

晚型恒星中的类太阳活动(I): 恒星黑子、活动周和磁场

翟 迪 生

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文综述有关晚型恒星中的类太阳活动的研究进展。首先对恒星黑子、活动周、以及晚型星磁场的基本观测事实和结论进行了介绍,并阐述了有关活动性的研究情况和存在问题。

一、引 言

恒星物理和太阳物理虽是两个独立的天体物理学分支,但是,70年代以来,人们发现它们之间具有愈来愈多的相互渗透、相互关联的研究问题。恒星中的类太阳活动(Solar-like Activities)的研究,或者说多次国际学术会议所习用的所谓太阳与恒星的联系学(Solar-Stellar Connection),正处于一个迅速发展的时期中。

作为第一个被认为是恒星中的类太阳活动现象的,是1924年发现的DH Car的光度闪耀现象和1948年后观测到的一系列UV Cet型耀星的耀发事件。每次光度闪耀所包含的能量尽管可以比太阳耀斑高出几个数量级,但其性质的研究证明,它类似于太阳耀斑活动。但是,真正使所谓类太阳活动的研究发展成为一个重要的学科分支的开拓性工作,应归之于以下两个重要的观测计划及其有关发现:(1)由Olin Wilson从1966年开始的,在Wilson天文台进行的对91颗下主序矮星Ca II HK发射流密度的巡天监测以及有关恒星活动周的发现^[1,2];(2)1967年Catalano和Rodonó对RS CVn双星食外测光迁移波的发现^[3]及其逐年光变的光球黑子活动解释^[4]。

70年代末以来,空间卫星对大量红矮星、巨星包括单星和双星的紫外、X射线波段的观测,以及地面对它们的非热致微波辐射的射电观测,进一步提供了关于过渡区和冕区的类太阳活动的丰富资料,并且有关恒星和太阳的统一发电机理论也发展起来,使这门学科显得空前活跃。

目前的研究认为,类太阳活动现象是几乎所有晚型F-M型矮星和巨星的普遍现象。而由于活动性较强或有利于观测等原因,研究工作比较集中于以下几类天体对象:

- (1) RS CVn双星以及W UMa型双星;
- (2) BY Dra型变星以及UV Cet型和EQ Vir型耀星;

(3) FK Com 型迅速自转的 G-K 巨星;

(4) 年轻的 T Tau 型星等等。

本文将有关恒星中的类太阳活动的一般特征和研究进展作综合介绍。

二、恒星光球黑子活动

恒星表面暗化区, 称之为“恒星黑子”的存在, 已被较多的观测事实和分析结论所证实, 主要根据有: (1) RS CVn 型双星食外测光迁移波的存在和黑子模型拟合解的成功解释; (2) 利用光谱轮廓变化的多普勒成像技术, 已成功地获得恒星表面黑子像; (3) 色球发射线 Ca II HK 线和 Mg II hk 线的光学和紫外波段流密度变化和光变曲线扰动波的相位同步; (4) 有关星的强氧化钛 TiO 分子吸收带的出现, 亦证明表面低温暗化区的存在等等。

