

# $\delta$ Scuti 变星和相关天体

蒋 世 仰

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

## 摘 要

$\delta$  Scuti 型变星是赫罗图上 A3~F5 区间的主序及其以上的一种周期短于 0.3 d 的单周期或多周期小变幅脉动变星。与它们相关的变星有矮造父变星、 $\gamma$  Dor 变星、蓝离散星、金属线星、A 型特殊星、 $\lambda$  Boo 变星和  $\delta$  Del 变星。有些赫比格 Ae/Be 星也存在类似的脉动。对自 1964 年起的研究工作进行了系统的总结, 给出了 1995 年后新发现的相关变星数和最可靠的周期变化表, 提出应当用双星轨道光时效应来解释实测得到的变星周期变化中的幅度很大的成分。统计表明自转越快变幅越小, 因此年轻星团中不可能存在大变幅变星。变幅随周期的分布有 3 个极大值, 最大变幅是周期 0.17d 处的 1.0 mag。恒星系统内变星的平均周期越短系统的年龄越大, 金属丰度也越低。

**关键词** 变星 — 脉动变星 —  $\delta$  Scuti 型变星 — 矮造父变星 —  $\gamma$  Dor 变星 — 蓝离散星 — 金属线星 — A 型特殊星 —  $\lambda$  Boo 变星 —  $\delta$  Del 变星 — 赫比格 Ae/Be 星

**分类号** P145.2

## 1 引 言

$\delta$  Scuti 型变星是位于赫 - 罗图上造父不稳定带下部的光谱型 A3~F5、光度级 III~V 的一类短周期小变幅径向和非径向脉动变星。 $\delta$  Scuti 为典型星。多数  $\delta$  Scuti 型变星有多重周期。周期界于 0.01~0.25 d, V 波段光度变幅在 0.001~1.0 mag 间。它们的周期和振幅均随时间而有数年时标的复杂变化。质量大约是太阳质量的 1.0~3.0 倍。有效温度界于 6800 K 到 8200 K 间。绝对星等为 0.0~3.5 mag。迄至 1995 年已知成员约 300 颗<sup>[1,2]</sup>, 近年来的一批 CCD 巡天又发现了大约 300 颗<sup>[3,4]</sup>, 总数超过 636 颗, 其中我国天文学家发现 10 余颗<sup>[5~14]</sup>。在赫 - 罗图上相同或相近的区域内, 还存在着若干组变星, 它们的脉动周期和光度变化幅度与  $\delta$  Scuti 型变星存在一定的关系, 脉动起因也存在一定的联系。我们把这些变星叫做相关天体, 并在此一并加以介绍。

近年来在日震学获得成功的启示下, 人们把  $\delta$  Scuti 型变星结合星震学进行研究, 组织了许多国际多台站 24 小时光度和光谱联测, 原北京天文台就是其中最重要的台站之一<sup>[15~28]</sup>。

目的是想进一步了解这类恒星的内部结构和演化, 并探明它们内部的对流以及角动量的分布和传输。研究表明, 自转越快光度变幅越小, 犹如高速旋转的陀螺可以保持稳定一样<sup>[2,4]</sup>。根据光度变化幅度的大小可以把  $\delta$  Scuti 型变星分成主要属于星族 II 的大变幅的矮造父变星和主要属于星族 I 的小变幅的  $\delta$  Scuti 型变星。前者有一个或两个振幅特别大的径向脉动频率, 余下的多为振幅很小的拍频。它们曾经被叫做 AI Vel 型变星, 而且一些金属含量特低的成员被认为属于星族 II, 并被叫做 SX Phe 型变星。后者则存在许多振幅相差不大的频率。对于前一种变星, 用一台直径 15~100 cm 的望远镜加一套廉价 CCD 照相机就可以测准它们的光度极大发生时刻, 获得很有科学意义的观测结果。综合分析同一颗星的全部极大时刻就可以研究它们的脉动周期随年代的变化。原北京天文台的天文学家们用这种方法获得了 15 颗这类变星的周期变化率, 并从中发现了 5 颗变星存在着看不见的暗伴星, 占具有暗伴星的这类变星总数 8 颗的一半多。对于后一种变星要求的测光精度比较高, 不过迄今发现的绝大多数是亮于 10 mag 的亮星, 也不难用小望远镜获得有用的测光资料。但是要进行多普勒成像观测就必须使用口径 2 m 级的大望远镜和高效阶梯光栅摄谱仪进行多台址联测。

