

耀斑日冕硬 X 射线源观测研究*

白伟东^{1,2,3†} 李友平^{1,2} 甘为群^{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 对于足点被日面边缘遮挡住的耀斑的观测研究是诊断日冕硬 X 射线辐射的一个重要方法. 通过统计分析 RHESSI (Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager) 卫星观测到的 71 个此类耀斑硬 X 射线源发现, 前人提出的两类源, 即日冕 X 射线辐射中热辐射与非热辐射源区空间分离较小的源和分离较大的源, 在能谱、成像、光变曲线以及 GOES 持续时间等方面都没有显著的区别, 其中辐射区的面积、耀斑总热能以及 GOES 持续时间与分离距离之间有很好的相关性. 这些结果支持近年来提出的一些耀斑统一模型. 同时也表明 Masuda 耀斑只是一类非常特殊的事件, 不具有日冕硬 X 射线辐射的一般特征.

关键词 太阳: 耀斑, 太阳: 日冕, 太阳: X 射线

中图分类号: P 182; **文献标识码:** A

1 引言

目前的太阳耀斑标准模型认为, 耀斑的能量来源于发生在日冕中的磁重联过程. X 射线和 γ 射线的观测研究表明, 磁重联释放的能量最初有很大一部分被用来加速粒子. 部分被加速的粒子沿着磁力线向下运动, 到达高密度的低层太阳大气, 通过碰撞释放能量加热当地的等离子体. 这些被加热的等离子体通过色球蒸发过程向上运动直至充满整个耀斑环. 在这些模型中, 不断重联的磁力线形成越来越长的磁环. 由于色球蒸发需要一定的时间, 开始时由加速粒子占据的磁环在一段时间之后会被蒸发上来的热等离子体充满. 耀斑加速的电子与环境中的等离子体碰撞通过韧致辐射产生硬 X 射线辐射. 辐射强度与环境中的等离子体密度成正比. 一般情况下日冕密度较小, 只能通过薄靶过程产生较弱的日冕硬 X 射线辐射; 而色球及其之下的太阳大气由于密度增加很快, 电子会通过厚靶过程产生强烈的硬 X 射线辐射. 日冕硬 X 射线辐射强度至少比色球硬 X 射线辐射强度低一个量级. 所以对于动态范围有限的硬 X 射线探测仪器而言, 在硬 X 射线观测上经常看到的就是占据主导地位的色球中的足点辐射. 不过在某些情况下, 日冕密度也会足够高, 以至于可以把加速的电子阻挡在日冕中而形成强烈的日冕硬 X 射线辐射^[1].

2011-05-26 收到原稿, 2011-06-21 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10833007, 11078025) 及 973 项目 (2011CB811402, KJ951-A1-01) 资助

† wdbai@pmo.ac.cn

在这种以及一些类似的情况下,日冕源才会被观测到(例如文献[2-5]).1992年1月13日的M2.0级耀斑是一个著名的例子,即所谓的Masuda耀斑^[2].这个事件产生了3个硬X射线源.除了足点处的两个源外,在软X射线环顶之上约10''处又出现了第3个硬X射线源.其时间演化方式和两个足点源类似.如果以热模型来拟合,其温度可高达203 MK;若以非热模型来处理,其谱指数为 $\gamma_1 = 2.2 \pm 0.6$ (<25 keV); $\gamma_2 = 4.1 \pm 0.2$ (>25 keV).多年来,很多作者^[6-9]都试图建立一个能够解释Masuda耀斑各项特征的自洽的模型.然而并没有出现这样一个能够被普遍接受的模型.这可能是因为Masuda耀斑的环顶硬X射线源和两个足点源并不是由同一批电子产生的^[10].

当耀斑发生在日面边缘之后一定角度时,明亮的耀斑硬X射线足点源会被日面遮挡住.在这种情况下就可以不受仪器动态范围不足的影响而直接观测到日冕硬X射线源.通过这种方法研究日冕源开始于上个世纪60年代末.YOHKOH和RHESSI时代利用这种方法对日冕硬X射线源已进行了进一步的研究^[5,11-15].Tomczak^[11]利用YOHKOH卫星的数据研究了14个部分被日面遮挡的耀斑.这些耀斑的光变曲线由两部分组成:低能的缓变成分和高能的脉冲性成分.在成像上,大部分事件的硬X射线辐射区都有对应的软X射线辐射,两个像的分离一般不超过约5''.但是由于YOHKOH卫星的谱分辨率比较低(只有4个通道),要把非热辐射成分从主要的热辐射成分中分离出来是比较困难的.Krucker等^[13]利用RHESSI卫星的数据分析了2002年2月到2004年8月期间的55个此类事例.同样看到光变曲线中存在的低能缓变成分和高能的快变成分.基于RHESSI卫星较高的能量分辨率^[16],辐射中的热与非热成分可以得到很好的区分.他们的研究表明对于大部分事例热与非热部分之间只有较小的空间分离(约小于5''),只有少数事例显示出较大的分离(约大于5'').但是对于这两类源之间的异同,作者并未做进一步的分析,只是猜测它们可能是不同种类的源.基于这样的研究状况,在本文中我们利用RHESSI卫星的最新数据和它的较高的能量分辨率对这两类源进行了详细的统计分析.

2 数据处理方法

本文共统计分析了71个RHESSI观测到的部分被日面遮挡的耀斑.事件选取标准如下:

1. 耀斑的发生时间在2002年2月12日到2010年12月31日之间.这是由于热与非热成分分离较大的源一般数目较少,只有大量的样本才有可能获得足够多的此类事例,以便进行统计分析.
2. 选取至少在12~25 keV能段有可探测的硬X射线辐射且在这一能段的峰值计数率大于100 counts·s⁻¹的耀斑,以保证足够好的信噪比和可能的非热成分.
3. 耀斑距离日心的距离大于940'',以保证所选择的耀斑是边缘耀斑.这一数据来源于Krucker等^[13]所选择的55个事例中日心距离的最小值.为了防止有所遗漏,我们对于日心距在900''~940''的耀斑也做了检测,结果显示这一日心距上的耀斑都是靠近边缘的日面耀斑,从而证明940''这一最小距离的选取是合适的.
4. 对于选取的耀斑事例通过RHESSI网站上提供的Quicklook方法进行初步筛选,

去掉足点可见的耀斑. 对于较难判断的事例, 则利用 RHESSI 软件成像, 再进行判断.

