

类太阳活动星的 X 射线观测与研究进展

施建荣^{1,2,3} 赵刚^{1,2} 尤峻汉³

(1. 中国科学院北京天文台 北京 100012)

(2. 中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)

(3. 上海交通大学应用物理系 上海 200030)

摘 要

扼要介绍了类太阳恒星星冕 X 射线辐射的研究历史。综述了 X 射线辐射与恒星参量的关系,并对星冕的加热机制作了介绍。类太阳恒星的 X 射线辐射与表面磁场有关,因此测定晚型星表面的磁场很重要。

关键词 X 射线: 恒星 — 恒星: 磁场 — 类太阳恒星

分类号: P144

1 前 言

自 1948 年首次发现日冕的 X 射线辐射以来,星冕属于首先预测的 X 射线源之一。但由于日冕 X 光度相对较弱 ($L_X/L_{bol} \approx 10^{-7}$),人们认为即使最近的星冕,在当时的观测条件下也探测不到。直到 1974 年,才发现了 Capella(α Aur) 星冕的 X 射线辐射^[1]。但在 Einstein 卫星投入工作以前,发现的星冕不足 20 个^[2]。

1990 年 ROSAT X 射线卫星上天后,已探测到数以万计星冕的 X 射线辐射。观测结果表明,星冕的 X 射线辐射是一个普遍现象,大多数类太阳活动星的 X 射线辐射强度比太阳的强得多。除了非常冷的单个巨星、超巨星和 A 型星外,几乎所有光谱型的恒星都是 X 射线源。一个重要的结论是:早型 O、B 星同晚型 F~M 型星不同的恒星参数决定了其不同的 X 射线辐射特性,早型星的 X 射线光度与光学光度有很强的相关性,而晚型星的辐射强度则依赖于自转速度^[3]。对这一现象的解释是早型星和晚型星星冕的起因和加热机制不同。

2 星冕模型

星冕存在于具有对流层的类太阳活动星表面。X 射线的观测结果表明,星冕的温度一般

为 $10^6\text{K} \sim 10^7\text{K}$ 量级, 尽管在很多情况下, 类太阳活动星的 X 射线辐射强度比太阳的大几个量级, 但一般认为绝大多数星冕是类太阳的, 它们与日冕有相同的形成和加热过程。其加热机制同磁场的存在有关。与太阳的情况类似, 磁场通过磁流体力学发电机被带到恒星表面并被放大^[4]。

除了少量的掩食双星外, 星冕详细的空间结构到目前为止还未了解清楚, 通常认为类太阳活动星的星冕类似于日冕, 是被磁场约束在一个环状结构内的光薄热等离子体, 主要辐射 X 射线和远紫外光。

类太阳活动星的星冕一般不能用单温模型拟合, 普遍认为是具有不同温度的热等离子体贡献了 X 射线谱。为了从能谱得到星冕的物理参量, 人们采用了很多技术(如多温度拟合、连续温度模型(以下简称为 DEM)拟合)以得到等离子体的温度、发射强度等物理量。

Lemen 等人^[5]用 DEM 模型拟合了 Capella、 δ^2 CrB 和 Procyon(α CMi) 三颗星的 EXOSAT 能谱, 他们发现星冕的能谱可由一个等离子体在两个较窄温度范围的模型较好地拟合, 其温度范围的峰值对 Capella 和 δ^2 CrB 分别为 $5 \times 10^6\text{K}$ 和 $25 \times 10^6\text{K}$, 对 Procyon 为 $0.6 \times 10^6\text{K}$ 和 $2 \times 10^6\text{K}$, 双峰温度分布表明, 一个星冕包含有两个给定温度处于准静力学平衡的磁流环。

Mewe 等人^[6]首先用 RTV 模型^[7](处于静力学平衡的、常截面的磁流环模型)对 Capella 和 δ^2 CrB 进行 EXOSAT 能谱分析, 他们发现用 RTV 模型无法拟合, 这表明在 140\AA 以上, 来自 FeVIII~FeXI(在 10^6K 时形成)的辐射很强, 一个可能的解释是磁流环的截面积随高度增加而增大, 在这样的磁流环中, 大多数物质处于高温状态。为检验该假定, Schrijver 等人^[8]用一个有最高温度和膨胀系数 Γ (Γ 是磁流环的最大和最小截面积之比)的磁流环模型, 用双温分量拟合 Capella 的 EXOSAT 能谱, 发现低温分量用 $\Gamma = 5$ 的磁流环模型拟合得很好。

Schmitt 等人^[9]用五种模型(分别为单温热等离子体、单温热等离子体加星际氢吸收、一个等离子体有两个温度分量、一个等离子体有两个温度分量加星际氢吸收和 DEM 模型)对四组星(F 与 G 型矮星, M 型矮星、巨星、RS CVn 双星系统)拟合 Einstein 卫星的 X 射线能谱, 得到以下结论: M 型矮星有一高温分量($T \approx 10^7\text{K}$), 同时有一低温分量($T \approx 3 \times 10^6\text{K}$); 而 F 和 G 型矮星的高温分量很弱或没有; 巨星有高温分量, 但没有低温分量; RS CVn 型双星系统一般有非常高温的高温分量($T \approx 10^{7.5}\text{K}$), 有时没有低温分量。

Drake 等人^[10]研究了两个活动单星(G 矮星 π UMa 和 G9/K0 巨星 β Cet)的 ASCA 能谱。发现用 MEKA 的双温模型(允许更多的元素丰度可调的热等离子体模型)比用 RS 模型(热等离子体模型)拟合得好。而 Antunes 等人^[11]用 RS 和 MEKA 模型拟合双星系统 β Per 的 ASCA 的能谱, 发现两者基本一致。

Fleming 和 Tagliaferri^[12]研究了星族 II 双星 HD89499 的 ASCA 能谱, 发现其缺少发射线, 能谱可用热韧致辐射谱拟合($T \approx 2.6 \times 10^7\text{K}$)。他们认为这么高的星冕温度是由于缺少金属元素(主要是 Fe), 因此缺少有效的降温机制所致。

3 X 射线与恒星参量

恒星表面的磁场是解释类太阳活动星星冕 X 射线辐射的关键^[13]。类太阳活动星表面的磁场由恒星内部的磁流体力学发电机产生并放大。发电机的强弱, 即恒星表面磁活动性大