研究表明  $\delta$  Scuti 型变星的基频服从造父变星周光关系在短周期方向的外延<sup>[29]</sup>。它们的一阶谐频也服从一个平行的周光关系, 只是绝对星等移动了  $-0.36$  mag<sup>[30]</sup>。因此支持矮造父变星这个名称。它们的绝对星等如下:

$$M_V = -3.29 \lg P - 1.38,$$

或

$$M_V = -3.725 \lg P_F - 1.933,$$

$$M_V = -3.29 \lg P_{H1} - 1.74.$$

## 2 各类相关天体的研究情况

### 2.1 矮造父变星

早期人们把 V 波段光变幅度大于 0.3 mag 的  $\delta$  Scuti 型变星叫做矮造父变星, 也有人把它们叫做 AI Vel 型变星。近年来有人提议把变幅降低到 0.1 mag<sup>[31]</sup>。迄今共发现了 171 颗这类变星。它们大多为单周期, 一部分是双周期或三周期。它们的光变幅度与投影自转速度之间存在很好的逆相关性: 自转越快光度变化幅度越小。由于光变幅度较大且周期数目较少, 这类变星的周期变化研究比较容易。迄今有关  $\delta$  Scuti 型变星的周期变化数据多半是这类变星提供的。我们对其中的 15 颗进行过观测研究, 发现 EH Lib<sup>[32]</sup>、KZ Hya<sup>[33]</sup>、BS Aqr<sup>[34]</sup>、CY Aqr<sup>[35]</sup> 和 AD Cmi<sup>[36]</sup> 可能有暗伴星。我们的观测资料还提供 BE Lyn<sup>[37]</sup> 和 VZ Cnc<sup>[38]</sup> 存在暗伴星的可能性。最近 Szeidl 等人<sup>[71]</sup> 和周爱英<sup>[72]</sup> 分别发现 DY Her 和 AN Lyn 存在暗伴星。矮造父变星中的一部分变星金属含量较低, 空间速度较大, 属于星族 II, 有人将它们叫做 SX Phe 型变星。这部分矮造父变星的质量与太阳十分接近, 大多是蓝离散星, 尤其是球状星团中的这类矮造父变星。

目前人们对矮造父变星的想法主要有两种: 以 Breger 等大多数研究者认为矮造父变星与  $\delta$  Scuti 型变星无区别, 但是仍然把其中的一小部分星族 II 变星当作 SX Phe 型变星来加以

特殊处理。另外以 McNamara 等少数研究者认为矮造父变星应当是一组独立的变星, 它与  $\delta$  Scuti 型变星间既存在密切联系又存在明显差异。

## 2.2 $\gamma$ Dol 型变星

在  $\delta$  Scuti 型星的红边界附近, 有一些小变幅变星, 它们的周期在 0.3~2 d 左右, 以  $\gamma$  Dol 为典型星。过去总以为它们是表面上存在黑子的恒星, 因自转而发生光变。近年来的多普勒成像研究表明它们的光度变化是非径向、高阶、重力模式脉动引起的, 而且视线速度曲线与相应的光变曲线几乎共相位。迄今已肯定的成员约 18 颗, 尚有一批候选者<sup>[39]</sup>, 总数大约 100 颗。我们参与发现了其中的 2 颗<sup>[40,41]</sup>。观测表明金属含量与这类脉动的发生有关。要想寻找这类变星, 应当到  $[\text{Me}/\text{H}] \leq 0.10$  的拥有很多主序星的疏散星团中去找。对于场星, 应当在  $2.70 \leq \beta \leq 2.76$  和  $\delta c_1 \leq 0.1 \text{ mag}$  的 AF 型恒星中去找<sup>[70]</sup>。

对这类变星的研究还开始不久, 目前仍然处在发现更多成员星和观测确定更多基本特性的阶段。其产生脉动的确切机制仍然有待于进一步研究。值得一提的是, 观测确定  $\delta$  Scuti 型变星的压力模式脉动是否真的能够与  $\gamma$  Dol 型变星的重力模式脉动共同存在于同一个变星中是非常有意义的。Paparo 等人关于 57 Tau 的研究结果<sup>[56]</sup>在这方面起到了十分重要的作用。

## 2.3 金属线星和 A 型特殊星

光谱中具有较强的铁和稀土元素谱线的 A3 到 F3 型星叫金属线星, 并分别记作 Am、Fm。它们的光谱中钙和钪的谱线特别弱。由于这些谱线的干扰, 在短波段求得的光度级比在长波段求得的光度级高。它们的自转速度较小, 平均为 50 km/s 左右, 一般没有短周期脉动。Abt 等人用折轴 CCD 高色散光谱仪观测了 1700 颗 A~F 型星的自转, 发现所有快速自转星的光谱均正常, 所有慢速自转星均为 A 型特殊星 (Ap 或 Am 星)<sup>[42]</sup>。目前一般认为 A 型特殊星大多是轨道周期较短的双星, 由于潮汐作用使自转速度变慢到接近于同步自转, 因此一些特定的金属元素浮到了恒星大气的表面。这些金属元素降低了大气的储能作用, 所以不容易发生脉动。但是蒋世仰等人利用亮星星表发现 Ap 和 Am 型星中的双星比例与正常 A 型星中的比例相近, 但投影自转速度确实比较低, 表明它们或许已经因演化而离开了主星序<sup>[43]</sup>。加之 Kurtz 等人在 1995 年发现典型 Am 星 HD 40765 是一颗 V 星等变幅达 0.15 mag 的单周期脉动变星<sup>[44]</sup>。所以上述解释未必见得可靠。