5. 只选取 GOES 级别在 C 级之上的耀斑.

另外, 对于在谱拟合过程中出现的只能用热函数来拟合的事例, 鉴于我们的研究目的而进行了舍弃. 这样, 我们最终得到了 71 个合乎要求的事例. 这 71 个事例包括了 Krucker 等^[13] 所分析的 55 个事例中的大部分. 去掉的部分包括只能用热函数来拟合的事例、缺少 GOES 数据的事例和峰值计数率不足 ($\text{peak value} < 100 \text{ counts} \cdot \text{s}^{-1}$) 的事例.

在利用 RHESSI 和 OSPEX 软件对所选事例进行能谱拟合、获取所需数据之后, 分别对每个事件的热与非热部分成像, 计算出了热与非热部分分离的距离, 从而对所有事例进行了分类. 之后对两类日面硬 X 射线源的各项参数进行了统计分析. 对于耀斑光子谱的分析我们利用了 OSPEX 中标准的前向拟合方法, 谱拟合的积分时间为 20 s, 选择的函数组合为单温热函数 + 双幂律谱 + 6.7 keV 的线谱 + 8.0 keV 的线谱. 其中固定双幂律谱折点能量以下部分的谱指数为 1.5^[13]. 成像方法选为 Clean. 成像的时间为从非热谱指数最小的时刻到热辐射峰值时刻.

3 结果和分析

在对所有事件进行谱拟合进而确定热与非热的界限之后, 通过成像得到耀斑按照热与非热部分分离距离的分布图 (图 1).

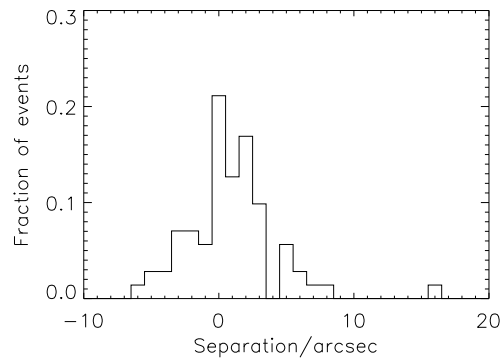


图 1 耀斑按照热辐射与非热辐射分离距离的分布图

Fig.1 Distribution of separation between the thermal source and non-thermal source

从这张耀斑分布图上可以看出, 对于大部分事例而言热辐射和非热辐射之间的分离不超过 $4.5''$ (59 个事例), 只有少数事例 (12 个) 的分离超过了 $4.5''$, 其中分离最大的是 2003 年 11 月 18 日的事件, 其分离约为 $15''$. 图 2 所示为两次事件的源的分离情况. 耀斑分布图上分离距离为正的事例表示非热辐射源在热辐射源之上 (48 个事例), 分离距离为负的事例则表示非热辐射源在热辐射源之下 (23 个事例).

根据这些结果, 在以下的讨论中我们将根据热辐射源和非热辐射源之间的距离是否大于 $4.5''$ 把所有 71 个事例分成两类: 间距小于 $4.5''$ 的事例称为第 1 类源, 间距大于 $4.5''$ 的事例称为第 2 类源. $4.5''$ 的划分只是依据前人的研究结果, 无法确定其中有多少物理

依据. 另外, 在此分类中并没有考虑非热辐射和热辐射的相对高度, 也就是说只要分离距离在 $4.5''$ 之内就归于第 1 类, 大于 $4.5''$ 就归于第 2 类. 或许考虑这个条件的划分会得到更多的信息, 因为非热辐射在热辐射之上的源可能对应于一般所谓的环顶源, 而热辐射在非热辐射之上的源可能对应于 X 点之上的日冕源, 具体的分析已超出本文的范围. 下面具体讨论与本文相关的结果.

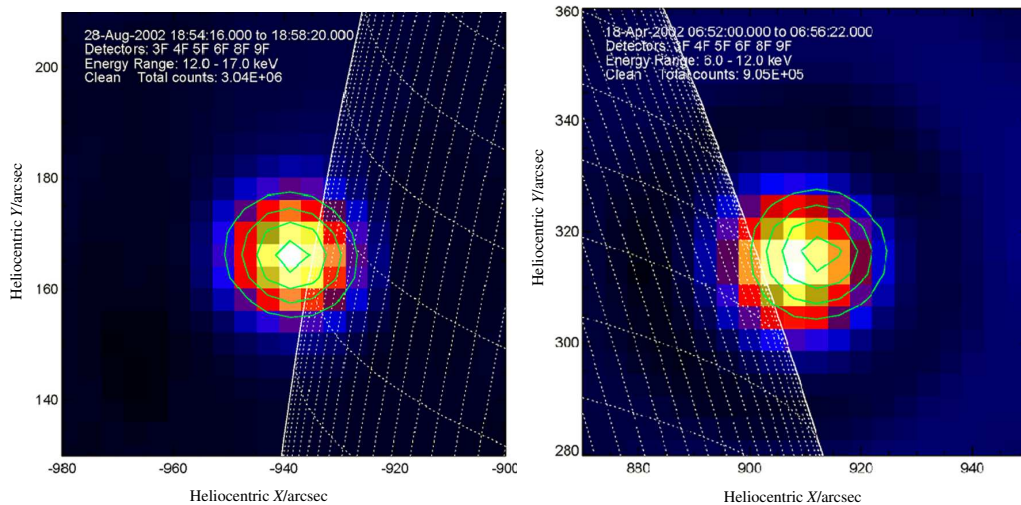


图 2 源的分离情况. 左图的分离为 $0.19''$; 右图的分离为 $4.97''$

Fig. 2 Example of imaging in the thermal range and non-thermal range. Left: event with a $\sim 0.19''$ separation; Right: event with a $\sim 4.97''$ separation

3.1 谱拟合的结果

由于 Tomczak^[11] 和 Krucker 等^[13] 的研究都未对这两类源做详尽的能谱分析, 因此能谱分析将成为本文的一个重要组成部分.

3.1.1 谱指数的比较

每个事件的谱指数为整个耀斑过程中谱指数的最小值 (对应于某个高能峰值), 这样选取是因为这类的极值可能具有某种特征. 谱指数的统计结果显示于图 3 中.

