

一类 X 射线发射度在脉冲相具有显著指数增长特征的太阳耀斑*

韩斐然^{1,2,3} 刘四明^{1,2†}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210008)

(3 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 太阳耀斑脉冲相的 X 射线光变曲线的复杂性表明此阶段有多种物理过程参与其中. 基于某些显著的观测特征对耀斑分类可以用来探索这些特征的物理起源. 对 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 卫星观测数据的分析表明有一类 X 射线发射度在脉冲相呈显著指数增长的耀斑. 指数增长阶段的平均温度为正态分布. 在此温度分布 1σ 之内的大多数耀斑属于 B 级或 C 级耀斑, 其 GOES 低通道流量的峰值分布为对数正态分布. 指数增长相的增长率和持续时间也遵循对数正态分布. 持续时间分布范围大概为几十秒到几千秒. 正如所预期的, 增长时标同软 X 射线的衰减时标具有相关性. 此外, 指数增长相的增长率与持续时间呈强烈的反相关, 而且随增长率的增大, 对应的平均温度也有缓慢增大的趋势.

关键词 粒子加速, 等离子体, 辐射机制: 热, 太阳: 耀斑, 太阳: X 射线

中图分类号: P 182; **文献标识码:** A

1 引言

大多数耀斑的观测研究集中于对个别耀斑事件的详细分析^[1-6]. 而耀斑的统计研究通常将耀斑样本作为一个整体, 从中提取一些量, 分析这些量的发生频率分布^[7-10]. 尽管这两种方法是相互补充的, 但其结果之间的联系却是模糊的. 比如, 由单个耀斑事件分析所揭示的物理过程到底是怎样造成耀斑 X 射线峰值流量发生频率的幂律分布的? 也许耀斑的统计特征是由其所在的环境决定的, 而不是由其具体的物理过程决定的^[11]. 尽管如此, 对于一些具有相似的软 X 射线峰值流量 (重要的衡量耀斑强度的量) 的耀斑, 它们的实际表现也极其不同. 这反映了耀斑作为具有巨大自由度的宏观物理现象有其内禀的复杂性. 因此为了更好地理解耀斑, 基于耀斑的一些显著观测特征, 对其进行分类, 探索相应的物理机制是非常必要的. 最近, 对大尺度的日冕 EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) 波的分类已经解决了一些相关的争论^[12]. 而长期以来对射电暴的分类研究对揭示内在的物理过程也一直起着至关重要的作用.

2012-03-30 收到原稿, 2012-04-19 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (11143007, 11173063, 11173064) 以及 973 项目 (2011CB811402) 资助

† liusm@pmo.ac.cn

太阳耀斑研究的一个重要方面是探索能量的释放过程. 脉冲相支配着整个能量释放过程的观点已经被人们普遍接受^[13]. 通常在脉冲相 X 射线的光变是复杂的, 这表明有多种物理过程参与其中; 与之形成鲜明对比的是, 大多数耀斑的缓变相具有相对光滑的流量曲线. 缓变相与冕环的演化有紧密的联系, 人们对此已经进行了广泛的研究, 并取得了较深入的认识^[14–18]. 许多观测到的耀斑的复杂性起源于耀斑发生当地的等离子体的复杂磁场结构. 因此为了更好地理解与能量释放相关的基本物理过程, 研究结构相对简单的耀斑, 尤其对单环耀斑进行研究是非常重要的.

Raferly 等^[4] 对一个耀斑环进行了详细的分析. 我们注意到在这个耀斑的脉冲相软 X 射线 (SXR) 流量以及由此导出的发射度 (EM) 具有显著的指数增长. 该耀斑环相对简单的行为可能反映出一些基本的能量释放过程^[19–20]. 受此观测启发, 在本文中我们分析了从 1999 年 1 月到 2002 年 12 月 GOES 卫星的 SXR 观测数据, 从中筛选出了在脉冲相发射度具有显著指数增长的耀斑事件. 这些耀斑是耀斑的一类分支, 对它们进行详细研究可以帮助我们揭示耀斑脉冲相能量释放的物理过程.

2 数据分析

背景选择和峰值时间: GOES 8 和 GOES 10 的观测覆盖了太阳活动第 23 周期的峰年. 我们分析的数据为 GOES 8 和 GOES 10 的 $1 \sim 8 \text{ \AA}$ 和 $0.5 \sim 4 \text{ \AA}$ 的 SXR 流量 (3 s 步长数据), 时间从 1999 年 1 月至 2002 年 12 月. RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) 卫星在 2002 年 2 月发射入轨, 所以一些耀斑也同时被 RHESSI 卫星观测到^[2]. 为了计算耀斑过程的温度和发射度, GOES 的 SXR 流量必须要减去耀斑前的背景流量, 所以选择合适的背景流量非常重要^[21]. 我们使用的 GOES 耀斑列表来自 <http://umbra.nascom.nasa.gov/sdb/ngdc/xray-events/>. 这些列表给出了耀斑的起止时间和低通道流量的峰值时间, 对 1999 年 1 月至 2002 年 12 月这段时间给出了 10 511 个耀斑事件. 我们把低通道流量的峰值时间与耀斑开始的时间之差称为耀斑上升相的持续时间 t_r . 我们利用耀斑列表对 GOES 8 和 GOES 10 的观测资料提取数据. 对于每一个耀斑, 我们把提取用来分析数据的时间区间分别在耀斑相应的起止时间前后各延长 t_r ¹. 对于一些事件, 耀斑列表的峰值时间并不对应于低通道流量的最大值, 我们重新校正了这些峰值时间. 背景流量选择为峰值时间之前的、一段流量较稳定且较低的时间段对应的平均流量, 而且对于低通道与高通量我们分别独立地选择相应的背景流量².

图 1(左) 显示了对所有耀斑扣除背景之后的峰值流量频率分布. 深色柱状图显示的是具有低背景流量水平的耀斑 ($\leq 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 浅色柱状图显示的是具有高背景流量水

¹ Raferly 等^[4] 所研究的耀斑, 其实际的开始时间早于耀斑列表给出的开始时间, 因此对于这个耀斑, 用来分析的数据区域, 是从耀斑起止时间前后各分别延长 $2t_r$ 的时间.

² 实际上, 我们以一系列的线段来拟合光变曲线. 误差的大小被假定为数据本身的大小. χ^2 的临界值被设为 0.001. 拟合从最先的 3 个数据点开始, 同时计算相应的 χ^2 . 如果计算的 χ^2 小于临界值, 我们将会增加更多的数据点进行线性拟合. 当 χ^2 超过临界值时停止拟合. 之前最接近临界值但还没有超过临界值的线性拟合的线段作为这段数据的近似描述. 我们不断重复上面的过程直到所有的数据点都被拟合为一条条的线段. 我们对每一条线段计算流量的平均值. 对于耀斑峰值之前两条平均流量最低的线段, 我们选取其中斜率最小的线段的平均流量作为背景流量.

平的耀斑 ($> 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). 两者在峰值流量的高端具有相似的谱形, 与 Lu 等^[11] 的自组织临界模型的预言相一致. 在峰值流量的低端, 仪器效应以及 GOES 8 与 GOES 10 的观测差别是非常明显的.

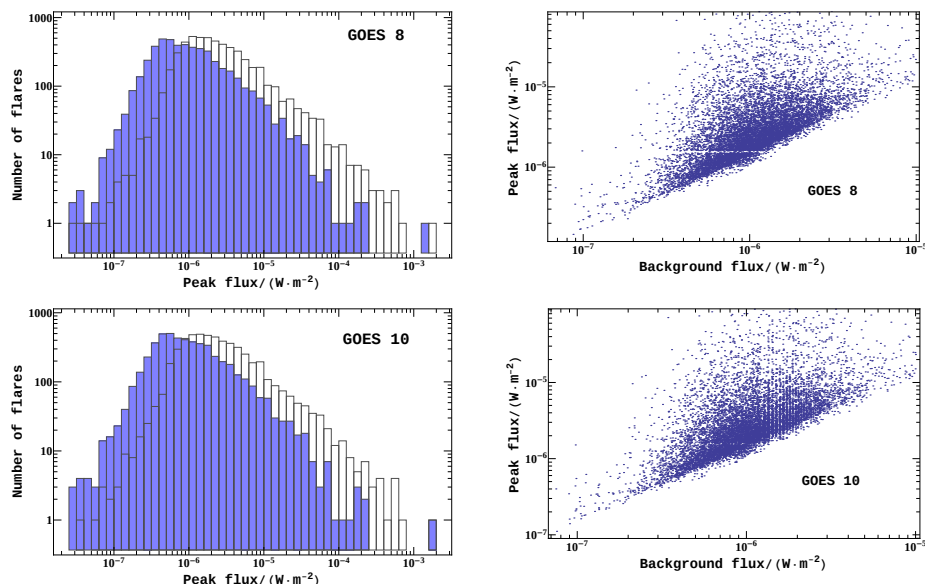


图 1 左: 扣除背景的背景流量分布. 深色柱状图是对背景流量小于或等于 $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的耀斑, 浅色柱状图是对背景流量大于 $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的耀斑. 右: 背景流量与峰值流量 (包含背景) 的相关性图.

