

# 晚型矮星的色球活动

刘 清 耀

(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

## 摘 要

晚型矮星色球 Ca II H 和 K 线及 H $\alpha$  线发射的波动的时序分析, 能提供我们关于恒星活动的许多信息。在晚型矮星上都观测到类似太阳色球活动行为的所有时标变化。在类太阳恒星上找到了类太阳的“Maunder 极小”长期宁静统计意义上的证据; 在晚型矮星上完全肯定地观测到十年左右周期的活动周; 已用几天到几星期时标的色球活动区的自转调制来测量晚型星的自转周期; 在若干晚型星上也已发现几分钟到几小时时标的类耀发现象。

## 1 引 言

通常认为晚型恒星(有对流包层的星)的自转和对流的相互作用, 是通过发电机机制产生磁场的原因。这种磁场同色球等离子体凝聚(磁冻结)在一起, 通过复杂的动力学过程, 产生某些谱线很强的色球发射, 反映恒星色球活动而又较容易观测的特征线是 Ca II H 和 K 共振线及巴耳末 H $\alpha$  线。产生 Ca II 共振线和 H $\alpha$  线的发射成份的色球等离子体物理条件的变化, 能通过 Ca II H 和 K 及 H $\alpha$  线的轮廓和等值宽度的变化反映出来。因此, 长期以来人们就把 Ca II H 和 K 及 H $\alpha$  线的观测作为认识恒星色球活动的重要手段。

目前有两种方法测量 H $\alpha$ , Ca II H 和 K 色球发射流量。一是绝对流量测量。这种测量在技术上要求较高。为了构造色球模型, 需要通过对恒星色球特征线进行绝对流量测量和研究。Linsky 等人<sup>[1]</sup>发表了恒星 Ca II H 和 K 绝对发射流量表; Pasquini<sup>[2]</sup>发表了 H $\alpha$  绝对色球发射流量表。二是相对测量。研究恒星色球活动变化使用相对方法测量比较简单方便。Wilson<sup>[3]</sup>发表了一个用眼估计恒星色球发射强度的星表。他根据吸收线被发射线成分填充的程度, 从没有填充到最强填充划分成 0 到 5 级。这种相对测量方法有很大的局限性, 原因在于对谱线的分辨率有很强的依赖性。比较好的相对测量方法是 Mount Wilson 天文台定义的 S 指数法。这种方法本质上是宽波段光电测光。S 指数的定义是线心 1 $\text{\AA}$  带宽内的能量同谱线附近 20 $\text{\AA}$  带宽内的连续背景能量之比<sup>[4]</sup>。尽管指数 S 被用来测量 Ca II H 和 K 流量随时间的变化非常方便有效<sup>[5]</sup>, 但这个指数中混

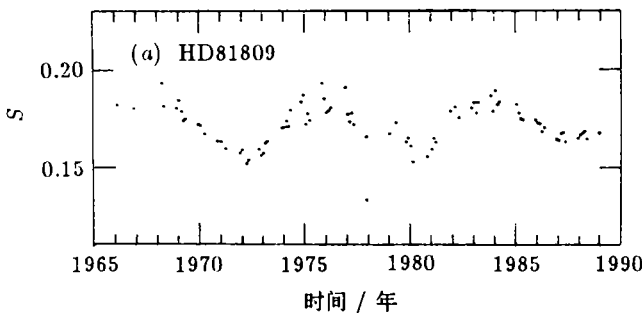
杂进了光球辐射。为了消除光球光的影响,在某些假设的基础上,不同作者导出了各种相应的度标<sup>[1,6,7,8,9]</sup>。还有一种常用相对测量方法,非常类似于恒星光度的较差测量<sup>[10,11]</sup>。测量色球特征谱线的等值宽度 $w$ 的同时,也测量特征线附近选定的两条稳定的光球吸收线的等值宽度 $w_{c1}$ 和 $w_{c2}$ 。用 $w_{c1}/w_{c2}$ 值随时间的弥散作为观测误差; $w/w_{c1}$ 值随时间的变化作为色球特征线的变化。