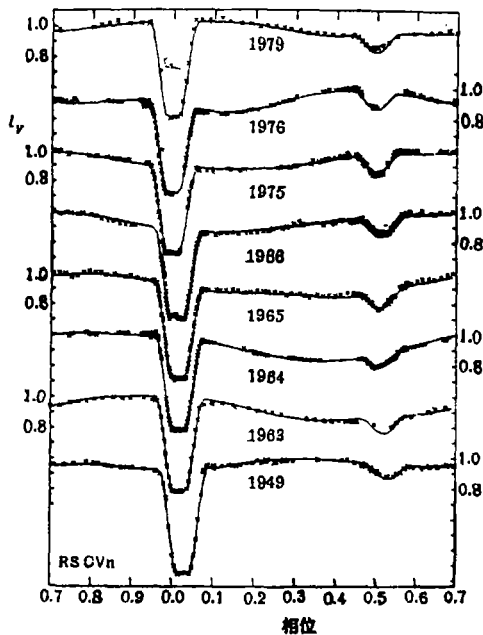


图 1 RS CVn 食外测光扰动波

中心纬度是随黑子活动的周期性由高纬向低纬度赤道区迁移的。在恒星表面, 黑子活动区的变迁, 有可能跨越同步自转带, 而使观测到的扰动波由前进变为退行波。目前, 已在一些 RS CVn 型双星如 SS Boo、RT Lac 等双星中观测到这一往返迁移现象, 并且还观测到测光扰动波的振幅和平均星等有周期性的变化, 意味着黑子活动周的存在。

通过简化黑子模型假设, 可以用分析的方法, 从测光扰动波得到黑子活动区中心位置、平均温度和面积大小等重要物理参数。有关的综合光变曲线分析方法很多, 近期翟迪生等人^[5]和 Kang 等人^[6]采用黑子参数微分改正调节方法所得结果, 其理论曲线能相当满意地重现测光扰动波的形状和变幅。图 1 中所示的实线, 即 Kang 和 Wilson 对 RS CVn 型双星测光扰动波黑子模拟解, 采用的是两个圆型黑子模型, 并由黑子中心经度的变化, 得出测光扰动波的可

图 1 是 Catanalo 天文台对 RS CVn 双星食外测光扰动波的逐年的连续观测结果, 其波形扰动呈水波似的向轨道相位减小方向迁移, 这一著名的观测现象, 被认为是子星表面暗化区的自转调制效应所引起的。假定黑子区所在的表面纬度带自转周期为 P_s , 双星因潮汐相互作用, 子星的平均自转周期与轨道运动周期同步, 这一同步自转周期为 P_r 。那么, 由于子星表面较差自转效应, 黑子所引起的食外测光扰动将会因黑子所在纬度带的自转速度不等于同步自转速度而产生迁移现象, 设其迁移周期为 P_m , 则满足以下关系式:

$$\frac{1}{P_r} = \frac{1}{P_s} + \frac{1}{P_m} \quad (1)$$

若黑子所在纬度高于同步自转纬度带, 扰动波向光变曲线相位增加的方向迁移; 反之, 则为退行波。根据太阳黑子活动的蝶形图, 黑子活动区中

表 1 几类活动星黑子参数观测结果

星名	光谱型	年份	纬度	$\Delta T(K)$	面积比	参考
RS CVn 型星:						
RS CVn	K0IV	1949—79	20°	300°—1600°	0.10—0.20	(6)
AR Lac	K0IV	1972—81	20	230—1320	0.02—0.09	
HR 1099	K1IV	1963—81	35	520—1280	0.08—0.16	
HK Lac	K0III	1980	50	1080	0.08	(8)
LX Per	K0IV	1980	20	730	0.09	
HR 7275	K1IV	1980	50	1200	0.09	
UX Ari	K0IV	1980	40	1420	0.08	
IM Peg	K1III	1980	51	920	0.07	
σ Gem	K1III	1980	0	570	0.06	
II Peg	K2IV	1974—81	30—50	730—1020	0.01—0.07	
λ And	G8IV	1980	20	1050	0.17	
WY Cnc	G5V	1964	38	2169	0.01	(9)
			-70	1341	0.05	
		1986	-52	2092	0.02	
			-60	280	0.08	
RT CrB	G0/K0	1978	31—60	340—1009	0.32	(5)
BY Dra 型星:						
BY Dra	K7IV	1965—80	58—83	140	0.02—0.23	(8)
W UMa 型星:						
U Peg	G2V	1958—70	-7—16	193—485	0.03	(7)(11)
SW Lac	G3V	1978	-60	1700	0.04	(10)