在同一区域内还有一些恒星的光谱中电离硅、电离锰、电离铬、电离锶、电离钡以及其它一种或多种稀土元素的电离谱线特别强, 即上文提到的 A 型特殊星, 记作 Ap。后来发现它们具有很强的磁场, 有的自转较快而发生光度变化, 被叫做快速振荡 A 型特殊 (RoAp) 星。它们的光度变化周期约几十分到几小时, 幅度约千分之几到百分之几星等。

有两个星表列出了 Am 和 Ap 型星: Hauk 列出 2152 颗 Am 型星<sup>[45]</sup>; Rensen 等人列出 6684 颗 Ap 及 Am 型星<sup>[46]</sup>。可以用多普勒成像技术来求得它们的表面亮度和元素丰度分布。

## 2.4 $\lambda$ Boo 型变星

$\lambda$  Boo 型变星是一组非磁性化学丰度特殊的星族 I A~F 型矮星。它们的光谱中除 C、N、O 和 S 谱线以外, 其它金属谱线均偏弱 (含量偏低)。它们位于赫-罗图中经典不稳定带内靠近零龄主序附近。约半数成员星具有周期为几小时到 17 h 的小变幅非径向脉动多周期光变。目前有两种理论试图解释这类变星的成因: 其一是质量流失伴以扩散效应; 另一是吸积效应。Charbonneau 指出, 即使是中等的自转致混合效应也足以能避免恒星在演化较晚期发生

非常低丰度所要求的深度化学元素分离现象。因此需要搜集更多的观测资料才能找到这类变星的真正成因。最近有人甚至认为织女星也可能有一点  $\lambda$  Boo 星的特点。迄今列出了 61 颗成员星, 其中做过光度测量的 52 颗星中有 22 颗存在脉动, 因此其光变概率大约为 50%<sup>[47]</sup>。

### 2.5 $\delta$ Del 型星

已经离开主序的金属线星叫  $\delta$  Del 型星, 它们都是光度变化幅度不大的脉动变星<sup>[48]</sup>。关于  $\delta$  Del 型星的演化来源, 1976 年基于化学丰度和  $\delta$  Del 型星在  $(\beta, M_v)$  平面上的位置, Kurtz 认为它们是演化了的 Am/Fm 型星。1992 年 Berthet 认为已经离开主星序的金属线星, 即所谓的  $\delta$  Del 型星, 可能是主星序 Am/Fm 星直接演化过来的。但是由最近的新分光资料获得的自转与视线速度数据表明, 情况并非如此。Kunzli 和 North 在 1998 年指出, 一般的金属线巨星是  $v \sin i$  大于  $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  的快速自转星, 而且周期短于 1000 d 的密近双星概率小于 30%。而主星序 Am/Fm 型星是慢速自转星, 它们的短周期双星比例也特别高。因此二者之间不可能存在直接演化关系。

### 2.6 蓝离散星

按照演化理论, 在球状星团的主序蓝端延长线上的所有恒星均应当离开了主序。但是那里却常常有一些恒星, 人们把它们叫做蓝离散星。目前大多数人认为蓝离散星原本是双星, 其中的质量较大的主星已经演化离开了主序并且把部分质量转移到了原来的小质量伴星上而形成一个新的主序星。另一种可能是在恒星较为密集的区域, 有些小质量恒星彼此碰撞而融合成一个新的主序星。例如在 M3 的外围部分共找到 52 颗蓝离散星, 且总数可能达到 200 颗。Ferraro 等人在 IC4499 中发现 64 颗蓝离散星; 在 47Tuc 中发现 45 颗蓝离散星。目前 Fusi 共已发现 625 颗这类天体<sup>[49]</sup>。它们中不少是 SX Phe 型变星。

### 2.7 双星和多重星中的变星

许多  $\delta$  Scuti 型变星是双星或多重星中的一个成员。例如 AB Cas 是一个周期为 1.3668 d 的大陵五型食变星的子星, 因此在食外可以清楚地看到短周期脉动光变。 $\theta^2$  Tau 是周期为 140.738 d 的双谱分光双星的子星。57 Tau 是轨道周期为 2.4860 d 的分光双星。 $\theta$  Tuc 也是分光双星的成员。SZ Lyn 先是有光时效应, 后被视线速度观测证实为分光双星。另外 8 颗大变幅  $\delta$  Scuti 型变星 (BS Aqr、CY Aqr、AD CMi、VZ Cnc、DY Her、KZ Hya、EH Lib、BE Lyn) 均显现出光时效应。还有诸如 RO Pup、KW Aur、UZ Lyn、Y Cam、UX Mon、AI Hya、HD 73712、DL UMa、AI Com、UU Com、TZ CrB 等变星均是双星成员星<sup>[1,3]</sup>。迄今已发现这类变星 86 颗, 占已知  $\delta$  Scuti 型变星总数的 14%。恒星中约 50% 是双星或多重星成员, 因此这个比例显然太低, 需要更多的长时间精确观测才能确定它们的真实比例。研究这些双星系统中的变星可以帮助获得它们的精确质量, 了解潮汐效应和质量交换对脉动的影响。