相对于足点硬 X 射线源, 日冕源的谱指数普遍比较软, 主要分布在 $3 \sim 7$ 之间. 这和前人的结果基本一致^[11,13]. 而且对于第 1 类和第 2 类源, 谱指数的分布几乎没有差别. 为了进一步分析这两类源在谱指数上可能存在的差异, 我们求取了谱指数的平均值 (表 1) 并制作了谱指数与分离距离的散点图 (图 4).

第 1 类源的相关系数为 $r=0.11$, 其置信度在 $50\% \sim 80\%$ 之间; 第 2 类源的相关系数为 $r=0.09$, 其置信度小于 50% . 这说明两类源的谱指数和分离距离之间都没有线性相关性. 正如 Tomczak^[11] 所指出的, Masuda 等^[2] 曾经发现的谱指数随分离距离而变硬的趋势在这里并没有出现. 第 1 类源的谱指数的平均值为 (表 1) 5.25 ± 1.03 , 第 2 类源的谱指数的平均值为 4.99 ± 0.71 , 也不存在差别. 所以我们得出结论, 这两类源在谱指数上不存在差异.

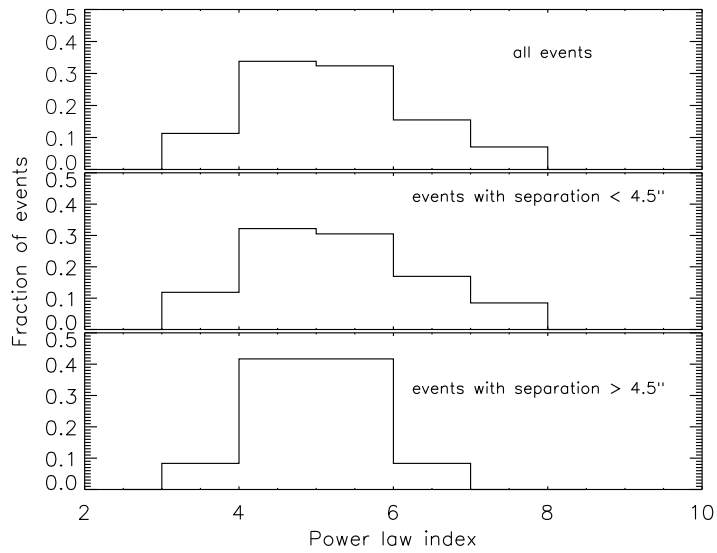


图 3 谱指数的分布图

Fig. 3 Distribution of power law index

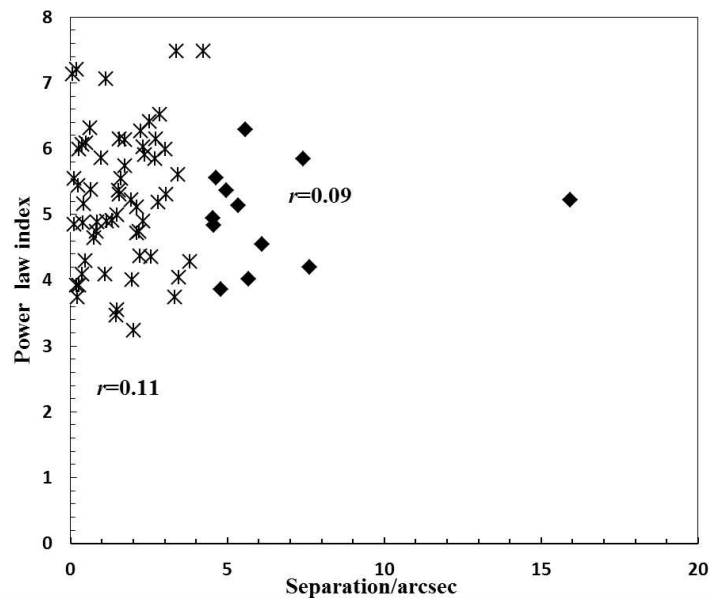


图 4 谱指数与分离距离的散点图. 星号表示第 1 类源, 菱形表示第 2 类源

Fig. 4 Scatter plot of power law index and separation. Asterisks represent the first class events, diamonds represent the second class events

表 1 各参量的平均值

Table 1 Mean values of various parameters

	1st class		2nd class	
	Thermal	Non-thermal	Thermal	Non-thermal
Area(arcsec ²)	530.44	878.37	817.33	2033.33
Density(10 ⁹ cm ⁻³)	13.02 ± 11.16		11.82 ± 8.37	
GOES class(10 ⁻⁶ W/m ⁻²)	1.1		1.3	
GOES duration(min)	25.91		39.92	
Temperature(MK)	21.33 ± 5.28		21.39 ± 5.15	
Break energy(keV)		14.40 ± 3.63		14.77 ± 2.44
Critical energy(keV)		13.80 ± 4.43		14.48 ± 3.60
Photon index		5.25 ± 1.03		4.99 ± 0.71
Thermal energy(10 ²⁹ erg)	4.72 ± 7.11		8.56 ± 14.83	
Non-thermal energy(10 ²⁹ erg)		60.00 ± 96.29		42.25 ± 36.78

3.1.2 折点能量和临界能量的比较

折点能量和临界能量的值也取自谱指数最小时段的值。折点能量是采用双幂律谱拟合时的一个参数，在固定折点能量之下的谱指数为 1.5 之后^[13]，折点能量就相当于通常所谓的低能截止能量，双幂律谱就相当于单幂律谱。临界能量是指热和非热辐射流量相等时对应的能量。把折点能量和临界能量放在一起考虑，是因为它们在各项特征上都比较接近。最突出的是它们的分布图都呈现双峰分布且第 1 类源和第 2 类源都具有双峰结构(图 5)。

