J D. *AJ*, 1967, 72: 1327
- [26] Ngeow C-C, Kanbur S M, Neilson H R, et al. *MNRAS*, 2005, 363: 831
- [27] Ngeow C-C, Kanbur S M. *MNRAS*, 2006, 369: 723
- [28] Ngeow C-C, Kanbur S M, Neilson H R, et al. *ApJ*, 2009, 693: 691
- [29] Ngeow C-C, Kanbur S M. *ASPC*, 2009, 404: 262
- [30] Hendry M A, Tanvir N R, Kanbur S M. *ASPC*, 1999, 167: 192
- [31] Kanbur S M, Ngeow C-C, Neilson H R, et al. *A&AS*, 2009, 41: 452
- [32] Ngeow C-C, Kanbur S M, Bellinger E P, et al. *Ap&SS*, 2012, 341: 105
- [33] Simon N R, Kanbur S M, Mihalas D. *ApJ*, 1993, 414: 310
- [34] Kanbur S M, Hendry M A. *A&A*, 1996, 305: 1
- [35] Kanbur S M, Phillips P M. *A&A*, 1996, 314: 514
- [36] Stothers R B. *ApJ*, 1988, 329: 712
- [37] Sasselov D D, Beaulieu J P, Renault C, et al. *A&A*, 1997, 324: 471
- [38] Kennicutt JR R C, Stetson P B, Saha A, et al. *ApJ*, 1998, 498: 181
- [39] Alibert Y, Baraffe I, Hauschildt P, et al. *A&A*, 1999, 344: 551
- [40] Sakai S, Ferrarese L, Kennicutt JR R C, et al. *ApJ*, 2004, 608: 42
- [41] Groenewegen M A T, Romaniello M, Primas F, et al. *A&A*, 2004, 420: 655
- [42] Romaniello M, Primas F, Mottini M, et al. *A&A*, 2008, 488: 731
- [43] Scowcroft V, Bersier D, Mould J R, et al. *MNRAS*, 2009, 396: 1287
- [44] Feast M W, Glass I S, Whitelock P C, et al. *MNRAS*, 1989, 241: 375
- [45] Kanbur S M, Hendry M A, Clarke D. *MNRAS*, 1997, 289: 428
- [46] Kanbur S M, Hendry M A, Clarke D. *ASPC*, 1998, 135: 111
- [47] Baade W. *ApJ*, 1944, 100: 137
- [48] Shapley H. *ApJ*, 1918, 48: 89
- [49] Blaauw A, Morgan H R. *BAN*, 1954, 12: 95
- [50] Irwin J B. *MNSSA*, 1955, 14: 38
- [51] Ngeow C -C, Kanbur S M. *MNRAS*, 2004, 349: 1130
- [52] Fouqué P, Arriagada P, Storm J, et al. *A&A*, 2007, 476: 73
- [53] Benedict G F, McArthur B E, Fredrick L W, et al. *AJ*, 2002, 124: 1695
- [54] Benedict G F, McArthur B E, Feast M W, et al. *AJ*, 2007, 133: 1810
- [55] Feast M W, Catchpole R M. *MNRAS*, 1997, 286: L1
- [56] Feast M W. *LNP*, 2003, 635: 45
- [57] Baade W. *AN*, 1926, 228: 359
- [58] Wesselink A J. *BAN*, 1946, 10: 91
- [59] Becker W. *ZA*, 1940, 19: 289
- [60] Barnes T G, Evans D S. *MNRAS*, 1976, 174: 489
- [61] Gieren W P, Fouqué P, Gómez M. *ApJ*, 1998, 496: 17
- [62] Tammann G A, Sandage A, Reindl B. *A&A*, 2003, 404: 423
- [63] Narayanan V K, Gould A. *ApJ*, 1999, 523: 328
- [64] Kervella P, Nardetto N, Bersier D, et al. *A&A*, 2004, 416: 941
- [65] Kraft R P. *ApJ*, 1960, 132: 404
- [66] Matsunaga N, Fukushi H, Nakada Y, et al. *MNRAS*, 2006, 370: 1979
- [67] Majaess D, Turner D, Lane D. *AcA*, 2009, 59: 403
- [68] McNamara D H. *AJ*, 1995, 109: 2134
- [69] Pritzl B J, Smith H A, Stetson P B, et al. *AJ*, 2003, 126: 1381
- [70] Bohm-Vitense E, Szohy P, Wallerstein G, et al. *ApJ*, 1974, 194: 125
- [71] Wallerstein G W, Cox A N. *PASP*, 1984, 96: 677
- [72] Wallerstein G W. *PASP*, 2002, 114: 689