最先系统观测研究晚型恒星光球发射变化的是 Wilson<sup>[12]</sup>。他发现恒星活动周<sup>[5]</sup>和恒星 H、K 发射的等值宽度和绝对目视星等之间的 Wilson-Bappu 关系<sup>[13,3]</sup>。Skumanich<sup>[14]</sup>通过对 G 型星色球活动的定量测量,证明色球活动水平正比于自转速度。Vaughan 等人<sup>[15]</sup>把这一研究推向了高峰,色球活动的自转调制被正式用于晚型星的测量。在大量观测的基础上, Noyes 等人<sup>[16]</sup>发现恒星光球活动程度同 Rossby 数紧密相关。在许多恒星上清楚地观测到了色球发射的短时标(几分钟到几小时)变化。短时标的变化可能反映着更复杂的物理过程,其中非辐射加热的过程也许是短时标变化的原因之一<sup>[11]</sup>。

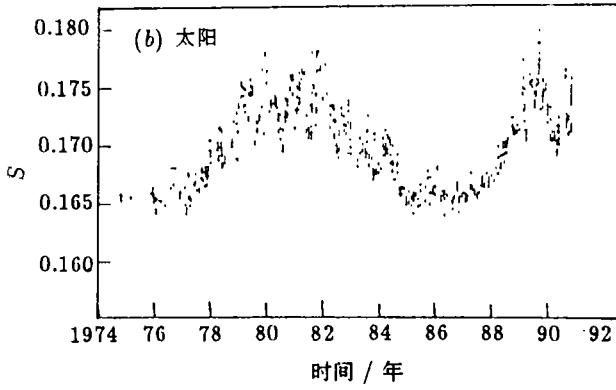
## 2 恒星活动周 Maunder 极小

太阳有 11 年周期的活动周。恒星是否也有类似太阳活动周的长周期变化? Wilson<sup>[5]</sup>通过对 68 颗光谱型 F5—M2 的主序星长达 11 年的色球 HK 发射强度指数  $S$  的监测,对这个问题作了肯定的回答。在他监测的程序中, 12 颗星的色球 Ca II H 和 K 平均发射强度明显有 7—14 年的活动周。后来的继续监测又发现另外 5 颗星的色球活动也有明显的 10 年左右周期性变化<sup>[15]</sup>。Baliunas 和 Jastrous<sup>[17]</sup>从 1966 年开始对 74 颗类太阳恒星(质量和年龄都同太阳相近的主序星)进行了  $S$  指数的监测达 23 年之久。其中 13 颗星作了系统监测;发现有 9 颗星的  $S$  值有类太阳的活动周变化。另外 4 颗的  $S$  值没有明显变化,且  $S$  值的水平很低,比太阳活动周极小时的  $S$  值还低一些。

作为例子,图 1 和图 2 分别表示单星 HD81809 和双星天琴 61 两子星的色球 Ca II H 和 K 平均发射强度  $S$  指数变化曲线。HD81809 是一个 G2 型主序星。Baliunas 和 Jastrow<sup>[17]</sup>对这颗星的  $S$  指数监测了 23 年。由图 1(a) 可以看到,该星的色球活动有约



(a) 太阳型恒星 HD81809 的  $S$  值的变幅略有变化,活动周的周期大约是 9 年<sup>[1]</sup>



(b) 整个日面积分的  $S$  值随时间的变化<sup>[28]</sup>, 活动周的周期是 11 年  
 图 1 HD81809 和太阳色球活动的长期项变化