## 3 周期变化研究

### 3.1 周期变化的理论根据和实测结果

根据脉动理论有

$$\lg p = -0.5 \lg M - 0.3 M_{\text{bol}} - 3 \lg T_{\text{eff}} + C,$$

$$\dot{p}/p = -0.69(dM_{\text{bol}}/dt) - 3(dT_{\text{eff}}/dt)/T_{\text{eff}}.$$

其中  $p$  是脉动周期,  $\dot{p}$  是周期变化率,  $M$  是恒星的质量,  $M_{\text{bol}}$  和  $T_{\text{eff}}$  分别是恒星的绝对星等和有效温度,  $t$  为时间。在大多数情况下周期应当以  $10^{-9}/\text{yr}$  的速率不断地增加, 但是观测结果却是增加和减少的概率几乎相同, 且速率界于  $10^{-8} \sim 10^{-7}/\text{yr}$  间。现在把所有实测结果列于表 1。

表 1 若干  $\delta$  Scuti 型变星的周期变化率

星 名	脉动周期 /d	$(\dot{p}/p)/10^{-8}\text{yr}^{-1}$	参考文献
星族 I			
IP Vir	0.067	-4155	[50]
GP And	0.079	13	[51]
V 1162 Ori	0.079	-1600 加周期性变化	[52]
AE UMa	0.086	-4.3	[53]
EH Lib	0.088	小而且可能是双星	[32]
BE Lyn	0.096	双星	[37]
YZ Boo	0.104	3	[54]
AI Vel	0.086	正	[55]
	0.112	小	
SZ Lyn	0.121	7 双星	[56]
AD CMi	0.123	4 双星	[36]
RS Cru	0.147	-11	[57]
DY Her	0.149	-3.5 双星	[58,71]
VZ Cnc	0.178	双星	[38]
BS Aqr	0.198	-0.3 双星	[34]
XX Pyx	0.026	353	[59]
	0.278	-917	
	0.0299	62	
$\tau$ Peg	0.054	可变	[60]
4 CVn	0.116	-110	[61]
	0.170	-300	
星族 II			
BL Cam	0.039	17	[62]
SX Phe	0.043	-16	[63]
	0.055	-2	
KZ Hya	0.0595	30 双星	[33]
CY Aqr	0.061	10 双星	[35]
DY Peg	0.073	-3	[64]
XX Cyg	0.135	0.7	[65]
ZZ Mic			[57]
NGC 5053			
NC13	0.03416	448.8	[66]
NC11	0.0350	0.0	[66]
NC7	0.03683	-4350.7	[66]

### 3.2 光时效应

假如双星中的一颗是脉动变星, 它的光度极大时刻将会在某一平均值附近周期性地变化, 这是由于光速有限且变星离开我们的距离因双星轨道运动而周期性地变化所致, 这种现象被

称为光时效应。其变化的时间尺度一般相当长。因此当利用变星的光度极大时刻的变化来研究变星的周期变化时, 如果资料取得的时段的长度只是轨道周期的一部分, 就会错误地得出周期以远大于理论预期值在变化的结果。当观测时段大于轨道周期的 2 倍以上时, 就可以求出这种光时效应而加以剔除, 从而获得实际的周期变化率。已经得到 SZ Lyn、BE Lyn、DY Her、KZ Hya、CY Aqr、BS Aqr、EH Lib 和 AD CMi 等变星的相应结果。剔除光时效应后周期变化率明显地变小。有的已经接近理论预期值, 如 BS Aqr 和 EH Lib。有的仍然相当大, 如 KZ Hya 和 CY Aqr。对于后者需要更多的观测来提高测量精度并弄清楚它们是否还存在另外的轨道周期更长的暗伴星。

在这些变星中, DY Her、BE Lyn 和 AD CMi 的暗伴星的质量均可能小于 0.07 倍的太阳质量, 因此它们的暗伴星很可能是褐矮星。利用脉动变星的光时效应来寻找褐矮星是一种技术条件要求不高的方法, 同样可以应用于脉冲星和食变星<sup>[73]</sup>。