注: “光谱型”系有黑子的子星光谱型; “ ΔT ”为黑子与光球温度差; “面积比”系一个或多个黑子总面积与恒星表面积之比。

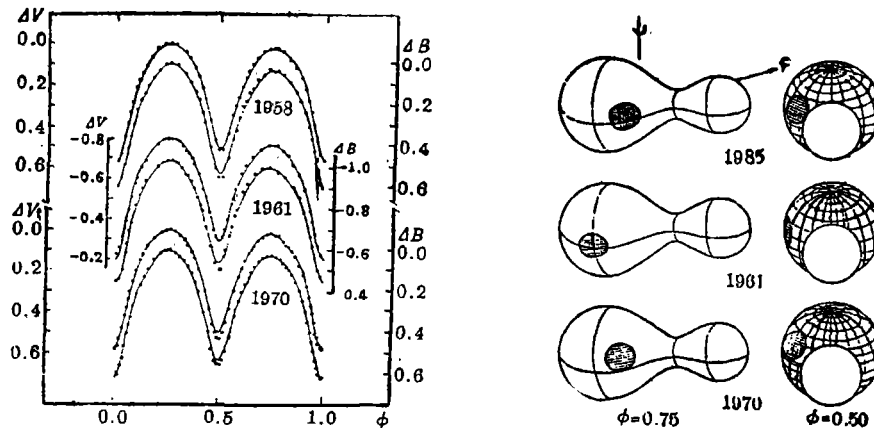


图 2 W UMa 型双星 U Peg 的光变曲线变性的黑子模型

靠的迁移周期值 $P_m = 9.30 \pm 0.24$ 年^[6]。图 2 系翟迪生等人对 W UMa 型双星 U Peg 光变曲线变性的黑子模型结果^[7]。表 1 列出几类活动双星的黑子物理参数的观测分析结果。

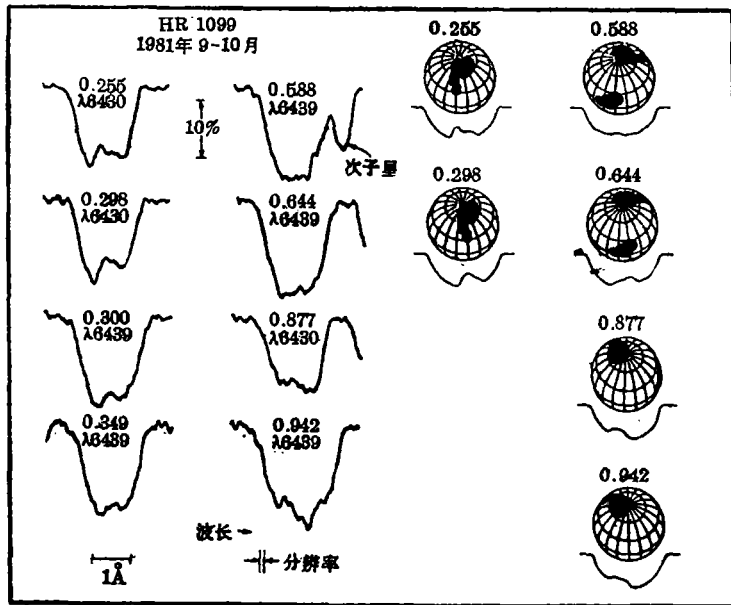


图 3 HR1099 的表面黑子的多普勒成像

近年来,通过高分辨率、高信噪比的光谱观测,发展起一种多普勒成像技术。最初由 Vogt 等人提出,通过强吸收线中心轮廓随恒星自转的多普勒调制变化,可以较直接地得出星面黑子活动区的分布图像(见图 3 所示)^[12,13];同时,一种把测光光变曲线和高分辨光谱观测结合起来的所谓黑子多普勒快照相技术,已经发展起来^[14]。并且这种技术业已应用于 *A_r* 等特殊星的表面化学元素不均匀性分布的图像研究。