Fig. 1 Left: background-subtracted peak flux distribution. The shaded histogram is for flares with a background flux less than or equal to $10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. The other histogram is for the rest of flares with a higher pre-flare background flux. Right: correlation between the background flux and the peak flux (including the pre-flare background flux).

图 1(右) 显示了所有耀斑的背景流量与峰值流量 (包含背景) 的相关性. 在耀斑的识别过程中, 要求其 1 min 的平均峰值流量至少超过背景流量的 40%, 这可以解释为什么在图的右下方没有耀斑出现³. 因此, 背景流量与峰值流量似乎存在的相关性是由于耀斑的识别过程造成的. 右图的分布表明对于一个给定强度的耀斑其发生的频率不依赖于背景流量. 事实上背景流量很大程度上是由前一个耀斑的衰减相造成的^[7]. 因此这里研究的大多数耀斑彼此之间是相互独立的. 右图中水平和竖直的条纹是由仪器的数字化过程造成的^[22].

开始时间: 背景流量选定之后, 为了更好地定量描述上升相, 我们重新定义了耀斑的开始时间. 耀斑开始后的数据应满足以下条件: 为了得到可靠的温度和发射度^[22], 我们要求减去背景的低通道流量要超过 $2.1 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 如果小于这个值, GOES 软件则会给出 4 MK 的温度缺省值和 $0.01 \times 10^{49} \text{ cm}^{-3}$ 的发射度缺省值⁴. 类似地, 我们要求

³ http://umbra.nascom.nasa.gov/sdb/ngdc/xray_events/xraytime.txt

⁴ 详见 SSWIDL (Solar SoftWare IDL) 程序: /ssw/gen/idl/synoptic/goes/goes_chianti_tem.pro

高通道减去背景之后的流量应当超过 $1.0 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的值⁵。为了保证数据的可靠性, 相邻两个数据点的发射度的对数之差不应超过耀斑数据范围内发射度对数的最大值和最小值之差的 15%。

发射度的指数增长相: 我们最感兴趣的是耀斑的上升相。为了找出其中的指数增长部分, 我们以一系列的线段对发射度的对数曲线进行拟合。具体的作法是, 从低通道流量的峰值时间向前不断增加数据点进行线性拟合, 计算相应的 χ^2 (误差假定为 1), 当 χ^2 超过临界值 (设为 9.3×10^{-4}) 时停止拟合。之前最接近临界值但还没有超过临界值的线性拟合的线段作为对这段数据近似的指数增长形式的描述。然后, 对峰值之前的其他数据区域, 重复上面的过程, 直到整个上升相区域全部拟合。如果整个上升相可以用一条线段拟合, 这样的耀斑将会排除出去, 因为它们通常强度较弱, 只有持续较短时间的上升相。

仪器和软件的效应: 在耀斑的背景流量和开始时间确定之后, 我们能够把所有的耀斑表示在以背景流量和开始时刻的流量 (扣除背景) 为变量的参数空间内, 如图 2 所示。信号差的耀斑以及少数数据异常的耀斑已经被排除。图 2(上) 显示的是 GOES 软件默认的情况。对 GOES 8 和 GOES 10 分别有 10 198 个和 10 230 个耀斑。由仪器和软件效应所造成的人为痕迹是很明显的。当背景流量超过 $1.5 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 默认情况下 GOES 软件对温度和发射度的计算会设置 $5 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的阈值限制⁶, 相应地在此数值处的纵轴方向耀斑分布有一个尖锐的截止。在纵轴的 $2.1 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 处耀斑分布也有一个尖锐的截止, 当扣除背景的流量低于此值时, GOES 软件同样会把温度和发射度设为缺省值。图 2(下) 显示了去除软件中 $5 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 阈值限制的结果。对 GOES 8 和 GOES 10 分别有 10 251 个和 10 275 个耀斑。去除限制之后, 我们可以看到, 仪器至少有两个显著的响应状态, 大致以背景流量的高低划分。对于背景流量的高端, GOES 10 的数据还会呈现出一些条纹状的分布, 这可能与仪器的数字化过程有关。

类似地, 图 3 显示了 GOES 高通道的情况, 显示了或多或少的连续分布 (见图 3(下))。因此, 仪器的两个显著响应状态仅在低通道存在。

耀斑选择: 为了筛选出那些在上升相发射度呈显著指数增长的耀斑, 我们使用了以下判据: (1) 我们要求低通道的背景流量不超过 $1.0 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 因为背景流量过高时, 上升相早期的信号太低, 不能给出可靠的温度和发射度。(2) 指数增长相的持续时间 (见图 4 中 D_u) 是重要的提取信息, 我们要求指数增长相的持续时间大于 30 s 且大于从耀斑开始到耀斑峰值时间的一半, 这是为了保证指数增长部分是显著的且在上升相占主导地位。(3) 指数增长相的发射度对数的增长幅度要求超过上升相的发射度对数的最大值与最小值之差的 40%。(4) 为了确保选中的耀斑具有简单的光变曲线, 我们对衰减相低通道流量 (扣除背景) 的对数从峰值流量到峰值流量一半的区域进行线性拟合 (误差假定为 1)。我们要求所得的约化 χ^2 小于 10^{-4} 。具有较高约化 χ^2 值的耀斑, 其衰减相比较复杂, 可能具有多环的结构。

⁵ 详见 SSWIDL 程序: /ssw/gen/idl/synoptic/goes/goes_tem_calc.pro

⁶ 详见 SSWIDL 程序: /ssw/gen/idl/synoptic/goes/goes_tem.pro

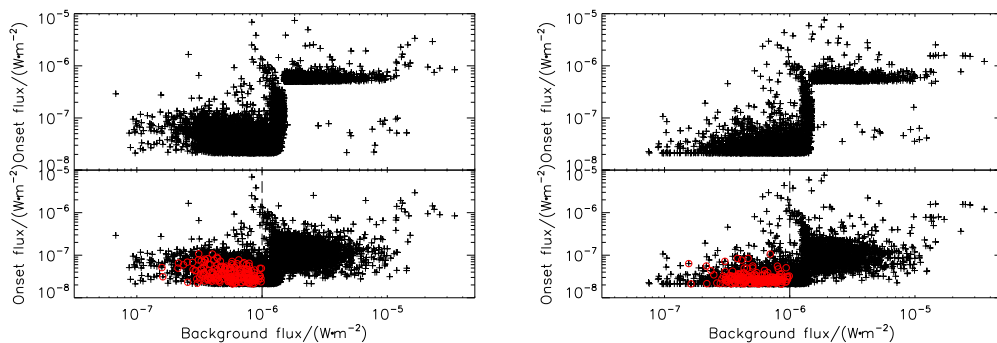


图 2 背景流量与耀斑开始时刻流量 (扣除背景) 的散点图 (对所有耀斑 $1 \sim 8 \text{ \AA}$ 低通道). 左图为 GOES 8 的观测, 右图为 GOES 10 的观测. 上图是在 GOES 软件默认的情况下获得的, 下图是在去除 $5 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的背景流量限制的情况下获得的. 垂直虚线标示了选中的耀斑背景流量的上限. 圆圈代表我们选中的发射度具有显著指数增长的耀斑事件.

Fig. 2 The background flux vs. the background-subtracted flux at the flare onset in the $1 \sim 8 \text{ \AA}$ energy band of all flares. The left and right panels are for the GOES 8, and GOES 10 observations, respectively.

The upper panels are obtained with the default GOES software. The lower panels are obtained after removing a criterion on the background flux. The vertical dashed line indicates the upper limit of the background flux for our flare selection. The open circles indicate the selected flares with the rise phase dominated by an exponential growth period of the EM.

