GECAM太阳耀斑高能辐射监测和研究

苏杨^{1*}, 陈维^{1*}, 熊少林^{2*}, 朱玥², 彭文溪², 李友平¹, 甘为群¹

1. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210023

2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

*联系人, 苏杨, E-mail: yang.su@pmo.ac.cn; 陈维, E-mail: w.chen@pmo.ac.cn; 熊少林, E-mail: xiongsl@ihep.ac.cn

收稿日期: 2020-01-16; 接受日期: 2020-06-05; 网络出版日期: 2020-11-11

国家自然科学基金天文联合重点项目(编号: U1631242)、国家自然科学基金重点国际合作研究项目(编号: 11820101002)和中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA15052700)资助

摘要 引力波暴高能电磁对应体全天监测器(Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor, GECAM)双星项目是我国研发的高能天体活动监测系统, 预计在2020年底发射, 主要观测目标是引力波事件电磁对应体和伽马暴等深空天体爆发中的高能辐射。日地空间的高能事件也是GECAM的重要科学目标之一。其双星轨道共轭布局和单星配置25个广视角伽马射线探测器(6 keV–5 MeV)的特性使得GECAM可以几乎全天区、全时段进行监测。这也使其成为理想的太阳耀斑(Solar Flares)爆发观测仪器, 包括太阳X射线暴和伽马射线暴。本文首先介绍了耀斑高能辐射研究的背景和现状, 包括太阳高能物理的主要科学问题、耀斑高能辐射的一般特征以及太阳X射线暴和伽马射线暴的研究情况, 着重讨论了光变和能谱的分析, 并展望了GECAM数据在太阳物理中的重要研究前景。

关键词 太阳, 太阳耀斑, 太阳X射线暴, 太阳伽马射线暴, 空间天气

PACS: 96.60.-j, 96.60.qe, 95.85.-e, 95.85.Nv, 95.85.Pw

1 引言

太阳是一颗普普通通的恒星, 但对人类而言又是一个十分特殊的天体。我们的生存、生活和生产, 地球的天气和气候, 地磁环境和空间天气都受到太阳辐射及其活动的直接或间接影响。在科学上, 太阳是一个天然的等离子体实验室, 更是我们了解其他各类恒星的窗口。

太阳大气中存在极为丰富的活动现象。黑子和

黑子群是可见光波段一种常见的太阳光球层现象。这里是磁场的局部汇集区, 强度可达到几千高斯, 由于温度比周围的宁静光球结构稍低而相对较暗。在紫外、极紫外波段可以看到黑子周围的区域充满了环状日冕结构, 温度高于周围宁静日冕(约1–2 MK, 百万开尔文)。太阳多种活动现象都发生在这附近, 因此该区域被称为太阳活动区。这里我们只讨论其中一类: 太阳爆发活动。这是太阳系内最剧烈的能量急速释放现象, 包含耀斑(Flares, 详见

引用格式: 苏杨, 陈维, 熊少林, 等. GECAM太阳耀斑高能辐射监测和研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129505

Su Y, Chen W, Xiong S L, et al. Monitoring and research of high-energy solar flare emissions with GECAM (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 129505, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0012

综述[1-3])和日冕物质抛射(Coronal Mass Ejections, CMEs, 详见综述[4-7]). 这两种爆发均可能导致行星际空间高能粒子数量的大幅增加, 形成太阳高能粒子事件(Solar Energetic Particles, SEP^[8-10]).

太阳爆发的根源在于磁场自由能积聚到一定程度后, 磁等离子体结构的各种不稳定性触发了磁重联或其他喷发过程, 导致自由磁能的快速释放, 并产生大量高温等离子体、高速抛射的磁云、高能粒子、行星际激波等. 耀斑就是那团被其“点燃”并在太阳大气里持续“燃烧的火堆”(实际是充满高温等离子体的巨大磁环系, 见图 1(a), 温度最高可超过 30 MK^[12,13]), CME则是在爆发中抛离太阳、裹挟着大量等离子体向行星际空间扩散的磁绳结构(图 1(b)), 速度可超过 3000 km/s (如著名的 2017 年 09 月 10 日爆发^[14]), 并可驱动行星际激波, 对粒子、特别是质子, 产生持续加速.

这两种爆发的空间尺度差异巨大, 耀斑的空间大小从角秒级到角分级(每角秒对应太阳表面的尺度约为 720 km), 而 CME 抛射到日地空间后可膨胀到几千角秒以上, 但两者所释放的能量大体相当^[15,16]. 耀斑和抛射可独立发生, 也可以作为同一事件的两个方面同时出现. 统计研究明确表明, 越强烈的爆发, 两者同时出现的概率越高^[17]. 这两种现象之间的关系, 及其与磁场结构的关系是太阳爆发研究

和理解爆发触发过程的一个核心问题. 这也正是我国另一项空间科学任务, 国内首颗太阳专用观测卫星 ASO-S (先进天基太阳天文台, 拟于 2021 年底前后发射^[18])的主要科学目标.

太阳爆发会产生从射电到 X 射线、伽马射线的整个电磁能谱上的辐射增强. 国际上按照 GOES 卫星测量的 1–8 Å 软 X 射线的峰值流量作为标准, 把耀斑强度分为 5 级(A, B, C, M, X), 依次以 10 倍递增. 因为这一波段的辐射主要来自于被耀斑加热的高温等离子体, 其峰值流量大致反映出耀斑释放的能量强弱. 波兰学者建议在 A 级以下增加两个级别: S 和 Q 级, 以反映极宁静时期的日冕软 X 射线流量^[19].

强烈的辐射、海量的高能粒子以及巨大的等离子体磁云是太阳爆发的主要产物. 它们到达地球后会地磁场、电离层产生剧烈扰动, 造成地磁暴等一系列效应^[20], 影响宇航飞行、卫星设备、导航通讯, 甚至地面电网设施, 是灾害性空间天气的主要成因. 因此, 太阳爆发活动不仅是太阳物理的重要研究内容, 也是空间天气学、空间物理、大气科学和行星科学等其他领域的关注目标.

