doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2016.01.002

类太阳恒星耀斑光变轮廓特征分析*

云 $3^{1,2\dagger}$ 王华宁^{1,2} 贺 晗^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台 北京 100012) (2 中国科学院太阳活动重点实验室 北京 100012)

摘要 太阳耀斑是由于在太阳黑子附近磁场能量的突然释放所引起的爆发现象. 人们发现在许多类太阳恒星上也有类似的耀斑(称类太阳恒星耀斑)出现. 主要采用开普勒太空望远镜获取的数据, 从中选取SC(Short Cadence)数据进行分析, 找出类太阳恒星上耀斑光变轮廓的特征参数并做统计, 总结耀斑的活动特点. 分析结果表明: 类太阳恒星耀斑的光变轮廓和爆发的特征时间与太阳耀斑的相似, 这可以说明两种耀斑的物理机制相同.

关键词 恒星: 耀斑, 恒星: 类太阳, 时间, 方法: 统计

中图分类号: P144; 文献标识码: A

1 引言

太阳耀斑是太阳活动最剧烈的现象之一,耀斑爆发的同时往往伴随一系列的高能辐射.耀斑活动的频次与剧烈程度是描述太阳活动强弱的一个重要参数.与太阳耀斑类似,类太阳恒星上也会发生剧烈的耀斑活动.在本文中,我们主要研究开普勒太空望远镜^[1]观测到的类太阳恒星耀斑光变轮廓特征.开普勒太空望远镜观测到的类太阳恒星耀斑的能量为10³³ ~ 10³⁷ erg^[2],属于白光耀斑,要高于太阳耀斑的最大能量(约10³² erg)^[3-4].

近期的一些研究发现,类太阳恒星耀斑与太阳耀斑的物理机制有相同之处^[5-6]. Candelaresi 等人从G、K和M型恒星的开普勒数据中研究了能量大于10³⁴ erg的超级耀斑的发生原因,得出的结果是: 随有效温度的增加超级耀斑的发生率会下降,而且对于自转周期小的恒星,它的黑子覆盖率更高^[7]. 此外, Frasca 等人研究了一颗典型年轻恒星的磁活动和较差自转,发现它的特征也与太阳类似^[8]. Wichmann 等人发现,在类太阳恒星上有相当数量的超级耀斑,而且这些恒星普遍的特征是年轻且自转周期较小^[9]. Nogami 等人发现: 某些产生超级耀斑的类太阳恒星的自转周期与太阳的类似,此外,在有效温度、表面重力和金属含量方面都比较相近^[10].

然而,上面文献中的工作主要是基于开普勒数据中的LC(Long Cadence)数据对超级耀斑展开统计分析或者针对个别恒星事例的研究工作. 开普勒的数据根据时间分辨

2015-04-20收到原稿, 2015-06-09收到修改稿

*国 家 自 然 科 学 基 金 项 目(11303051、 11403044、 11273031、 11221063)及973项目(2011CB811406)资助

[†]dyun@nao.cas.cn

率的不同分为LC和SC(Short Cadence)两种数据^[1].基于SC数据的恒星耀斑光变轮廓特征统计分析研究是一个新的工作.所以,本文主要从开普勒太空望远镜所获取的数据中,选取SC数据进行分析,找出类太阳恒星上耀斑光变轮廓的特征参数并做统计,总结耀斑的活动特点.在第2部分中,我们主要介绍数据的来源及特点;接下来,在第3部分中,我们描述数据的分析方法,并分析恒星耀斑光变轮廓的特征,得出初步结果;最后,我们把所得结果进行物理分析与讨论.