小, 由对流层深度和较差自转这两个物理量决定。而恒星对流层的性质决定于其质量和化学组成。化学组成可像质量一样强烈影响对流层的结构, 必然影响恒星的磁活动性。富金属星比同质量贫金属星的对流层深, 因此应有较强的活动性。类太阳恒星自转的快慢, 很快就与其形成时的初始条件无关, 只由其质量和年龄决定。所以恒星的磁场与恒星自转速度、年龄、光谱型和化学丰度有关。同时色球和星冕的加热机制可能都与磁场有关, 因此 X 射线也与恒星级球活动性有关。

3.1 X 射线与色球活动性

大多数类太阳活动星色球和星冕的加热机制可能都与磁场有关, 而其加热与多波段的辐射冷却达到平衡。所以这些谱线可用来研究色球和星冕的结构及活动性。对太阳的观测结果表明, Ca II H 和 K 的线核辐射随磁流密度 (fB , f 是覆盖因子, B 是磁场强度) 的增大而增强, 且随太阳周期的变化而变化^[14]。

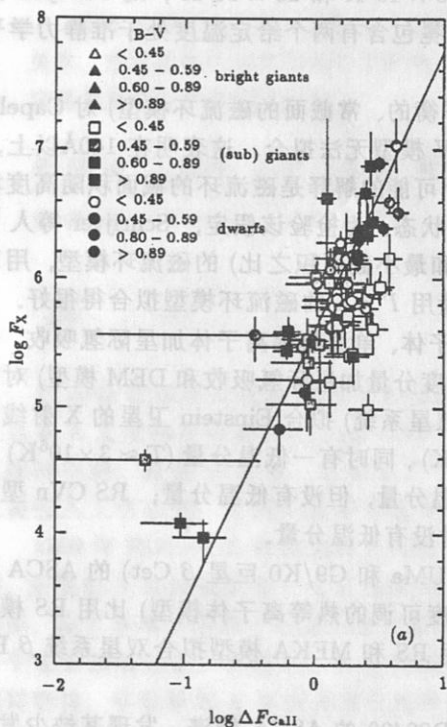


图 1(a) Ca II H 和 K 的表面流量与 X 射线表面流量的关系图^[15]

实线为对 $(B-V) > 0.45$ 的最佳幂律谱拟合曲线

线核辐射与磁流密度 (fB) 是非线性依赖关系, 而 X 射线辐射与磁流密度是线性依赖关系。

研究还发现大部分活动双星属于于色球活动性最强的源^[20]。其它活动性强的星很有可能是由于它们较年轻的缘故 (除非存在很多不可见的光谱双星)。Fleming 等人^[20] 发现色球活动性最强的星 (dMe) 星冕活动性也最强。他们还发现 dM/K 型星和 dMe 型星有非常大的区别, 对 dM/K 型星, $\log(L_X/L_{bol})$ 的平均值为 -5.21 , 而对 dMe 星则为 -3.56 。他们还讨论

Piters 等人^[15] 和 Rutten 等人^[16] 对光谱型为 F~K 的类太阳活动星的研究表明, 其星冕活动性与色球辐射紧密相关 (见图 1)。主序和演化恒星的表面 X 射线辐射流量和 Ca II H 与 K 线核辐射有相关性, 但与光谱型无关。大量研究发现, Ca II 线核辐射与 X 射线辐射都有相关性, 但在具体关系上有很大差别。用什么物理量描述 Ca II 线核辐射与 X 射线辐射的相关性最合适? 是不是所有磁场活动星 (从晚 A 型矮星、M 型巨星到 M 型矮星) 有相同的相关性? 当此关系可用幂函数描述时, 其谱指数又是多少? 各个作者的研究结果很不同, 这主要是与他们所取样本不同和所取样本少有关。Rutten 和 Schrijver^[17] 认为用表面辐射流量来衡量磁场活动性是合适的, 因为当色球活动性用表面辐射流量描述时其与自转速度的相关性最紧密。

Mangenay 等人^[18] 讨论了 Ca 的 K 线和 C IV 1550 Å 谱线辐射与 X 射线辐射的关系, 发现 Ca 的 K 线与 C IV 1550 Å 谱线的辐射流量和 X 射线辐射流量分别存在: $L_{CIV} \propto L_K^{1.9}$ 和 $L_X \propto L_K^{2.59}$ 。Schrijver^[19] 认为 X 射线辐射与 Ca II 线核辐射的非线性关系是由于 Ca II

了 $H\alpha$ 线的等值宽度与 L_X/L_{bol} 的相关性,发现当 L_X/L_{bol} 为 $10^{-6} \sim 10^{-4.5}$ 时 $H\alpha$ 表现为弱的吸收线,而当 $L_X/L_{bol} > 10^{-4.5}$ 时 $H\alpha$ 变成发射线,这一结果表明,随色球活动性的增强,其 X 射线辐射变强。

3.2 X 射线与恒星年龄

由于恒星在演化过程中不断损失角动量,使其自转变慢,从而降低了其活动性。因此类太阳活动星 X 射线光度与恒星年龄有关(随恒星年龄的增大而减弱)。这一结论已被大量的观测所证实。

Stern 等人 [22] 对毕星团类太阳活动星(其年龄为 $6 \times 10^8 \text{yr}$) 的统计结果表明,此星团中 G 型星 X 射线平均光度比太阳 X 射线光度大 30 倍。由此他们认为恒星的年龄决定了 L_X 。Feigelson 和 De Campli [23] 以及 Montmerle 等人 [24] 观测了恒星形成区主序前 G 型星,发现它们的平均 X 射线光度为 $10^{31} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$,比太阳 X 射线光度大得多,表明 L_X 随年龄的增大而单调下降;

Micela 等人 [25] 发现,昴星团 G 矮星 X 射线光度比毕星团相应 G 矮星 X 射线光度大得多,这一发现证实了 X 射线光度对恒星年龄的依赖性。Micela 等人 [26] 发现邻近 K、M 型矮星的 X 射线光度比毕星团中相应源弱得多; Micela 等人 [27] 还研究了昴星团和毕星团恒星以及单独场星(其年龄用 Li 丰度确定),发现年龄在 $10^{7.7} \sim 10^9 \text{yr}$ 时,类太阳恒星的 X 射线光度随年龄缓慢下降,当年龄大于 10^9yr 时 X 射线光度很快下降; Caillault 和 Helfand [28] 利用较少样本,发现此关系可用一个指数衰减的函数描述。研究还发现在主序的最初 10^8yr 中,大质量 F 和 G 型矮星的 X 射线光度有非常大的变化,而小质量 K 和 M 型矮星 X 射线光度的变化则缓慢得多。这一现象可能反映了小质量的 K 和 M 型矮星自转变化较慢,因此能保持强的 X 射线辐射。