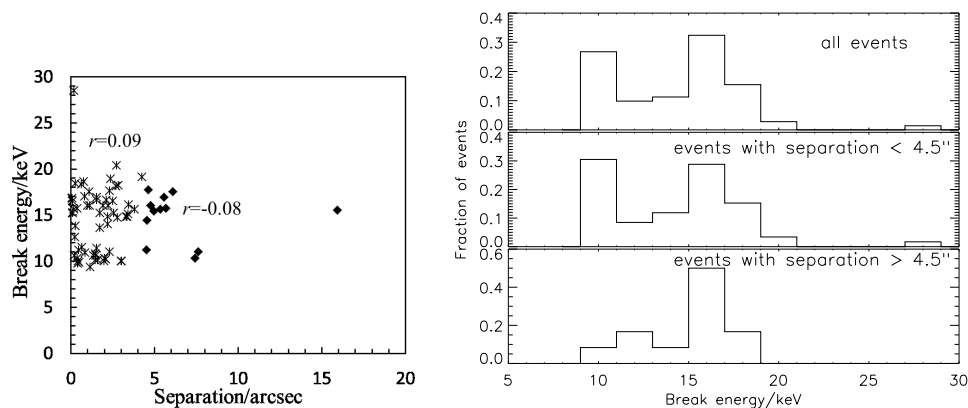


图 5 折点能量的分布图以及折点能量与分离距离的散点图

Fig. 5 Distribution of break energy and scatter plot of break energy and separation

从折点能量的分布图上可以看到两个峰值对应的能量值为 (10,16) keV、(10,16) keV 和 (12,16) keV, 分别对应于全部事件、第 1 类源和第 2 类源。第 2 类源在较低能区域分布的较少一些, 但考虑到这类源只有 12 个, 统计误差可能比较大。这类源的折点能量的平均值(表 1)分别为 (14.40 ± 3.63) keV 和 (14.77 ± 2.44) keV, 可以认为是一样的。两类源的折点能量与分离距离的相关系数分别为 0.09 和 -0.08, 置信度都不足 50%, 从而都没

有线性相关性. 对于临界能量的分析也得到了类似的结果. 其分布图 (图 6) 上两个峰值对应的能量值为 (8,17) keV, (8,16) keV 和 (10,18) keV. 平均值分别为 (13.80 ± 4.43) keV 和 (14.48 ± 3.60) keV. 相关系数分别为 0.13 (置信度在 50% ~ 80% 之间) 和 0.17 (置信度小于 50%), 没有线性相关性. 所以, 可以认为两类源在折点能量和临界能量方面也不存在差异.

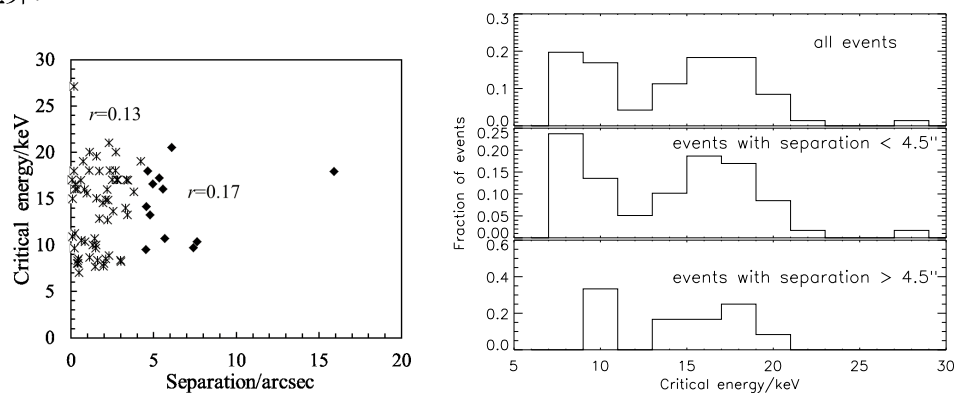


图 6 临界能量的分布图以及临界能量与分离距离的散点图

Fig. 6 Distribution of critical energy and scatter plot of critical energy and separation

3.1.3 温度的比较

此处的温度为耀斑峰值时刻的温度. 因为这时的温度值与耀斑的总热能相关, 具有一定的代表性. 从分布图 (图 7) 上可以看到温度主要分布在 13 ~ 27 MK 之间. 第 1 类源的温度分布稍偏向于高温, 其分布的峰值在 24 MK 附近; 第 2 类源的温度分布稍偏向于低温, 对应的峰值在 18 MK 附近. 但就总体分布而言, 差别不大. 两类源的温度与分离距离的相关系数分别为 -0.02 (置信度小于 50%) 和 -0.14 (置信度小于 50%), 都没有线性相关性. 两类源温度的平均值分别为 (21.33 ± 5.28) MK 和 (21.39 ± 5.15) MK, 可以认为是相同的. 所以这两类源在温度方面差别不大. 对其它时刻, 例如谱指数最硬时刻温度的分析也得到了类似的结果.

3.2 成像的结果

成像的时间较长, 平均值约为 3 min. 辐射流量和源区的面积分别为 50% 等值线以内的流量和面积. 由于热辐射和非热辐射的流量和面积一般不同, 所以下面的讨论将就热辐射和非热辐射部分分别进行.

3.2.1 辐射区面积的比较

首先需要说明的是由于成像时积分时间较长, 一般包括数个高能脉冲所持续的时间. 在这段时间内, 热辐射和非热辐射的位置都可能发生较大的变化 (例如文献 [17-21]). 所以这里得到的面积可能并不对应于耀斑过程中的某些简单事件的面积, 而是不同时段像的某种平均结果.