太阳爆发的发生同太阳大气中的磁场(包括日冕中、光球层及光球层下的磁场)密切相关. 黑子的相对数因而也被用作标志太阳活动频繁程度的一

图 1 (a) X7 级太阳耀斑 EUV (131 Å) 图像 (2011-Aug-09, NASA SDO/AIA); (b) 一个典型的暗条爆发形成的 CME (2012-Oct-07 08:05 UT, SOHO 卫星, ESA&NASA); (c) 一个日面边缘耀斑 (~2012-Jul-19 05:21 UT) EUV 和 X 射线图像, 显示出高温耀斑环(温度为几千万开尔文)、软 X 射线环顶源、硬 X 射线足点源和硬 X 射线日冕源(截取自文献[11], 已获 AAS 授权)

Figure 1 (a) The EUV 131 Å image of the 2011-Aug-09 X7 class solar flare (Courtesy of NASA/SDO and the AIA science teams); (b) a CME formed by a filament eruption (2012-Oct-07 08:05 UT, SOHO, ESA&NASA); (c) the EUV and X-ray images of a limb flare (around 2012-Jul-19 05:21 UT), which revealed the flare loops at temperatures of tens of MK, loop-top soft X-ray source, footpoints hard X-ray sources, and coronal HXR source (this panel is taken from ref. [11], with the permission of AAS).

个指标. 其长期的变化显示出太阳活动具有周期性, 约为11年(详见综述[21]). 当前(2020年), 我们已经进入太阳活动第25周(1755年极小年为起点的太阳活动周为第1周).

图 2对比显示了活动极大期和极小期两个不同日期的GOES太阳软X射线流量曲线及白光和软X射线像, 显示了太阳在平静期和活跃期的巨大差异. 2018年7月26日的软X射线总体水平很低, 甚至低于A级, 且较稳定. 而2012年7月6日的软X射线光变显示出不断爆发的耀斑事件, 即使是背景流量也已经超过了C级. KSO(奥地利格拉茨大学Kanzelhöhe天文台^[22])的白光像对比了这两天中黑子数量的多寡, 而日本Hinode卫星的软X射线像则显示了黑子周围活动区辐射的强弱. 需要指出的是, 短期的平静并非只能在太阳活动极小期才能见到, 而短期的活跃也可以发生在太阳活动的衰减期甚至极小期. 如2005年1月和2017年9月的一系列强耀斑, 均发生在太阳活动转进极小期的阶段.

每个活动周太阳的活跃程度并不相同. 以刚

过去的第24周为例, 这是近百年来最弱的一个活动周, 但据美国太阳高能卫星RHESSI^[23]的统计(2002年发射, 2018年退役), 共记录了超过12万个X射线事件, 其中42个具有300 keV以上的伽马射线辐射, 27个有伽马谱线发射. 其事件识别主要使用的自动判断依据是6–12 keV能段的光变信息和X射线源的位置信息等, 但需要注意的是由于南大西洋异常区SAA和地球阴影的影响, 部分大耀斑或长周期耀斑可能会被记录为多个事件(详见<https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3>, <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/data-access/rhessi-data/flare-list/index.html>, 以及统计文章[24]).

X射线和伽马射线是太阳耀斑磁重联和能量释放的直接产物之一, 可用于高能粒子的定量分析和研究, 得到非热粒子的分布、能量、传播等信息, 热等离子体参数, 耀斑环密度等. 因此相关的观测和研究自空间时代以来一直是太阳物理领域的热点之一.

在最近20年间的耀斑高能观测仪器中, GOES

图 2 太阳活动极大期和极小期的白光像、软X射线像及24 h 1–8 Å软X射线流量的对比. 数据分别取自奥地利Kanzelhöhe天文台/Hinode卫星和GOES卫星

Figure 2 This figure displays the solar white light images, soft X-ray images, and 24-h SXR (1–8 Å) fluxes during solar maximum and minimum, respectively. The data are obtained from the Kanzelhöhe observatory in Austria, Hinode, and GOES.

是最常用的X射线流量观测仪器, 但GOES仅有两个宽能区通道, 并不能获得能谱和成像信息(部分GOES卫星具有软X射线成像仪). 在成像谱仪中主要的卫星是日本阳光(Yohkoh)卫星和美国RHESSI卫星(均已退役, 更详细的仪器和观测历史请参阅文献[25, 26]). 尤其是后者, 可提供高时间、空间、能谱分辨率的成像、能谱和像谱数据, 过去十几年来一直是太阳高能观测的主力卫星. 但由于频繁地进入地球阴影和SAA, 导致其并不能进行长时间的连续观测.

而GECAM由配置相同的两颗卫星构成, 它们均采用反地心指向, 运行在共轨共轭轨道上^[27]. 每颗卫星有效载荷包含两种探测器: 伽马射线探测器(GRD)和荷电粒子探测器(CPD). 这里我们仅关注GRD. 每颗卫星共有25个GRD模块, 负责测量6 keV–5 MeV的高能能谱及光变信息. GRD分别指向不同方向, 在立体角上基本均匀分布, 可监测除地球遮挡外的所有天区. 双星位于地球两侧, 联合起来可形成对全天的完整监测.

因此, 前面所提到的观测断续缺失的问题对GECAM来说不再是问题, GECAM将能够获得更加完整的耀斑观测数据, 对太阳物理学家来说, 这无疑是一个好消息. 几乎不间断的观测带来的是近乎完整的耀斑事件列表, 可用于多方面的、更准确的统计研究. 此外, 对伽马暴、引力波事件等深空天体爆发事件探测来说, 则同样需要对太阳耀斑进行监测, 并排除掉太阳高能辐射的影响. 除了GECAM自身的源定位能力^[28], 还需要太阳X射线成像仪器来辅助鉴别太阳事件, 如欧洲主导的Solar Orbiter/STIX, 我国的ASO-S/HXI (Hard X-ray Imager^[29, 30])等.

本文着重介绍耀斑高能辐射光变、能谱的观测和研究, 并讨论GECAM卫星的太阳数据对太阳物理研究可能提供的重要贡献.

2 太阳X射线暴

太阳X射线暴主要来自耀斑中的高温等离子体和高能电子, 因此常被用于耀斑高能物理过程的诊断, 包括磁重联、能量释放、电子的加速和传播、

热和非热轫致辐射等过程. 其主要观测对象是X射线积分流量, X射线像, 能谱(含像谱, 即由不同能段的成像来获取单一X射线源的能谱), X射线源的时间、空间演化, 元素发射线, 及X射线偏振. 主要关注的科学问题包括: 日冕加热难题、耀斑触发和能量释放过程、磁重联过程、粒子加速源区和传输过程、波粒相互作用、能量分配问题、活动区的加热机制、日冕X射线辐射、高能粒子数量问题、高能偏振探测和研究、谱线诊断、元素丰度、高能粒子的射电辐射、太阳高能电子事件等. 这些研究同时也有助于理解恒星耀斑等其他高能现象.