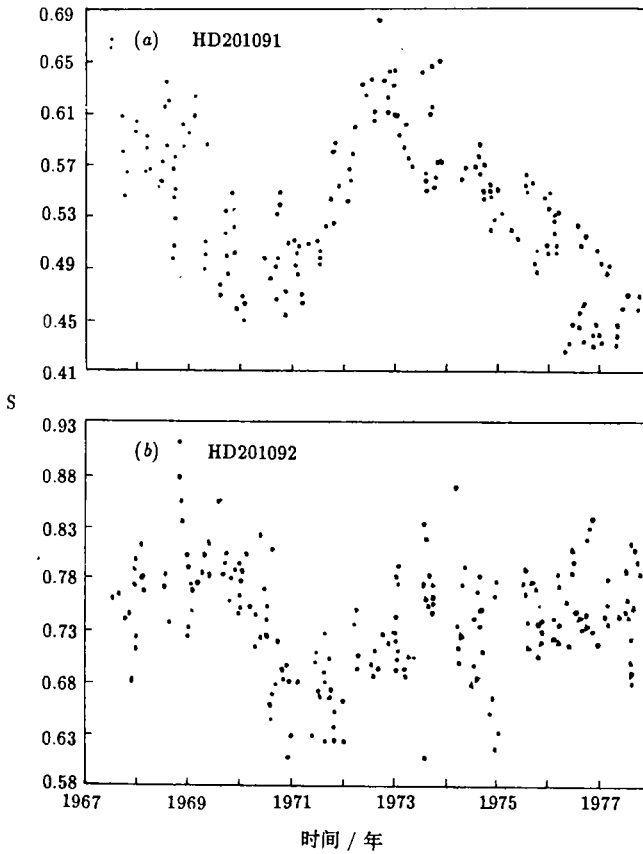


图 2 双星天琴 61 两子星色球活动的长期项变化, 两子星  
 (a 为主星, b 为伴星)  $S$  值变化曲线形状不同, 活动周的周期相近, 均约为 8 年<sup>[5]</sup>

9年的周期。不同活动周  $S$  指数的变幅略有不同。活动水平变化特征都非常类似太阳的色球活动(图 1(b))。HD201091 和 HD201092 分别是双星天琴 61 的主子星伴星。两星色球 Ca II H 和 K 发射强度变化曲线很不相同(图 2(a) 和 2(b))。两星色球活动周期相似(约 8 年),但主星活动周的上升比下降快,类似于太阳;子星活动的上升比下降慢,同太阳活动周的演变相反<sup>[5]</sup>。

目前对恒星活动周的研究,积累资料的历史不长,信息量较少,只有活动周的周期和振幅以及曲线形状。可是,由已观测的不同参数的恒星资料,似乎可以说,恒星活动周出现的频数沿赫-罗图主序是不同的,星越红,色球活动越剧烈,越容易观测活动周。高活动水平活动星和低活动水平活动星,在活动曲线的形态结构上存在差异。老年星,色球活动水平低,活动平滑;年轻星,活动水平高,有不稳定性波动。目前,要想回答哪些星没有活动周的问题还为时过早,因为监测时间还不够长。另外,像太阳那样的小变幅活动周的恒星,在低精度观测中,也许难以发现其色球发射固有变化的详细特征,以及它们与质量和年龄的关系,以便研究产生恒星活动周的机理;而这种机理则是今后进一步观测和分析的方向。

Eddy<sup>[18]</sup> 得到一个令人信服的证据,太阳从 1645 年到 1715 年,出现称作“Maunder 极小”的历时大约 70 年的宁静期。以前太阳是否也曾出现过长久的不活动?今后是否还会发生“Maunder 极小”?原则上,观测恒星应能回答这个问题。如果跟踪监测恒星活动的历史,那么所需要的时间至少要几个世纪,甚至几十个世纪,才能得到答案。因为类太阳恒星很多,所以可对类太阳恒星作观测分析,即任意时刻,有多少星处在活动周阶段,多少星处在“不活动”宁静期。假设所有类太阳恒星一生中处于活动周和“Maunder 极小”期的时间大致相同,就能由处于活动周阶段的星数与处于宁静期的星数之比,估计一颗星一生中处于活动周状态的时间同处于“Maunder 极小”期时间之比。

Baliunas 和 Jastrow<sup>[17]</sup> 为解决上述问题作了第一次尝试。他们测量了 74 颗类太阳恒星色球发射的  $S$  值,得出活动水平频数分布图,在此图上呈现出宽窄两个峰,宽峰中心在  $S=0.17$  处,此值正巧与太阳一个活动周内的  $S$  平均值( $S=0.171$ )相同;这暗示类太阳恒星处在活动周阶段时,其平均色球活动水平与太阳相同,此峰较宽则表明被测恒星在色球活动周内  $S$  值的变化。窄峰中心在  $S=0.145$  处,比太阳活动周内极小时的  $S=0.164$  还要低,仅比“零”色球活动  $S=0.14$  略高。此窄峰暗示许多类太阳恒星有一个长期宁静期,其色球活动的  $S$  值是 0.145,与太阳“Maunder 极小”类似。根据这一分布图的特征,可以推猜,类太阳恒星在它们生命中,大部分时间处在正常磁活动的活动周状态,某些时间处在低磁活动水平的“Maunder 极小”状态,处于这两状态之间的时间很少。

低活动水平和“磁平”(即  $S$  值几乎不变)是“Maunder 极小”的特征。在上述分布图上,处在低  $S$  值的窄峰附近的星,  $S$  值在观测误差内是不变的,即处在“磁平”状态。实际上, Wilson<sup>[5]</sup> 观测的低  $S$  值星也是“磁平”的。这一特征与太阳“Maunder 极小”期间的长期宁静相同。另外, Baliunas 和 Jastrow<sup>[17]</sup> 证明,恒星的低水平磁活动代表“Maunder 极小”,而不是因为恒星的年龄老。所以“Maunder 极小”不可能是永久的,仅是比活动周的周期更长时标活动的低态阶段。放射性碳 14 的记录表明,太阳在