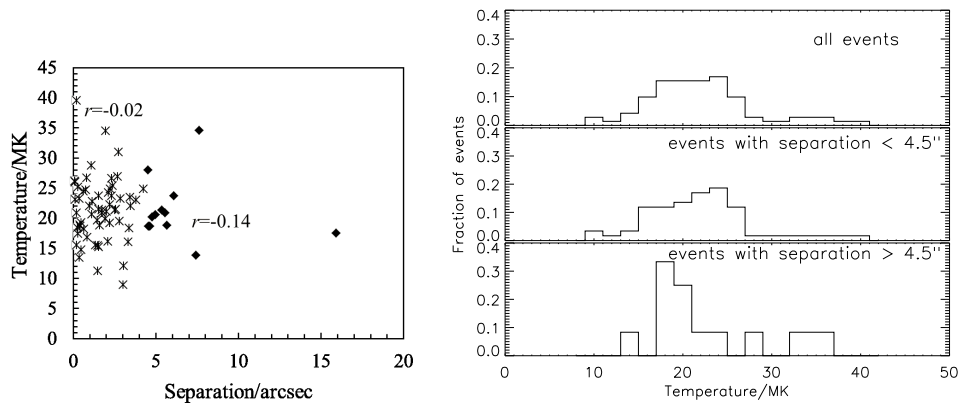


图 7 温度的分布图以及温度与分离距离的散点图

Fig. 7 Temperature distribution and scatter plot of temperature and separation

热辐射的面积主要分布在 $150 \sim 700 \text{ arcsec}^2$ 之间, 分布的峰值在 300 arcsec^2 处. 从分布图 8 上可以看到第 2 类源的面积分布在较大面积区域中的比例相对较高, 其平均值为 817.33 arcsec^2 . 第 1 类源的平均面积为 530.44 arcsec^2 , 小于第 2 类源的平均值. 两类源的热辐射面积与分离距离之间的线性相关性都十分显著, 其相关系数分别为 0.42 和 0.96, 置信度均大于 99.9%.

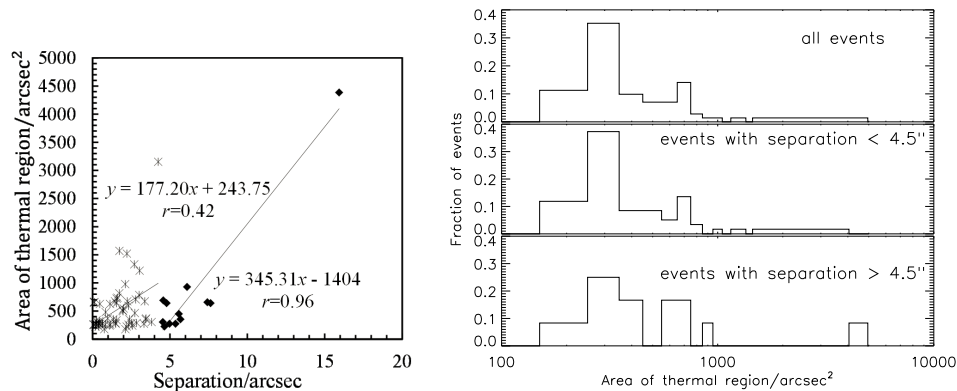


图 8 热辐射区域面积的分布图及其与分离距离的散点图

Fig. 8 Area distribution of thermal sources and scatter plot of area and separation

非热辐射面积也主要分布在 $150 \sim 700 \text{ arcsec}^2$ 之间, 分布的峰值在 300 arcsec^2 处 (图 9). 第 2 类源的面积分布在较大面积区域中的比例也相对较高, 平均值为 2033.33 arcsec^2 . 第 1 类源的平均面积为 878.37 arcsec^2 . 两类源的非热辐射面积与分离距离之间的线性相关性也都十分显著, 其相关系数分别为 0.58 (置信度大于 99.9%) 和 0.79 (置信度在 99.5% ~ 99.8% 之间).

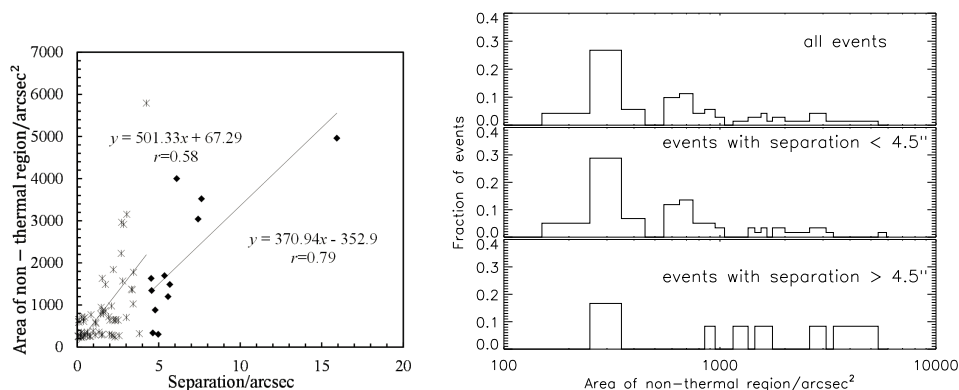


图 9 非热辐射区域面积的分布图及其与分离距离的散点图

Fig. 9 Area distribution of non-thermal sources and scatter plot of area and separation

3.2.2 密度的比较

此处的密度为耀斑峰值时刻热辐射区域等离子体的密度, 是通过公式 $n_e(t) = \sqrt{EM(t)/S(t)^{3/2}}$ 估算得到的, 其中 $EM(t)$ 为发射度, $S(t)$ 为热等离子体的面积.

从分布图上可以看到 (图 10) 日冕区密度分布在约 $1.9 \times 10^9 \sim 6.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 之间, 是典型的日冕区密度值. 第 1 类源和第 2 类源的密度分布相近. 两类源的密度与分离距离的相关系数分别为 -0.07 (置信度小于 50%) 和 -0.29 (置信度在 50% ~ 80% 之间), 都没有线性相关性. 其平均值分别为 $(13.02 \pm 11.16) \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 和 $(11.82 \pm 8.37) \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$, 第 2 类源的密度稍小一些.

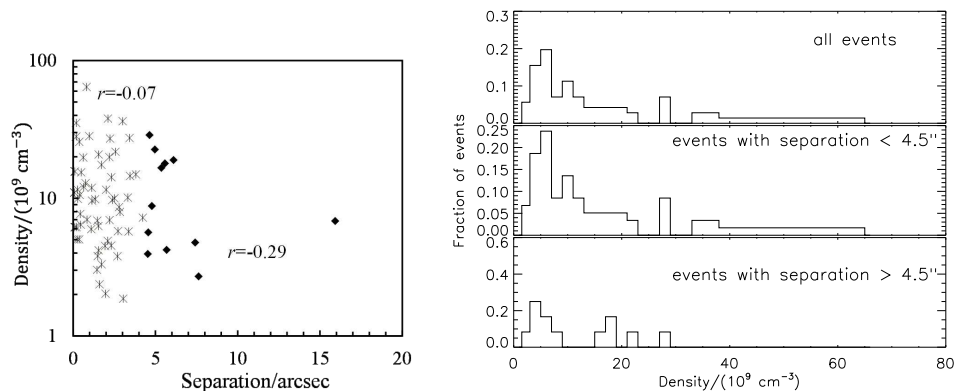


图 10 密度的分布图及其与分离距离的散点图

Fig. 10 Density distribution and scatter plot of density and separation

3.2.3 耀斑热能的比较

在耀斑峰值时刻通过公式 $E_{\text{th}}(t) = 3n_e(t)V(t)kT(t) \simeq 3kT(t)\sqrt{EM(t)S(t)^{3/2}}$ 估算耀