2 数据来源

对类太阳恒星耀斑的观测, 开普勒太空望远镜的优势在于它提供了大批量的恒星观 测数据. 开普勒太空望远镜于2009年发射, 用于精确探测类太阳恒星中适合居住的地球 尺度大小的行星, 使用凌星光度探测法(Transit photometry method), 运行在"地球跟随 环日轨道"(Earth-trailing heliocentric orbit)上[1]. 开普勒只携带光度计这一台仪器, 主 要目的是为了测量恒星光度, 获得恒星的光变曲线数据. 观测波长范围约为420~900 nm[1], 主要在可见光波段, 因此只能观测白光耀斑. 开普勒光度计的核心部件由42个科 学CCD组成. CCD的单次曝光时间为6.02 s, 数据读出时间为 $0.52 \text{ s}^{[1]}$. 在探测过程中, CCD是连续曝光的, 因此数据量比较大, 所以需要把数据进行积分叠加后传输给地面. 这样可以减少数据量,增加信噪比,从而提高数据质量,利于研究.对于开普勒获取的数 据, 叠加的方法有两种: 一种是把270次曝光后得到的数据进行积分叠加成为一个数据 点传输给地面. 这一数据的时间积分采样间隔约为30 min, 称LC数据, 这对识别耀斑有 重要作用: 而另一种是把9次曝光后得到的数据进行积分叠加成为一个数据点传输给地 面,这一数据的时间积分采样间隔约为1 min,称SC数据. SC数据的时间分辨率比LC数 据的高30倍左右, 这对分析耀斑轮廓特征起到了重要作用, 由于SC数据量非常大, 因而 数据样本数相对比较少. 在任意时刻, 开普勒可以获得16万颗恒星的LC数据的同时, 却 只能获取512颗恒星的SC数据. 本论文主要分析耀斑的光变轮廓特征, 所以是基于SC数 据进行的研究. 此外, 开普勒每3个月(month)的数据归为一个季度(quarter). 开普勒望 远镜在两个季度之间会旋转90°, 所以, 每个季度恒星在开普勒CCD上呈现的位置会有 所不同. 而且, 从数据的连贯性来说, 季度内每月的数据是连续的, 季度之间的数据因所 用CCD模块不同, 会有起伏.

3 数据处理与结果分析

3.1 对开普勒获取的SC数据分析

首先,我们对开普勒数据进行筛选,把有SC数据的那一部分类太阳恒星数据挑选出来,针对每一颗恒星分别画出SC数据的光变曲线图和对应的LC数据的光变曲线图,把这两幅图进行对比后识别出单个耀斑的位置,并在SC数据的光变曲线图上标记出单个耀斑在恒星的整体光变曲线上所对应的位置,排序后做成样本集。图1是选用编号为KID4543412恒星(KID指Kepler ID)的光变曲线图,并标出了单个耀斑的位置。图中X轴表示时间(BJD-2454833,BJD指Barycentric Julian Date,偏移量2454833为2009年1月1日的Julian Date),Y轴表示相对流量(Relative flux, $\Delta F/F_0$,其

中, $\Delta F = F - F_0$, $F_0 = \text{mean}(F)$),短实线和上方的数字表示识别出的耀斑位置和编号,(a) 图采用SC数据画出的光变曲线图,(b) 图采用LC数据画出的光变曲线图.