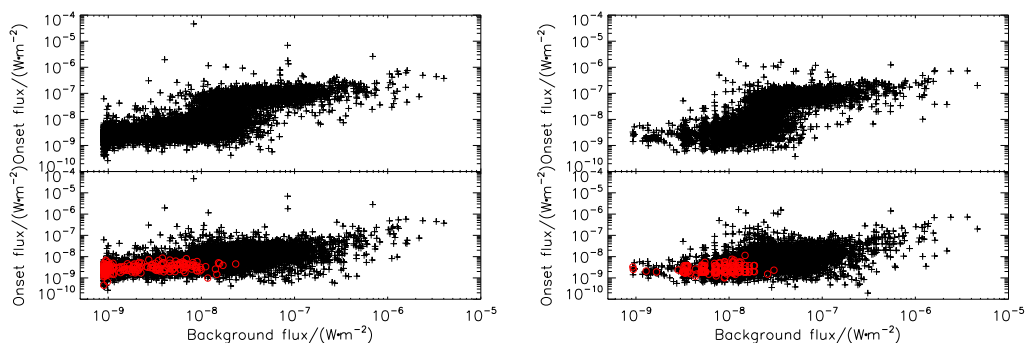


图 3 同图 2 (对所有耀斑 $0.5 \sim 4 \text{ \AA}$ 高通量)

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the high energy channel of $0.5 \sim 4 \text{ \AA}$

图 4 给出了两个选中的耀斑. RHESSI 卫星没有观测到这两个耀斑上升相早期的情况. 左面的耀斑已经被 Raftery 等^[4]详细研究. 这个耀斑与一个单环结构相联系, 在 UV 和 EUV 波段可以看到明显的环顶和足点. 在其 SXR 上升相的大部分时间里, 发射度呈指数增长, 对应的温度则近乎不变. 其峰值时间的硬 X 射线 (HXR) 也没有明显的脉冲行为. 右面的耀斑同左面的类似, 只是在峰值时间 25 keV 之上有明显的脉冲发射.

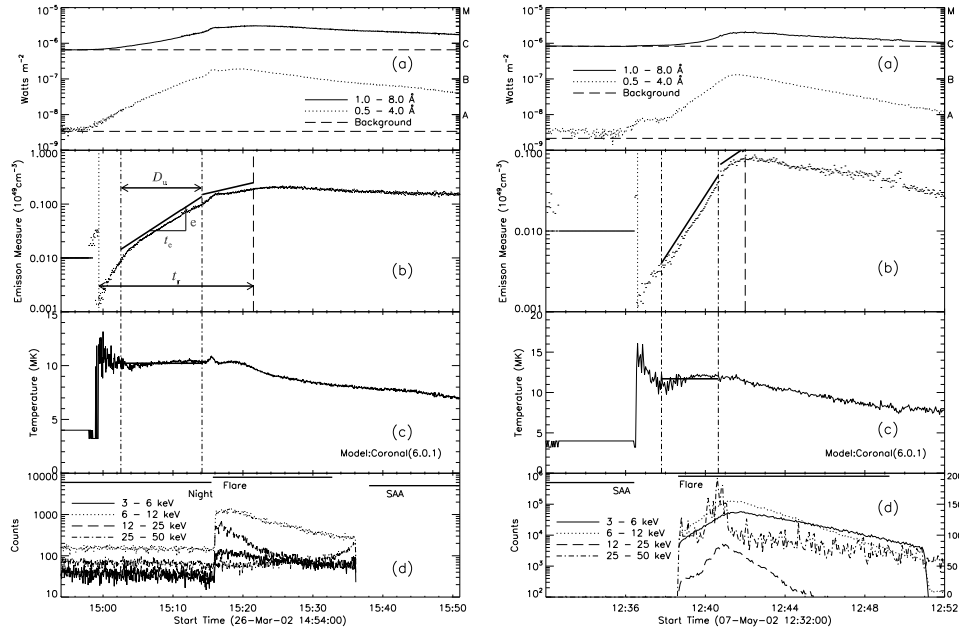


图 4 2002 年 3 月 26 日的耀斑 (左) 与 2002 年 5 月 7 日的耀斑 (右). (a) GOES 8 卫星的光变曲线 (3 s 数据). 水平虚线表示背景流量. (b) 由 GOES SXR 流量导出的发射度. 实线段代表指数增长的区域. 两条点虚线之间为指数增长相. 点线和虚线分别为耀斑的开始时间和低通道流量的峰值时间. (c) 由 GOES SXR 流量导出的温度. 水平实线表示与指数增长相对应温度的平均值. (d) RHESSI 卫星在不同能段所观测到的光变曲线 (4 s 数据). 夜间和 SAA (South Atlantic Anomaly) 时间区域也已经标出. 对于右面的耀斑, 为了显示它的脉冲行为, 其 25 ~ 50 keV 能段的光变曲线以线性标度画出.

Fig. 4 Observation summary of two flares on 2002 March 26 (left) and 2002 May 7 (right). (a) The GOES 8 light curves (3 s data). The dashed lines indicate the background fluxes. (b) The EM derived from the GOES fluxes. Solid line segments illustrate the periods of exponential growth in the EM. The dominant exponential growth phase of the EM is indicated by the two vertical dot-dashed lines. The vertical dotted and dashed lines indicate the flare onset and peak times, respectively. (c) The temperature derived from the GOES fluxes. The mean temperature during the dominant exponential growth phase is indicated by a horizontal solid line. (d) The RHESSI light curves (4 s data) in different energy bands. The RHESSI night and the South Atlantic Anomaly (SAA) time intervals are indicated by horizontal lines. In the right panel, the RHESSI light curve in 25 ~ 50 keV energy band is plotted in linear scale to show its impulsive behavior.

图 5 所示两个耀斑的光变曲线稍许复杂些, 尤其是指数增长相对应的高能量通道的流量曲线, 由光变曲线导出的温度演化也很复杂. 光变的复杂也许是由于涨落, 因此这两个耀斑可以认为与图 4 的耀斑类似. 但与图 4 不同的是, 这两个耀斑的指数增长相可以一直延伸到峰值时间. 如前文所述, 对于所有选中的耀斑, 我们可以得到耀斑指数增长相的持续时间 D_u 、增长率 G_r 、对应的平均温度, 以及低通道 $1 \sim 8 \text{ \AA}$ 的峰值流量, 还有低通道 SXR 流量的衰减时标 t_d . 下面, 我们将会呈现这些量的统计特征和相关性.

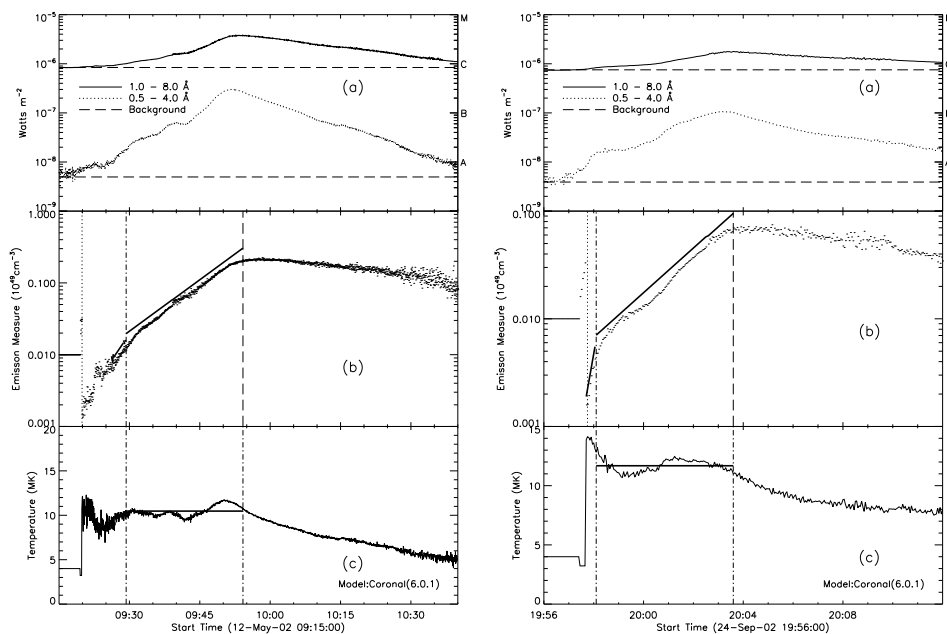


图 5 同图 4, 显示了当发射度呈指数增长时对应温度演化稍许复杂的两个耀斑. RHESSI 对这两个耀斑没有很好的观测.

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the two flares with slightly more complicated temperature evolution when the EM grows exponentially. RHESSI did not have good coverage of these two flares.