#### 4 自转速度与光变幅度的关系

McNamara 等人研究过  $v \sin i$  与光变幅度的关系<sup>[77]</sup>, 但他们使用的样本不够大。我们尽可能收集了一切已知的数据, 共获得 180 颗变星的有关数据, 得出它们的平均  $v \sin i$  为 87.8 km/s。按不同光变幅度分组统计它们的平均  $v \sin i$ , 由  $\Delta V$  从小于 0.02 的 112.6 km/s 下降到大于 0.092 的 24.6 km/s。其中 33 颗变星的变幅大于 0.1 mag。假如除去这 33 颗变星, 其余 147 颗小变幅变星的  $v \sin i$  平均值为 102 km/s。在这些小变幅变星中, 72 颗变星的  $v \sin i$  大于 100 km/s。将这些小变幅变星再按变幅分段进行分布研究时, 它们的平均  $v \sin i$  由  $\Delta V$  从 0.02 的 112.6 km/s 变化到 0.091 的 81.1 km/s。 $v \sin i$  最大的是 HD 19279, 为 285 km/s, 但变幅只有 0.002 mag; 最小的是 HD 127986, 为 5 km/s, 但变幅有 0.02 mag, 可能是自转轴冲着地球方向所致。结果表明, 快速自转会限制光变幅度, 从而不支持高自转速度会增加脉动可能性的观点。在表 2 统计过的恒星中有 3 小组变星分别位于 3 个不同的星团中: 12 颗属于昴星团, 平均  $v \sin i$  为 149.7 km/s; 8 颗属于毕星团, 平均  $v \sin i$  为 119.7 km/s; 4 颗属于杜鹃 47 星团, 平均  $v \sin i$  为 50 km/s。最后一组的光变幅度远远大于前二组。因此我们倾向于认为杜鹃 47 比毕星团老, 毕星团又比昴星团老。由于属于星族 II 的球状星团远远老于属于星族 I 的银河星团, 所以统计的结果是年轻星群的  $v \sin i$  比老年星群的  $v \sin i$  大。另外, 由于光变幅度受限于快速自转, 所以在年轻的银河星团中没有大变幅的  $\delta$  Scuti 型变星。

表 2 不同光变幅度相应的平均  $v \sin i$

$\Delta V$	$\leq 0.020$	0.021 ~ 0.040	0.041 ~ 0.091	$\geq 0.092$	总计
星数	70	43	34	33	180
平均 $v \sin i / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	112.6	101.3	81.1	24.6	87.8

#### 5 新 $\delta$ Scuti 型变星的统计

近年来 CCD 巡天发现了大量的新变星, 为此我们收集了一切可以获得的资料编制了一份

新变星表<sup>[4]</sup>。由于篇幅所限,在此仅给出一些统计结果。

### 5.1 光度变化幅度随周期的分布

表 3 列出了 119 颗大变幅新  $\delta$  Scuti 型变星随周期的分布。其中  $N_N$  代表新变星数,  $N_O$  代表旧变星数。新变星非常集中于周期 0.04~0.08 d 间。 $N_N$  总数达 85 颗(小计总数 97 颗), 大于 71% (大于 56%)。它们的平均周期在 0.06 d 左右。对于不同的星团平均周期似与星团的年龄和金属丰度有关: 星团越老, 金属丰度越低, 平均周期越短。这与 McNamara 的研究结果一致<sup>[74]</sup>。球状星团 NGC 5053 ([Fe/H] = -2.4) 中 5 颗变星的平均周期仅 0.0361 d; 其次是 Ruprecht 106 中 3 颗变星的平均周期为 0.04839 d; 再次是 NGC 5466 中 6 颗变星的平均周期为 0.0486 d, NGC 4372 中 8 颗变星的平均值为 0.0535 d, M68 中 2 颗变星的平均值为 0.05364 d, 船底矮球状星系中 20 颗变星的平均值为 0.06225 d。它们均远远小于 OGLE 巡天计划中的 48 颗大变幅变星的平均值 (0.09844 d)。根据 Minniti 等人文章中的图 2<sup>[67]</sup>, 我们估计 MACHO 巡天计划发现的 90 颗大变幅变星具有更长的平均周期(最短 0.0631 d, 一些星的周期大于 0.195 d)。大变幅变星都位于银晕区。对于场星中的 49 颗大变幅变星, 其平均周期为 0.1452 d。

表 3 大变幅  $\delta$  Scuti 型变星随周期的分布

$p/d$	< 0.04	0.0401~0.06	0.0601~0.08	0.0801~0.10	0.1001~0.12	0.1201~0.14	0.1401~0.16	> 0.1601	总计
$N_N$	8	41	44	5	10	1	3	7	119
$N_O$	3	4	8	6	7	7	5	12	52
小计	11	45	52	11	17	8	8	19	171

