由THEMIS ESA和SST粒子探测器首次探测到强伽马射线暴GRB221009A于2022年10月9日

O.V. Agapitov[1,2], M. Balikhin[3], A. J. Hull[2], Y.Hobara[4,5,6], V. Angelopoulos[7], F.S. Mozer[2]

摘要

我们介绍了对2022年10月9日发生的强伽马射线暴 GRB 221009A 的影响进行研究的首批结果。该事件被美国国家航空航天局 THEMIS 任务的四艘航天器搭载的电子和质子探测器意外记录下来。长持续时间伽马射线暴是强烈的宇宙爆炸，标志着大质量恒星的死亡。其中，GRB 221009A 迄今为止是观测到的最明亮的暴发，这归因于其巨大的能量（$E_{\gamma\,\mathrm{iso}} \approx 10^{55}$ erg）和较近的距离（红移为 z≈0.1505）。于2008年发射的 THEMIS 任务旨在研究地球磁层和太阳风中的等离子体过程。绕月球运行的两颗内磁层 THEMIS 探测器 THA 和 THE，以及两颗外部探测器（2010年后更名为 ARTEMIS）THB 和 THC 所测得的粒子通量数据，以每秒4次（最高可达8次）的高时间分辨率捕捉到了 GRB 221009A 的动态变化。这使我们能够解析伽马射线暴的精细结构，并确定两个主要暴发中尖峰结构的时间尺度，从而补充了伽马射线空间望远镜和探测器的观测结果。

引言

GRB 221009A 是一次明亮且持续时间很长的伽马射线暴（GRB），最初由 Swift卫星搭载的爆发警报望远镜（BAT）探测到；一小时后，费米伽马射线空间望远镜（FGST）上的伽马射线暴监测器（GBM）也探测到了它（Dichiara et al. 2022）（Veres et al., 2022; Bissardi et al. 2022; Lesage et al. 2022; Pilera et al. 2022）。其他空间观测台也观测到了它，包括 Swift（Dichiara et al. 2022）、AGILE（Piano et al. 2022; Ursi et al. 2022）、INTEGRAL（Gotz et al. 2022）、太阳轨道器（Xiao et al. 2022）、SRG（Lapshov et al. 2022）、Konus（Frederiks et al. 2022, 2023）、GRBAlpha（Ripa et al. 2022）和 STPSat- 6（Mitchell et al. 2022）；SATech-01 上的高能爆发搜寻器（HEBS）也观测到了它（Liu et al. 2022）。地面观测台高海拔宇宙线观测站（LHAASO）探测到了显著的甚高能特征（Huang et al. 2022）。GBM 的光变曲线显示，13:16:59 UTC 出现了一个持续 ~10 秒的初始脉冲，随后在触发时刻约 ~180 秒后出现一次异常明亮的爆发，持续至少 100 秒（Veres et al., 2022）。这次余辉爆发比此前观测到的所有其他伽马射线暴都更明亮（Sahu et al., 2023）。高海拔宇宙线观测站（LHAASO）利用水切伦科夫探测器阵列（WCDA）和面积达平方公里的大型簇射阵列（KM2A），在触发后 2000 秒内观测到能量范围为 500 GeV–18 TeV 的 5000 多个甚高能（VHE）光子，使其成为迄今观测到的来自伽马射线暴的能量最高的光子（Huang et al. 2022）。这次事件持续时间极长且强度极大，导致地球全球电离层（昼夜两侧）出现突发扰动——这是一个结果

[1] 通讯作者 agapitov@ssl.berkeley.edu[2] 加州大学伯克利分校空间科学实验室，CA 94720[3] 谢菲尔德大学，英国谢菲尔德[4] 电气通信大学（UEC）信息与工程研究生院，日本东京调布市 1828585[5] UEC 空间科学与无线电工程中心，日本东京调布市 1828585[6]实现可持续社会研究中心，UEC，日本东京调布市调布之丘 1-5-1，1828585[7] 加州大学洛杉矶分校，美国加利福尼亚州洛杉矶