Barbera 等人 [29] 采用两种动力学分类方法来决定场星的年龄。第一种方法:如果 $|W| < 15 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ (W 是恒星自行速度的一个分量) 是年轻的盘星,年老盘星的 $|W| > 15 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; 第二种办法是根据 $V_{pec} = (U^2 + V^2 + W^2)^{1/2}$ (V_{pec} 是恒星的自行速度) 的大小确定年龄,年轻盘星的 $V_{pec} < 30 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$,年老的盘星 $V_{pec} > 30 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。他们发现只有用第二种方法确定的恒星年龄与 X 射线辐射流量有相关性,原因是第一种方法依赖于恒星自行速度的一个分量,随机性较大。Fleming 等人 [21] 讨论用动力学方法确定恒星年龄,他们发现加热效率 (L_X/L_{bol}) 与动力学年龄没有相关性。若用色指数 JHK 确定恒星年龄,则加热效率与年龄有相关性。他们还发现年轻类太阳恒星的星冕温度和金属丰度(与年龄相关的特征参数)有很好的相关性,但与动力学分类方法确定的年龄则没有相关性。因此他们认为用动力学分类确定年龄的方法只适用于邻近恒星,Barbera 等人 [29] 没有发现这一现象是由于他们所选样本趋向于强活动耀星,而 Fleming 等人 [21] 的样本更趋于弱活动星。图 2 是 A、F、G、K、早 M、晚 M 型星的平均 X 射线光度的对数 $\log(L_X)$ 与恒星年龄的关系图,从图中可以看出 X 射线光度随年

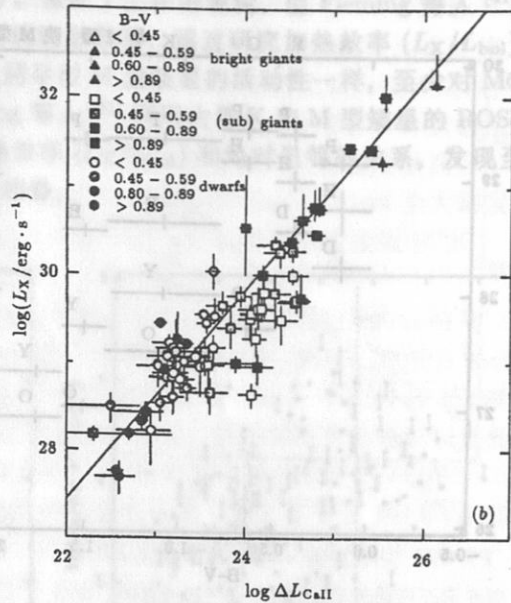


图 1(b) 单、双星 ROSAT 的 X 射线光度与 Ca II H 和 K 核心辐射光度的关系图 [15]

实线是最佳幂律谱拟合曲线

Micela 等人 [25] 发现,昴星团 G 矮星 X 射线光度比毕星团相应 G 矮星 X 射线光度大得多,这一发现证实了 X 射线光度对恒星年龄的依赖性。Micela 等人 [26] 发现邻近 K、M 型矮星的 X 射线光度比毕星团中相应源弱得多; Micela 等人 [27] 还研究了昴星团和毕星团恒星以及单独场星(其年龄用 Li 丰度确定),发现年龄在 $10^{7.7} \sim 10^9 \text{yr}$ 时,类太阳恒星的 X 射线光度随年龄缓慢下降,当年龄大于 10^9yr 时 X 射线光度很快下降; Caillault 和 Helfand [28] 利用较少样本,发现此关系可用一个指数衰减的函数描述。研究还发现在主序的最初 10^8yr 中,大质量 F 和 G 型矮星的 X 射线光度有非常大的变化,而小质量 K 和 M 型矮星 X 射线光度的变化则缓慢得多。这一现象可能反映了小质量的 K 和 M 型矮星自转变化较慢,因此能保持强的 X 射线辐射。

Barbera 等人 [29] 采用两种动力学分类方法来决定场星的年龄。第一种方法:如果 $|W| < 15 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ (W 是恒星自行速度的一个分量) 是年轻的盘星,年老盘星的 $|W| > 15 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; 第二种办法是根据 $V_{pec} = (U^2 + V^2 + W^2)^{1/2}$ (V_{pec} 是恒星的自行速度) 的大小确定年龄,年轻盘星的 $V_{pec} < 30 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$,年老的盘星 $V_{pec} > 30 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。他们发现只有用第二种方法确定的恒星年龄与 X 射线辐射流量有相关性,原因是第一种方法依赖于恒星自行速度的一个分量,随机性较大。Fleming 等人 [21] 讨论用动力学方法确定恒星年龄,他们发现加热效率 (L_X/L_{bol}) 与动力学年龄没有相关性。若用色指数 JHK 确定恒星年龄,则加热效率与年龄有相关性。他们还发现年轻类太阳恒星的星冕温度和金属丰度(与年龄相关的特征参数)有很好的相关性,但与动力学分类方法确定的年龄则没有相关性。因此他们认为用动力学分类确定年龄的方法只适用于邻近恒星,Barbera 等人 [29] 没有发现这一现象是由于他们所选样本趋向于强活动耀星,而 Fleming 等人 [21] 的样本更趋于弱活动星。图 2 是 A、F、G、K、早 M、晚 M 型星的平均 X 射线光度的对数 $\log(L_X)$ 与恒星年龄的关系图,从图中可以看出 X 射线光度随年

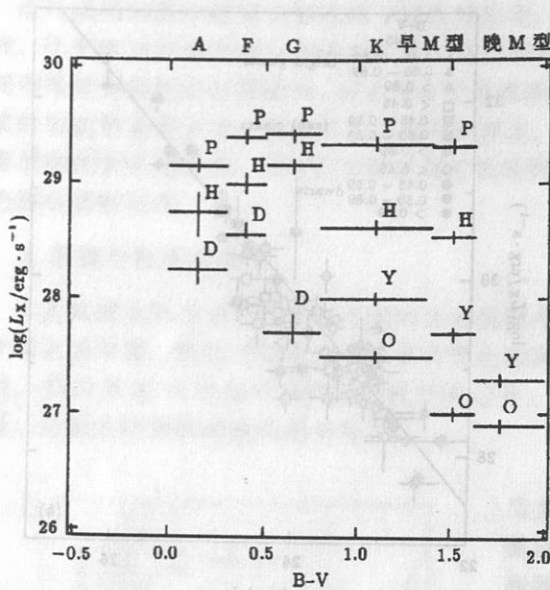


图2 A、F、G、K、早M、晚M型星的平均X射线光度 $\log(L_x)$ 与恒星年龄关系图^[29]