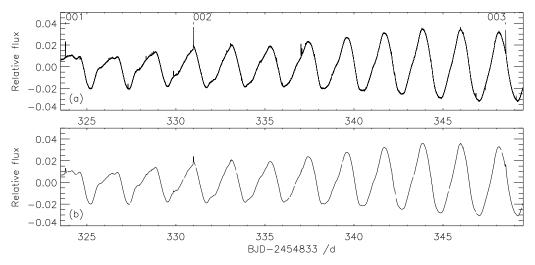


图 1 编号为KID4543412的恒星光变曲线图

Fig. 1 $\,$ The light curve of the solar-type star KID4543412

Balona 研究了开普勒获取的恒星耀斑的SC数据,从中可以准确测量耀斑的形态和耀斑爆发的持续时间^[11]. 所以,可以把识别出的单个耀斑分别画出放大的耀斑光变曲线轮廓图,做成样本集,供下一步的耀斑轮廓特征的统计分析. 王家龙^[12] 曾按照太阳耀斑在光学、X射线及射电波段的观测现象,把太阳耀斑分为8类. 我们把识别出的类太阳恒星耀斑的样本根据耀斑轮廓特点分成3类: 第1类型的耀斑轮廓比较简单,在耀斑爆发后短时间内到达峰值,然后快速下降;第2类型的耀斑轮廓与第1类型的耀斑相同之处在于耀斑爆发后短时间内到达最大峰值,区别在于第2类型的耀斑下降过程比较缓慢,在爆发过程中可能会有两个或两个以上的极大峰值;第3类型的耀斑区别在于需要经过较长时间到达最大峰值,而且可能会有多个次峰值,然后才缓慢下降,总的持续时间比较长.图2、3、4分别为3种类型的类太阳恒星耀斑光变轮廓样本示例图. X轴表示时间,上下横轴分别为耀斑爆发的BJD日期和相对时间(以h为单位); Y轴表示相对流量. 3条分别垂直于X轴的虚线从左到右依次为耀斑上升相起点,耀斑峰值点及耀斑下降相终点. 从耀斑光变轮廓图可以获得耀斑轮廓特征,比如耀斑爆发的幅度、上升相时间、下降相时间等,然后对此展开统计分析.

3.2 数据分析与探讨

从开普勒获取的类太阳恒星SC数据中, 我们共识别出31个耀斑事例. 表1中列出了所选耀斑事例的各个参数. 表中, No代表耀斑编号; Kepler ID、quarter和month分别用字母KID、Q、M表示. 开普勒第1季度的数据观测时间较短, 不分月份, 因此, 在表格中用"/"表示; 耀斑类型(class)用字母C表示, 分别用1、2、3指3种类型; T1和Y1分别表示耀斑爆发开始对应的时间(BJD-2454833)和相对流量; T2、Y2和T3、Y3则分别表示耀斑爆发最大峰值点和爆发结束时对应的时间(BJD-2454833)和相对流量; Dflux表示耀

斑爆发最大峰值点的幅度,由Y2-Y1得出; T2-T1、T3-T2和T3-T1分别表示耀斑爆发的上升相,下降相和总的持续时间(以h为单位).

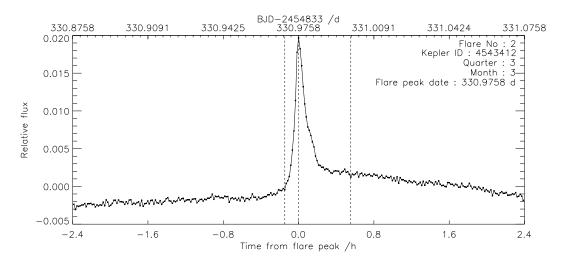


图 2 第1类类太阳恒星耀斑轮廓示例图

Fig. 2 Example of the first class flare profile of solar-type stars

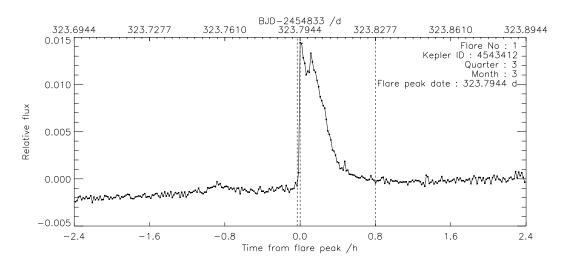


图 3 第2类类太阳恒星耀斑轮廓示例图

Fig. 3 Example of the second class flare profile of solar-type stars

把识别出的耀斑事例逐个画出耀斑轮廓放大图后, 一一归类, 并分别对耀斑的幅度、 上升相时间、下降相时间及耀斑总的持续时间做统计, 得出柱状分布图.

图5为类太阳恒星耀斑爆发幅度的统计分布图, X轴表示耀斑幅度, Y轴表示各个幅度区间内耀斑的数量. 图中, 幅度小于等于0.005区间的耀斑数为0; 从0.01区间开始的各个区间内会有一定数量的耀斑, 而且, 在0.01~0.03区间内的耀斑数目较多; 然后

从0.035区间开始耀斑数又开始减少; 从统计的数目来看, 幅度在0.01~0.03区间内的耀斑数占耀斑总数的83.87%, 这表明, 所选样本的耀斑爆发幅度集中在0.01~0.03区间内. 需要说明的是, 我们筛选耀斑样本的标准为: 耀斑需要明显的光变轮廓. 对于轮廓不明显或者有不确定性的候选耀斑, 样本没有采用.