对恒星黑子的观测研究,比太阳黑子观测来说难度是无可比拟地大得多,但它是研究恒星类太阳活动问题最基本的课题,需要高技术,也需要观测者耐心的追求。从表1和表 3 所列的一些最初步的观测结果可见,恒星黑子的性质已显示出非常吸引人的重要特征:(1) 黑子活动规模比太阳大得多,黑子活动区的面积占整个星面的比例可达到 20-30%。最近 Liseau 等人对一颗 T Tau 型星 RY Lup 的测光和光谱观测揭示出,其表面黑子活动区甚至可达到星面的 70-80%,而活动区的平均温度与光球温度差超过 1000K^[15];(2) 存在高纬度的黑子活动区,甚至有极区黑子,而太阳上的黑子只出现在南北纬度 ±35° 之间;(3) 活动区相当集中,不但

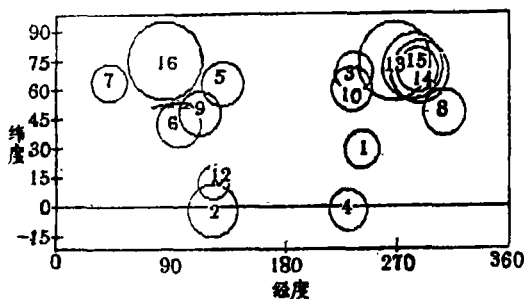


图 4 1939-1984 年间 SV Cam 星面黑子大小和位置分布情况

在双星中是如此,而且在单星中亦观测到大规模黑子集中区,以致造成因恒星自转而形成的系统光度的观测变化;(4) 此外,一些研究者提出,RS CVn 型双星黑子活动区在经度分布上有集中倾向,即所谓“活动经度带”。Zeilik 等人对著名的短周期 RS CVn 型双星 SV Cam 的 45 年测光观测结果的分析,得出其黑子活动区主要分布在两个经度带区: 45°—135° 和 225°—315° 经度带^[16] 等等。这些重要特征,

都是需要去进一步加以研究的。

三、恒星活动周

恒星黑子活动有没有周期性的问题, 虽然仍是一个观测问题, 但是, 恒星活动周的概念已经由类似太阳的恒星色球活动谱线 Ca II HK 线流的长期监测结果而相当可信地建立起来了。

早在 80 多年前, 著名的天体物理学者 Carl Schwarzschild 就注意到, 应对太阳型恒星中的色球钙线 Ca II H 和 K 发射流进行监测, 为此, Wilson 山天文台曾制造了 1.5 米反射镜, 计划用于该项研究, 但因星系研究热的兴起而中断。直到 1965 年, 才由 Olin Wilson 着手于实际观测计划, 他对所选的 91 个下主序矮星进行了持续观测。这些星中已排除已知的分光双星, 光谱型从早 F、G 到早 M 型。到 1978 年时, 他已发现其中 25 颗星的 Ca II HK 流密度有确切的或很有可能的周期性变化^[1]。后来, Baliunas 和 Vaughan 采用改进了的摄谱仪和数据采集系统继续这一巡天观测, 到 1985 年, 进一步发现 85% 的选星, 其 HK 流密度都有不同程度的变化, 而 60% 的星有明确的或较明显的变化周期^[2]。图 5 即其中几颗突出的样品, 表 2 系 Wilson 巡天观测有关典型选星