耀斑X射线暴的特征, 无论是从流量曲线、时间演化、能谱形式, 还是耀斑形态方面, 都不尽相同. 首先在耀斑强度上的差异可超过6个数量级, 在持续时间上可从分钟到天的量级变化. 我们选取了RHESSI和GOES观测的6个耀斑事件, 将光变曲线统一按峰值时间展开, 可清晰地显示其在强度、时标、能区、演化上的差别, 见图 3. 由此图可至少得到以下结论: 耀斑的持续时间从分钟量级到10 h以上; 长持续耀斑并非都是强耀斑, 小耀斑(如F2)的持续时间也可以很长; 级别相近耀斑之间的脉冲性差异可以很大(如F1和F2); 小耀斑也可有较强的脉冲性质(F1和F4); 耀斑上升时间大多短于下降时间, 但也有反例(F3)等. 这些不同的光变形式背后很可能代表了不同的物理过程, 按照耀斑的光变特性统计分组后再进行对比分析, 可能更容易理解其背后的物理本质.

尽管差异巨大, 目前普遍认为耀斑中磁能释放的主要形式是通过磁重联(见综述[31, 32]), 其结果是耀斑区域的等离子体被加热到约5 MK到几十MK的高温, 并通过热轫致辐射产生X射线, 能量覆盖软X射线至最高几十keV的硬X射线; 另一方面, 电子(离子)被快速加速到上百keV甚至几十MeV (10 GeV)以上(见综述[33, 34]). 这些粒子中的一部分沿磁环注入到日冕底部, 另一部分则可能逃离太阳, 并在此过程中产生太阳III型射电暴(可参考综述[35]). 前者一路同当地等离子体作用损失能量, 同时加热大气, 产生非热轫致X射线辐射, 能量范围可覆盖整个X射线能区, 甚至伽马射线能区. 由于环足的密度较大, 相互作用更强, 这里产生的硬X射线辐射往往

图 3 RHESSI和GOES观测的6个耀斑事件, 光变曲线统一按GOES峰值时间展开, 以对比显示其在峰值强度、爆发时标、能区、背景、演化上的区别. 小图分别显示了其中4个事例在更高能段的光变(RHESSI数据). 这里使用的峰值时间分别是2013-Sep-02 00:12:36 UT, 2017-Oct-18 10:32:58 UT, 2002-Mar-31 14:53:57 UT, 2002-Feb-26 10:27:24 UT, 2002-Jul-23 00:36:03 UT, 2017-Sep-10 16:06:28 UT

Figure 3 This figure shows six solar flares observed by RHESSI and GOES, whose light curves are aligned by their GOES peak times to highlight their differences in peak flux, burst time scale, energy range, background, and evolution. The small panels show the light curves (from RHESSI data) at higher energies for four flares of the six. The peak times used here are 2013-Sep-02 00:12:36 UT, 2017-Oct-18 10:32:58 UT, 2002-Mar-31 14:53:57 UT, 2002-Feb-26 10:27:24 UT, 2002-Jul-23 00:36:03 UT, 2017-Sep-10 16:06:28 UT, respectively.

占主导地位, 因此, 硬X射线图像多呈现双足点源结构(图 1(c), 需注意这里的部分足点结构位于日面边缘的背后而被遮挡). 但近年来也发现耀斑环之上存在硬X射线源或双X射线源等新的日冕X射线结构, 对理解磁重联和粒子加速有重要意义^[36-40]. 此外, 在耀斑过程中产生的各种等离子体波和湍动现象在加热加速中也起着重要作用.

虽然耀斑中存在多种过程可加热大气, 但高能电子在等离子体加热中起着核心作用. 这一点表现在耀斑光变曲线中, 即耀斑硬X射线/微波暴的光变轮廓(反映非热电子辐射)对时间的积分同软X射线/谱线光变曲线(反映等离子体热辐射)往往一致性较好, 这被称为Neupert效应^[41]. 它表明耀斑等离子

的加热和高能电子是密切相关的. 这一发现也是利用光变曲线特征推断物理过程的典型成果之一.

除了光变信息以外, 能谱及能谱分析也是获取物理参数的重要手段. 图 4(a)显示的是一个强耀斑的典型高能能谱. 利用RHESSI观测的2005年01月20日X7级耀斑峰值能谱数据和详细的能谱分析, 我们在X射线和伽马射线能段分别获得了光子能谱、高能电子、高能离子的详细参数, 然后合并光子能谱制作了此图. 其中流量最强的成分是低能区的热韧致辐射和发射线(绿色线), 硬X射线能段以幂律谱/双幂律谱形式的非热韧致辐射(红色线)为主.

通过能谱分析, 可获得热等离子体和非热高能

图 4 (a) 典型大耀斑的高能能谱图(RHESSI观测的2005年01月20日X7级耀斑). 不同颜色代表能谱中含有的不同分量. (b) 包含大量特征发射线的伽马射线能谱

Figure 4 (a) The high-energy spectrum of a typical large flare (the 2005-Jan-20 X7-class flare observed by RHESSI). The curves in different colors represent the contributions of different components in the spectrum. (b) The gamma-ray energy spectrum with a large number of characteristic emission lines.

电子的详细参数, 结合多波段资料可分析能量成分、加热加速等物理过程. 利用高能量分辨率能谱还可以进一步分析能谱谱形背后的电子传输过程、太阳低层大气对X射线源的反射、靶区等离子体的电离度分层、耀斑环密度、谱线演化、元素丰度等.

另一方面, 基于X射线图像的结构分析和X射线源的像谱分析对理解耀斑磁重联过程可提供关键的信息. 因本文的重心不在成像观测, 这里不再展开叙述.

3 太阳伽马射线暴

当耀斑产生足够的相对论性电子时, 其韧致辐射可延伸到伽马射线能区, 并超过仪器背景, 从而产生耀斑伽马射线暴(通常指高于300 keV的辐射增强). 但耀斑伽马能谱不仅只有这一个成分, 耀斑加速的高能离子(质子、 α 粒子、重原子核)与太阳大气的碰撞作用会导致一系列核反应, 从中释放的伽马射线连续谱及发射线也是耀斑能谱极为重要的成分之一. 通常认为, 能谱中<1 MeV的辐射是电子韧致辐射占优, 而在这能量之上以伽马发射线贡献为主^[25], 这一重要事实将电子和离子的作用区分开来. 耀斑伽马射线的观测对象同X射线基本一致, 主

要是能谱、光变、成像、发射线轮廓. 主要科学问题包括: 耀斑高能离子的成分、能谱和数目, 发射线的产生机制和作用区特性, 长持续伽马耀斑的本质, 行星际激波加速和耀斑加速之间的关系, 正负电子湮灭线的产生和演化, 中子俘获线的产生和演化等.