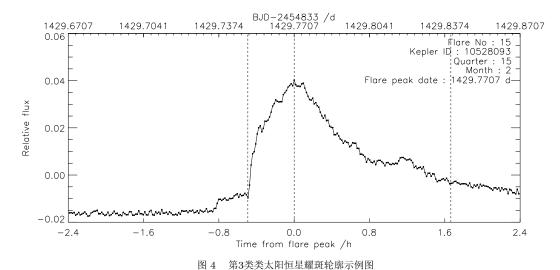
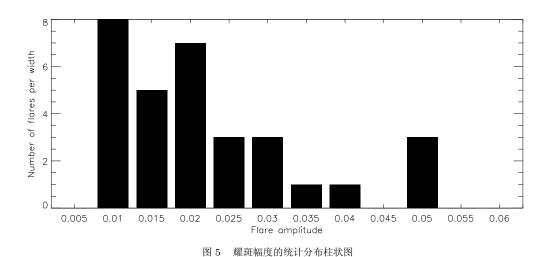


Fig. 4 Example of the third class flare profile of solar-type stars



Histogram of the amplitudes of the flare samples

图6为耀斑上升相时间的统计分布图, X轴表示时间, 以h为单位; Y轴表示耀斑数量. 图中, 时间在0.09 h区间内的耀斑数目最多, 占耀斑总数的35.48%; 在0.15 h区间内的耀斑数目占总耀斑数的16.13%; 而从0.21 h区间开始, 以后的每个区间内的耀斑数都非常少, 或者没有耀斑数. 从统计结果来看, 耀斑爆发的上升相的时间集中在0.09 h附近. 此外, 上升相的时间小于0.1 h的耀斑均为第1、2类型的耀斑.

表 1 从SC数据中选取的耀斑样本参数列表
Table 1 Parameters of the flare samples selected from the SC data