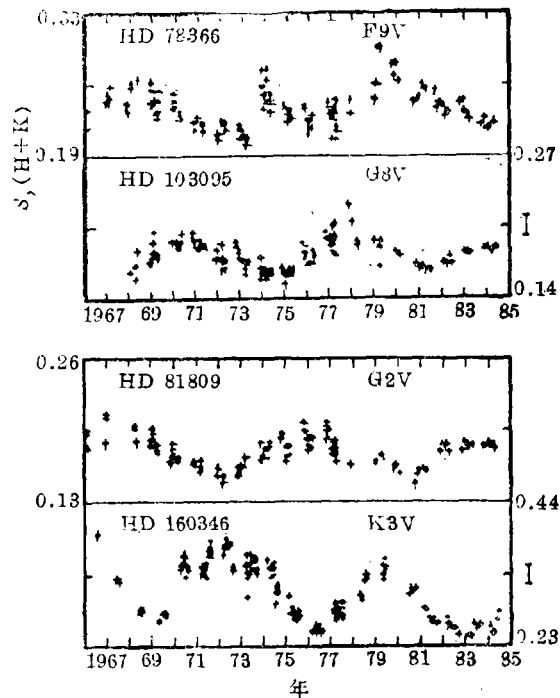


图 5 4 颗活动矮星 H, K 流密度变化的 18 年观测结果

表 2 Wilson 巡天观测的典型星活动周测定

弱色球发射线星				强色球发射线星			
星名 HD	光谱型	活动周 (年)	自转周 (天)	星名 HD	光谱型	活动周 (年)	自转周 (天)
<u>单星:</u>							
207978	F6IV-V	17:	(3.1)	18256	F6V	8:	(3.1)
81809	G2V	8.4	(41.7)	16673	F6V	3.8	7.6
103095	G8V	7.2	(36)	190406	G IV	2.6	14.5
166620	K2V	13	45	152391	G8IV	12	11.2
160346	K3V	7	34	115404	K3V	11:	18.7
32147	F3V	9.5	48	190007	K4V	5:	29
				156026	K5V	20:	18.4
<u>目视双星子星:</u>							
201091	K5V	7.2	38	165341A	KOV	18:	19.2
201092	K7V	14	35	165341B	K5V	20:	(23.9)
219834A	G5IV	18:	(47)				
219834B	K2V	14	46				

的活动周的观测结果, 其中, Ca II H 和 K 发射流密度 S 指数的定义如下:

$$S = k(N_H + N_K) / (N_V + N_R) \quad (2)$$

其 N_H 和 N_K 是 H 和 K 线中心宽 1\AA 波段内光子计数; N_V 和 N_R 是中心分别在 4001\AA 和 3901\AA 处, 半宽为 20\AA 的波段内的光子计数, 相当于 H 线的红端和 K 线的紫端两侧连续背景强度取样, k 是 Wilson 定标因子。

Wilson 的巡天观测揭示了类太阳矮星色球活动的周期性, 虽然部分选星尚未观测到 HK 线流有明显的变化周期, 可能它们还正处于相对宁静期。Wilson 选星观测得出以下几个重要的结论和结果: (1) 色球特征谱线 Ca II HK 线的活动性, 原则上反映了光球黑子和磁场活动, 其周期性确立了恒星活动周的概念, 并得出下主序星的活动周大约从 2.6 年到 20 年, 平均在 11—12 年左右。具体星的活动周大小, 还可能与其他恒星参数有关。一个值得注意的倾向是, 短于 5 年的活动周是在对太阳的观测中从未有过的, 且只出现在比太阳光谱型更早型的恒星上; (2) HK 流密度还具有短时标的变化, 被认为是恒星自转调制结果, 并由此测出约 40 颗恒星的自转周期, 这对研究活动性和自转关系具有很重要的统计意义; (3) HK 流密度短时标变化周期具有多重性, 反映了表面存在较差自转, 类似于 RS CVn 型双星测光扰动波的迁移周期的多重性。并得出一些选星的表面自转较差值 $\Delta\Omega/\Omega$ 至少大于 5—21%, 远高于太阳表面较差自转程度(3%)。

关于恒星活动周的现象, 在其他类太阳活动星如 RS CVn 型双星(主序后)、BY Dra 型星(主序前)等的观测中, 均可得到证认。BY Dra 型星是一类 dMe 耀星, 以 BY Dra 为例, 它是一颗非食双星, 却存在光度的周期性变化, 从光度扰动的颜色变化证明, 是由于表面低温区, 即恒星黑子受自转调制而形成的, 由长期观测的底片资料揭示, 其光变幅度和恒星的平均星等亦有着长期的变化, 从而可测出其黑子活动周来(图 6 即 2 颗 BY Dra 型星的光扰动变化情况)^[2], 其活动周较长, 在 50—60 年数量级上。同样, 对 RS CVn 型双星测光扰动波的黑子解释, 也提供有关活动周的估计。表 3 是这两类星活动周的观测分析结果^[2], 由于其中大多数星尚缺乏长期的连续测光观测和类似翟迪生等人的较可靠的黑子模拟分析, 其活