3 结果

应用上面耀斑选择的判据, 对于 GOES 8 和 GOES 10 可以分别得到 620 个和 522 个选中的耀斑事件, 其中有 316 个是两颗卫星共同选中的. 图 6 显示了这 316 个耀斑指数增长相对应的平均温度的发生频率分布. 这些分布可以用正态函数拟合. 分布的两端, 高温部分和低温部分由于仪器效应有可能是不可靠的. 对于 GOES 8 和 GOES 10 分别有 210 个和 209 个耀斑是在正态函数 1σ 范围之内, 其中有 192 个耀斑是两颗卫星共同选中的, 因此后面的结果是对这 192 个耀斑进行统计分析得到的. 表 1 显示了这 192 个耀斑的特征量, 其中 SXR 流量衰减时标的定义为从低通道流量的峰值衰减到此峰值流量的一半所占用的时间再除以 $\ln 2$.

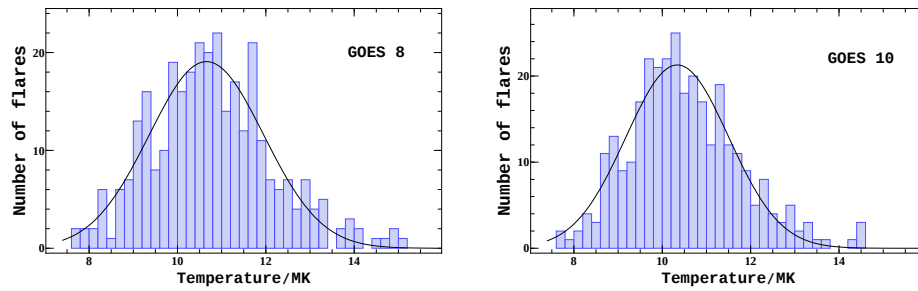


图 6 GOES 8 和 GOES 10 共同选中的耀斑事件其指数增长相平均温度的发生频率分布. 实线为拟合的正态函数. 对 GOES 8 (左), 均值为 10.7 MK, 标准差为 1.30 MK; 对 GOES 10 (右), 均值为 10.3 MK, 标准差为 1.16 MK.

Fig. 6 The occurrence frequency distribution of the mean temperature of the dominant exponential growth phase of all flares selected from both GOES 8 and 10 satellite observations. The solid line shows a Gaussian fit with a mean of 10.7 MK and 10.3 MK, and a standard deviation of 1.30 MK and 1.16 MK for GOES 8 (left) and GOES 10 (right), respectively.

表 1 选中耀斑的特征量 (GOES 8 数据)

Table 1 Characteristics of selected flares derived from the GOES 8 observations

Peak time	Peak flux ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	D_u (s)	t_d (s)	G_r (s^{-1})	Temperature (MK)
1999-01-12UT20:44:27	7.93×10^{-7}	153	201	3.74×10^{-3}	11.28
1999-01-27UT01:21:39	1.22×10^{-6}	282	240	3.10×10^{-3}	10.13
1999-01-31UT11:43:39	6.17×10^{-7}	84	90	5.38×10^{-3}	11.71
1999-01-31UT16:28:03	4.81×10^{-7}	42	96	8.83×10^{-3}	10.35
1999-02-01UT23:31:33	8.79×10^{-7}	87	189	6.67×10^{-3}	11.94
1999-02-02UT05:10:03	6.03×10^{-7}	81	57	4.20×10^{-3}	10.08
1999-02-11UT23:15:27	1.35×10^{-6}	579	1490	1.08×10^{-3}	9.84
1999-02-18UT17:20:30	2.10×10^{-6}	324	513	2.61×10^{-3}	10.65
1999-02-22UT01:38:30	7.49×10^{-7}	126	255	2.55×10^{-3}	10.59
1999-02-25UT13:42:15	4.61×10^{-7}	63	93	6.13×10^{-3}	11.12
1999-03-03UT07:57:03	7.34×10^{-7}	129	159	4.98×10^{-3}	10.63
1999-03-03UT13:25:12	8.38×10^{-7}	159	132	4.80×10^{-3}	11.24
1999-03-03UT19:47:27	7.20×10^{-7}	78	105	1.04×10^{-2}	11.71
1999-03-09UT23:27:09	8.61×10^{-7}	129	462	3.75×10^{-3}	11.35
1999-03-12UT13:29:27	8.21×10^{-7}	48	81	8.76×10^{-3}	11.24
1999-03-12UT16:37:00	1.35×10^{-6}	138	66	6.24×10^{-3}	10.85
1999-03-15UT02:01:21	8.47×10^{-7}	153	99	3.69×10^{-3}	11.49
1999-03-15UT15:52:51	7.37×10^{-7}	252	270	3.04×10^{-3}	10.18
1999-03-17UT03:42:42	1.16×10^{-6}	147	117	5.77×10^{-3}	11.52
1999-04-06UT02:59:33	6.00×10^{-7}	144	96	4.31×10^{-3}	11.52
1999-04-06UT04:17:09	7.92×10^{-7}	81	168	4.45×10^{-3}	11.57
1999-04-06UT07:05:42	3.61×10^{-6}	948	1170	1.02×10^{-3}	10.41
1999-04-07UT05:36:42	1.25×10^{-6}	159	162	4.08×10^{-3}	11.01

表 1 续

Table 1 Continued

Peak time	Peak flux ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	D_{u} (s)	t_{d} (s)	G_{r} (s^{-1})	Temperature (MK)
1999-04-09UT04:15:39	6.20×10^{-7}	123	153	3.70×10^{-3}	10.19
1999-04-09UT15:54:27	1.29×10^{-6}	372	282	2.21×10^{-3}	10.55
1999-04-09UT20:09:39	5.43×10^{-7}	42	54	8.99×10^{-3}	10.06
1999-04-11UT02:59:09	4.21×10^{-7}	42	96	6.73×10^{-3}	10.62
1999-04-13UT09:21:21	6.37×10^{-7}	126	102	5.65×10^{-3}	10.70
1999-04-18UT21:19:24	7.88×10^{-7}	264	213	2.01×10^{-3}	9.96
1999-04-21UT00:22:36	6.05×10^{-7}	135	258	5.12×10^{-3}	10.75
1999-04-21UT11:56:30	6.00×10^{-7}	120	180	5.88×10^{-3}	11.08
1999-04-21UT14:06:54	7.61×10^{-7}	111	249	5.34×10^{-3}	11.91
1999-04-24UT18:23:24	3.47×10^{-7}	228	348	2.01×10^{-3}	10.31
1999-04-27UT09:37:15	5.71×10^{-7}	204	306	3.36×10^{-3}	10.93
1999-05-03UT18:14:51	7.61×10^{-7}	75	102	5.24×10^{-3}	11.30
1999-05-04UT11:29:09	9.48×10^{-7}	135	267	4.34×10^{-3}	10.21
1999-05-25UT18:10:12	1.62×10^{-6}	585	369	1.41×10^{-3}	10.73
1999-05-26UT14:12:03	1.04×10^{-6}	93	93	5.87×10^{-3}	11.68
1999-05-29UT09:34:33	1.15×10^{-6}	201	159	2.44×10^{-3}	10.88
1999-05-31UT15:46:54	6.60×10^{-7}	60	165	4.76×10^{-3}	10.71
1999-05-31UT20:26:36	1.40×10^{-6}	354	240	2.81×10^{-3}	11.68
1999-06-09UT00:18:12	1.27×10^{-6}	471	723	1.63×10^{-3}	10.03
1999-06-09UT17:12:36	1.30×10^{-6}	216	597	2.56×10^{-3}	11.61
1999-06-11UT21:36:42	1.40×10^{-6}	165	153	5.47×10^{-3}	10.78
1999-06-12UT23:51:39	2.11×10^{-6}	228	282	4.41×10^{-3}	11.80
1999-06-20UT00:59:42	2.01×10^{-6}	156	333	4.73×10^{-3}	10.74
1999-06-23UT15:59:09	1.41×10^{-6}	213	138	3.62×10^{-3}	9.63
1999-07-07UT14:50:27	1.26×10^{-6}	183	240	3.37×10^{-3}	9.99
1999-07-10UT05:10:15	1.05×10^{-6}	168	105	5.69×10^{-3}	11.35
1999-07-10UT15:12:39	8.80×10^{-7}	90	225	6.09×10^{-3}	10.44
1999-07-12UT16:47:57	1.33×10^{-6}	207	288	4.89×10^{-3}	10.02
1999-07-15UT15:58:42	1.03×10^{-6}	258	342	2.54×10^{-3}	10.36
1999-07-16UT00:49:27	5.08×10^{-7}	54	99	4.63×10^{-3}	10.30
1999-07-16UT07:40:36	7.93×10^{-7}	102	81	4.20×10^{-3}	10.14
1999-07-21UT14:06:15	7.74×10^{-7}	102	192	4.33×10^{-3}	9.91
1999-08-13UT11:29:54	6.77×10^{-7}	207	219	2.28×10^{-3}	10.52
1999-08-13UT23:34:39	6.01×10^{-7}	36	96	5.67×10^{-3}	10.16
1999-09-10UT07:43:36	7.13×10^{-7}	177	150	3.26×10^{-3}	10.55
1999-09-10UT09:20:24	8.82×10^{-7}	300	183	2.80×10^{-3}	10.52
1999-09-11UT14:44:15	8.15×10^{-7}	165	282	3.89×10^{-3}	10.59
1999-09-20UT00:58:27	1.33×10^{-6}	486	393	1.71×10^{-3}	10.61
1999-09-22UT09:10:57	9.77×10^{-7}	96	201	3.29×10^{-3}	10.22
1999-09-29UT15:23:45	7.00×10^{-7}	411	432	1.38×10^{-3}	10.21
1999-09-30UT23:46:24	7.51×10^{-7}	219	282	3.36×10^{-3}	10.98
1999-10-01UT03:19:27	1.02×10^{-6}	171	246	3.80×10^{-3}	10.39
1999-10-03UT14:28:51	9.11×10^{-7}	180	336	2.60×10^{-3}	10.12