No	KID	Q	М	С	T1	Y1	T2	Y2	T3	Y3	Dflux	T2– $T1$	T3-T2	T3-T1
					$/\mathrm{d}$		$/\mathrm{d}$		$/\mathrm{d}$			$/\mathrm{h}$	$/\mathrm{h}$	/h
1	4543412	3	3	2	323.7930	-0.0007	323.7944	0.0144	323.8277	-0.0004	0.0151	0.0336	0.7992	0.8328
2	4543412	3	3	1	330.9697	-0.0004	330.9758	0.0200	330.9989	0.0012	0.0204	0.1464	0.5544	0.7008
3	4543412	3	3	2	348.5202	0.0003	348.5229	0.0217	348.5454	-0.0020	0.0214	0.0648	0.5400	0.6048
4	4831454	4	1	2	354.0222	-0.0004	354.0250	0.0091	354.0590	-0.0004	0.0095	0.0672	0.8160	0.8832
5	4831454	14	3	2	1343.0141	-0.0003	1343.0161	0.0097	1343.0420	0.0001	0.0100	0.0480	0.6216	0.6696
6	6032920	14	1	1	1301.7373	0.0006	1301.7408	0.0112	1301.7544	-0.0003	0.0106	0.0840	0.3264	0.4104
7	6032920	14	2	2	1335.3718	-0.0016	1335.3752	0.0359	1335.4039	-0.0018	0.0375	0.0816	0.6888	0.7704
8	8226464	2	1	3	187.9888	-0.0070	188.0385	0.0150	188.1155	-0.0029	0.0220	1.1928	1.8480	3.0408
9	8226464	2	1	3	199.2649	-0.0026	199.2846	0.0091	199.3616	-0.0011	0.0117	0.4728	1.8480	2.3208
10	8226464	2	1	3	192.7976	-0.0019	192.8241	0.0073	192.8595	0.0002	0.0092	0.6360	0.8496	1.4856
11	9652680	2	3	3	235.4642	-0.0050	235.4887	0.0198	235.5466	0.0045	0.0248	0.5880	1.3896	1.9776
12	9652680	2	3	3	252.1119	-0.0057	252.1275	0.0276	252.1718	-0.0006	0.0333	0.3744	1.0632	1.4376
13	10528093	15	1	2	1381.5205	-0.0035	1381.5252	0.0106	1381.5974	-0.0027	0.0141	0.1128	1.7328	1.8456
14	10528093	15	2	2	1426.3516	-0.0011	1426.3584	0.0096	1426.4347	0.0009	0.0107	0.1632	1.8312	1.9944
15	10528093	15	2	3	1429.7503	-0.0101	1429.7707	0.0418	1429.8402	-0.0037	0.0519	0.4896	1.6680	2.1576
16	10646889	10	1	2	912.8089	-0.0018	912.8123	0.0200	912.8593	-0.0012	0.0218	0.0816	1.1280	1.2096
17	10646889	10	1	2	915.2521	-0.0025	915.2541	0.0463	915.2875	-0.0014	0.0488	0.0480	0.8016	0.8496
18	10646889	10	1	2	926.6004	-0.0034	926.6031	0.0484	926.6412	-0.0019	0.0518	0.0648	0.9144	0.9792
19	10646889	10	2	2	966.7482	-0.0021	966.7551	0.0088	966.8143	-0.0015	0.0109	0.1656	1.4208	1.5864
20	10646889	10	3	1	983.7780	-0.0006	983.7841	0.0089	983.8059	0.0006	0.0095	0.1464	0.5232	0.6696
21	10646889	10	3	1	994.1907	-0.0014	994.1928	0.0268	994.2071	0.0005	0.0282	0.0504	0.3432	0.3936
22	10646889	11	1	2	1002.9572	-0.0015	1002.9606	0.0199	1003.0021	-0.0013	0.0214	0.0816	0.9960	1.0776
23	10646889	11	3	2	1073.9358	-0.0025	1073.9453	0.0255	1073.9909	-0.0013	0.0280	0.2280	1.0944	1.3224
24	10745663	12	1	3	1112.8339	-0.0019	1112.8482	0.0176	1112.8945	-0.0001	0.0195	0.3432	1.1112	1.4544
25	10745663	12	2	3	1140.6585	-0.0031	1140.6715	0.0128	1140.7301	-0.0008	0.0159	0.3120	1.4064	1.7184
26	10745663	13	2	2	1224.8383	-0.0028	1224.8423	0.0143	1224.8839	0.0004	0.0171	0.0960	0.9984	1.0944
27	10745663	13	2	2	1240.9521	-0.0049	1240.9596	0.0236	1241.0216	-0.0021	0.0285	0.1800	1.4880	1.6680
28	10745663	13	3	2	1252.9696	-0.0025	1252.9730	0.0203	1253.0234	-0.0019	0.0228	0.0816	1.2096	1.2912
29	10745663	13	3	3	1269.5916	-0.0016	1269.5997	0.0199	1269.6379	0.0006	0.0215	0.1944	0.9168	1.1112
30	11610797	1	/	2	148.6287	-0.0032	148.6315	0.0214	148.7146	-0.0041	0.0246	0.0672	1.9944	2.0616
31	11610797	1	/	3	159.2859	-0.0023	159.2968	0.0113	159.3533	0.0012	0.0136	0.2616	1.3560	1.6176

图7为耀斑下降相时间的统计分布图. 图中, 在 $0.6 \sim 1.4$ h区间内的耀斑数占总数的74.19%. 而且, 在1.0 h区间内耀斑数最多.

图8为耀斑爆发总的持续时间的统计分布图. 图中, 在0.8~h和1.4~h区间的耀斑数最多. 经统计得出, 耀斑爆发总的持续时间在 $0.6\sim2.0~h$ 区间内的耀斑数目占总数的83.87%.