### 5.2 变星随光度变化幅度的分布和光度变化幅度与周期的关系

从表 4 可以看出大部分变星的变幅小于 0.5 mag。变幅最大的是船底矮球状星系中的 V16 (0.90 mag), 该星系中 20 颗变星的平均光变幅度为 0.55 mag, 周期范围很小。变幅大于 0.71 mag 的仅 5 颗变星中有 4 颗属于这一组。如果把 MACHO 巡天计划包括进来, 则最大光变幅度就会达到 1.0 mag, 且周期变长到 0.17 d。由于场星中变幅最大的是 XX Cyg (0.85 mag, 周期 0.135 d), 因此在变幅随周期分布图上会获得 3 个峰值: 周期最短的 0.065 d (0.90 mag)、中间的 0.135 d (0.85 mag) 和周期最长的 0.17 d (1.0 mag)。

表 4 不同光度变化幅度区间的变星数

$\Delta V/mag$	0.10~0.20	0.21~0.30	0.31~0.40	0.41~0.50	0.51~0.60	0.61~0.70	0.71~0.80	0.81~0.90	总计
$N_N$	32	31	21	17	6	7	2	3	119
$N_O$	10	8	12	7	9	3	2	1	52
小计	42	39	33	24	15	10	4	4	171

## 6 多台址联测研究

为了克服日夜交替带来的伪频率的影响, 必须联合世界上位于不同经度的若干天文台进行 24 小时不间断的连续观测, 即多台址联测<sup>[68]</sup>。1989 年起原北京天文台在继续参加 Breger 的  $\delta$  Scuti 型星联测网 (DSN) 的同时, 又参加了法国人 Baglin 发起的恒星光度联测网 (STEPHI)

和 Catala 等人发起的多台址恒星光谱联测 (MUSICOS)。相继发表了关于  $\theta^2$  Tau、4 CVn、HR 729、GX Peg、V650 Tau、63 Her、BN Cnc、BU Cnc、EP Cnc、VW Ari、FG Vir 和 48 Per 等的测光和分光资料以及频谱分析。尤其是关于  $\theta^2$  Tau、4 CVn、BN Cnc、BU Cnc 和 FG Vir 的结果和论文已成为当今这一领域中的最高水平。虽然这些论文的第一作者多为外国人，中国的观测资料和贡献也是很重要的。而有关 V650 Tau 和 VW Ari 的首席研究者和论文的第一作者均是原北京天文台的研究人员。中国研究人员也曾单独或为首合作对  $\theta^2$  Tau、GX Peg、4 CVn 和 HR 8859 发表过论文。在众多的国际合作者中，中国天文学家的工作占了相当的比例。目前这种合作以更加广泛和深入的方式在继续开展着。

## 7 星震研究

### 7.1 科学目标

研究恒星震动的关键目标是探测恒星内部的结构和演化，因为不同恒星内部结构间的差异直接反映在它们的脉动模式特征差异上。因此，通过对恒星脉动特征的比较研究来反演出恒星内部的结构特征，已经成为对这类变星的测光和分光研究的主要目的。

### 7.2 观测和分析方法

这种研究的主要方法是在毫星等或更高精度的长时间连续光度测量和百分之一纳米分辨率光谱观测的基础上，利用频率分析方法确定出恒星的脉动频率谱。光度观测一般只能获得低阶脉动信息，而光谱观测就能提供高阶脉动信息。由于大多数脉动模式的幅度都很小，要想获得足够多的脉动模式，就必须到地球大气外进行观测，以克服大气干扰而获得极高的光度和分光观测精度。

典型恒星模型由质量、年龄、初始化学组成中的氦 (Y) 和重元素 (Z) 以及混合长度等 5 个参量来描述，而通常从观测只能获得光度及有效温度或表面重力两个参量。因此需要想方设法获得另外 3 个可观测参量，才能对模型进行确切的检验。从高精度测光和高分辨率分光观测能够获得大间隔  $\Delta\nu_0$  和小间隔  $\delta\nu_{nl}$ 。前者等于量子参数为  $n$  及  $l$  的脉动模式的频率与量子参数等于  $n+l$  及  $l$  的脉动模式的频率之间的差值；后者等于量子参数等于  $n$  及  $l$  的脉动模式的频率与量子参数等于  $n-1$  及  $l+2$  的脉动模式的频率之间的差值。前者取决于恒星内部的平均声速，而后者对恒星内部结构的细节十分敏感。因此还需要另外一个观测参量，才能确切地确定恒星模型。为了解决这个问题，可以通过观测同一个星团内的几颗变星，以利用它们具有相同的年龄和化学组成的特性来研究；或通过对由不同类型恒星组成的一组变星进行多次观测，以求出它们的各个脉动模式的振幅和寿命并计算出它们的自转分裂来研究。模式的振幅和寿命与模式的激发和恒星对流相关；频率分裂与恒星内部的自转有关。因此，星震研究可以提供恒星内部自转和对流的详细情况，而这是其它方法所不能提供的。正因为如此，近年来星震研究变得十分活跃。欧美各国提出了若干小型卫星计划，如 COROT (CONvection and ROTation，对流和自转)、MONS (Measuring Oscillation of Nearby Stars, 对近距离恒星测量星震)、MOST (Micovariability and Oscillations of Stars, 恒星的微光度变化和震动) 和 Eddington 等。我国也正在积极研究发射类似目的的小卫星。