人类历史上, 伽马射线的第一个观测证据来自于使用太阳轨道天文台(OSO-7)伽马射线光谱仪^[42]对1972年08月04日耀斑的观察, 在太阳光子谱中探测到4条伽马发射线, 这也证实了莫里森对太阳大气中核反应可以产生伽马射线的预测. 图4(b)为典型的太阳伽马能谱, 从能谱形态特性上看, 包含大量的特征发射线和连续谱^[25]. 伽马连续谱不但有高能离子轰击周围太阳大气物质引起的核反应的贡献, 还包括相对论性电子的非热韧致辐射以及更高能的 π 介子衰变; 而伽马发射线主要来自碰撞激发重核的退激发和正反粒子湮灭等过程, 它的强度和轮廓跟高能离子的能谱、成分、角分布等有关(可以参阅文献^[43], 了解最高能量分辨率的耀斑伽马能谱). 譬如能量为511 keV的发射线, 它来自耀斑正负电子对湮灭过程, 其中正电子来自高能离子与太阳大气的核相互作用过程^[44], 产生后与周围电子迅速湮灭, 产生511 keV 发射线, 其强弱能够部分反映耀斑过程中高能离子的参与程度, 其演化

也反映了耀斑过程中高能离子的变化特性; 又如 2.223 MeV 发射线, 即中子俘获线, 它来自高能离子产生的中子在热化后被氢原子俘获的过程 [45], 这条发射线的存在直接标志着耀斑过程中有高能离子的参与, 其演化轮廓能够帮助确定太阳大气中 $^3\text{He}/\text{H}$ 的丰度比.

耀斑非热电子分布的幂律谱谱指数大多在 -3 – -8 之间 [46], 但很多耀斑硬 X 射线谱呈现出双幂律谱特征, 通常以下折谱为主, 即高能段能谱更软(向下弯折). 有很多物理机制可造成这种现象, 如加速机制本身、电子分布的高能低能截止、太阳大气反照效应、反向电流等. 但对于一些强耀斑, 光子能谱在 >300 keV 上还会出现新的拐点, 再次变硬, 这是由于加速质子引导的伽马射线能谱的贡献, 以及电子-电子韧致辐射的作用 [47]. 这些能谱的变化特征甚至还会随着耀斑的演化发生变化. 一些观测显示, X 射线与伽马射线的流量似乎具有很好的对应关系, 这也暗示着高能电子与高能质子之间存在相关性 [48]. GECAM 有望获得完整的硬 X 射线和部分伽马射线能谱, 这将有利于了解高能电子与高能离子的相互关系, 同时也有助于理解粒子加速机制.

耀斑总能量包括热等离子体、加速电子和加速质子、 α 粒子等离子, 以及相关 CME 和 SEP 的能量. 但是耀斑过程中各成分间的能量分配是由来已久的难题, 目前也仅在为数不多的几个强耀斑事件中有所讨论 [49]. 耀斑能量分配的量化研究是一个有待深入开展的非常有意义的工作, 正确的估算将为耀斑能量释放模型提供有效的约束. 但是由于离子能谱、成分和数目的估算比较困难, 这就使得对耀斑总能量的估计缺失了重要的一环. 耀斑高能电子与高能离子的对比研究也给加速机制研究提供了价值. GECAM 对硬 X 射线以及部分伽马射线的观测能够提供丰富的研究样本.

在太阳耀斑期间发射的硬 X 射线和瞬时伽马射线辐射是粒子加速、传输及相互作用过程的直接诊断. 硬 X 射线和伽马射线的光变曲线以及能谱特性对粒子加速时标(电子 <10 ms、离子 <2 s), 电子和离子能谱、数量提供了很强的约束. 图 5 显示了 2005 年 01 月 20 日事件中不同能量光谱的时间演化特性 [50]. 可以看到, 伽马射线相比硬 X 射线的峰值

图 5 2005 年 1 月 20 日耀斑事件中不同能量段光子流量的时间演化. (a) 中子俘获线 (2.223 MeV), (b) 正负电子湮灭线 (0.511 MeV), (c) 200 keV (d) 500 keV 非热韧致辐射, (e) 4–7 MeV 伽马射线辐射. 本图是在文献 [50] 的工作基础上利用新的分析结果重新制作的

Figure 5 The light curves of different energy bands for the 2005-Jan-20 event. (a) Neutron capture line (2.223 MeV), (b) e^+e^- annihilation line (0.511 MeV), (c) 200 keV (d) 500 keV non-thermal bremsstrahlung emission, (e) 4–7 MeV gamma-ray emission. This figure is made for the new analysis of the flare data based on the work of ref. [50].

延迟, 这可能是由于不同粒子在耀斑过程中加速机制的差异造成 [51], 使得电子的加速优于质子. 也可能是由于不同粒子在传输过程受捕获沉降的影响不同造成 [52], 延迟的时标可能还与耀斑环的性质有关; 另外, 来自中子俘获辐射的 2.223 MeV 线相对于 4–7 MeV 伽马退激发线延迟了约 100 s, 这个时标大致对应于核反应中产生的快中子热化所需的时间. GECAM 的高时间分辨率观测将为研究能谱演化特性以及揭示背后物理机制提供很好的观测依据.

Fermi/LAT 在 2008–2016 年间观测到超过 30 个的大于 100 MeV 的长持续高能辐射事件 [53], 这些高

能辐射持续时间从数个小时到20 h不等, 主要由高于500 MeV质子引起的 π 介子衰变产生. 观测还发现, 这些长持续伽马耀斑通常都伴随着快速CME以及硬X射线辐射^[54]. 长时间伽马耀斑背后的物理机制目前尚不清楚, GECAM具有较大的探测面积, 这将为揭示长时间伽马耀斑创造更好的硬X射线观测数据样本.