表 1 续

Table 1 Continued

Peak time	Peak flux ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	D_u (s)	t_d (s)	G_r (s^{-1})	Temperature (MK)
1999-10-13UT04:53:18	1.18×10^{-6}	105	141	4.42×10^{-3}	11.30
1999-10-15UT07:20:36	1.31×10^{-6}	69	129	1.30×10^{-2}	10.62
1999-10-18UT02:31:24	1.83×10^{-6}	291	927	3.95×10^{-3}	11.21
1999-11-01UT22:35:30	9.60×10^{-7}	159	171	4.73×10^{-3}	11.05
1999-11-02UT09:49:03	1.46×10^{-6}	384	246	1.76×10^{-3}	9.80
1999-11-30UT11:12:39	1.28×10^{-6}	198	273	3.44×10^{-3}	11.39
1999-12-05UT03:27:54	9.30×10^{-7}	294	294	2.28×10^{-3}	9.74
1999-12-06UT09:51:15	1.22×10^{-6}	390	354	1.40×10^{-3}	10.03
1999-12-14UT07:00:03	1.17×10^{-6}	237	369	2.33×10^{-3}	9.74
2000-01-05UT04:15:30	1.06×10^{-6}	369	351	1.03×10^{-3}	10.62
2000-01-07UT15:16:03	1.16×10^{-6}	237	207	2.54×10^{-3}	10.48
2000-01-10UT19:02:45	1.30×10^{-6}	675	489	1.26×10^{-3}	9.80
2000-01-25UT11:37:00	6.51×10^{-7}	147	177	2.47×10^{-3}	9.37
2000-01-29UT00:30:51	7.90×10^{-7}	189	318	2.44×10^{-3}	9.50
2000-01-29UT12:53:57	5.92×10^{-7}	108	111	3.57×10^{-3}	10.34
2000-02-05UT18:20:33	1.27×10^{-6}	288	861	3.12×10^{-3}	9.80
2000-02-29UT21:58:54	1.87×10^{-6}	150	189	4.65×10^{-3}	10.82
2000-04-16UT18:02:48	8.55×10^{-7}	81	81	4.75×10^{-3}	9.78
2000-04-26UT12:33:15	1.10×10^{-6}	123	180	7.32×10^{-3}	11.24
2000-04-27UT03:20:27	9.39×10^{-7}	81	87	6.39×10^{-3}	10.38
2000-04-27UT15:50:36	8.99×10^{-7}	147	294	5.08×10^{-3}	9.88
2000-04-30UT16:18:48	8.33×10^{-7}	174	240	2.67×10^{-3}	10.83
2000-04-30UT16:38:18	7.68×10^{-7}	93	150	5.12×10^{-3}	11.35
2000-05-03UT21:47:09	1.15×10^{-6}	237	141	3.62×10^{-3}	10.42
2000-05-09UT04:19:54	1.12×10^{-6}	357	834	1.00×10^{-3}	9.45
2000-05-28UT07:25:12	1.66×10^{-6}	279	186	3.52×10^{-3}	10.16
2000-05-29UT12:29:36	1.01×10^{-6}	231	168	4.93×10^{-3}	10.80
2000-05-30UT18:47:06	8.13×10^{-7}	123	204	4.35×10^{-3}	11.00
2000-06-19UT05:31:36	1.16×10^{-6}	132	141	3.92×10^{-3}	11.91
2000-06-21UT00:46:54	6.71×10^{-6}	264	351	3.66×10^{-3}	11.91
2000-06-26UT04:35:15	1.93×10^{-6}	381	495	2.47×10^{-3}	11.76
2000-07-03UT04:15:12	8.19×10^{-7}	282	381	1.45×10^{-3}	9.49
2000-07-03UT16:29:36	7.58×10^{-7}	42	150	9.42×10^{-3}	10.88
2000-08-18UT23:55:21	1.34×10^{-6}	363	138	2.64×10^{-3}	10.64
2000-08-23UT01:16:00	1.41×10^{-6}	711	603	5.63×10^{-4}	9.88
2000-08-24UT06:42:12	1.81×10^{-6}	903	864	9.47×10^{-4}	10.36
2000-08-28UT11:42:42	1.17×10^{-6}	204	72	4.11×10^{-3}	10.40
2000-09-04UT15:37:42	1.40×10^{-6}	171	105	5.92×10^{-3}	11.77
2000-09-14UT13:56:18	2.26×10^{-6}	258	249	3.88×10^{-3}	11.24
2000-10-17UT11:22:21	1.11×10^{-6}	312	330	1.94×10^{-3}	10.36
2000-10-22UT17:04:24	8.50×10^{-7}	108	381	4.51×10^{-3}	11.02
2000-11-10UT16:39:15	1.81×10^{-6}	330	381	2.67×10^{-3}	10.34
2000-11-16UT06:55:27	9.61×10^{-7}	54	123	9.70×10^{-3}	11.30

表 1 续

Table 1 Continued

Peak time	Peak flux ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	D_u (s)	t_d (s)	G_r (s^{-1})	Temperature (MK)
2000-11-17UT02:23:30	1.39×10^{-6}	159	102	5.17×10^{-3}	10.85
2000-11-21UT16:48:18	1.19×10^{-6}	156	387	4.32×10^{-3}	10.61
2000-12-07UT02:45:12	1.06×10^{-6}	96	99	7.45×10^{-3}	11.52
2000-12-13UT17:01:39	1.16×10^{-6}	150	57	3.41×10^{-3}	9.88
2000-12-14UT18:28:57	1.50×10^{-6}	204	159	4.25×10^{-3}	10.22
2000-12-25UT08:46:39	9.66×10^{-7}	105	138	5.05×10^{-3}	10.41
2000-12-26UT04:16:39	1.16×10^{-6}	84	231	5.64×10^{-3}	10.90
2001-01-11UT03:48:36	1.36×10^{-6}	219	162	3.04×10^{-3}	9.93
2001-01-15UT20:24:00	1.32×10^{-6}	273	210	2.50×10^{-3}	10.96
2001-01-17UT18:22:03	1.09×10^{-6}	132	234	3.92×10^{-3}	9.81
2001-02-17UT03:14:09	6.36×10^{-7}	63	153	4.51×10^{-3}	10.53
2001-02-20UT03:49:24	9.98×10^{-7}	273	525	2.70×10^{-3}	10.83
2001-02-20UT23:41:18	6.58×10^{-7}	69	150	7.01×10^{-3}	11.05
2001-02-23UT12:28:21	6.34×10^{-7}	168	264	3.04×10^{-3}	10.96
2001-03-01UT14:42:45	6.10×10^{-7}	72	123	6.41×10^{-3}	9.52
2001-03-03UT05:42:27	8.16×10^{-7}	171	198	3.17×10^{-3}	11.13
2001-03-04UT06:09:15	5.73×10^{-7}	201	312	2.11×10^{-3}	10.27
2001-03-04UT18:49:42	1.44×10^{-6}	78	75	1.01×10^{-2}	10.75
2001-03-05UT16:40:21	1.45×10^{-6}	711	516	1.13×10^{-3}	10.73
2001-03-06UT02:36:21	1.39×10^{-6}	735	969	8.38×10^{-4}	10.43
2001-03-11UT08:13:09	1.45×10^{-6}	807	1080	9.06×10^{-4}	10.84
2001-03-16UT15:54:15	1.80×10^{-6}	297	384	3.34×10^{-3}	11.43
2001-03-18UT04:26:09	5.81×10^{-7}	198	333	2.51×10^{-3}	9.68
2001-03-18UT12:26:12	2.24×10^{-6}	264	135	3.24×10^{-3}	9.59
2001-04-13UT08:30:06	5.86×10^{-7}	165	354	2.05×10^{-3}	10.70
2001-05-06UT19:20:15	5.99×10^{-7}	126	141	3.96×10^{-3}	9.72
2001-05-16UT09:44:03	1.60×10^{-6}	348	270	1.89×10^{-3}	11.64
2001-05-22UT14:13:12	8.90×10^{-7}	414	978	1.19×10^{-3}	9.81
2001-05-28UT14:10:27	7.32×10^{-7}	333	333	1.74×10^{-3}	11.05
2001-06-02UT13:26:54	9.73×10^{-7}	138	240	4.59×10^{-3}	10.83
2001-06-05UT08:01:06	9.68×10^{-7}	201	225	3.06×10^{-3}	11.45
2001-06-07UT13:03:00	1.39×10^{-6}	189	90	4.32×10^{-3}	10.80
2001-06-10UT17:26:06	1.15×10^{-6}	210	267	2.08×10^{-3}	9.93
2001-06-29UT23:50:00	7.62×10^{-7}	126	150	3.85×10^{-3}	9.94
2001-07-06UT06:01:33	3.68×10^{-7}	42	36	4.38×10^{-3}	9.71
2001-07-08UT01:50:03	4.12×10^{-7}	153	222	3.02×10^{-3}	9.80
2001-07-13UT07:50:12	7.62×10^{-7}	57	180	9.83×10^{-3}	11.04
2001-07-15UT23:24:51	8.86×10^{-7}	174	447	3.42×10^{-3}	10.03
2001-07-23UT01:44:18	8.28×10^{-7}	243	162	2.42×10^{-3}	10.00
2001-07-23UT21:57:36	1.30×10^{-6}	102	129	6.29×10^{-3}	10.94
2001-07-29UT19:10:42	1.31×10^{-6}	498	426	1.91×10^{-3}	10.48
2001-08-03UT05:34:39	1.27×10^{-6}	345	330	2.29×10^{-3}	9.60
2001-08-05UT19:54:00	1.73×10^{-6}	237	336	4.10×10^{-3}	11.06