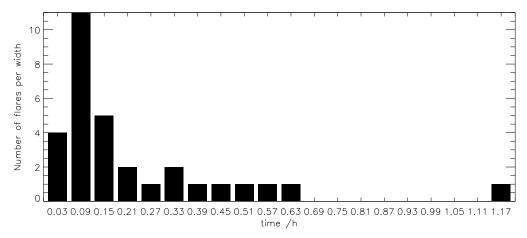


图 6 对耀斑上升相的持续时间统计后得出的柱状图

Fig. 6 Histogram of the time durations of flare rising phase

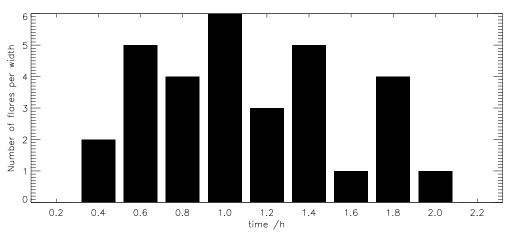


图 7 对耀斑下降相的持续时间统计后得出的柱状图

Fig. 7 Histogram of the time durations of flare decline phase

总体来说,在整个耀斑爆发过程中,耀斑轮廓有明显的先上升后下降的形态变化.在整个耀斑爆发过程的持续时间里,上升相占较短的一部分时间,特征时间约为0.09 h,而下降相的时间相对比较长,特征时间约为1.0 h.

对类太阳恒星耀斑的轮廓和爆发时间, 我们做下面的物理分析与讨论:

首先,对于耀斑轮廓本身,轮廓的形状与发生耀斑活动区的磁场位型有密切关系.对于第1类型的耀斑,轮廓形状相对比较简单,约占耀斑总数的12.9%,所以对应最简单的磁场位型;对于第2类型的类太阳恒星耀斑,耀斑轮廓具有典型的快速上升、缓慢下降的特征,约占耀斑总数的54.84%,是耀斑出现最多的类型.磁场位型较为复杂,可能出现两次或者更多次的次级爆发现象,伴随多次磁场能量的释放过程;而第3类型的恒星耀斑,占耀斑总数的32.26%,在耀斑爆发过程中会有持续不断的能量释放.所以,耀斑轮廓的形状变化可以间接反映出耀斑活动区的磁场位型.

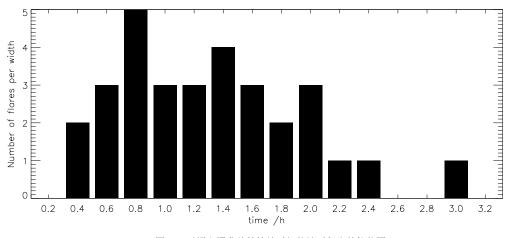


图 8 对耀斑爆发总的持续时间统计后得出的柱状图

Fig. 8 Histogram of the total time durations of the flare samples

其次,类太阳恒星耀斑爆发过程的上升相和下降相的特征时间与太阳耀斑的时间尺度非常接近.特征时间近似,说明太阳耀斑与恒星耀斑满足相同的物理机制.耀斑爆发前后是准稳态过程,而在耀斑爆发开始的那一瞬间到结束是一个动态过程,它是随时间变化的.类太阳恒星日冕与太阳日冕相同,都是等离子体状态,从而可以用同一个磁流体力学方程来描述^[13-14].类太阳恒星耀斑的能量比太阳耀斑的高,但是两个耀斑的特征时间近似,所以需要把磁流体力学方程上的空间尺度增加一定的值,而磁流体力学方程与空间尺度无关.所以,无论空间尺度增加了多少,它们的特征时间是一样的.

此外,3种类太阳恒星耀斑可与太阳的致密耀斑、双带耀斑和缓变型耀斑进行类比^[14].基于对太阳耀斑的认识^[15-16],可以从4个方面进行理解:首先,从形态上来说,从第1类到第3类耀斑,发生的空间尺度在逐渐增大;其次,能量释放都伴随磁重联过程,区别在于第1类和第2类耀斑的重联过程较快,第3类耀斑的重联过程较慢;然后,3种耀斑都可能伴随高能粒子加速过程;最后,对于耀斑的电磁辐射,一个典型的耀斑涵盖从射电、可见光、极紫外到X射线、γ射线等多个波段的辐射,辐射强度随时间的变化会有所不同.然而,这只是基于太阳耀斑的观测和研究结果的理解,对于太阳耀斑与恒星耀斑的具体细节方面的异同我们还需要进一步的研究.可参考熊大闰等^[17-18]对恒星类太阳和类长周期变星的脉动激发机制及詹想等^[19-20]对6颗彗星的光谱分类的研究.另外,因为太阳耀斑的能量相对较低,在太阳的光变曲线中较难分辨出白光耀斑,所以在太阳的光变曲线中识别出的白光耀斑的样本事例较少.而在Thomas等人的文章中第2幅图的典型太阳白光耀斑事例与本文中第2类型的耀斑非常相似^[21].