图中P表示昴星团恒星、H表示毕星团恒星、Y是年轻的场星、O是年老的场星，从图中可以看出X射线光度随年龄的增大而变小

由于早型F星对流层太浅，无法产生磁流体学发电机，星冕由声波加热所致。Staauffer等人^[32]对昴星团F型星ROSAT卫星的X射线辐射的统计，也发现了类似现象，但是转折点在 $B-V \approx 0.6$ 。他们对此现象的解释是由于所选样本的年龄差异。Schmitt^[33]统计了125个晚型A星和F型星的Einstein卫星的观测结果，根据X射线光度是否同Rossby参数 ($R_0 = P/\tau_{\text{conv}}$ ，P是恒星自转周期， τ_{conv} 是对流回转时间)存在相关性(考虑了可能存在的双星系统)，认为有X射线辐射光谱型最早的星是 α Aql (A7 IV~V)。他们认为尽管光谱型A7V星的对流层非常薄，但类太阳磁流体学发电机可以在这类星上发生。现在普遍认为星冕活动性大约开始于A7或F0V型星^[34]。对更早型恒星来说，磁场可能来源于原始的剩余磁场。由于这些星的表面缺少对流层，类太阳发电机不可能存在。早型星和类太阳活动星的主要区别在于：早型星的X射线光度与光学光度直接相关(对大多数O和B型星 $L_x/L_{\text{bol}} = 10^{-6} \sim 10^{-7}$ ^[34,35])，其X射线可能来自看不见的晚型伴星或其它机制^[36~38]。

由恒星结构和演化理论可知，当恒星光谱型晚于M5V时，其表面是完全对流的，而根据发电机理论，当表面层完全对流时，辐射核与对流层之间的相互作用消失，同时径向的旋转速度差也消失，而这是放大磁场的关键。如果此理论正确，则这些星表面的磁场比较弱，而磁场有约束和加热星冕气体的重要作用，因此其X射线辐射也应该比较弱。这一结论若被大样本观测结果所证实，可以加深我们对星际磁场放大机制的了解。早期小样本的观测表明，当恒星光谱型晚于M5V时，X射线辐射发生一个陡的下降^[39,40]。Barbera等人^[29]利用138个M型矮星(其中70个是晚于M5V的星)的Einstein卫星观测结果，分别研究了X射线光度、X射线表面流量与绝对星等的关系，发现在绝对星等约为13.4时，X射线光度和

龄的增大而减弱。

类太阳活动星的X射线辐射强度随恒星年龄增加而下降的事实，表明X射线光度可用来作为恒星年龄的标志。如动力学性质一样，若被合适地标准化，可用这种方法来估计恒星年龄，同时还能提供星系中恒星结构和演化的信息。

3.3 X射线与光谱型

星冕的活动性由类太阳恒星表面的磁场决定，磁场的产生和维持与恒星对流层的较差自转有关。那么以恒星光谱型为参数，有对流层的星冕活动星从何时开始到何时结束？Walter^[30]、Simon和Drake^[31]分析了Einstein卫星对F、G型场星和毕星团类太阳活动星的X射线观测结果，认为类太阳的磁发电机开始于光谱型F5V ($B-V \approx 0.45$)，因为早于此光谱型的星X射线光度与恒星自转速度没有相关性。这主要是

X 射线表面流量均有一个陡的下降 (见图 3), 验证了上面的理论。但 Fleming 等人^[41] 利用 ROSAT 结果讨论了 M5~M9 型矮星的 X 射线辐射数据, 通过研究加热效率 (L_X/L_{bol}) 与绝对星等的关系, 发现光谱型晚于 M5 的矮星同早型 M 型矮星的活动性一样, 至少对 M6 型矮星其加热效率没有明显下降的趋势。Fleming 等人^[21] 利用大量 K 和 M 型矮星的 ROSAT 和 Einstein 卫星 X 射线观测结果, 讨论了加热效率 (L_X/L_{bol}) 和绝对星等的关系, 发现至少对 M7 型矮星没有发现加热效率有明显下降的趋势。

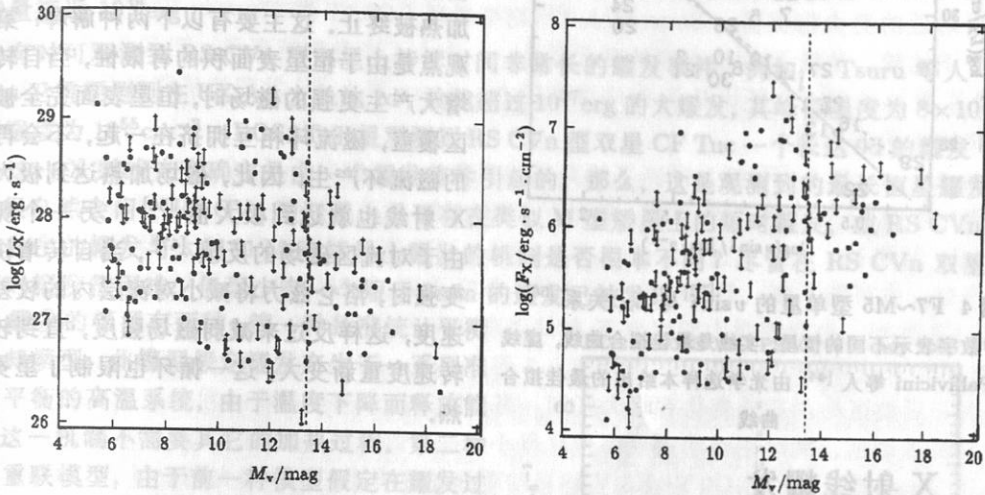


图 3 X 射线光度和表面流量与光谱型的关系图^[29]

图 3a X 射线光度与绝对星等的关系; 图 3b X 射线流量与绝对星等的关系图, 从图中可以看到当绝对星等约为 13.4 时 X 射线光度和 X 射线的表面流量均有一个陡的下降。