表 1 续
Table 1 Continued

Peak time	Peak flux ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	D_u (s)	t_d (s)	G_r (s^{-1})	Temperature (MK)
2001-08-08UT06:29:30	1.06×10^{-6}	63	153	4.26×10^{-3}	11.52
2001-08-09UT04:38:18	2.09×10^{-6}	114	78	6.60×10^{-3}	11.53
2001-08-16UT02:52:42	8.10×10^{-7}	78	60	7.37×10^{-3}	11.08
2001-08-16UT17:46:36	8.98×10^{-7}	225	405	2.61×10^{-3}	10.91
2001-08-17UT09:25:12	6.10×10^{-7}	54	102	6.66×10^{-3}	10.16
2001-09-02UT04:08:48	1.42×10^{-6}	162	114	3.53×10^{-3}	11.19
2001-11-26UT19:21:27	1.64×10^{-6}	141	183	4.39×10^{-3}	10.72
2002-03-26UT15:21:30	3.11×10^{-6}	693	1520	1.42×10^{-3}	10.22
2002-04-01UT13:03:39	1.40×10^{-6}	180	261	4.18×10^{-3}	10.49
2002-04-02UT16:28:36	1.23×10^{-6}	42	93	1.45×10^{-2}	11.22
2002-04-20UT09:35:18	1.38×10^{-6}	738	1180	9.56×10^{-4}	11.95
2002-04-24UT10:53:15	2.16×10^{-6}	351	441	3.07×10^{-3}	10.62
2002-04-26UT13:26:54	9.25×10^{-7}	159	165	3.20×10^{-3}	10.44
2002-05-02UT03:32:33	1.71×10^{-6}	219	1090	4.33×10^{-3}	10.90
2002-05-07UT12:42:00	2.10×10^{-6}	171	240	6.35×10^{-3}	11.70
2002-05-12UT09:54:12	3.82×10^{-6}	1491	969	7.99×10^{-4}	10.47
2002-05-19UT06:49:36	1.19×10^{-6}	138	579	6.02×10^{-3}	11.59
2002-05-25UT05:47:00	1.40×10^{-6}	177	159	3.98×10^{-3}	11.25
2002-06-12UT01:19:21	8.70×10^{-7}	144	180	3.29×10^{-3}	10.31
2002-06-14UT00:02:51	9.55×10^{-7}	87	228	5.55×10^{-3}	11.20
2002-06-25UT01:59:03	6.87×10^{-7}	54	54	9.77×10^{-3}	10.02
2002-06-26UT17:18:45	4.53×10^{-7}	60	201	6.09×10^{-3}	10.58
2002-06-26UT20:09:57	6.31×10^{-7}	135	186	2.67×10^{-3}	9.88
2002-06-29UT12:53:21	8.52×10^{-7}	249	246	2.08×10^{-3}	10.35
2002-07-03UT08:51:51	1.13×10^{-6}	129	297	3.06×10^{-3}	9.80
2002-07-11UT02:39:57	1.62×10^{-6}	180	117	4.96×10^{-3}	11.69
2002-07-12UT07:01:42	1.70×10^{-6}	894	1160	8.27×10^{-4}	11.79
2002-07-12UT19:45:27	8.22×10^{-7}	111	195	4.18×10^{-3}	10.91
2002-07-16UT19:15:00	1.46×10^{-6}	141	141	6.35×10^{-3}	10.94
2002-09-24UT20:03:36	1.78×10^{-6}	327	267	3.46×10^{-3}	11.68
2002-09-28UT09:00:12	8.39×10^{-7}	132	240	2.81×10^{-3}	9.60
2002-09-28UT10:01:39	7.86×10^{-7}	141	273	4.05×10^{-3}	11.20
2002-09-30UT06:43:39	3.30×10^{-6}	468	588	2.26×10^{-3}	10.55
2002-10-06UT02:26:33	1.20×10^{-6}	45	60	1.24×10^{-2}	11.47
2002-10-11UT01:53:00	1.21×10^{-6}	420	360	1.65×10^{-3}	10.83
2002-11-05UT05:54:06	1.38×10^{-6}	123	54	6.16×10^{-3}	11.69
2002-11-24UT02:13:00	1.10×10^{-6}	213	273	2.57×10^{-3}	10.60
2002-11-25UT22:33:00	1.06×10^{-6}	54	120	5.80×10^{-3}	11.06
2002-12-08UT16:43:00	8.69×10^{-7}	171	156	3.57×10^{-3}	10.14
2002-12-27UT16:52:45	6.55×10^{-7}	486	477	1.06×10^{-3}	9.37

图 7 显示了指增长相的上升时标 t_e 与 SXR 流量的衰减时标 t_d 的相关性. 这里上升时标为指数增长相增长率的倒数, 也就是发射度对数增长幅度为 $e \simeq 2.72$ 时所对应的

时间 (见图 4). 对于大多数耀斑, 尤其是那些具有长的衰减时标的耀斑, 其上升时标要短于衰减时标. 对于极个别的耀斑, 其上升时标长于衰减时标. 总体上, 上升时标随衰减时标的增长而缓慢地增大. 对这两个时标取对数之后的线性拟合, 可以得到: 对 GOES 8, 有 $t_e = 4.0t_d^{0.60}$; 对 GOES 10, 有 $t_e = 3.5t_d^{0.61}$. 实线和虚线分别表示了这些拟合. 点虚线为上升时标与衰减时标相等的情形.

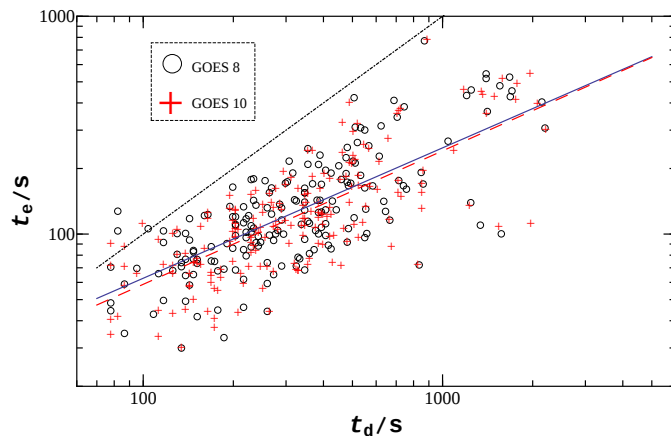


图 7 指数增长相的上升时标与衰减时标的相关性. 点虚线为上升时标与衰减时标相等的情形. 实线和虚线分别为 GOES 8 和 GOES 10 结果的线性拟合.