的增强X 射线和γ伽马射线辐射导致电离增强（Hayes and Gallagher, 2022; Pal et al., 2023），这可从地球电离层 D 区甚低频/低频（VLF/LF）次电离层信号的动态变化中观测到（~60–100 km）。对这次暴的光学观测（其位置约为赤经 RA = 288.282，赤纬 Dec = 19.495（Pillera et al. 2022））显示其红移 z = 0.1505（Castro-Tirado et al. 2022; de Ugarte Postigo & Izzo 2022），与大多数其他长暴相比相对较小，这表明它是观测到的距离最近的长时标伽马射线暴之一（伽马射线暴211211A 的红移甚至更低，为 0.076，对应的距离为 ~346 兆秒差距（Rastinejad rt al., 2022; Troja et al., 2022; Mei et al., 2022; Gompertz et al. 2022）。据估计，GRB 221009A 发射的各向同性等效伽马射线总能量为（2–6）× 10^{54} 尔格（de Ugarte Postigo et al. 2022; Kann & Agui 2022）。

高能伽马光子会促使航天器材料溅射产生次级粒子（质子、电子以及可能产生的次级光子），这些粒子可由航天器上搭载的粒子探测器探测到（Pisacane 2008）。在 SGR 1806220 的伽马射线巨型耀发之后，Schwartz 等人（2005）和 Terasawa 等人（2005）也报道了类似效应。航天器粒子探测器获取的这些测量数据提供了另一种观察视角，可通过提供高采样率来分辨暴发的精细结构，从而补充伽马射线望远镜的观测结果（Schwartz et al. 2005；Terasawa et al. 2005）。在搭载于低地球轨道（LEO）的中国地震电磁卫星上的 HEPP-L 带电粒子探测器所进行的电子通量测量中，探测到了 GRB 221009A（Battiston et al. 2023）。Battiston 等人（2023）表明，记录到的 GRB221009A 电子通量异常信号源于探测器被动材料中光子吸收所产生的次级电子。该信号的动态变化与 HEBS 记录的 GRB221009A 信号结构高度吻合（Liu 等人 2022）。本文报告了 2022年10月9日由四颗（五颗中的）THEMIS 航天器（Angelopoulos et al., 2008）搭载的静电分析器 ESA（McFadden et al., 2008）和固态望远镜 SST（Larson et al., 2010）记录的 GRB 221009A 伽马暴信号精细结构观测结果。这些观测结果来自电子和质子通量测量数据（即伽马光子与探测器材料相互作用产生的次级电子暴发（Battiston et al. 2023））。航天器的配置如图 1 所示。具体而言，我们使用了 THB 和 THC 的数据，这两颗航天器作为 ARTEMIS 任务的一部分绕月球运行（Angelopoulos et al., 2015），以及两颗位于内磁层的探测器 THA 和 THE 的数据。THEMIS ESA 和 SST 以自旋周期为采样周期提供质子和电子分布函数（THA、THD 和 THE 为 3 秒，THB 和 THC 为 4 秒）。Battiston 等人（2023）表明，次级电子产生的信号覆盖了完整的立体角，因此能够将自旋分辨率分解为单次测量，并将时间分辨率提高至 0.25 秒（最高可达 0.125 秒），从而分辨暴发的精细结构。在整个观测时间段内，SST 和 ESA 探测器记录的数据均未发生饱和，能够分辨大多数高强度暴发的精细结构，从而补充了由 HEBS（Liu 等人 2022，未饱和数据的亚秒级时间分辨率）和 HEPP-L（Battiston et al. 2023，未饱和电子通量数据的采样率为每秒一次）对暴发活动最强烈时段所进行的高分辨率测量（部分伽马射线望远镜曾经历饱和时段）。

数据与方法

THEMIS（次磁暴期间事件与大尺度相互作用历史）是美国国家航空航天局（NASA）的任务，由五颗设备完全相同的卫星（探测器 THA、THB、THC、THD 和 THE）组成。该任务的主要目标是对地球磁层磁尾中的次磁暴现象开展多点观测（Sibeck & Angelopoulos，2008）。在启动月球加速、重联、湍流与电动力学（

与太阳相互作用（ARTEMIS）任务之后，该任务通过调整 THEMIS 的五个探测器中的两颗（THB 和 THC）的位置，使其进入协同运行的月球赤道轨道，从而由 THEMIS 衍生而来；其轨道距离为 ~55–65 个地心地球半径，R_E (~1.1–12 个月心月球半径，R_L）。这些探测器对遥远磁尾、太阳风、月球空间以及行星环境开展系统性的双点观测（Angelopoulos 等，2010）。三颗内侧探测器（THA、THD 和 THE）继续在内磁层（~1.2–9 R_E）收集数据。