它过去几千年的历史上有 1/3 的时间处在“Maunder 极小”期。任意时刻类太阳恒星的  $S$  值测量表明, 1/3 的类太阳恒星处在“Maunder 极小”低色球活动状态。因此, Baliunas 和 Jastrow<sup>[17]</sup> 推猜, 类太阳恒星在它生命中有 1/3 时间可能处在“Maunder 极小”磁活动水平状态。

尽管在 17 世纪相当长的时期内, 肉眼看不到太阳上有黑子存在, 碳 14 的记录也支持太阳有低磁活动周期, 但对太阳是否真有“Maunder 极小”的周期性变化, 仍存在争议。在这种情况下, 研究类太阳恒星 Maunder 极小性的周期变化, 就有很大意义, 因为如果有充分证据说明类太阳恒星确有 Maunder 极小性的周期变化, 那么这对印证太阳 Maunder 极小曾存在过和还会发生, 将是重要的。太阳在 11 年活动周期间, 亮度变化可达 0.1%, 如果这个变化不足以对全球气候造成显著影响, 那么 Maunder 极小期间太阳亮度变化就要大得多, 并必定对全球气候产生重大影响。

### 3 色球发射的自转调制

晚型恒星色球活动观测证明, 除存在类似太阳活动周的长期项变化外, 也存在几天到几星期时标的变化。目前我们尚不了解引起恒星活动周变化的详细机理, 但是较长寿命色球活动区的自转调制, 的确能解释观测到的色球发射中等时标的周期性变化。并且, 已经成功地应用色球发射自转调制的观测效应, 确定了晚型恒星的自转速度。

70 年代, Wilson<sup>[5]</sup> 已提出在他监测的样本星中, 在长期项变化中含有几天到几星期时标的弥散; 这种中等时标的弥散, 可能是色球活动区自转调制造成的。以研究晚型星色球发射自转调制为目的的系统观测是 Vaughan 等人<sup>[15]</sup> 完成的。他们对 64 颗晚型主序星和 8 颗亚巨星和巨星的色球 Ca II H 和 K 发射的  $S$  指数, 逐夜监测了 14 星期, 发现了 19 颗星的  $S$  指数变化有明显的自转调制证据。另有 9 颗星, 用自动相关分析  $S$  指数变化曲线, 也求出自转周期。他们的结果表明: 色球活动星(年轻星)中, 80% 明显存在自转调制; 老年星, 低水平色球活动星中, 自转调制难以通过观测发现。在他们研究的 20 颗老年星中, 仅有 6 颗星观测到有自转调制。这可能是由于观测效应造成的。因为对色球活动水平低的恒星, 观测误差往往掩盖了中等时标的变化<sup>[15]</sup>。

早在 60 年代, 人们就已经知道 Ca II H 和 K 色球发射强度是随恒星自转加快而增加的<sup>[12,19,20]</sup>。后来, 不同研究者统计得到色球 H 和 K 发射强度与自转周期不同形式的精确关系。Noyes 等人<sup>[16]</sup> 给出在确定的 B-V 色指数时  $S$  指数与自转周期  $P$  的关系是:  $S = 0.78e^{-P/30} (0.68 \leq B-V \leq 0.89)$ 。色指数不同,  $S$  和  $P$  关系也不同, 早型星的斜率比晚型星陡一些。Young 等人<sup>[21]</sup> 证实同步自转双星和单星遵从共同的自转-活动规律, 并且发现, 用自转周期表征该规律比用 Rossby 数表征它更好。他们给出的度标是:

$$\log F(\text{HK}) = -0.84 \log P + 7.14$$

这里  $P$  是自转周期, 用 d 作单位;  $F(\text{HK})$  是色球 Ca II H 和 K 发射绝对流量。这个度标适用于  $P < 100\text{d}$ ,  $0.6 < (B-V) < 1.2$ 。他们用这个度标预言了大批星的自转周期。晚