EXOSAT 卫星探测到晚型 M 型星 G1 644c 上发生的耀斑过程, 说明在这样的类太阳活动星上有磁场存在, 暗示存在其它的磁场放大机制^[42]。Rosner 等人^[43] 指出在这些恒星上即使经典的磁流体发电不存在, 但对于高度湍动的流体, 小型磁流体发电总是不可避免存在的。Giampapa 等人^[34] 认为不能排除经典磁流体发电机的存在。

3.4 X 射线与恒星自转速度 $v \sin i$ (或 Rossby 参量)

Pallanicini 等人^[3,44] 研究了 X 射线光度同自转速度 ($v \sin i$) 的关系, 得到如下结论: X 射线光度 L_X 与光谱型晚于 F7 的恒星自转速度有关, 而与光学光度无关。最佳拟合曲线是 $L_X \approx 10^{27} (v \sin i)^2$ 。对不同光度型 III、IV 和 V 类太阳活动星, X 射线性质没有什么区别。一些光学选样本^[34,45~47] 和 X 选样本^[48] 的研究也证实了这一结论。但由于所选样本和 X 射线观测结果不同, 得到的关系式也不同。如 Fleming 等人^[48] 给出的关系式为 $L_X \propto (v \sin i)^{1.03}$ 。Schachter 等人^[49] 利用 F7~M5 V 型星 X 选样本的 ROSAT 卫星的观测结果, 分别讨论了单星和双星 X 射线光度与 $v \sin i$ 和 Rossby 参量的关系, 发现单星的 X 射线光度与 $v \sin i$ 和 Rossby 参量有很强的相关性, 最佳拟合曲线为 $L_X \propto (v \sin i)^{0.4}$ 。而双星则没有此关系。他们认为这是由于双星系统比较复杂, 必须同时考虑两个子星的 X 射线辐射。对上述相关性的理论解释是: 观测到 X 射线光度的差别主要反映了星冕加热效率的不同, 其加热机制主要是恒星磁场与星冕等离子体的相互作用, 磁场的产生和放大与恒星表面的较差自转有关, 因而恒

星的自转速度 ($v \sin i$) 或 Rossby 参量被认为是衡量发电机强度的物理量。

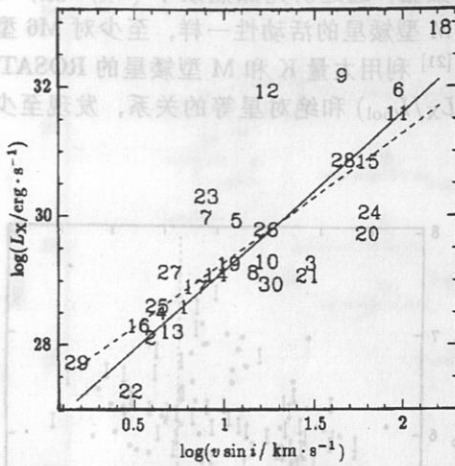


图 4 F7~M5 型单星的 $v \sin i$ 与 L_x 关系^[50]

图中数字表示不同的恒星, 实线是最佳拟合曲线, 虚线是 Pallavicini 等人^[44] 由光学选样本给出的最佳拟合曲线

研究发现, 当类太阳活动星的自转速度超过 $20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, X 射线光度 L_x 的增加变慢^[43,49]。Schachter 等人^[50] 利用大量 F7~M5 型矮星的 ROSAT 观测数据证实了这一结论 (见图 4)。这一现象很自然地解释为存在星冕辐射饱和现象, 当自转速度增大时, 进一步的加热被终止。这主要有以下两种解释: 第一种观点是由于恒星表面积的有限性, 当自转速度增大产生更强的磁场时, 恒星表面完全被活动区覆盖, 磁流环相互拥挤在一起, 不会再有新的磁流环产生, 因此, 磁场加热达到极大值, X 射线也就达到极大值^[50]。另一个观点是由于对流区磁场的反馈^[47], 当自转增快磁场变强时, 洛仑兹力将减小对流层内的较差自转速度, 这样反过来减弱磁场强度, 直到较差自转速度重新变大, 这一循环也限制了星冕的加热。

4 X 射线耀发

类似太阳表面的耀发事件也出现于不同种类类太阳活动星 (M 型耀星、RS CVn 型双星及主序前星) 表面。耀发事件在整个电磁波段都能观测到, 耀发产生的原因可解释为恒星表面磁能的释放。

耀发事件的 X 射线观测很重要, 因为它可以提供来自耀发星冕的信息, 至少能提供能量释放和粒子加速的信息。事实上, 有关耀发目前只有软 X 射线波段观测结果 ($< 10 \text{ keV}$)。一般认为在耀发星冕上热过程比非热过程强得多。目前, X 射线谱线分辨率很差, 只能得到 X 射线的光变, 平均温度和发射强度。ROSAT 卫星的巡天结果表明: 对类太阳活动星而言, 耀发是很普遍的现象, 从 F 到 M 型矮星上均有耀发事件发生^[51]。

在 M 型耀星上, 一般发生几到几十 min 的短时耀发, 软 X 射线的积分能量为 $10^{30} \sim 10^{33} \text{ erg}$ 。UV Cet 和 BY Dra 型 K 和 M 型矮星 X 射线耀发的光变同太阳上致密耀发 (产生于一个或数个磁流环中) 非常相似, 从 X 射线得到的温度为 $(2 \sim 4) \times 10^7 \text{ K}$, 与太阳的耀发温度接近, 但发射强度比太阳耀发大几个量级; X 射线连续谱比光学连续谱变化慢, 同热等离子体的 X 射线谱一样, 这一事实强有力地说明这些星际耀发类似于太阳致密耀发, 它们的大能量暗示其来自大体积或强磁场辐射源, 也有可能两者兼而有之。除了短时耀发以外, 强的长时耀发事件也常常在 M 型矮星上发现: 例如, 大型耀发事件在 YY Gem (EXOSAT)、CC Eri 和 EV Lac (ROSAT) 上发现, 这些耀发持续时间接近 1 到数 h, 这种耀发在软 X 射线波段释放的能量约为 10^{34} erg 。它们衰减时间或上升时间较长, 表明这是一个缓慢放能和连续加热过程, 这类耀发很象太阳的双带耀发, 由连续的磁重联提供能量。但到目前为止, 没有事