4 总结

基于开普勒数据中SC数据的耀斑光变轮廓事例的统计研究,我们可以得出如下结论:类太阳恒星耀斑的爆发过程是一个动力学过程,而且相当复杂.此外,不同的耀斑会有不同的形态和演化过程.对于太阳耀斑,耀斑的发展大体上包括3个阶段:首先是前相,一般时标为几分钟到几十分钟;然后为闪相,时标为几分钟到几十分钟,耀斑有上升和下降的轮廓变化;最后为缓变相,时标为几十分钟到一两小时[14-15].本文统计的恒星耀斑爆发的上升相的特征时间约为0.09 h,下降相的特征时间约为1.0 h,耀斑爆发总的持续时间约为1.1 h. 所以,类太阳恒星耀斑的上升相、峰值阶段和下降相过程以及耀斑爆发的持续时间都与太阳耀斑的爆发过程相似. 因此,对于类太阳恒星耀斑而言,太阳耀斑的参数与其无论在特征时间上,还是轮廓变化上都非常近似,都可以用相同的磁流体力学方程来描述.所以,我们可以认为,类太阳恒星耀斑与太阳耀斑有相同的物理机制.

参考文献

- [1] Koch D G, Borucki W J, Basri G, et al. ApJL, 2010, 713: L79
- [2] Wu C J, Ip W H, Huang L C. ApJ, 2015, 798: 92
- [3] Švestka Z. SoPh, 1970, 13: 471
- [4] 方成, 丁明德. 天文学进展, 1994, 12: 100
- [5] Maehara H, Shibayama T, Notsu S, et al. Nature, 2012, 485: 470
- [6] Shibayama T, Maehara H, Notsu S, et al. ApJS, 2013, 209: 5
- [7] Candelaresi S, Hillier A, Maehara H, et al. ApJ, 2014, 792: 67
- $[8]\$ Frasca A, Fröhlich H E, Bonanno A, et al. A&A, 2011, 532: A81
- $[9]\$ Wichmann R, Fuhrmeister B, Wolter U, et al. A&A, 2014, 567: A36
- [10] Nogami D, Notsu Y, Honda S, et al. PASJ, 2014, 66: L4
- [11] Balona L A. MNRAS, 2015, 447: 2714
- [12] 王家龙. 天文学进展, 1994, 12: 11
- [13] Benz A O, Güdel M. ARA&A, 2010, 48: 241
- [14] Shibata K, Magara T. LRSP, 2011, 8: 6
- [15] 方成, 丁明德, 陈鹏飞. 太阳活动区物理. 南京: 南京大学出版社, 2008: 59-60
- [16] 林元章. 太阳物理导论. 北京: 科学出版社, 2000: 459-479
- [17] 熊大闰, 邓李才. 天文学报, 2013, 54: 1
- [18] Xiong D R, Deng L C. ChA&A, 2013, 37: 248
- [19] 詹想, 陈黎. 天文学报, 2013, 54: 334
- [20] Zhan X, Chen L. Ch
A&A, 2014, 38: 100
- [21] Thomas N W, Francis G E, Juan F, et al. GeoRL, 2004, 31: L10802

Analysis of Light Curve Profile Characteristics for the Flares of Solar-type Stars

YUN Duo^{1,2} WANG Hua-ning^{1,2} HE Han^{1,2}

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012) (2 Key Laboratory of Solar Activity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

ABSTRACT The solar flare is caused by the sudden release of magnetic energy around sunspot region. It had been found that many solar-type stars have the similar flare phenomenon (called the flares of solar-type stars). In this paper, based on the short cadence data obtained by the Kepler space telescope, we find out the characteristic parameters of the light curve profiles of the selected stellar flare samples. Through the statistical analysis, the flare activity characteristics of solar-type stars are summarized. The result shows that the light curve profiles as well as the characteristic timescales of the flares on the solar-type stars are similar to the flares on the Sun. This illustrates that the two kinds of flares have the same physical mechanism.

Key words stars: flare, stars: solar-type, time, methods: statistical