### 7.3 已经获得的一些研究结果



目前大约有 30 余颗变星, 其中最主要的是 FG Vir<sup>[17]</sup>、4 CVn<sup>[23]</sup>、 $\theta^2$ Tau<sup>[24]</sup> 和 XX Pyx<sup>[69]</sup> 等获得了初步的观测研究结果。对它们的频率进行分析后发现, 它们的频率分布存在两种情况: 彼此非常密近(如  $\theta^2$ Tau、BU Cnc、4 CVn、 $\theta$  Tuc、HD 2724、 $\kappa^2$  Boo 以及 NGC 6134 中的 ID 9) 和彼此非常分开(如 V 650 Tau、63 Her 和 FG Vir)。对它们的脉动常数进行分析表明, 大部分分布在 0.009 到 0.088 之间, 对应的脉动模式主要分布在  $P_8$  到  $g_3$  之间。最可几的脉动常数值是 0.02, 对应的脉动模式是 P1、P2 或 2H 或 3H。由于光度观测主要能够发现低阶脉动模式, 而目前大部分观测结果均来自光度观测, 所以观测获得的  $\delta$  Scuti 型变星的主要脉动模式介于  $P_1$  和  $P_5$  范围之间。光谱观测可以发现高阶脉动, 可是观测技术条件要求较高。只对  $\theta^2$  Tau 等少数变星进行过足够长时间的多台站光谱联测, 因此目前还缺乏有关高阶脉动模式情况的可靠资料。在 30 余颗观测得较好的  $\delta$  Scuti 型变星中, 7 颗天体的低阶模式的脉动常数大于 0.04, 处于重力模式的脉动常数范围之内。它们在赫-罗图上的位置表明它们已经有了相当程度的演化, 也就是说重力模式会出现在稍微离开主星序的那些  $\delta$  Scuti 型变星中。

近年来在这个领域中的一个重要成果是, 利用 Hipparcos 卫星比较准确地确定了这类变星的绝对星等, 特别是矮造父变星<sup>[75]</sup>。

有关  $\delta$  Scuti 型变星随光度变化幅度的分布、随周期的分布和随视星等的分布以及其它的统计研究可以参考 Rodriguez 和 Breger 的文章<sup>[70]</sup>。但必须指出的是, 这些统计研究严重地受到了选择效应的影响, 因此没有太大的价值。

### 参 考 文 献

- 1 Rodriguez E et al. Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1994, 106: 21
- 2 Garcia J R et al. Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1995, 109: 201
- 3 Rodriguez E et al. Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 2000, 144: 469
- 4 Jiang S Y et al. ASP Conf. Ser., 1999, 210: 572
- 5 Huang C, Zhang C. Chin. Astron. Astrophys., 1980, 4: 101
- 6 Jiang S Y et al. 天文通讯, 1989, 37(1): 1
- 7 Li Zh P et al. IBVS, 1990, No.3451
- 8 Li Zh P et al. IBVS, 1991, No.3592
- 9 Yao B. IBVS, 1991, No. 3649
- 10 Hao J X, Huang Lin. IBVS, 1993, No.3832
- 11 Breger M, Jiang S Y et al. Astron. Astrophys., 1994, 281: 90
- 12 Liu Y Y et al. Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1996, 120: 179
- 13 Liu Z L et al. IBVS, 1998, No.4592
- 14 Du B T et al. IBVS, 2000, No.4805
- 15 Breger M et al. Astron. Astrophys., 1989, 214: 209
- 16 Breger M et al. Astron. Astrophys., 1993, 271: 482
- 17 Breger M et al. Astron. Astrophys., 1995, 297: 473
- 18 Belmonte J A et al. Astron. Astrophys., 1994, 283: 121
- 19 Michel E et al. In: Hoeksema J T, Domingo V, Fleck B et al. eds. Proc. of Fourth SOHO Workshop, Paris: ESA, 1995: 533
- 20 Liu Y Y et al. Chin. Sci. Bull., 1993, 38: 471
- 21 Liu Y Y et al. Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1996, 120: 179