4 GECAM太阳数据研究前景

GECAM的能量观测范围在6 keV–5 MeV^[27], 很好地覆盖了耀斑高能辐射的主要能区. GECAM将在很大程度上继承和扩展Fermi/GBM^[55]对全天高能辐射的监测功能. 后者同样具有多个方向的探测器, 用于测量大视场中的X射线和伽马射线爆发, 因此同样是太阳耀斑研究的重要工具. 尤其是近年来, 取得了一系列新成果, 如光变的准周期振荡研究^[56–58]、日冕环顶源高能能谱研究^[59]、耀斑初始相高能粒子的证据^[60]等, 为理解耀斑的物理过程和改进相应理论提供了新线索. Fermi太阳数据处理和发布由太阳高能卫星RHESSI团队负责, 其耀斑能谱分析也是通过RHESSI的OSPEX软件包完成(详见Fermi solar).

相比Fermi/GBM, GECAM在多个方面具有优势. 首先, GECAM包括两颗卫星, 且双星的轨道相同、相位相反, 因此具有更好的天区覆盖和更强的源区定位能力, 几乎可以记录所有的太阳爆发. 其次, GECAM具有更多的探测器、较丰富的灵敏面积选择, 有利于探测流量动态范围极大的各类耀斑.

图6显示了根据当前GECAM探测器响应矩阵所计算的2005年01月20日X7级耀斑在多个探测器中产生的不同入射角下的计数能谱, 以及当前利用仿真模拟估计的在轨本底能谱^[61]. 可以看出, 面对X7级强耀斑, 正入射和斜入射情况下, 计数率已超探测器能力, 脉冲堆积效应(Pulse Pile-up)将导致能谱畸变. GECAM将详细标定测试脉冲堆积对能谱畸变的影响, 从而对在轨观测的畸变能谱进行校正还原. 而在侧入射情况下, 大部分的低能光子将被挡住. 利用准确的响应矩阵和X射线辐射物理模

图6 根据X7级耀斑能谱和当前仿真模拟所得到的GECAM响应矩阵估算的GECAM耀斑计数能谱. 彩色曲线分别显示了不同探测器GRD01 (红色)、GRD06 (绿色)、GRD11 (蓝色)在不同入射角下的计数能谱. 黑色虚线显示了仿真模拟的轨道背景

Figure 6 The GECAM counts spectra calculated from the spectral analysis results of the X7 solar flare data, and the GECAM response functions obtained by simulation. The colored curves show the spectra derived for detectors that have different incident angles: red for GRD01, green for GRD06, and blue for GRD11. The black dashed curve shows the estimated in-orbit background in simulations.

型, 仍然可以通过能谱拟合和分析还原入射光子能谱. 另一方面, 这也说明GECAM在探测中小耀斑时将比较灵敏.

因此, GECAM的太阳数据将至少在以下方面做出贡献: (1) 近全时监测太阳耀斑的高能辐射, 获得更完整的事件数据库, 用于统计研究; (2) 提供高时间分辨率的X射线能谱及光变曲线精细结构, 用于研究高温/超高温等离子体和高能电子; (3) 同ASO-S/HXI, Solar Orbiter/STIX等仪器进行联合定标和分析, 用于研究高能辐射的各向异性, 这将是首次实现对太阳硬X射线暴的多视角立体观测; (4) 耀斑伽马射线能谱分析及时间演化, 用于研究太阳高能离子(尤其是高能质子)的特性; (5) 为宇宙深空天体爆发研究排除太阳因素干扰.

这里着重讨论四个可能产生新结果的方向.

4.1 耀斑的统计规律

太阳物理学家常利用统计资料 and 自组织模型分析耀斑相关参数(如峰值流量、持续时间等)的频数分布^[62,63]来研究耀斑的系统性规律、微纳耀斑在日冕加热中的作用、耀斑发生的等待时间分布规律^[64]、超级耀斑发生的可能性等. 这些频数分布形式多为幂律谱(谱指数在-2上下, 根据不同的数据处理方式, 参数的选择而不同), 意味着低能量的小耀斑和微纳耀斑的数量要比大耀斑的数量多得多, 从而可能在日冕加热中起到重要作用. 但也有研究认为耀斑的这种分布并非幂律谱^[65].

在这方面, GECAM数据最大的优势是近全时观测. 相比RHESSI数据, 时间覆盖更完整、更连续; 相比GOES数据, 能量覆盖更广, 能量分辨率更好; 相比Fermi/GBM更灵敏, 时间分辨率更高. 因此, 可提供更完整、更高质量的样本, 这对于统计研究有重要意义. 此外, GECAM还具有荷电粒子探测器(CPD), 可有效排除粒子事件对耀斑X射线数据的干扰.

另一方面, 如图2所示, 由于GOES (1–8 Å)记录的能量范围较低, 受太阳活动背景水平(如活动区的软X射线辐射)的影响较大, 导致在小事件探测上的完整性不够(表现之一为幂律谱在一定参数阈值之下严重偏离幂律谱). 而GECAM的能段更高, 受太阳背景辐射的影响较小, 可实现对更多小事件的有效探测. 这一点也可以从RHESSI的微耀斑研究中得到体现^[66].

4.2 耀斑高能能谱和SEP的联合分析

通过高能能谱分析(主要指基于一定物理模型的正向谱拟合), 可以获知源区等离子和高能粒子的重要物理参数信息, 如温度、发射度、非热电子的分布等. 所使用的拟合函数包括热韧致辐射模型、非热韧致辐射模型等各种物理模型、单/双幂律谱等各种光子能谱模型, 以及仪器校正函数等. 但目前的高能拟合存在一个问题, 即针对仪器计数能谱拟合所得到的源区的光子能谱在一定程度上依赖于模型和参数的选择, 因此结果并不一定是唯一的. 如文献^[67]中图4所展示的, 同一能谱既可以用传统

的单温度热模型加一个幂律形式的非热模型拟合, 也可以用三个不同温度的热模型来拟合. 这个问题由来已久, 原因之一是高能仪器对X射线光子复杂的响应矩阵.

GECAM的探测器较多, 且指向不同, 每一个对太阳入射光来说都是独立的测量. 同时, 它们具有显著不同的响应矩阵. 因此, 利用这个特点, 我们有可能通过同时拟合多个探测器的能谱数据, 来更好地限制光子能谱的形式, 从而获得更准确的结果. 这是目前的太阳高能研究尚未实现的.