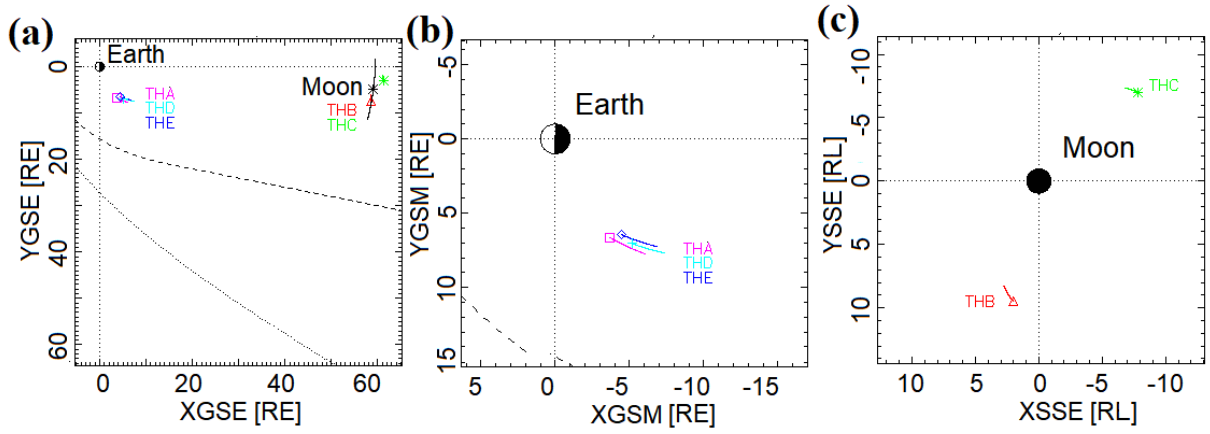

图 1. 面板 (a) 展示了 GRB 211211A 事件期间 THEMIS 和 ARTEMIS 航天器的构型，以及 1200–1400 UT 时段内它们在黄道面上的轨迹。地球磁层顶和弓形激波的模拟位置分别以虚线和点线表示。(b)——内侧 THEMIS 航天器的构型。(c)——月心坐标系中 ARTEMIS 航天器 THB 和 THC 的位置（黄道面投影）。

一对背靠背的顶帽式半球静电分析器（ESA）测量离子（0.005 至 25 keV）和电子（0.005 至 30 keV）的分布函数，覆盖 4π str，从而获得时间分辨率为 3 s 的等离子体矩（McFaddenetal.2008）。该仪器由一对共用 180°×6° 视场的“顶帽式”静电分析器组成，每个 3 s 自旋周期可扫描 4π str。传感器通常以能量对数间隔扫描，电子能量从 ~32 keV、离子能量从 ~25 keV 逐步降低至 ~6–7 eV。标称工作模式下，每个自旋周期进行 32 次扫描，每次扫描包含 31 个能量采样，另加一次能量回扫采样，因此典型测量分辨率为 $\Delta E/E$ ~32%。粒子事件由微通道板（MCP）探测器记录。在低时间分辨率模式下，THEMIS 通常保持“完整”的 32 个能量采样，并采用由 88 个区间组成的立体角图。结合能量和立体角测量数据可有效提高时间分辨率。固态望远镜（SST）以类似的测量模式，对覆盖 4π str 的离子和电子分布中的超热部分（0.02–1 MeV）进行测量。

GRB 221009A 事件期间 THEMIS 和 ARTEMIS 航天器的配置如图 1 所示。两颗 THB 和 THC（ARTEMIS）航天器位于月球附近的磁尾磁层中，距地心分别为 ~58 R_E（THB）和 61 R_E（THC）。两颗航天器之间的距离为 ~3.5 RE（~13 R_L）。内侧探测器距地心均为 ~8.5 R_E，两颗航天器之间的距离为 ~1 R_E。