斑过程中的热能, 其中 $V(t)$ 为热等离子体的体积, $T(t)$ 为热等离子体的温度, k 为玻尔兹曼常数. 耀斑的热能分布在 $4.2 \times 10^{28} \sim 5.5 \times 10^{30}$ erg 之间 (图 11). 第 2 类源中有较多的事例分布在热能较高的区域中. 其平均值为 $(8.56 \pm 14.83) \times 10^{29}$ erg, 第 1 类源的平均值为 $(4.72 \pm 7.11) \times 10^{29}$ erg. 两类源的热能与分离距离的相关系数分别为 0.33 和 0.90, 置信度均大于 99%. 可见这两类源的热能和分离距离之间的相关性都十分显著.

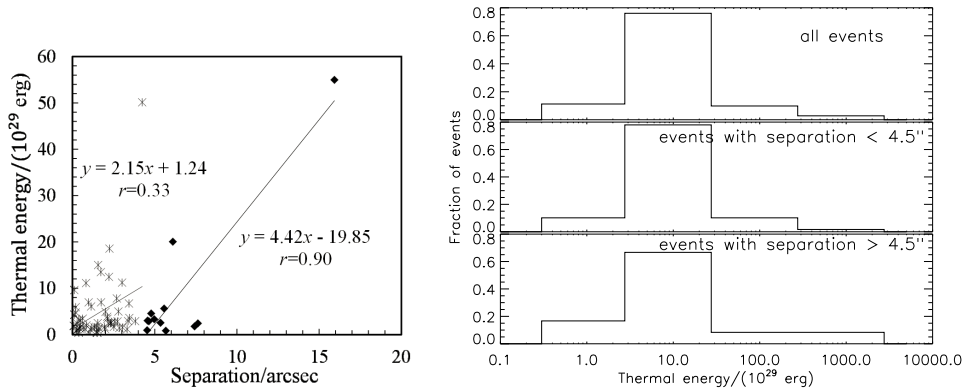


图 11 耀斑热能的分布图及其与分离距离的散点图

Fig. 11 Distribution of total thermal energy and scatter plot of energy and separation

3.2.4 耀斑非热能的比较

耀斑的非热能量是通过薄靶模型估算得到的^[22]. 非热能分布在 $4.3 \times 10^{28} \sim 6.4 \times 10^{31}$ erg 之间 (图 12). 两类源非热能量的分布比较一致, 但在相关性上差别很大. 第 1 类源的非热能与分离距离之间有十分显著的线性相关性, 其相关系数为 0.40, 置信度在 99.8% ~ 99.9% 之间. 第 2 类源的非热能与分离距离之间的相关系数为 0.16, 置信度小于 50%, 两者之间没有线性相关性.

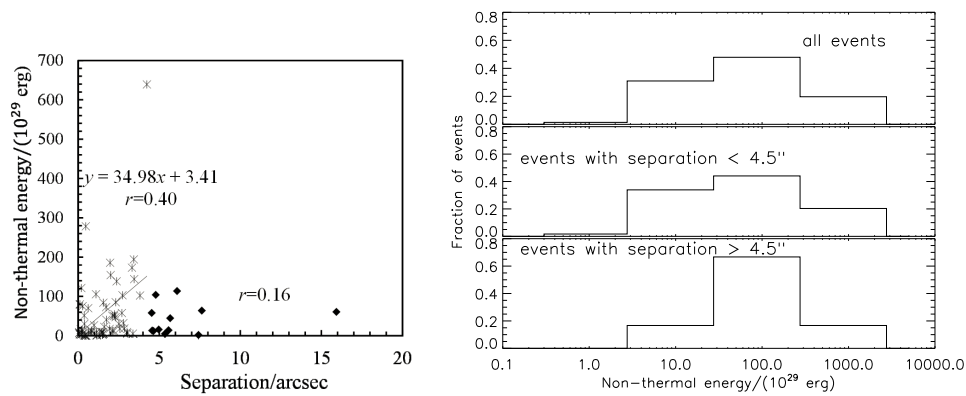


图 12 耀斑非热能的分布图及其与分离距离的散点图

Fig. 12 Distribution of total non-thermal energy and scatter plot of energy and separation

3.3 光变曲线

光变曲线热和非热部分的区分是由谱指数最硬时段的相关数据确定的. 热辐射部分一般在 $3 \sim 15$ keV, 非热辐射部分一般在 18 keV 到最高能量. 热辐射部分光变曲线一般变化比较缓慢, 非热辐射部分的光变曲线则有较多快变的峰值结构. 很多事例表现出高能提前. 对于表现出高能提前的事例, 其非热辐射的峰值结构与 GOES 软 X 射线光变曲线的导数类似, 可能是 Neupert 效应的反映.

3.4 GOES 级别和持续时间的比较

所分析事例的 GOES 级别分布在 C1.0 ~ M6.6 之间 (图 13). 第 1 类源分布的峰值在 C3.0 处, 第 2 类源分布的峰值在 M1.0 处. 其平均值分别为 M1.1 和 M1.3. 第 1 类源的 GOES 级别与分离距离的相关系数为 0.09, 置信度为 50%, 说明没有线性相关性. 第 2 类源的 GOES 级别和分离距离的相关系数为 0.75, 置信度为 99.5%, 两者之间有十分显著的线性相关性.