型星色球磁活动与自转周期相关容易理解,因为自转是产生恒星磁场的条件之一。从本质上说,色球活动不仅与自转有关,而且也应该与恒星对流包层的性质有关(对流层深度,表面重力加速度等)。Noyes 等人<sup>[16]</sup>的度标中所限定的色指数,正是反映了限定对流包层的特定性质。Young 等人<sup>[21]</sup>的度标范围很广,换言之,在他们的度标中没有考虑对流层的性质。因此必然造成预言自转周期较大的不确定性。Soderblom<sup>[7]</sup>研究了色球 Ca II H 和 K 发射的  $S$  指数测量中被光球辐射污染的情况后,根据不同光谱型的光球辐射性质,从  $S$  指数中扣除光球辐射的影响,得到了  $R_{HK}$  指数。他用  $R_{HK}$  指数与 Rossby 数之间的精确关系,计算了 177 颗晚型星相对太阳的角速度。他证实用他的度标得到的晚型星自转速度优于用  $v \sin i$ 。

一般来说,由于晚型星的谱线自转致宽较小,用分光谱线自转致宽法测得的自转速度投影值都不很精确。因此,用色球活动自转调制测量晚型恒星自转速度的新方法,可能是很有前途的。而且用这种新方法测得的自转速度,不含有自转轴倾角  $i$  这个未知数。

## 4 短 时 标 变 化

晚型矮星从几分钟到几小时时标的色球活动变化,已在现有观测资料中得到证实。Middelkoop 等人<sup>[22]</sup>和 Baliunas 等人<sup>[23]</sup>都描述过 Wilson<sup>[5]</sup>观测的某些星的短时标变化。色球活动的短时标变化,可能是最普遍和最复杂的一类变化。不幸,目前精细的监测资料尚不够丰富,可是,从变化的种类看,可以分为两类:随机的小变幅波动和小耀发活动。

HD95735(M3V)是 Ca II 和 K 发射有显著随机波动而没有活动周证据的恒星<sup>[5]</sup>。在 Wilson 的资料中,1974 年该星有三个测点的  $S$  值超过 0.53,一般平均  $S$  值是 0.35。所以该星 H 和 K 发射有小的耀发行为。这一现象在以后观测中也得到进一步证实<sup>[24]</sup>。有趣的是,根据近红外光谱,HD95735 是一颗贫金属星,因此它可能是一颗老年星<sup>[25]</sup>。一般来说老年星的色球活动趋于平静,而 HD95735 却不同,它虽是一颗老年星,其色球活动不仅有显著的波动性变化,而且有较强的耀发事件伴随。

HD22049(K2V)的色球发射有大约 5%—10% 的波动<sup>[23]</sup>。观测到该星有耀发行为。它有几分钟时标的亮度变化,较仔细地测量了其色球发射的一次耀发下降支<sup>[22]</sup>。

在 G-K 型星中,观测到色球发射类耀发事件中的能量,类似于耀星和太阳大耀发时的能量<sup>[23]</sup>。这些类太阳矮星色球发射剧烈耀发时所释放的能量,与光球连续辐射能量相比仍然非常小,属于一种小规模类耀发活动。

在 M 型矮星中,除发射线星 dMe 外,非发射线 M 型星  $H\alpha$  吸收线的等值宽度也有随机性变化。Bopp<sup>[26]</sup>监测了几颗 dM 星,其中 GL900(dM0.5)在 3 年观测期间,  $H\alpha$  由吸收线变化到双峰发射。Cutispoto 和 Giampapa<sup>[11]</sup>观测的 dM 星  $H\alpha$  线,也揭示出色球活动强度小变幅的随机变化。

经典声波加热理论是以稳态加热为特征的,因此不大可能解释色球发射的随机变化和小耀发活动。非辐射磁场加热的转送过程及其不稳定性,可能是小振幅随机变化产生的原因<sup>[11]</sup>。

Ca II H 和 K 及 H $\alpha$  两种色球发射强度之间没有紧密的联系, 且独立于有效温度的事实, 可能暗示用色球一个参数 (即加热率) 来描述色球发射机制是不够的。另外, H $\alpha$  线形成区可能比 Ca II 线形成区高<sup>[27]</sup>, 这与非辐射磁加热机制的理论预言一致。