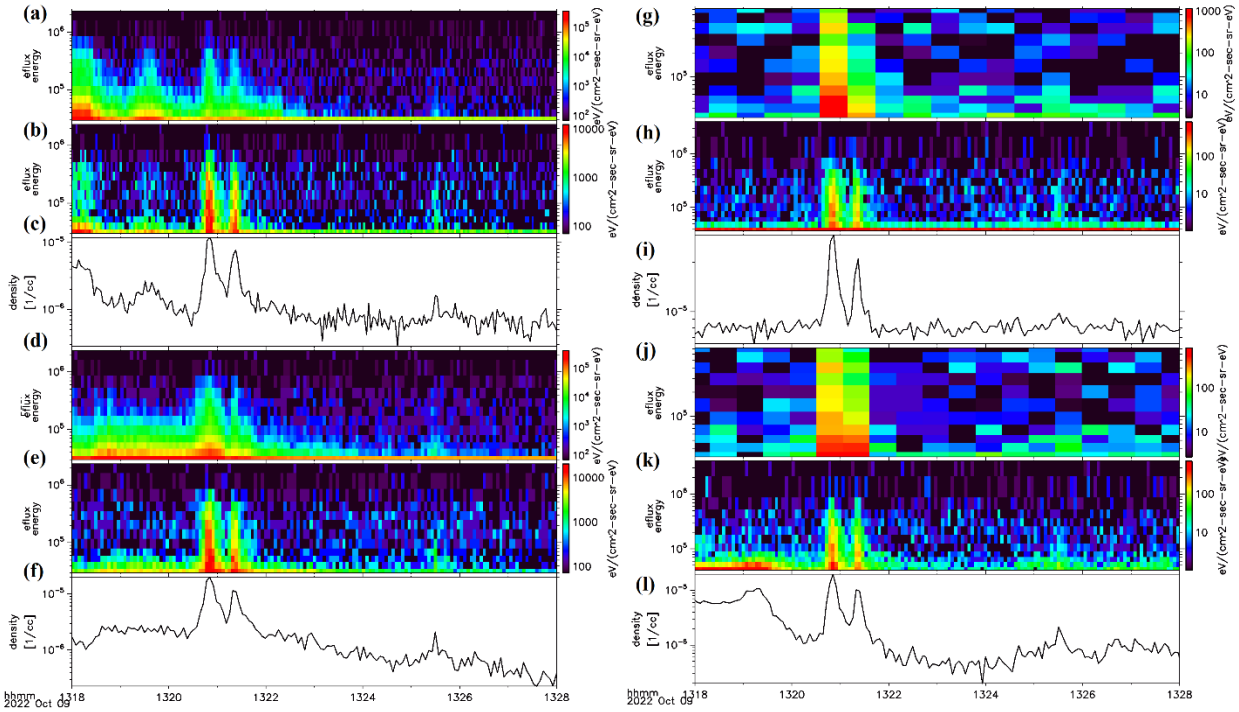

图 2. THA 和 THE 探测器上的 SST 探测器记录的电子和质子通量：(a)——THA SST 探测器记录的质子通量；(b)——THA SST 探测器记录的电子通量；(c)——SST 能量范围内的质子密度。图 (d-f) 展示了 THC 上记录的相同特征，图 (g-i) 展示了 THB 上记录的相同特征，图 (j-l) 展示了 THC 上记录的相同特征。

四颗航天器（THA、THB、THC 和 THE）均探测到了伽马射线暴 GRB221009A 的影响，其表现为 13:20:36–13:21:30 期间的两次极强暴发，以及随后约在 13:25:30 发生的一次较弱暴发（图 2）。第五颗 THEMIS 航天器 THD 在此时间段内未采集粒子数据。ARTEMIS 航天器 THB 和 THC 搭载的粒子测量设备采用相同的工作模式：自旋分辨率 ESA 和自旋分辨率 SST（质子）。图 2 展示了 SST 探测器在 THA、THB、THC 和 THE 上记录的全向电子和质子通量动态变化。与 GRB221009A 相关的电子和质子表观通量增强现象，在 SST 测量数据中可观测到最高达 1 MeV 的能量范围内，这与 Xiao 等人（2022）基于太阳轨道器 STIX 对 4–150 keV 能量范围内五个能段的测量数据（时间分辨率为 4 s）以及 Liu 等人（2022）基于 HEBS 在 400–6000 keV 能量范围内的探测结果所报告的 GRB221009A 动态变化一致。SST 记录的通量在能量高于 1 MeV 时呈下降趋势，这与 HEPP-L 的结果（Battiston 等人，2023）一致。THA 和 THE 的可用数据采用自旋平均采样率 3 s，因此，亚秒级数据处理仅适用于 ARTEMIS 探测器 THB 和 THC。内侧探测器（THA、THD 和 THE）与 ARTEMIS 航天器（THB 和 THC）之间的距离相当于 ~1 光秒（考虑到事件的几何结构后，距离小于 0.25 秒）。THA 和 THE 的自旋分辨率数据无法充分分辨伽马射线暴信号在不同航天器之间的时间延迟。下文中，我们将比较 THB 和 THC 记录的信号时间（其时间分辨率更高）与低地球轨道航天器上记录的 HEPP-L（Battiston 等人，2023）和 HEBS（Liu 等人，2022）信号的时间。