实能证明如此长的耀发确实与太阳上的双带耀发一样 [52]。

RS CVn 和 Algol 型双星的情况同 M 型矮星相反, 经常发生长时耀发, 这些耀发比 M 型矮星的长时耀发的能量大得多, 典型释放能量为 $10^{34} \sim 10^{37}$ erg (比太阳最大耀发大 $2 \sim 5$ 个量级)。EXOSAT 卫星观测到 Algol 星上一个持续 4h 多的大耀发事件, 释放的总能量为 10^{35} erg, 由 X 射线数据得到的冕温度为 7×10^7 K, 比 M 型矮星的典型温度要高。Ottmann 和 Schmitt [53] 及 Ottmann [54] 讨论了 ROSAT 卫星观测到的 AR Lac 和 Algol 上大耀发事件, 在 Algol 星发生的耀发峰值时 X 射线光度为 2×10^{32} erg \cdot s $^{-1}$, 峰值温度接近 10^8 K, X 射线总能量接近 10^{38} erg。

有时可观测到 RS CVn 型双星上持续时间非常长的耀发事件, 例如: Tsuru 等人 [55] 用 Ginga 卫星观测到在 UX Ari 上长达 1d、放能超过 10^{37} erg 的大耀发, 其峰值温度为 8×10^7 K, 发射强度为 10^{55} cm $^{-3}$ 。ROSAT 卫星观测到 RS CVn 型双星 CF Tuc 一个长达 9d 的耀发 [56], 如果这一 X 射线光变确实是由一个耀发事件引起的, 那么, 这是观测到的最长恒星耀发。因此, 很自然会问, RS CVn 型双星上是否存在类似 M 型矮星上的短时耀发, 或 RS CVn 型双星上发生的耀发与太阳和 M 型矮星上耀发的机制是否根本不同? 尽管在 RS CVn 双星上观测短时耀发很困难, 但至少有一个短于 3min 的耀发已被发现 [57]。

耀发的模型有两种: 第一种是准统计平衡的冷却模型, 此模型假定耀发产生于一系列准统计平衡的高温系统, 由于温度下降而释放能量, 这一机制不需要其它的加热过程。第二种是磁重联模型, 由于前一种模型假定在耀发过程中没有其它的加热过程, 虽然这种可能性不能排除, 但似乎对长时耀发事件不可能。从太阳的观测知道, 太阳上的长时耀发时标常常比辐射冷却时标长得多, 所以不能解释其能量来源。而磁重联模型认为能量来自磁场能, 由于磁力线不断发生重联, 从而把磁能转化为热能, 提供耀发的能量。不同的磁重联模型, 甚至没有加热的模型均能拟合观测光变, 目前还不能肯定哪种模型更接近事实。图 5 是 AB Dor 型星 HD 197890 的一个长时耀发, 其耀发长达 0.7d, 是其自转周期 (0.3d) 的 2 倍多, 释放的能量为 2×10^{36} erg \cdot s $^{-1}$ 。

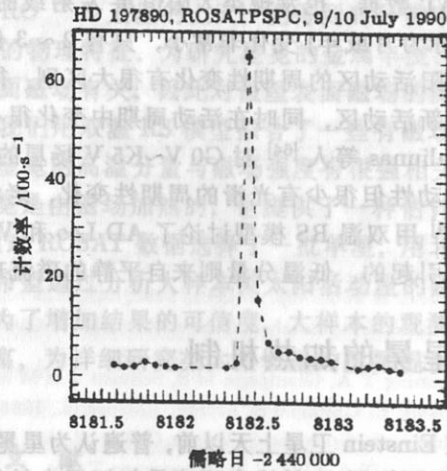


图 5 ROSAT 卫星巡天观测到 AB Dor 型星 K0 V 星 (HD 197890) 的一个长时耀发 [58]

5 X 射线的长时变化

近年来, 尽管对星冕的 X 射线变化的研究有了很大进步, 但比起其它方面的研究还有很大差距。首先, Einstein 卫星对绝大多数星冕的观测都是短时的 (几千 s), 而且只观测了一次。其次, 即使一些源有重复的观测结果, 但常常是用不同的卫星。不同卫星的探测器有不同波长灵敏度, 存在一个怎样修正的问题; 而且, 即使是同一卫星的观测结果, 也很难区分 X 射线的短时变化是由于恒星自转还是恒星活动周期产生的。由于上述原因, 尽管有长达几

d 的 X 射线观测数据, 对星冕 X 射线变化的了解仍很有限。只有太阳, 我们有它从 s 到数十 yr 的 X 射线变化观测结果^[59]。

太阳在软 X 射线波段的变化幅度很大, 一个太阳周期中, 日冕 X 射线在 0.2 ~ 0.25keV 和 0.6 ~ 1.5keV 波段的光变可达 20 ~ 200 倍; 太阳 X 射线的长周期变化出现在活动区形成和消失时, 这在 0.6 ~ 1.5keV 波段显得更明显, 因为特征的活动区在这一波段有很多 Fe VII ~ VIII 谱线。ROSAT 卫星在 1 keV 附近有一响应峰, 因此对这些线的出现很敏感。如果类太阳恒星的 X 射线变化类似于太阳, 那么 ROSAT 卫星应该能探测到这种变化。Schmitt 等人^[60]对太阳附近的类太阳恒星、Stern 等人^[61]对毕星团 ROSAT 和 Einstein 卫星的 X 射线观测结果作了比较, 发现 X 射线光度的变化很小。一个令人惊奇的结果是, 高 X 射线光度源 (耀星) 的 X 射线光度变化要比低 X 射线光度源小。Stern 等人^[61]发现毕星团恒星的 X 射线光度变化比太阳的弱得多。

Ambruster 等人^[62]深入讨论了星冕的时变现象, 他们分析了 19 个类太阳恒星 (大多数是耀星) 的 Einstein 卫星观测数据, 得到了以下结论: (1) 所有样本星都有短时的时变 (时标从几 min 到几 h); (2) 典型的变化为 30 ~ 50%; (3) 变化是随机的。在不同时间观测时, 可能有变化, 也可能不变。Pallavicini 等人^[63]分析了 25 个 dMe 星 (观测时间为 300h 左右) 的 EXOSAT 数据, 也发现类太阳恒星 X 射线的变化和变化的随机性, 他们发现 X 射线的长周期 (时标为月或年) 变化非常小, 只有 2 ~ 3 倍的差别。因此, 类太阳恒星活动区的周期性变化同太阳活动区的周期性变化有很大区别。很可能是类太阳恒星有一发电机能在恒星表面连续产生新活动区, 同时在活动周期中变化很小。这一假设被长周期 Ca II 线核辐射的观测证实, Baliunas 等人^[64]对 G0 V ~ K5 V 场星的观测结果表明: 年轻类太阳恒星 (< 1 Gyr) 显示出强活动性但很少有光滑的周期性变化, 老年星有相对平滑的类太阳活动周期。Giampapa 等人^[34]用双温 RS 模型讨论了 AD Leo 和 Wolf 630 的光变, 发现 X 射线的光变主要是由高温分量引起的, 低温分量则来自平静的磁流环, 对 X 射线光变基本没有影响。