人们认为, 晚型恒星大气不同层次的活动都是来源于恒星表面的某种磁活动。显然, 为了进一步认识这种恒星磁活动的物理本质和活动规律, 需要使用不同方法观测分析恒星的光球活动、色球活动和星冕活动, 以便获得关于恒星大气活动的立体信息。可是, 就研究恒星大气活动的各种时标的变化来说, 色球发射特征谱线的长期监测则更为方便。这是因为色球发射线的观测在地面就可进行, 比起星冕发射线 (X 射线或紫外谱线) 空间观测要经济得多。光球活动主要以恒星黑子的演变为特征。有关黑子信息的获得一般需要较大的观测量, 因此把恒星黑子作为监测目标来研究它的各种时标变化, 要比对色球发射线的监测麻烦得多。自 60 年代以来, 对晚型恒星色球活动的监测虽已取得若干重要发现, 但是为了取得恒星“Maunder 极小”的直接证据, 为证明恒星活动周存在的普遍性及晚型星磁活动变化与恒星各种参量之间的关系, 不仅需要延长监测的时段, 而且需要扩大监测样本星的范围和数量; 为研究色球活动区的演变特征, 也需要延长监测时间和加密观测点数; 为研究晚型星小耀发现象, 更需要发现更多的耀发事件样本和更详细的耀发事件观测资料。从某种意义上说, 恒星色球活动的精细监测是一项长期的历史任务。

### 参 考 文 献

- [1] Linsky J L et al. *Ap. J. Suppl.*, 1979, 41: 47
- [2] Paswuni L. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1990, 22: 743
- [3] Wilson O C. *Ap. J.*, 1976, 205: 823
- [4] Vaughan A H et al. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1978, 90: 267
- [5] Wilson O C. *Ap. J.*, 1978, 226: 379
- [6] Middelkoop F. *Astron. Astrophys.*, 1982, 107: 31
- [7] Soservlom D R. *A. J.*, 1985, 90: 2103
- [8] Skumanich A et al. In: Bonnet RM, Dupree A K eds. *Solar phenomena in stars and stellar systems*, first ed. Dordrecht: Reidel, 1981. 349
- [9] Schrikver C J. *Astron. Astrophys.*, 1983, 127: 289
- [10] Danks A C et al. *Publ. Astron. Astrophys.*, 1985, 148: 293
- [11] Curispoto G et al. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1988, 100: 1452
- [12] Wilson O C. *Ap. J.*, 1963, 138: 832
- [13] Wilson O C et al. *Ap. J.*, 1957, 125: 661
- [14] Skumanich A. *Ap. J.*, 1972, 171: 565
- [15] Vaughan A H et al. *Ap. J.*, 1981, 250: 276
- [16] Noyes R W et al. *Ap. J.*, 1984, 279: 763
- [17] Baliunas S L et al. *Nature*, 1990, 348: 520
- [18] Eddy J A. In: *The solar output and its variation*. Boulder: Colorado Associated Univ. Press, 1977. 51
- [19] Wilswon O C et al. *Ap. J.*, 1964, 140: 1401
- [20] Kraft R P. *Ap. J.*, 1967, 150: 551

- [21] Young A *et al.* Publ. Astron. Soc. Pac., 1988, 101: 1017  
[22] Middelkoop F *et al.* Astron. Astrophys., 1981, 96: 401  
[23] Baliunas S L *et al.* Ap. J., 1981, 246: 473  
[24] Vaughan A H *et al.* Publ. Astron. Soc. Pac., 1980, 92: 385  
[25] Mould J R. Ap. J., 1978, 226: 923  
[26] Bopp B W. Ap. J., 1987, 317: 781  
[27] Robinson R D *et al.* Solar and stellar flares, Proc. of IAU colloquium No.104, Pala Alto, Calif., 1988, poster papers, 1988: 75  
[28] Giampapa M S. Nature, 1990, 348: 488

(责任编辑 刘金铭)

## Chromospheric Activity of Late-type Dwarf Stars

Liu Qingyao

(Yunnan Observatory, The Chinese Academic of Sciences, Kunming 650011)

### Abstract

Time series analysis of fluctuations Ca II H and K lines and H $\alpha$  chromospheric emission of late-type dwarf stars has provided us with much information concerning stellar activities. On all timescales, the variations which parallel solar chromospheric behaviour can be observed. The frequency distribution of magnetic activity for the solar-type stars **may indicate** some evidence that some stars show behaviour similar to that of the Sun in the Maunder minimum, with very low levels of magnetic activity. The activity cycles, on timescales about ten years, have been directly observed in the solar-like stars. Rotation modulation of chromospheric active areas on timescales of days to weeks has been applied to determine the rotation period of late-type stars. Flare-like phenomena on timescales of minutes to hours have been discovered in some late-type stars.