Fig. 7 Correlation between the rise and decay times. The dot-dashed line indicates the equality of these two timescales. The solid and dashed lines indicate the linear fits to the data derived from the GOES 8, and GOES 10 observations, respectively.

图 8(左) 显示了指数增长相持续时间 D_u 与对应的增长率 G_r 的相关性. D_u 与 G_r 具有明显的反相关, 而随着 G_r 的增大, 对应的平均温度 T 也有缓慢增大的趋势. 对 GOES 8 和 GOES 10 的 $\lg G_r$ 、 $\lg D_u$ 以及 $\lg T$ 分别进行线性拟合可以得到

$$\lg(G_r/s^{-1}) = -0.69 \lg(D_u/s) + 1.9 \lg(T/\text{MK}) - 2.5,$$

$$\lg(G_r/s^{-1}) = -0.73 \lg(D_u/s) + 1.5 \lg(T/\text{MK}) - 2.0.$$

这样的反相关性也意味着在达到某种临界值后发射度将停止指数增长.

图 8(右) 为低通道 1~8 Å 峰值流量的发生频率分布. 图中选中耀斑的峰值流量具有相对较窄的对数正态分布⁷. 既然温度分布在一个较窄的区域, 那么 SXR 的峰值流量就对峰值时间的发射度给出了一个粗略的估计. 因此观测到的 G_r 和 D_u 的反相关性同 SXR 峰值流量的相对较窄的分布是一致的. 这里所有选中的耀斑都是属于 B 级或 C 级. 大耀斑可能更为复杂, 因此只有很小的机会被我们的选择判据所选中. 尽管如此, 在峰值流量的高端, 有一些事件偏离了对数正态分布.

G_r 、 D_u 和 T 的相关性是很弱的. 图 9 显示了 $D_u^{0.7}G_r$ 和 T 的相关性. 尽管 $D_u^{0.7}G_r$ 有随平均温度 T 增大而增大的趋势, 但是这样的相关性的宽度范围非常大.

⁷ 我们选中耀斑的样本相对较小, 不能确定这样的分布同图 1 所示的所有耀斑峰值流量分布的结果是否相一致.

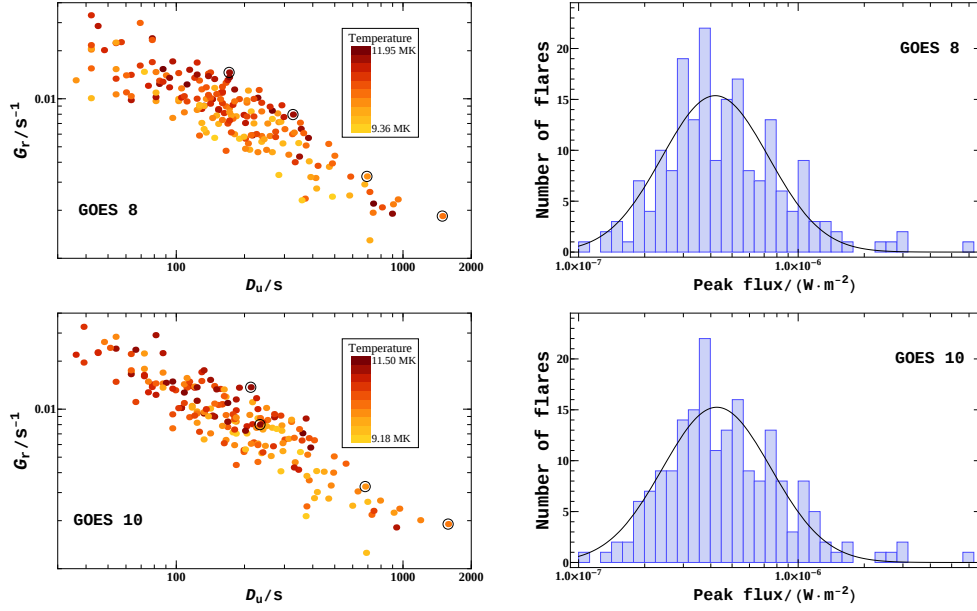


图 8 左：指数增长相的持续时间 D_u 与对应的增长率 G_r 的相关性，平均温度以颜色的深浅标出。图 4 和图 5 的 4 个事件以圆圈标出。右：低通道 $1 \sim 8 \text{ \AA}$ 峰值流量的发生频率分布。实线为对数正态拟合，对 GOES 8 和 GOES 10，均值为 $10^{-6.4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，标准差为 0.24。

Fig. 8 Left: Correlation between the duration of the dominant exponential growth phase D_u and the corresponding growth rate G_r . The mean temperature is indicated by the color bar. The circles indicate the four flares shown in Figs. 4 and 5, respectively. Right: Distribution of the background-subtracted peak flux of the selected flares in the $1 \sim 8 \text{ \AA}$ band. The solid line shows a log-normal fit with a mean of $10^{-6.4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, and a standard deviation of 0.24 for both GOES 8 and 10 observations.

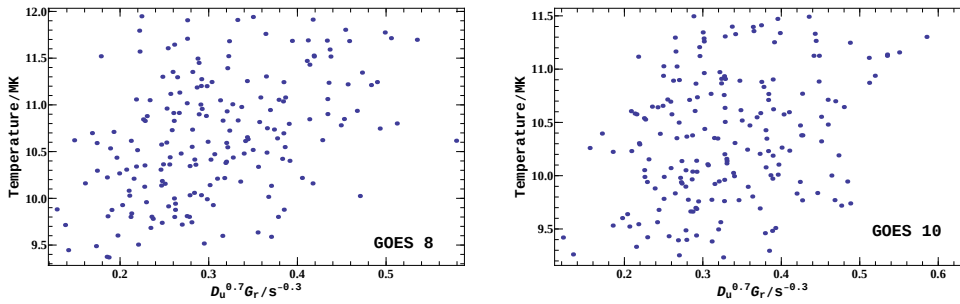


图 9 平均温度 T 与 $D_u^{0.7} G_r$ 的相关性

Fig. 9 Correlation between the mean temperature T and $D_u^{0.7} G_r$

图 10 为指数增长相持续时间和增长率的发生频率分布. 所有的分布都可以用对数正态拟合. 我们的耀斑选择判据之一就是要求持续时间长于 30 s, 这解释了图中的持续时间的下限. 图中最长的持续时间大概是 0.5 h. 相对于对数正态的拟合, 实际的分布在更长的持续时间和更低的增长率处略有偏离.

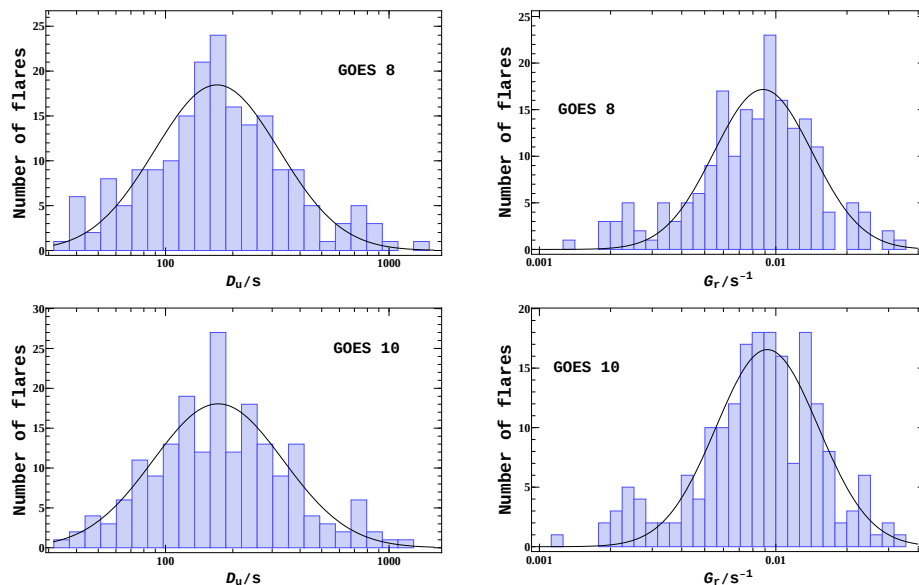


图 10 左: 指数增长相持续时间的发生频率分布. 实线为对数正态拟合. 对 GOES 8 和 GOES 10, 均值为 170 s, 标准差为 1.9. 右: 指数增长相增长率的发生频率分布. 实线为对数正态拟合, 对 GOES 8 和 GOES 10, 均值为 0.009 s^{-1} , 标准差为 1.6.