- 22 Alvarez M *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1998, 340: 149  
23 Breger M *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1999, 349: 225  
24 Kennelly E J *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1996, 313: 571  
25 Michel E *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1992, 255: 139  
26 Ostermann W M. *Astron. Astrophys.*, 1991, 245: 543  
27 Li Z P *et al.* *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1997, 109: 217  
28 Paparo M *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 2000, 142: 1  
29 Fernie J D. A. J., 1992, 103: 1647  
30 McNamara D H. A. J., 1995, 109: 1751  
31 Solano E, Fernley J. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1997, 122: 131  
32 Jiang S Y, Yang Zh Z. *Acta Astronomica Sinica*, 1981, 22: 220  
33 Liu Y Y, Jiang S Y, Cao M. *IBVS*, 1991, No. 3606  
34 Fu J N, Jiang S Y. *Delta Scuti Stars Newsletter*, 1998, 13: 9  
35 Zhou A Y *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1999, 308: 631  
36 Fu J N, Jiang S Y. *IBVS*, 1996, No. 4325  
37 Kiss L L, Szatmary K. *IBVS*, 1995, No. 4166  
38 Fu J N, Jiang S Y. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1999, 136: 285  
39 Handler G, Krisciunas K. *Delta Scuti Stars Newsletter*, 1997, 11: 3  
40 Breger M *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1997, 324: 566  
41 Zerbi F M *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1997, 292: 43  
42 Abt H A, Morrell N I. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1995, 99: 135  
43 Jiang S Y, Xia E M. *Acta Astrophysica Sinica*, 1987, 7: 129  
44 Kurtz D W *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1995, 276: 199  
45 Templeton M, McNamara B. *Delta Scuti Stars Newsletter*, 1998, 12: 9  
46 Renson P *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1991, 89: 429  
47 Paunzen E *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1998, 335: 533  
48 Berthet S. *Astron. Astrophys.*, 1992, 253: 451  
49 Fusi P *et al.* *ASP Conf. Ser.*, 1993, 53: 97  
50 Joner M D *et al.* *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1998, 110: 451  
51 Rodriguer E *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1993, 101: 421  
52 Arentoft T, Sterken C, Knudsen M R *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2001, 378: L33  
53 Zhou A Y. *Astron. Astrophys.*, 2001, 374: 235  
54 Hamdy M A *et al.* *IBVS*, 1986, No. 2963  
55 Walraven Th *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1992, 254: 59  
56 Paparo M *et al.* *Astrophys. Space Sci.*, 1988, 149: 73  
57 Rodriquez E *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1995, 299: 108  
58 Yang D W *et al.* *IBVS*, 1993, No. 3831  
59 Handler G *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1998, 295: 377  
60 Breger M. *Astron. Astrophys.*, 1991, 250: 107  
61 Breger M. *ASP Conf. Ser.*, 1990, 11: 263  
62 Zhou A Y *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1999, 308: 631  
63 Thompson K, Coates D W. *Publ. Astron. Soc. Aust.*, 1991, 9: 281  
64 Mahdy H A. *IBVS*, 1987, No. 3055  
65 Jiang S Y. *科学通报*, 1986, 30: 243  
66 Nemeč J M *et al.* A. J., 1995, 110: 1186  
67 Minniti D *et al.* In: Bedding T R, Booth A J, Davis J eds. *IAU Symp. 189*, Dordrecht: Kluwer, 1998: 293  
68 Jiang S Y. In: Takeuti M, Sasselov D D eds. *Proceeding of the Joint Discussion 24 of the 23rd General Assembly of the International Astronomical Union*, Universal Academy Press, Inc., 1998: 43

- 69 Handler G *et al.* M.N.R.A.S., 2000, 318: 511  
70 Rodriguez E, Breger M. Astron. Astrophys., 2001, 366: 178  
71 Pocs M D, Szeidl B. IBVS, 2000, No. 4832  
72 Zhou A Y. Astron. Astrophys., 2002, 385: 503  
73 Guinan E F, Ribas I. Ap. J., 2001, 546: L43  
74 McNamara D H. Publ. Astron. Soc. Pac., 2001, 113: 335  
75 Petersen J O, Hog E. Astron. Astrophys., 1998, 331: 989

## $\delta$ Scuti Stars and Their Related Objects

Jiang Shiyang

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

### Abstract

$\delta$  Scuti stars are a group of stars located on or a little above the main sequence of H-R diagram with spectral type from A3 to F5. They are low amplitude single or multi period pulsators with period shorter than 0.3 d. Within the same area there are several groups of variables or special stars correlated with them, e.g., Dwarf Cepheids,  $\gamma$  Dor variables, Blue Stragglers, Am stars, Ap stars, ROAp variables,  $\lambda$  Boo variables and  $\delta$  Del variables. In this paper a general review in this field, including the number of new variables discovered after 1995, is presented. The most reliable period variation rates for all the high amplitude variables and several low amplitude variables are listed. Statistic shows the higher the rotation rate  $v \sin i$  is, the lower the light variation amplitude is. Thus within young open clusters high amplitude variables cannot be found. The amplitudes-periods distribution have 3 peaks with the highest of 1.0 mag in  $V$  at 0.17 d in period. For  $\delta$  Scuti variables in stellar systems the shorter the average period is, the lower the metallicity and the older the age of the stellar system are.

**Key words** variable star—pulsation variable— $\delta$  scuti star—dwarf cepheid— $\gamma$  Dor star—blue straggler—metallic-line star —Ap star— $\lambda$  Boo variable— $\delta$  Del variable—Herbig Ae/Be star