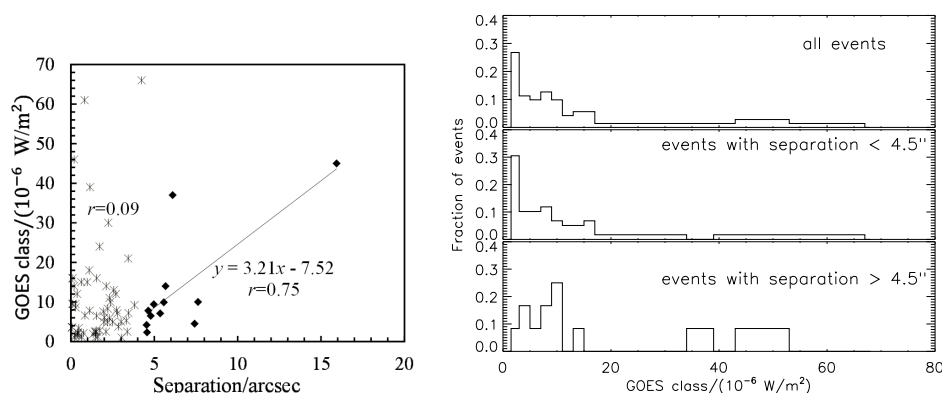


图 13 GOES 级别的分布图及其与分离距离的散点图

Fig. 13 Distribution of GOES class and scatter plot of GOES class and separation

两类源的 GOES 持续时间 (图 14) 分布在 $6 \sim 126$ min 之间. 第 1 类源分布的峰值在 10 min 处, 第 2 类源分布的峰值在 20 min 处. 其平均值分别为 25.91 min 和 39.92 min. 可见, 第 2 类源的持续时间较长. GOES 持续时间与分离距离的相关系数分别为 0.31 (置信度在 98% ~ 99% 之间) 和 0.63 (置信度在 95% ~ 98% 之间), 均有显著的线性相关性.

4 结论和讨论

耀斑硬 X 射线辐射直接关系着耀斑过程中很多重要的问题, 如非热电子加速、传输、能量分配等. 以往对于日冕硬 X 射线源的了解比较少, 而一般认为日冕区域正是耀斑最初能量释放的地方. 为了对日冕硬 X 射线源进行详细的、可信的研究, 我们选取了 71 个部分被日面遮挡的耀斑作为研究对象. 对于文中所述的两类日冕硬 X 射线源, 我们利用 RHESSI 卫星和 GOES 卫星的数据分别从能谱、成像和光变曲线等方面进行了统计和

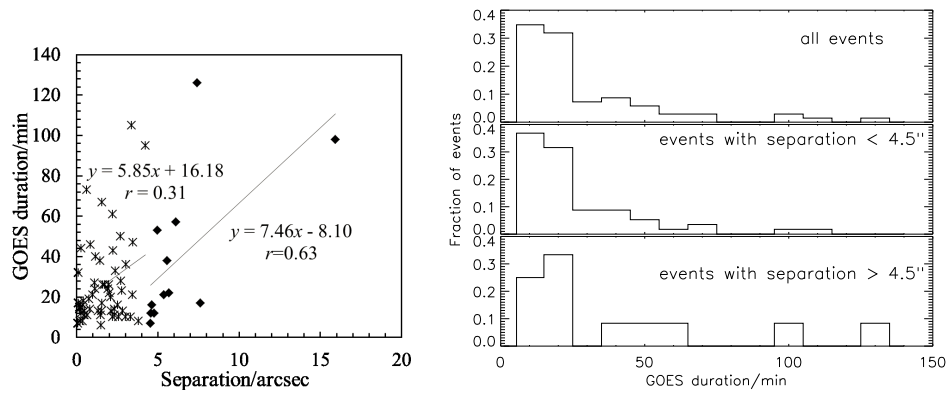


图 14 GOES 持续时间的分布图及其与分离距离的散点图

Fig. 14 Distribution of GOES duration and scatter plot of duration and separation

比较研究. 基本结果如下:

根据谱拟合得到的结果, 我们仔细分析了第 1 类源和第 2 类源在谱指数、折点能量、临界能量和温度等方面的特征. 结果显示两类日冕硬 X 射线源具有相似的特点.

在成像之后, 我们又分析了热和非热辐射区的面积、热等离子体的密度、耀斑的总热能和热电子所携带的非热能. 结果显示, 两类日冕源辐射区的面积和总热能均与分离距离之间有着十分显著的线性相关性, 其回归方程的差异可能是辐射区环境差异的反映. 两类日冕源的密度与分离距离之间都没有线性相关性, 其分布也十分相似, 但第 2 类源密度的平均值较小. 对于耀斑非热能的估算我们采用的是薄靶模型. 这是因为两类日冕源的密度都主要分布在 $2 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 之间, 是典型的日冕区密度值. 根据这样的密度和热辐射区域的面积计算出来的柱密度 N 在 $4 \times 10^{18} \sim 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ 之间. 这样的柱密度能够阻挡的电子的能量为 $E_{\text{stop}} = \sqrt{\frac{N}{1.5 \times 10^{17}}}$ (keV), 即约在 $5 \sim 15 \text{ keV}$ 之间. 这就是说薄靶模型是适用的. 根据薄靶模型得到的结果是, 两类源的非热能的分布是相似的, 但第 1 类源的非热能与分离距离之间有十分显著的线性相关性, 第 2 类源却没有. 这可能是因为非热能估算中的误差较大, 比如计算中所用到的谱指数和光子谱系数都取为谱指数最硬时段的价值, 而不是时间的函数. 另外, 这也可能是辐射区环境差异的反映.

在光变曲线上, 两类源中都有相当多的高能提前事例. 第 2 类源中这类事例稍多, 约占到总事例的 $1/3$. 另外, 第 2 类源的 GOES 持续时间较长.