另一方面, 更准确的高能能谱分析可以给出更准确的高能电子分布, 从而和SEP高能粒子研究形成前沿交叉. SEP粒子的加速源区, 目前一般认为主要有耀斑加速和CME激波加速^[10], 但实际加速区在哪, 加速过程和行星际空间传播过程究竟如何仍是悬而未决的问题.

对于耀斑磁重联过程加速的粒子, 大致可分为两部分, 分别位于重联两端的出流区. 在某些磁场位型下, 一部分高能电子向下注入到太阳表面, 另一部分则可以沿着开放磁力线或者跟随爆发磁绳逃逸到行星际空间. 前者可通过其辐射出的高能能谱进行分析, 而后者则有机会被局地探测仪器直接探测到, 形成SEP事件. 因此, 高能能谱研究往往和SEP电子分布研究组合^[68], 从两个方面研究同一加速过程. 预期GECAM在此方面也将同一些新仪器一起发挥重要作用, 如2018年发射的帕克太阳探针Parker Solar Probe (PSP)和2020年发射的环日轨道器Solar Orbiter.

4.3 GECAM与HXI, STIX的多视角联合观测

非热电子的角分布、传输过程、辐射过程等很可能都是各向异性的^[69], 因此, 在不同视角所看到的能谱形状及成像也不相同^[70]. 但截至目前, 我们的观测主要是在地球单一视角的观测. 由X射线能谱向电子分布的实际计算中(如OSPEX能谱分析软件中广泛使用的厚靶韧致辐射模型)也基本没有考虑各向异性的效应, 而是使用了各种近似和平均, 这主要是受观测所限.

但随着今年Solar Orbiter/STIX的发射, 这一情

况将发生改变, 它将第一次在非地球视角测量太阳X射线暴的能谱及成像. 而地球视角的X射线数据将主要由GECAM(能谱)、ASO-S/HXI(图像和能谱)两颗中国卫星和印度首颗太阳观测卫星Aditya-L1(能谱)等提供.

这将首次实现在硬X射线能段对太阳耀斑的多视角立体观测, 对了解高能电子的角分布、传输和辐射, 加速区和传输区的物理性质, 推动相关理论发展具有重要意义^[71].

新的联合观测也对数据分析提出了更高的要求: 一是多仪器之间精确的交叉定标, 二是要求我们发展新的分析软件, 使其能够处理多仪器/多探测器数据, 并利用同一理论模型(可以是热韧致辐射模型、非热韧致模型或多个模型的组合)同时拟合带有不同响应矩阵的多个方位角的出射能谱. 这一功能是目前通用能谱分析软件OSPEX所不能提供的.

4.4 CME的高能辐射

CME有没有高能辐射? 这个问题目前没有明确答案, 甚至还没有详细的、针对性的分析研究. 至少在高能成像方面尚没有合适的仪器对行星际空间中的CME (及其推动的激波)进行观测. 按照当前的理论和理解, CME中的主体是磁通量绳, 且在耀斑磁重联中可继续累积, 应存在相当数量的热等离子体. 在部分CME的初始爆发过程中我们已经观测到千万度级的热通道(Hot Channel^[72, 73]), 但其在行星际传播过程中的演化仍是未知. 另一方面, 磁绳中由重联生成的新通量内应存在耀斑加速的高能粒子, CME所驱动的行星际激波, 亦能长时间加速粒子. 因此, CME中应具有一定程度的热和非热属性的高能辐射. 但由于密度较低、范围较广, 预期该辐射的

强度也较弱. 这可能是目前还没有观测到CME中高能粒子辐射的原因之一.

GECAM虽然不进行成像观测, 但具有较好的定位能力^[28]和较大的灵敏面积, 在耀斑脉冲相结束后, 可根据定位区分来自耀斑主体和CME主体的高能辐射, 有望对理解SEP粒子的来源问题和热通道的本质做出重要贡献.

5 讨论与总结

GECAM双星项目的首要目标是观测遥远的宇宙天体爆发, 但来自日地系统的高能辐射也是GECAM的重要科学目标. 为了测量流量强且动态范围极大的太阳爆发, GECAM采取了一系列措施, 如尽量减小探测器死时间(Dead Time, 指探测器处理入射伽马射线单个事例所耗费的时间, 在这段时间内探测器无法接收处理新的事例)、提高数据传输带宽、探测器探测阈值可调、标定并校正脉冲堆积造成的能谱畸变等. 每颗GECAM卫星采用多达25个伽马射线探测器的半球面配置, 提供了丰富的灵敏面积选择, 满足了对大中小耀斑的观测要求. 此外, 每颗卫星配备的8个荷电粒子探测器可联合伽马射线探测器鉴别太阳耀斑与电子或离子事件. 另一方面, 有限的能谱分辨率(14% @ 59.5 keV, 5% @ 511 keV, 同HXI相近但低于RHESSI的高纯锗探测器), 和伽马射线能段相对较低的探测效率, 可能会给太阳高能数据处理和详细的能谱分析带来一定的挑战.

综上所述, GECAM具有较低的在轨本底、较大的灵敏面积、几乎不间断的观测能力、良好的爆发源定位能力, 有望为国际太阳物理界提供一个几乎完整的耀斑高能能谱数据库, 可同时为深空高能天体研究和太阳爆发研究做出重要的原创贡献.

参考文献

- 1 Fletcher L, Dennis B R, Hudson H S, et al. An observational overview of solar flares. *Space Sci Rev*, 2011, 159: 19–106
- 2 Benz A O. Flare observations. *Living Rev Sol Phys*, 2008, 5: 1
- 3 Hudson H S. Global properties of solar flares. *Space Sci Rev*, 2011, 158: 5–41
- 4 Forbes T G, Linker J A, Chen J, et al. CME theory and models. *Space Sci Rev*, 2006, 123: 251–302
- 5 Chen P F. Coronal mass ejections: Models and their observational basis. *Living Rev Sol Phys*, 2011, 8: 1