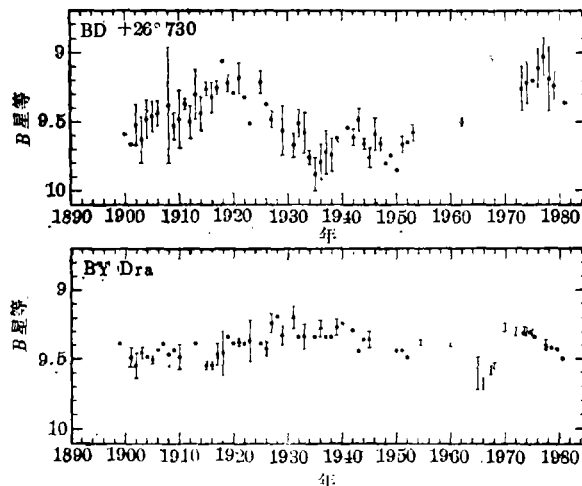


图 6 2 颗 BY Dra 型星活动周的观测

表 3 BY Dra 型和 RS CVn 型星活动周观测估计

星 名	光谱型	自转周(天)	活动周(年)	参考(见文献[2])
BY Dra型变星:				
CC Eri	dK7e	1.6	60	Phillips & Hartmann 1978
BD+26°730	dK5e	1.9	60	Hartmann et al. 1981
BY Dra	dMOe+dMOe	3.8	50	Phillips & Hartmann 1978 Rodono et al. 1982
RS CVn 型变星**:				
RS CVn	F4IV+K0IV	4.8	4.5*	Blanco et al. 1982
RT Lac	G9IV+K1IV	5.1	30-35*	Hall 1981
II Peg	K2IV-III	6.7	8-10	Bohusz & Udalski 1981
λ And	G8IV-III+?	54	6	Dorren & Guinan 1984
UX Ari	G5V+K0IV	6.4	16	Blanco et al. 1982
SS Boo	G0V+K1IV	7.6	12*	“
WY Cnc	G5V+M2V	0.83	30	Rao & Sarma 1982
AR Lac	G2IV+K0IV	2.08	30	Blanco et al. 1982
HK Lac	F1IV+K0III	24.4	22	“
HR 1099	G5IV+K1IV	2.8	5	“
XY UMa	G2V+K5V	0.48	25	Geyer 1980

注: “*” 由测光扰动波幅的变化周期而得; “***” 光谱型引自 Hall 等 1984 年星表。

动周的估计极需改进。由表 3 可初步看到: (1) 两类不同类型的活动星的活动周期与自转周期之间无明显关系; (2) 但活动周期 P_c 与自转周期 P_r 之比 P_c/P_r , 对 BY Dra 型星来说最大, RS CVn 型星次之, 且均比下主序太阳型矮星来得大, 活动周也长, 这可能是此类星的内部结构十分不同于太阳, 有的受双星间潮汐影响突出所致, 有关问题十分复杂。

太阳物理模型的一个重要方面是, 要去描述其 11 年的活动周问题。恒星活动周的研究, 无疑将提供重要的物理约束。Robinson 等^[17]和 Noyes 等^[18]的计算认为, 在固定自转情况下, 活动周随主序质量的减小而减小; Leighton^[19]和 Yoshimura^[20]亦曾得到活动周随自转减慢而减小的结果; 后来 Noyes 等进一步指出, 随质量的减小和自转的减慢, 活动周趋于减小; 但是 Stix 的理论结果认为短的活动周可以从快速自转得到^[21], 而某些非线性发电机模型预言, 活动周与自转周期无关(在给定质量情况下), 或随主序质量的减小而增加。为澄清有关问题, 需要进行三维磁流体动力学的计算和对恒星活动周进行更长时间基线的观测研究。