Fig. 10 Left: The frequency distribution of the duration of the dominant exponential growth phase. The log-normal fit has a mean of 170 s, and a standard deviation of 1.9 for both GOES 8 and 10. Right: The frequency distribution of the growth rate of the exponential growth phase. The log-normal fit has a mean of 0.009 s^{-1} , and a standard deviation of 1.6 for both GOES 8 and 10.

4 讨论和结论

许多观测到的耀斑的复杂表象来源于耀斑区域复杂的磁场结构. 为了更好地理解耀斑现象, 我们可以研究具有相对简单的光变曲线的耀斑. 本文从 GOES 的观测资料出发, 通过一系列的选择判据, 获得了具有相对简单的 SXR 光变的耀斑样本, 从而部分地避免了耀斑的复杂性. 尤其是我们主要考虑耀斑上升相发射度具有显著指数增长的耀斑, 这种耀斑是耀斑的一类分支, 对它们进行详细研究可以帮助我们揭示耀斑脉冲相能量释放的物理过程.

指数增长相的上升时标从 30 s 到超过 10 min, 说明这是一个 (磁) 流体过程. 有两种机制可能导致发射度的指数增长. 如果环的结构是相对简单和稳定的, 则发射度的增长由色球蒸发造成. 发射度的指数增长意味着热能的指数增长, 因此加热率要正比于热能

密度. 既然耀斑能量的释放是在日冕中发生的, 那么蒸发过程也是由从日冕到色球的能流所驱动的. 而加热率正比于热能密度实际上意味着从日冕到足点的饱和能流. 而这样的饱和能流可以由低密度等离子体的饱和热传导所引发^[23-24]. 依照这个模型, 我们预期脉冲相足点有强烈的辐射以及如图 7 所示的上升时标与衰减时标的相关性.

如果冕环磁场的拓扑结构是复杂的, 比如说磁力线是扭曲的^[25], 耀斑可能与一个暗条相联系^[26]. 那么发射度的指数增长可以由暗条内热等离子体的体积填充因子的指数增长所引起. 在这样的情形下, 来自色球的强烈蒸发就不是必需的. 对单个耀斑更为详细的多波段研究可以区分这两种模型. 对于本文所研究的耀斑, 单独依靠 GOES SXR 光变曲线是无法区分这两种模型的.

我们发现耀斑指数增长相的增长率与持续时间呈现出强烈的反相关. 当发射度达到某个临界水平时, 指数增长就停止了. 这标志着一种新的能量释放过程的开始. 根据前面提到的两种机制, 指数增长相的停止可以由蒸发上来的等离子体的高密度或者是体积填充因子达到饱和所引起. 尽管没有明显的原因说明为什么一旦达到某种临界状态发射度的指数增长就会停止, 但是我们所发现的强相关性与峰值流量相对较窄的对数正态分布是相一致的.

耀斑的峰值流量通常遵循幂律分布^[8]. 然而, 本文所选中的耀斑的峰值流量分布、指数增长相的持续时间以及增长率都遵循相对较窄的对数正态分布. 幂律分布标志着在系统内缺乏特征尺度. 我们所选中的耀斑具有相对较窄的分布则说明了它们代表一类特殊的耀斑, 其特征峰值流量约为 $4 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 其所对应的光变是相对简单的, 而且很可能与单环结构相联系. 如果这些结果能够被将来的观测进一步证实, 我们可以一般性把耀斑与一系列的磁环相联系. 峰值流量的幂律分布则可以由不同强度耀斑所含的激发的冕环数目的幂律分布来解释. 比如, 对于一个 X 级的耀斑应当有数以千计的冕环被激发. 因此耀斑的研究可以分成两个方面: (1) 耀斑环中的物理过程; (2) 耀斑区域的拓扑结构. 第 2 个方面决定了在一个耀斑事件中有多少冕环被激发. 本文研究的耀斑是针对第 1 个方面也就是耀斑环中的物理过程所进行的探索.

本文所选中的耀斑具有相对渐变的演化, 脉冲相的 HXR 发射也是相对较弱, 与 Bak-Steslicka 等^[6]研究的缓变长周期事件类似. SXR 的渐变演化可能与缺乏脉冲相 HXR 发射相联系. Su 等^[10]的早期研究指出, 与 SXR 流量相比, 脉冲相的 HXR 发射与 SXR 增长率具有更为密切的相关性. 既然上升相由缓变的辐射所主导, 则粒子的加速过程可能是不重要的. 伴随显著粒子加速的耀斑与我们这里所研究的耀斑是明显不同的. 本文所研究耀斑的大多数观测特征都应当可以在磁流体力学的框架下得到解释^[25].

致谢 在本文的写作过程中, 与李友平、Hugh Hudson、Lyndsay Fletcher 以及 Peter J. Cargill 进行了有益的讨论, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] Masuda S, Kosugi T, Hara H, et al. *Nature*, 1994, 371: 495
- [2] Lin R P, Krucker S, Hurford G J, et al. *ApJ*, 2003, 595: L69
- [3] Hannah I G, Krucker S, Hudson H S, et al. *A&A*, 2008, 481: L45
- [4] Raftery C L, Gallagher P T, Milligan R O, et al. *A&A*, 2009, 494: 1127
- [5] Longcope D W, Des Jardins A C, Carranza-Fulmer T, et al. *SoPh*, 2010, 267: 107
- [6] Bak-Steslicka U, Mrozek T, Kolomanski S. *SoPh*, 2011, 271: 75
- [7] Aschwanden M J. *SoPh*, 1994, 152: 53
- [8] Veronig A, Temmer M, Hanslmeier A, et al. *A&A*, 2002, 382: 1070
- [9] Veronig A, Vrsnak B, Dennis B R, et al. *A&A*, 2002, 392: 699
- [10] Su Y, Gan W Q, Li Y P. *SoPh*, 2006, 238: 61
- [11] Lu E T, Hamilton R J. *ApJ*, 1991, 380: L89
- [12] Warmuth A, Mann G. *A&A*, 2011, 532: A151
- [13] Hudson H S. *SSRv*, 2011, 158: 5
- [14] Rosner R, Tucker W H, Vaiana G S. *ApJ*, 1978, 220: 643
- [15] Antiochos S K, Sturrock P A. *ApJ*, 1978, 220: 1137
- [16] Serio S, Reale F, Jakimiec J, et al. *A&A*, 1991, 241: 197
- [17] Cargill P J, Mariska J T, Antiochos S K. *ApJ*, 1995, 439: 1034
- [18] Klimchuk J A, Patsour Akos A, Cargill P J. *ApJ*, 2008, 682: 1351
- [19] Grigis P C, Benz A O. *A&A*, 2004, 426: 1093
- [20] Liu S, Han F, Fletcher L. *ApJ*, 2010, 709: 58
- [21] Bornmann P L. *ApJ*, 1990, 356: 733
- [22] Garcia H A. *SoPh*, 1994, 154: 275
- [23] Jiang Y W, Liu S, Liu W, et al. *ApJ*, 2006, 638: 1140
- [24] Battaglia M, Fletcher L, Benz A O. *A&A*, 2009, 498: 891
- [25] Wilmot-Smith A L, Pontin D I, Hornig G. *A&A*, 2010, 516: A5
- [26] Liu R, Alexander D. *ApJ*, 2009, 697: 999

Solar Flares with an Exponential Growth of the Emission Measure in the Impulsive Phase Derived from X-ray Observations

HAN Fei-ran^{1,2,3} LIU Si-ming^{1,2}

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT The light curves of solar flares in the impulsive phase are complex in general, which is expected given the complexities of the flare environment in the magnetic field dominant corona. With the GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) observations, we however find that there are a subset of flares, whose impulsive phases are dominated by a period of exponential growth of the emission measure. The flares occurring from January 1999 to December 2002 are analyzed, and the results from the observations made with both GOES 8 and 10 satellites are compared to estimate the instrumental uncertainties. The frequency distribution of the mean temperature during this exponential growth

phase has a normal distribution. Most flares within the 1σ range of this temperature distribution belong to the GOES class B or C with the frequency distribution of the peak flux of the GOES low-energy channel following a log-normal distribution. The frequency distribution of the growth rate, and the duration of the exponential growth phase also follow a log-normal distribution with the duration covering a range from half a minute to about half an hour. As expected, the growth time is correlated with the decay time of the soft X-ray flux. We also find that the growth rate of the emission measure is strongly anti-correlated with the duration of the exponential growth phase, and the mean temperature increases slightly with the increase of the growth rate. The implications of these results on the study of energy release in solar flares are discussed at the end.

Key words acceleration of particles, plasmas, radiation mechanisms: thermal, sun: flares, sun: X-rays