- [73] Clement C M, Muzzin A, Dufton Q, et al. *AJ*, 2001, 122: 2587
- [74] Code A D. *ApJ*, 1947, 106: 309
- [75] Kraft R P. *ApJ*, 1960, 131: 330
- [76] Kraft R P. *ApJ*, 1961, 133: 39
- [77] Kraft R P. *ApJ*, 1961, 133: 57
- [78] Kraft R P. *ApJ*, 1961, 134: 616
- [79] Sandage A, Tammann G A. *ApJ*, 1969, 157: 683
- [80] Sandage A, Tammann G A. *ApJ*, 1971, 167: 293
- [81] Martin W L, Warren P R, Feast M W. *MNRAS*, 1979, 188: 139
- [82] Opolski A, Ciurla T. *IBVS*, 1984, 2528: 1
- [83] Feast M W, Walker A R. *ARA&A*, 1987, 25: 345
- [84] Fernie J D. *AJ*, 1967, 72: 422
- [85] Madore B F. *ApJ*, 1982, 253: 575
- [86] Madore B F, Freedman W L. *ApJ*, 2009, 696: 1498
- [87] van den Bergh S. *Stars and Stellar System*, Chicago: University of Chicago Press, 1975, 9: 509
- [88] Madore B F. *RGJ Bull.* 1976, 182: 153
- [89] Benedict G F, McArthur B E, Feast M W, et al. *AJ*, 2007, 133: 1810
- [90] Soszyński I, Udalski A, Szymański M K, et al. *Acta Astronomica*, 2008, 58: 293
- [91] Arp H C. *AJ*, 1960, 65: 404
- [92] Gascoigne S C B. *MNRAS*, 1969, 146: 1
- [93] Gascoigne S C B. *MNRAS*, 1974, 166: 25p
- [94] Iben Jr I, Tuggle R S. *ApJ*, 1975, 197: 39
- [95] Iben Jr I, Renzini A. *Phys. Rept.* 1984, 105: 329
- [96] Freedman W L, Madore B F. *ApJ*, 1990, 365: 186
- [97] Laney C D, Stobie R S. *MNRAS*, 1994, 266: 441
- [98] Macri L M, Stanek K Z, Bersier D, et al. *ApJ*, 2006, 652: 1133
- [99] Di Benedetto G P. *ApJ*, 1995, 452: 195
- [100] Gould A. *ApJ*, 1994, 426: 542
- [101] Kochanek C S. *ApJ*, 1997, 491: 13
- [102] Kenicutt JR R C, Sakai S, Ferrarese L, et al. *A&AS*, 2003, 202: 1114
- [103] Storm J, Carney B W, Gieren W P et al. *A&A*, 2004, 415: 531
- [104] McGonegal R, McLaren R A, McAlary C W, et al. *ApJ*, 1982, 257: L33
- [105] McGonegal R, McAlary C W, McLaren R A, et al. *ApJ*, 1983, 269: 641
- [106] Welch D L, McAlary C W, Madore B F, et al. *ApJ*, 1985, 292: 217
- [107] Hindsley R B, Bell R A. *ApJ*, 1990, 348: 673
- [108] Freedman W L, Madore B F, Rigby J, et al. *ApJ*, 2008, 679: 71
- [109] Ngeow C-C, Kanbur S M. *Ap&SS*, 2012, 341: 105
- [110] Ngeow C-C, Kanbur S M. *ApJ*, 2008, 679: 76
- [111] Ngeow C-C, Kanbur S M. *ApJ*, 2010, 720: 626
- [112] Aaronson M, Mould J. *ApJ*, 1986, 303: 1
- [113] Kanbur S M, Maconi M, Ngeow C-C, et al. *MNRAS*, 2010, 408: 695
- [114] Gascoigne S C B, Kron G E. *MNRAS*, 1965, 130: 333
- [115] Fiorentino G, Caputo F, Marconi M, et al. *ApJ*, 2002, 576: 402
- [116] Ngeow C-C, Kanbur S M. *MNRAS*, 2005, 360: 1033
- [117] Ngeow C-C, Kanbur S M, Nanthakumar A. *A&A*, 2008, 477: 621
- [118] Koen C, Kanbur S M, Ngeow C-C. *MNRAS*, 2007, 380: 1440
- [119] Tammann G A, Reindl B. *Ap&SS*, 2002, 280: 165
- [120] Tammann G A, Reindl B, Thim F, et al. *ASPC*, 2002, 283: 258
- [121] Kanbur S M, Ngeow C-C. *MNRAS*, 2004, 350: 962