- 6 Cheng X, Guo Y, Ding M D. Origin and structures of solar eruptions I: Magnetic flux rope. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60: 1383–1407
- 7 Guo Y, Cheng X, Ding M D. Origin and structures of solar eruptions II: Magnetic modeling. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60: 1408–1439
- 8 Reames D V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Sci Rev*, 1999, 90: 413–491
- 9 Wang L, Lin R P, Krucker S, et al. A statistical study of solar electron events over one solar cycle. *Astrophys J*, 2012, 759: 69
- 10 Petrosian V. Particle acceleration in solar flares and associated CME shocks. *Astrophys J*, 2016, 830: 28
- 11 Krucker S, Battaglia M. Particle densities within the acceleration region of a solar flare. *Astrophys J*, 2014, 780: 107
- 12 Lin R P, Schwartz R A, Pelling R M, et al. A new component of hard X-rays in solar flares. *Astrophys J*, 1981, 251: L109–L114
- 13 Caspi A, Lin R P. RHESSI line and continuum observations of super-hot flare plasma. *Astrophys J*, 2010, 725: L161–L166
- 14 Gopalswamy N, Yashiro S, Mäkelä P, et al. Extreme kinematics of the 2017 September 10 solar eruption and the spectral characteristics of the associated energetic particles. *Astrophys J*, 2018, 863: L39
- 15 Aschwanden M J. Global energetics of solar flares. IV. Coronal mass ejection energetics. *Astrophys J*, 2016, 831: 105
- 16 Feng L, Wiegmann T, Su Y, et al. Magnetic energy partition between the coronal mass ejection and flare from AR 11283. *Astrophys J*, 2013, 765: 37
- 17 Yashiro S, Akiyama S, Gopalswamy N, et al. Different power-law indices in the frequency distributions of flares with and without coronal mass ejections. *Astrophys J*, 2006, 650: L143–L146
- 18 Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. Advanced space-based solar observatory (ASO-S): An overview. *Res Astron Astrophys*, 2019, 19: 156
- 19 Gryciuk M, Siarkowski M, Sylwester J, et al. Flare characteristics from X-ray light curves. *Sol Phys*, 2017, 292: 77
- 20 Wang J X, Ji H S. Recent advances in solar storm studies in China (in Chinese). *Sci Sin-Terrae*, 2013, 43: 883–911 [汪景琇, 季海生. 空间天气驱动源——太阳风暴研究. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 883–911]
- 21 Hathaway D H. The solar cycle. *Living Rev Sol Phys*, 2015, 12: 4
- 22 Pötzi W, Veronig A M, Temmer M, et al. 70 years of sunspot observations at the Kanzelhöhe observatory: Systematic study of parameters affecting the derivation of the relative sunspot number. *Sol Phys*, 2016, 291: 3103–3122
- 23 Lin R P, Dennis B R, Hurford G J, et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI). *Sol Phys*, 2002, 210: 3–32
- 24 Abdel-Sattar W, Mawad R, Moussas X. Study of solar flares' latitudinal distribution during the solar period 2002–2017: GOES and RHESSI data comparison. *Adv Space Res*, 2018, 62: 2701–2707
- 25 Gan W Q, Wang D Y. High Energy Solar Physics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002 [甘为群, 王德焯. 太阳高能物理. 北京: 科学出版社, 2002]
- 26 Gan W Q, Huang Y, Yan Y H. The past and future of space solar observations (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42: 1274–1281 [甘为群, 黄宇, 颜毅华. 太阳空间探测的过去与未来. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 1274–1281]
- 27 Li X Q, Wen X Y, An Z H, et al. The GECAM and its payload (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 129508 [李新乔, 文向阳, 安正华, 等. GECAM卫星有效载荷介绍. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129508]
- 28 Liao J-Y, Luo Q, Zhu Y, et al. The localization method of GECAM and simulation analysis (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 129510 [廖进元, 罗琦, 朱玥, 等. GECAM定位方法及模拟分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129510]
- 29 Zhang Z, Chen D Y, Wu J, et al. Hard X-ray imager (HXI) onboard the ASO-S mission. *Res Astron Astrophys*, 2019, 19: 160
- 30 Su Y, Liu W, Li Y P, et al. Simulations and software development for the Hard X-ray imager onboard ASO-S. *Res Astron Astrophys*, 2019, 19: 163
- 31 Priest E R, Forbes T G. The magnetic nature of solar flares. *Astron Astrophys Rev*, 2002, 10: 313–377
- 32 Shibata K, Magara T. Solar flares: Magnetohydrodynamic processes. *Living Rev Sol Phys*, 2011, 8: 6
- 33 Holman G D, Aschwanden M J, Aurass H, et al. Implications of X-ray observations for electron acceleration and propagation in solar flares. *Space Sci Rev*, 2011, 159: 107–166
- 34 Raymond J C, Krucker S, Lin R P, et al. Observational aspects of particle acceleration in large solar flares. *Space Sci Rev*, 2012, 173: 197–221
- 35 Reid H A S, Ratcliffe H. A review of solar type III radio bursts. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 773–804
- 36 Masuda S, Kosugi T, Hara H, et al. A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection. *Nature*, 1994, 371: 495–497
- 37 Sui L, Holman G D. Evidence for the formation of a large-scale current sheet in a solar flare. *Astrophys J*, 2003, 596: L251–L254
- 38 Liu W, Petrosian V, Dennis B R, et al. Double coronal hard and soft X-Ray source observed by RHESSI: Evidence for magnetic reconnection and particle acceleration in solar flares. *Astrophys J*, 2008, 676: 704–716
- 39 Su Y, Veronig A M, Holman G D, et al. Imaging coronal magnetic-field reconnection in a solar flare. *Nat Phys*, 2013, 9: 489–493
- 40 Chen B, Bastian T S, Shen C, et al. Particle acceleration by a solar flare termination shock. *Science*, 2015, 350: 1238–1242