四、晚型星磁场的测定

磁场对于揭示恒星的类太活动性质具有基本的重要性, 但对恒星磁场, 尤其是对晚型星磁场的观测研究, 却是一个非常困难的课题, 原因在于: (1) 表面磁场可能的不均匀性。许多作者认为活动晚型星。虽然表面局部磁场可能很强, 但是若类似太阳黑子活动那样, 活动

区呈偶极性, 则会使平均磁场变得很小, 从而导致 Zeeman 偏振效应的观测一般很不成功; (2) 最活动的恒星, 也是自转较快的星, 虽然可望有较高的黑子磁场, 但自转对谱线的致宽效应又可能使 Zeeman 致宽被掩盖而难以测定。所以, 自从 Babcock 1947 年发表第一个成功的用 Zeeman 效应测定 Ap 星 78 Vir 磁场结果之后^[22], 直到 1980 年, Robinson 才首次给出一个晚型星 ξ Boo A 的光球磁场的有意义的测定, 其采用的是先进的高分辨率($\lambda/\Delta\lambda = 10^5$)高信噪比($S/N \geq 10^2$)的摄谱仪和谱线轮廓富利叶变换比的分析方法^[23]。

近 10 年来, 对晚型星磁场的测量工作, 取得明显的进展^[24]:

(1) 对有黑子活动的恒星表面平均磁场的观测, 得出其上限值为几十到 100 高斯;

(2) 强于 1000 高斯的大面积磁场活动区, 对许多晚型星来说是比较普遍的情况。Marcy 对 29 个主序矮星的巡天观测, 得到其中 19 个有局部磁场, 典型值是 1500—2000 高斯, 表面磁场覆盖面积达 30—80%。Saar 和 Linsky 曾测到 dMe 星 AD Leo 有 3000—4000 高斯的磁场, 覆盖 70—80% 的恒星表面。关于活动星磁场覆盖面积远大于同一星观测到的黑子面积的情况, 也是一个普遍结论, 这与太阳黑子面积小于活动区面积的情况相符。对不同类别的活动星局部磁场的观测结果是: 主序太阳型星 ($B-V = 0.63$ 左右), 场强 ~ 1500 高斯; M 型耀星 ~ 4000 高斯; 而 RS CVn 型双星, 场强从几百到 10^4 高斯。

(3) 磁场强度和覆盖面积, 在较晚的光谱型星中有普遍增加的趋势, 与 Durney 和 Robinson 发电机模型预言定性吻合。

对晚型星存在很强的局部磁场的事实, 亦从非热致微波射电发射的巡天观测中得到证明。Stewart 等曾对有强 Ca II 发射的 153 个活动色球星, 用 Parkes 64 米射电望远镜, 在 5.0 和主要是 8.4GHz 波段, 从 1981 到 1987 年间进行了重复巡天观测, 发现其中 70 个星具有 $\geq 3\text{mJy}$ 的微波辐射, 其非热致谱表明是来自类太阳耀发事件, 黑子磁场加速弱相对论电子所产生的回旋同步加速辐射, 相当于存在 $\sim 10^2$ 高斯的冕区磁场, 如果转换到恒星表面, 表明会有 10^3-10^4 高斯的场强, 大小等于或稍小于 Ap 星和 Bp 星的磁场^[25]。Stewart 等和 Slee 等对 63 个活动色球星的资料分析得出, 如果用表面流密度 L_r/R^2 表示恒星射电活动性的指标, 而不是 Morris 等用射电光度 L_r 表示, 那么, L_r/R^2 和自转之间存在着明显的统计关系, $L_r/R^2 \propto P^{-1.8 \pm 0.3}$ 。太阳的微波辐射流密度 L_r/R^2 与上述统计样品相比, 平均来说小 2—3 个数量级, 并且与上述周期的统计关系相偏离^[26]。

总之, 对晚型星磁场的直接测定, 是一个十分困难, 而又是非常吸引人的课题, 需要从观测技术和谱线轮廓计算两方面加以改进; 发展红外 Zeeman 效应测量仪, 是一个重要的方向, 因为 Zeeman 分裂效应, 在红区比其他致宽效应突出。