- [122] Sandage A, Tammann G A, Reindl B. *A&A*, 2004, 424: 43  
[123] Kanbur S M, Ngeow C-C, Nanthakumar A, et al. *PASP*, 2007, 119: 512  
[124] Benedict G F, McArthur B E, Feast M W, et al. *AJ*, 2007, 133: 1810  
[125] Pietrzyński G, Gieren W, Udalski A, et al. *AJ*, 2007, 134: 594

## Developments in Observational Studies on the PL Relation of Cepheids

ZHAO Jun-liang<sup>1,2</sup>

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 2. *Shanghai Normal University, Shanghai 200233, China*)

**Abstract:** Cepheids have been used as very good distance indicators on Galactic and extragalactic distance scales, based upon their period-luminosity (PL) relations. Since the Cepheids PL relation was found in 1908 by Leavitt, an American lady astronomer, lots of researches in different aspects have been done for the PL relations. Because of its great importance, it was suggested that the Cepheids PL relation should be referred to as Leavitt Law.

In order to calibrate the PL relations, it is necessary to know the distances of calibrating Cepheids, which can be determined through many different approaches, such as moving cluster parallax, statistical parallax, main sequence fitting, Baade-Wesselink method, trigonometric parallax, angular diameter measurements, etc. In recent years, some of the approaches mentioned above are combined to calibrate the PL relations. As early as 1950s, it was recognized there are two different PL relations, valid for the population I (classical) and the Population II Cepheids respectively, the zero point difference between them being some 1.5 mag. This discovery leads to the value of the Hubble constant a decrease of some 50%.

In 1958, the importance of the color term was pointed out for calibration of the Cepheids PL relation, which leads to the PLC relation of Cepheids to be found. Later, some people argue that the PLC relation offers no advantage over the simpler PL relation, and others show that the PLC relation gives a much better fit to observational data than the PL relation at least in a period range.

So far as the metallicity dependence of the Cepheids PL relations is concerned, a lot of discussions have been made. There have been different viewpoints for a long time: some people believe a single mean or “universal” PL and/or PLC relation is valid for all Cepheids in local galaxies, independent of the metallicity of Cepheids under study, and others suggest that extragalactic Cepheids may not obey such a so-called universal relation. Whether the metallicity effects on the PL relation are more or less significant than those on the PLC relation is also a disputed problem.

In addition to what mentioned above, some other problems concerned with the PL and/or PLC relations of Cepheids are also briefly reviewed in this paper, including the PL relations in multi-wavebands, the PL relations at maximum light and the multi-phase PL relations, the reddening-free Wesenheit magnitude PL relation, the possible nonlinearity of the PL relations and 10 d break in the PL relations, etc. However, some of the results derived from the researches concerned are not yet conclusive.

**Key words:** pulsation variable; Cepheids; PL relation; PLC relation; metallicity effect

---

## 《天文学进展》2013 年征订启事

《天文学进展》是天文学类中文核心期刊。刊物为季刊，2013 年本刊于 1、4、7、10 月中旬出版，每期定价 40 元，全年 160 元（含邮寄费和包装费）。凡需订阅 2013 年《天文学进展》，请到所在地邮局进行订购。

统一刊号：CN 31-1340/P

邮发代号：4-819

欢迎订阅！谢谢支持！

《天文学进展》编辑部