- 41 Neupert W M. Comparison of solar X-ray line emission with microwave emission during flares. *Astrophys J*, 1968, 153: L59
- 42 Chupp E L, Forrest D J, Higbie P R, et al. Solar gamma ray lines observed during the solar activity of August 2 to August 11, 1972. *Nature*, 1973, 241: 333–335
- 43 Smith D M, Share G H, Murphy R J, et al. High-resolution spectroscopy of gamma-ray lines from the X-class solar flare of 2002 July 23. *Astrophys J*, 2003, 595: L81–L84
- 44 Share G H, Murphy R J, Skibo J G, et al. High-resolution observation of the solar positron-electron annihilation line. *Astrophys J*, 2003, 595: L85–L88
- 45 Hua X M, Kozlovsky B, Lingenfelter R E, et al. Angular and energy-dependent neutron emission from solar flare magnetic loops. *Astrophys J Suppl S*, 2002, 140: 563–579
- 46 Oka M, Birn J, Battaglia M, et al. Electron power-law spectra in solar and space plasmas. *Space Sci Rev*, 2018, 214: 82
- 47 Kontar E P, Emslie A G, Massone A M, et al. Electron-electron bremsstrahlung emission and the inference of electron flux spectra in solar flares. *Astrophys J*, 2007, 670: 857–861
- 48 Shih A Y, Lin R P, Smith D M. RHESSI Observations of the proportional acceleration of relativistic >0.3 MeV electrons and >30 MeV protons in solar flares. *Astrophys J*, 2009, 698: L152–L157
- 49 Emslie A G, Dennis B R, Shih A Y, et al. Global energetics of thirty-eight large solar eruptive events. *Astrophys J*, 2012, 759: 71–88
- 50 Chen W, Gan W Q. The effect of Compton scattering on gamma-ray spectra of the 2005 January 20 flare. *Res Astron Astrophys*, 2012, 12: 1439–1450
- 51 Lin R P, Krucker S, Hurford G J, et al. RHESSI observations of particle acceleration and energy release in an intense solar gamma-ray line flare. *Astrophys J*, 2003, 595: L69–L76
- 52 Dauphin C, Vilmer N, Anastasiadis A. Particle acceleration and radiation in flaring complex solar active regions modeled by cellular automata. *Astron Astrophys*, 2007, 468: 273–288
- 53 Share G H, Murphy R J, White S M, et al. Characteristics of late-phase >100 MeV gamma-ray emission in solar eruptive events. *Astrophys J*, 2018, 869: 182–236
- 54 de Nolfo G A, Bruno A, Ryan J M, et al. Comparing long-duration gamma-ray flares and high-energy solar energetic particles. *Astrophys J*, 2019, 879: 90–106
- 55 Meegan C, Lichti G, Bhat P N, et al. The Fermi gamma-ray burst monitor. *Astrophys J*, 2009, 702: 791–804
- 56 Gruber D, Lachowicz P, Bissaldi E, et al. Quasi-periodic pulsations in solar flares: New clues from the Fermi gamma-ray burst monitor. *Astron Astrophys*, 2011, 533: A61
- 57 Inglis A R, Ireland J, Dennis B R, et al. A large-scale search for evidence of quasi-periodic pulsations in solar flares. *Astrophys J*, 2016, 833: 284
- 58 Ning Z. One-minute quasi-periodic pulsations seen in a solar flare. *Sol Phys*, 2017, 292: 11
- 59 Petrosian V. Implications of a loop-top origin for microwave, hard X-ray, and low-energy gamma-ray emission from behind-the-limb flares. *Astrophys J*, 2018, 865: 99
- 60 Hernandez-Perez A, Su Y, Thalmann J, et al. A hot cusp-shaped confined solar flare. *Astrophys J*, 2019, 887: L28
- 61 Guo D Y, Peng W X, Zhu Y, et al. Energy response and in-flight background simulation for GECAM (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 129509 [郭东亚, 彭文溪, 朱玥, 等. GECAM能量响应及在轨本底模拟. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129509]
- 62 Aschwanden M J, Crosby N B, Dimitropoulou M, et al. 25 years of self-organized criticality: Solar and astrophysics. *Space Sci Rev*, 2016, 198: 47–166
- 63 Li Y P, Feng L, Zhang P, et al. On the power-law distributions of X-ray fluxes from solar flares observed with GOES. *Res Astron Astrophys*, 2016, 16: 161
- 64 Li C, Zhong S J, Xu Z G, et al. Waiting time distributions of solar and stellar flares: Poisson process or with memory? *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2018, 479: L139–L142
- 65 Verbeeck C, Kraaikamp E, Ryan D F, et al. Solar flare distributions: Lognormal instead of power law? *Astrophys J*, 2019, 884: 50
- 66 Hannah I G, Hudson H S, Battaglia M, et al. Microflares and the statistics of X-ray flares. *Space Sci Rev*, 2011, 159: 263–300
- 67 Krucker S, Lin R P. Hard X-ray emissions from partially occulted solar flares. *Astrophys J*, 2008, 673: 1181–1187
- 68 Krucker S, Kontar E P, Christe S, et al. Solar flare electron spectra at the Sun and near the Earth. *Astrophys J*, 2007, 663: L109–L112
- 69 Brown J C. The directivity and polarisation of thick target X-ray bremsstrahlung from solar flares. *Sol Phys*, 1972, 26: 441–459
- 70 Casadei D, Jeffrey N L S, Kontar E P. Measuring X-ray anisotropy in solar flares. Prospective stereoscopic capabilities of STIX and MiSolFA. *Astron Astrophys*, 2017, 606: A2
- 71 Krucker S, Hurford G J, Su Y, et al. Joint hard X-ray observations with ASO-S/HXI and SO/STIX. *Res Astron Astrophys*, 2019, 19: 167

- 72 Zhang J, Cheng X, Ding M. Observation of an evolving magnetic flux rope before and during a solar eruption. *Nat Commun*, 2012, 3: 747
73 Cheng X, Zhang J, Ding M D, et al. The driver of coronal mass ejections in the low corona: A flux rope. *Astrophys J*, 2013, 763: 43

Monitoring and research of high-energy solar flare emissions with GECAM

SU Yang^{1*}, CHEN Wei^{1*}, XIONG ShaoLin^{2*}, ZHU Yue², PENG WenXi²,
LI YouPing¹ & GAN WeiQun¹

¹*Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China;*

²*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

The dual-satellite GECAM (Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor) project was developed by China for monitoring high-energy astrophysical phenomena. The expected launch date of GECAM is the end of 2020. The main scientific objectives are to observe high-energy emissions from gravitational wave events, gamma-ray bursts, and other explosive energy releases in deep space. Among the most important objectives is monitoring the high-energy events in the solar-terrestrial system. GECAM has a conjugated dual-satellite configuration, with 25 wide-angle gamma-ray detectors (6 keV–5 MeV) installed on each platform. With this configuration, GECAM can perform nearly all-sky and full-time observations, and is ideally suited to the monitoring of X-ray and gamma-ray bursts in solar flares. This paper first introduces the background and current status of research on high-energy flare emissions, including the major scientific questions in high-energy solar physics, general features of high-energy flare emissions, as well as research on solar X-ray bursts and Gamma-ray bursts. We focus on analysis of light curves and spectra, and also discuss the important research prospects of GECAM solar data in solar physics.

Sun, solar flares, solar X-ray bursts, solar gamma-ray bursts, space weather

PACS: 96.60.-j, 96.60.qe, 95.85.-e, 95.85.Nv, 95.85.Pw

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0012](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0012)