6 星冕的加热机制

在 Einstein 卫星上天以前, 普遍认为星冕和日冕的加热机制主要为声波。对此的责难有:

(1) 类太阳恒星 X 射线表面流量与恒星自转周期和自转速度有关, 与有效温度和重力加速度无关, 而后者是决定对流区的参数。(2) 太阳的观测结果表明: 磁场最强的地方 X 射线也最亮。

目前认为星冕几乎都是由磁场加热的, 尽管少量 dK 和 dM 矮星有可能是由声波加热的。但这种情况有待于证实。阿尔芬波主要对星风的加热有作用。尽管 Parker^[65]认为阿尔芬体波加热不足以平衡星冕损失的能量, 最近的观测和理论表明有更强流量的磁流体波存在。

Mullan 和 Fleming^[66]发现, 类太阳恒星星冕双温模型中的高温分量是快变的, 表明其来自一个不稳定源 (磁场活动区)。低温分量变化很小, 说明其来自稳定源。由于高低温分量的这一差别, 他们认为 M 型矮星的低温分量是声波加热的。这一结论与 X 射线观测数据在以下三个方面是一致的: (1) 声波加热的星冕不随时间变化, 并且是球对称的; (2) 声波加热达到的最高温度同低温分量的温度相差不大; (3) 平静区的 X 射线辐射流量低于声波加热上限。

活动星星冕比太阳表面活动区的温度高一个量级, 甚至比太阳耀斑的温度还高。Solansky^[67]

认为, 活动星星冕的温度如此之高是由于这些表面温度高的活动星一般是射电强源, 其射电辐射来自相对论电子的回旋辐射, 因此星冕的加热机制可能与电子的加速有关, 最可能的是磁重联加热。

由于表面磁声波的共振吸收在天体等离子体中非常重要, 一定也在星冕中发生作用, 这一机制可以解释观测到的星冕温度。而一些研究者认为磁流片 (DC) 的加热机制非常重要^[68], 也许是最重要的加热机制。

7 展 望

虽然, 类太阳恒星 X 射线辐射的理论和观测研究已取得很大进展, 但仍有许多问题有待人们去研究。如:

- (1) 类太阳恒星的星冕是贫金属的, 还是类太阳丰度的。
- (2) X 射线辐射与其表面磁场的关系, 是不是所有的星冕都是由磁场加热的。
- (3) X 射线辐射与恒星自转、年龄和金属丰度的确定关系。
- (4) 类太阳恒星表面磁场的准确确定。

在本世纪末, 随着 AXAF、XMM 和 ASTRO - E 卫星的上天, 能得到高分辨率类太阳恒星的 X 射线光谱, 有助于我们了解星冕详细的物理特征。为研究星冕的金属丰度、温度等提供可靠数据。类太阳恒星的 X 射线辐射与表面磁场有关, 因此对恒星表面磁场的测定非常重要, 它可以提供 X 射线产生的信息。最近, 我们用双温 RS 模型拟合了一些有磁场观测结果的 ROSAT 卫星的 X 射线能谱后, 发现单星星冕的高温分量与磁场强度有很强相关性, 随磁场的增强温度升高。这一现象说明了高温星冕是由磁场加热的, 也提供了一种估计类太阳活动星表面磁场强度的方法^[69,70]。同时我们通过 ROSAT 数据选择了一批单星, 用北京天文台的 2.16m 望远镜进行了高分辨率光谱观测, 希望通过分析大样本类太阳活动星的磁场, 对星冕的结构和加热机制有更深入的了解。另外, 为了增加结果的可信度, 大样本的观测和统计结果是十分必要的。随着观测资料的越来越丰富, 为详细研究类太阳恒星的星冕提供了更多的机会。

参 考 文 献

- 1 Catura R C, Acton L W, Johnson H M. *Ap. J. Lett.*, 1975, 196: L47
- 2 Mewe R. *Solar Phys.*, 1996, 169: 335
- 3 Pallavicini R, Golub L, Rosner R *et al. Ap. J.*, 1981, 248: 279
- 4 Pallavicini R. *Astron. Astrophys. Rev.*, 1989, 1: 177
- 5 Lemen J T, Mewe R, Schrijver C J *et al. Ap. J.*, 1989, 341: 447
- 6 Mewe R, Schrijver C J, Lemen J R *et al. Adv. Space Res.*, 1986, 6: 133
- 7 Rosner R, Tucker W M, Vaiana G S. *Ap. J.*, 1978, 220: 643
- 8 Schrijver C J, Lemen J R, Mewe R. *Ap. J.*, 1989, 341: 484
- 9 Schmitt J H M M, Collura A, Sciortino S *et al. Ap. J.*, 1990, 348: 557
- 10 Drake S A, Singh K P, White N E *et al. Ap. J. Lett.*, 1994, 436: L87
- 11 Antunes A, Nagase F, White N E. *Ap. J. Lett.*, 1994, 436: L83
- 12 Fleming T A, Tagliaferri G. *Ap. J. Lett.*, 1996, 472: L101
- 13 Rosner R, Vaiana G S. In: Giacconi R, Setti G eds. *X-Ray Astronomy*. Dordrecht: Reidel, 1980. 129
- 14 Schrijver C J, Cote J, Zwaan C *et al. Ap. J.*, 1989, 337: 964