综合考虑以上结果可以发现两类源在那些能够反映非热电子属性的参量如谱指数、折点能量和临界能量方面是没有差别的; 而在那些与辐射区环境相关的参量如温度、密度、面积、能量、持续时间等方面具有一定的差异. 我们的统计结果显示第 2 类源中的事件往往具有较大的面积、较低的密度和较长的持续时间, 可能对应于通常所谓的双带耀斑; 相应地, 第 1 类源可能对应于致密耀斑. 之前认为这两类耀斑的形成过程和动力学演

化可能是不同的. 近年来一些作者在耀斑的统一模型方面做了一些工作^[6,23], 如 Shibata 等^[6] 提出了等离子体团导致磁重联的耀斑模型, Chen 等^[23] 的磁重联数值模拟等. 等离子体团导致磁重联的耀斑模型认为磁重联率和等离子体团的抛射速度直接相关. 一方面等离子体团的存在会抑制强的入流进入电流片从而降低磁重联率. 另一方面当等离子体团移出电流片时, 就会有大量的等离子体和磁场流进电流片, 从而引发快速磁重联. 而快速磁重联又有利于等离子体团的抛射运动. 这样一种正反馈的存在使得快速磁重联得以维持且最终将等离子体团以近当地 Alfvén 速度抛出. 在这个模型中选择不同的参数值就可以解释包括致密耀斑、双带耀斑、微耀斑和巨型拱状抛射在内的不同种类的耀斑. 我们的研究显示不仅两类源各自的面积、热能和 GOES 持续时间与分离距离之间有显著的或者十分显著的线性相关性, 而且从整体上看, 不加区分时, 所有事件的面积、热能和 GOES 持续时间也与分离距离成显著的或者十分显著的线性相关性. 这和上述耀斑统一模型的预期是一致的. 另外, 如上所述, 两类源在谱指数、折点能量和临界能量方面的特性是相近的, 这也从另一个方面支持了耀斑的统一模型.

日冕硬 X 射线源, 尤其是热辐射与非热辐射源区分离较大的源, 很容易让人想到 Masuda 耀斑. Masuda 耀斑的特征是其具有较大的分离距离 (达 7 000 km) 和较硬的谱指数 ($\gamma_1 = 2.2 \pm 0.6$ (<25 keV); $\gamma_2 = 4.1 \pm 0.2$ (>25 keV)). 我们的分析表明文中所述两类日冕源在谱指数方面没有差异, 都具有典型的日冕非热辐射谱指数值. 第 2 类耀斑中具有最大分离的事件 (2003 年 11 月 18 日) 在 22 ~ 50 keV 能段的谱指数为 5.22; 而那些具有较硬谱指数的事件 (如 2004 年 11 月 23 日和 2005 年 5 月 7 日的事件, 其分离距离分别为 3 400 km 和 4 100 km) 又比 Masuda 耀斑的分离小很多. 所以, 同时具有 Masuda 耀斑大分离、较硬的谱指数特征的耀斑是非常少见的^[2-3,11].

如前所述, 本文对耀斑的分类并没有区分热辐射和非热辐射的相对高度, 或者说并没有把环顶源和 X 点之上的日冕源分开考虑, 这样的处理方法或许给统计结果带来了一定的模糊性, 进一步的工作可以考虑这样的划分, 但这就需要更大的样本库. 在我们的事例中, 可以归入环顶源的事例有 48 个, 可以归入 X 点之上的日冕源的事例有 23 个. 这种数目上的差别可能是由两者在磁场和密度方面的差别导致的 (一般情况下, X 点之上的区域磁场和密度都相对较小, 导致辐射较低而较难被观测到).

在我们的工作中, 与谱拟合相关的数据只取自谱指数最硬时段的价值, 详细的研究可以分析这些参数随时间的变化 (在我们所研究的事例中, 大部分事例的谱指数都有软硬软的变化方式, 只有一个事例其谱呈现软硬硬的变化方式). 考虑到辐射区的面积与源的分离距离有较好的相关性, 再对各事例的实际高度进行考察或许会是很有意义的工作. 另外本文对光变曲线的分析十分简单, 进一步的研究可以详细考察两类源在 Neupert 效应方面的异同.

参 考 文 献

- [1] Veronig A M, Brown J C. ApJ, 2004, 603: L117
- [2] Masuda S, Kosugi T, Hara H, et al. Natur, 1994, 371: 495

- [3] Petrosian V, Donaghy T Q, McTiernan J M. ApJ, 2002, 569: 459
- [4] Battaglia M, Benz A O. A&A, 2006, 456: 751
- [5] Krucker S, Hannah I G, Lin R P. ApJ, 2007, 671: L193
- [6] Shibata K, Masuda S, Shimojo M, et al. ApJ, 1995, 451: L83
- [7] Aschwanden M J, Hudson H, Kosugi T, et al. ApJ, 1996, 464: 985
- [8] Yokoyama T, Shibata K. ApJ, 1998, 494: L113
- [9] Tsuneta S. ApJ, 1996, 456: 840
- [10] Alexander D, Metcalf T R. ApJ, 1997, 489: 442
- [11] Tomczak M. A&A, 2001, 366: 294
- [12] Tomczak M. A&A, 2009, 502: 665
- [13] Krucker S, Lin R P. ApJ, 2008, 673: 1181
- [14] Li Y P, Gan W Q. ApJ, 2005, 629: L137
- [15] Liu W, Petrosian V, Dennis B R, et al. ApJ, 2008, 676: 704
- [16] Lin R P, Dennis B R, Hurford G J, et al. SoPh, 2002, 210: 3
- [17] Sui L, Holman G D. ApJ, 2003, 596: L251
- [18] Sui L, Holman G D, Dennis B R. ApJ, 2004, 612: 546
- [19] Li Y P, Gan W Q. AdSpR, 2007, 39: 1389
- [20] Shen J, Zhou T, Ji H, et al. ApJ, 2008, 686: L37
- [21] Jakimiec J, Tomczak M, Falewicz R, et al. A&A, 1998, 334: 1112
- [22] Asai A, Nakajima H, Shimojo M, et al. ApJ, 2009, 695: 1623
- [23] Chen P F, Fang C, Tang Y H, et al. ApJ, 1999, 513: 516

An Observational Study on Coronal Hard X-ray Sources of Solar Flares

BAI Wei-dong^{1,2,3} LI You-ping^{1,2} GAN Wei-qun^{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 Observations of solar flares partially occulted by the solar limb provide a valuable diagnostics of coronal hard X-ray emissions due to the absence of generally dominant emissions from flare footpoints. In this paper, a statistical survey of 71 partially occulted flares observed by RHESSI (Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager) is presented. We find that two kinds of hard X-ray sources proposed previously are similar in the aspects of their photon spectra, images, light curves and GOES durations, and the scales of the radiation region, the total thermal energy and the GOES durations are correlated to the separations between the thermal source and the non-thermal source. These results are consistent with some of the unified models proposed in recent years, and indicate that the Masuda flare could not be typical in coronal hard X-ray emission.

Key words sun: flares, sun: corona, sun: X-rays