关于恒星的类太阳活动性与恒星物理参数之间的关系的统计研究和活动性物理的研究进展情况, 将在本文(II)中进一步介绍。

参 考 文 献

- [1] Wilson, O. C., *Ap. J.*, 226 (1978), 379.
- [2] Balianas, S. L. and Vaughan, A. H., *Ann. Rew. Astron. Ap.*, 23 (1985), 379.
- [3] Catalano, S. and Rodono, M., *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 38 (1967), 395.
- [4] Hall, D. S., *Publ. A. S. P.*, 84 (1972), 323.

- [5] 翟迪生, 陈海林, 天体物理学报, 8 (1988), 265.
- [6] Kang, Y. W. and Wilson, R. E., *A. J.*, 97 (1989), 848.
- [7] 翟迪生, 张效愚, 天文学报, 29 (1988), 235.
- [8] Poe, C. H. and Eaton, J. A., *Ap. J.*, 289 (1985), 644.
- [9] 解兴发, 翟迪生, 陈海林, 李 焱, 天体物理学报, 9 (1989), 97.
- [10] 翟迪生, 陆文贤, 天体物理学报, 9 (1989), 208.
- [11] Binnendijk, L., *Publ. A. S. P.*, 96 (1984), 646.
- [12] Vogt, S. S. and Penrod, G. D., *Publ. A. S. P.*, 95 (1983), 565.
- [13] Vogt, S. S., Penrod, G. D. and Hatzes, A. P., *Ap. J.*, 321 (1987), 496.
- [14] Noah, P. V., Bopp, B. W. and Francis Fekel, Jr., in *Cool Stars, Stellar Systems and the Sun*, the 5th Cambridge Workshop, ed. by Linsky, J. L., and Stencel, R. E., p. 506, (1987).
- [15] Liseau, R., Lindroos, K. P. and Fischerstrom, C., *Astron. Ap.*, 183 (1987), 274.
- [16] Zeilik, M. De Blasi, C., Rhodes, M. and Budding, E., in *Cool Stars, Stellar Systems and the Sun*, the 5th Cambridge Workshop, ed. by J. L. Linsky and R. E. Stencel, p. 503, (1987).
- [17] Robinson, R. D. and Durney, B. R., *Astron. Ap.*, 108 (1982), 322.
- [18] Noyes, R. W., Hartmann, L., Baliunas, S. L., Duncan, D. K. and Vaughan, A. H., *Ap. J.*, 279 (1984), 783.
- [19] Leighton, R. B., *Ap. J.*, 156 (1969), 1.
- [20] Yoshimura, H., *Ap. J. Suppl.*, 29 (1975), 467.
- [21] Stix, M., in *IAU. Symp.*, No. 71 p. 267, (1976).
- [22] Babcock, H. W., *Ap. J.*, 105 (1947), 105.
- [23] Robinson, R. D., *Ap. J.*, 239 (1980), 961.
- [24] Hartmann, L., in *Cool Stars, Stellar Systems and the Sun*, the 5th Cambridge Workshop, ed. by J. L., Linsky and R. E. Stencel, p. 1, (1987).
- [25] Stewart, R. T., Slee, O. B., Nelson, G. J., Wright, A. E., et al., in *Cool Stars, Stellar Systems and the Sun*, the 5th Cambridge Workshop, ed. by J. L. Linsky and R. E. Stencel, p. 95, (1987).
- [26] Slee, O. B. and Stewart, R. T., *Mcm. N. R. A. S.*, in press.

(责任编辑 林一梅)

Solar-like Activities in Late-type Stars: (I): Starspots, Stellar Activity Cycles and Magnetic Field

Zhai Disheng

(Beijing Observatory, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

This paper gives a review of research advances of the solar-like activities in late-type stars. The basic observations and current characterizations of stellar spots, activity cycles and magnetic field, including some interesting problems which need to be concerned by both the stellar and solar physic investigators, are briefly described.