- 15 Piteres A J M, Schrijver C J, Schmitt J H M M *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1997, 325: 1115
- 16 Rutten R G M, Schrijver C J, Lemmens A F P *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1991, 252: 203
- 17 Rutten R G M, Schrijver C J. *Astron. Astrophys.*, 1987, 177: 155
- 18 Mangenay A, Praderie F. *Astron. Astrophys.*, 1984, 130: 143
- 19 Schrijver C J. *Astron. Astrophys.*, 1993, 269: 395
- 20 Henry T J, Soderblom D R, Baliunas S L. A. J., 1996, 111: 439
- 21 Fleming T A, Schmitt J H M M, Giampapa M S. *Ap. J.*, 1995, 450: 401
- 22 Stern R A, Zolcinski M -C, Antiochos S K *et al.* *Ap. J.*, 1981, 249: 647
- 23 Feigelson E D, DeCampi W M. *Ap. J. Lett.*, 1981, 289: L19
- 24 Moutmerle T, Koch-Miramond L, Falgarone E *et al.* *Ap. J.*, 1983, 269: 182
- 25 Micela G, Sciortino S, Vaiana G S *et al.* *Ap. J.*, 1985, 292: 172
- 26 Micela G, Sciortino S, Vaiana G S *et al.* *Ap. J.*, 1988, 325: 798
- 27 Micela G, Sciortino S, Vaiana G S *et al.* *Ap. J.*, 1990, 348: 557
- 28 Caillault J P, Helfand D. *Ap. J.*, 1985, 289: 279
- 29 Barbera M, Micela G, Sciortino S. *Ap. J.*, 1993, 414: 846
- 30 Walter F M. *Ap. J.*, 1983, 274: 794
- 31 Simon T, Drake S. *Ap. J.*, 1989, 346: 303
- 32 Staauffer J R, Caillault J -P, Gagne M *et al.* *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1994, 91: 625
- 33 Schmitt J H M M, Golub L, Harnden F R Jr *et al.* *Ap. J.*, 1985, 290: 307
- 34 Giampapa M S, Rosner R, Kashyap V *et al.* *Ap. J.*, 1996, 463: 707
- 35 Harnden F R Jr *et al.* *Ap. J.*, 1979, 234: 51
- 36 Sciortino S, Vaiana G S, Morossi G *et al.* *Ap. J.*, 1990, 220: 361
- 37 Linsky J L. *Solar Phys.*, 1985, 100: 333
- 38 Linsky J L, Drake S A, Bostian T S. *Ap. J.*, 1992, 393: 341
- 39 Linsky J L. In: Linsky J L, Serio S eds. *Physics of Solar and Stellar Coronae*. Noordwijk: Kluwer, 1993: 257
- 40 Golub L. In: Byrne P B, Rodono M eds. *Activity in Red-dwarf Stars*. Dordrecht: Reidel, 1983: 83
- 41 Rosner R, Golub L, Vaiana G S. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1985, 23: 413
- 42 Tagliaferri G, Doyle J G, Giommi P. *Astron. Astrophys.*, 1990, 231: 131
- 43 Rosner R *et al.* *Ap. J. Lett.*, 1995, 442: L25
- 44 Pallavicini R, Golub L, Rosner R *et al.* In: Giampapa M S, Golub L eds. *Cool Stars, Stellar Systems and the Sun* (SAO Spec. Rep. 392), 1982: II-77
- 45 Fleming T A, Giampapa M S, Schmitt J H M M *et al.* *Ap. J.*, 1993, 410: 387
- 46 Marilli E, Catalano S. *Astron. Astrophys.*, 1984, 133: 57
- 47 Maggio A, Sciortino S, Vaiana G S *et al.* *Ap. J.*, 1987, 315: 687
- 48 Fleming T A, Gioia I M, Maccucaro T. *Ap. J.*, 1989, 340: 101
- 49 Walter F M. *Ap. J.*, 1982, 253: 745
- 50 Schachter J F, Remillard R, Saar S H *et al.* *Ap. J.*, 1996, 463: 747
- 51 Schmitt J H M M. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1994, 90: 735
- 52 Pallavicini R. In: Greiner J, Duerbeck H W, Gershberg R E eds. *Flares and Flashes*, Proc. of IAU Colloq. No. 151, 1994, Sonneberg, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995: 148
- 53 Ottmann R, Schmitt J H M M. *Astron. Astrophys.*, 1994, 283: 871
- 54 Ottmann R. In: Greiner J, Duerbeck H W, Gershberg R E eds. *Flares and Flashes*, Proc. of IAU Colloq. No. 151, 1994, Sonneberg, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995: 164
- 55 Tsuru T *et al.* *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 1989, 41: 679
- 56 Kurster M. In Caillault J -P ed. *Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, ASP Conf. Series 64, 1994: 104
- 57 van den Oord G H J, Mewe R, Brinkman A C. *Astron. Astrophys.*, 1988, 205: 181
- 58 Kurster. In: Greiner J, Duerbeck H W, Gershberg R E eds. *Flares and Flashes*, Proc. of IAU Colloq. No. 151, 1994, Sonneberg, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995: 424
- 59 Pallavicini P. In: Linsky J F, Serio S eds. *Physics of Solar and Stellar Coronae*. Noordwijk: Kluwer, 1993: 237

60 Schmitt J H M M, Fleming T A, Giampapa M S. *Ap. J.*, 1995, 450: 392
 61 Stern R A, Schmitt J H M M, Kahabka P. *Ap. J.*, 1995, 448: 683
 62 Ambruster C W, Sciortino S, Golub L. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1987, 65: 273
 63 Pallavicini R, Tagliferri G, Stella L. *Astron. Astrophys.*, 1988, 228: 403
 64 Baliunas S L et al. *Ap. J.*, 1995, 438: 269
 65 Parker E N. *Ap. J.*, 1991, 376: 355
 66 Mullan D J, Fleming T A. *Ap. J.*, 1996, 464: 890
 67 Solansky S K. *Spece. Sci. Rev.*, 1993, 63: 1
 68 Narain U, Ulmschneider P. *Space. Sci. Rev.* 1996, 75: 453
 69 施建荣, 赵刚, 赵永恒, 尤峻汉. *天体物理学报*, 1998, 18: 293
 70 Shi J R, Zhao G, Zhao Y H et al. *Astron. Astrophys.*, 1998, 339: 840

Progress in the X-ray Observation and Study of Solar Like Stars

Shi Jianrong^{1,2,3} Zhao Gang^{1,2} You Junhan³

(1. Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

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

(3. Institute for Space Astrophysics, Department of Applied Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Abstract

The History of researches on the X-ray emission of solar like stars is introduced briefly in this article. With the continuous progress on observational techniques, it has been revealed that the magnetic field plays very important role in X-ray emission of late-type stars. Here we discuss: the coronae model where the X-ray is emitted; the dependence of the X-ray emission on the stellar parameters, such as, the rotation or Rossby number, age, spectral type, and the chromosphere activity; the X-ray flare; the long X-ray time variability; the coronal heating mechanisms. Finally, some of research notes for future are briefly discussed.

Key words X-rays: stars—stars: magnetic fields—stars: solar like stars