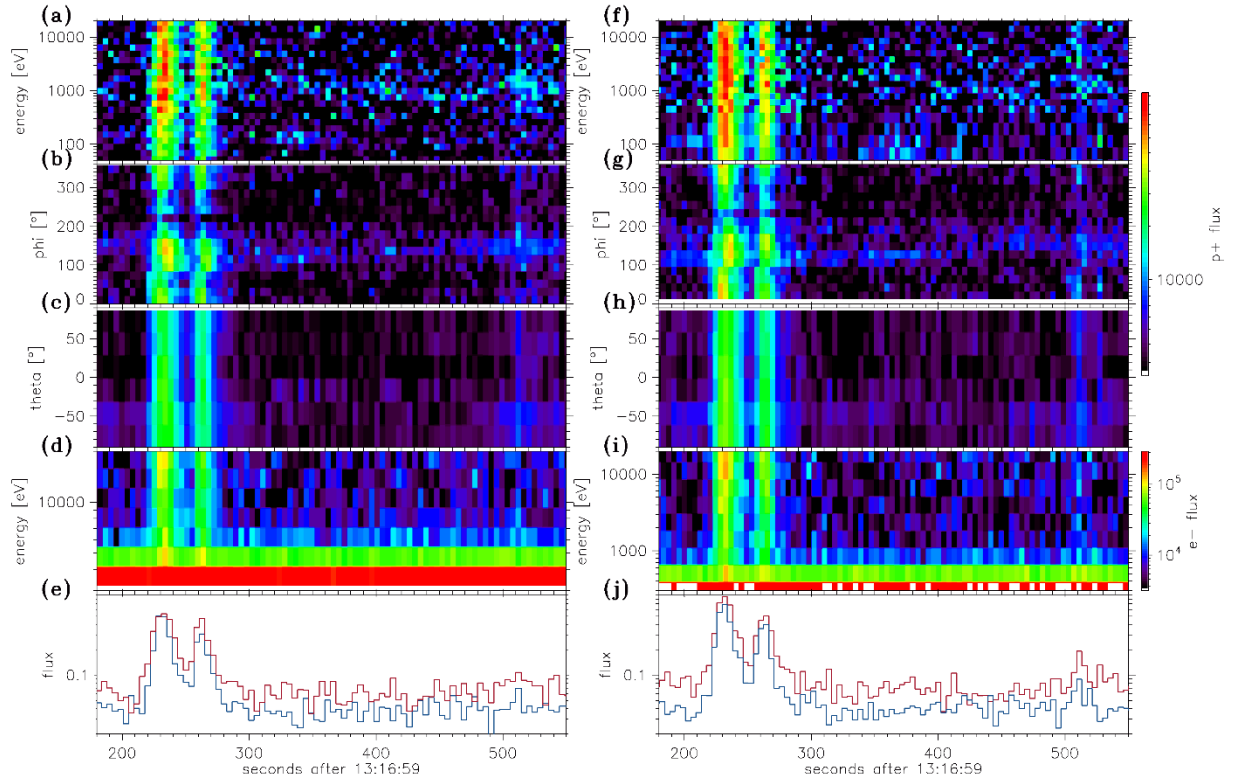

图3.使用静电分析器（ESA）记录的THB和THC探测器上的表观电子和质子通量：(a)–THBESA探测器的全向质子通量；(b)–方位角phi上的能量积分质子通量；(c)–极角theta上的能量积分质子通量；(d)–THBSST探测器的全向电子通量；(e)–积分质子通量（红色）和电子通量（蓝色）。图(f-j)展示了THC的相同特征。

ESA 和 SST 探测器的极角和方位角分辨率提供了有关粒子通量方向性的信息。THEMIS 航天器 THB 和 THC 采集了自旋分辨率的 ESA 质子和电子数据，如图3所示。这种通量增强动态表明，GRB 在 ESA 的整个能量范围（从 8 eV 到 ~20 keV）以及所有极角和方位角范围内均产生了影响（图3b、c）。图3b、c 中以极角和方位角为函数给出的粒子通量表明，与 GRB 相关的次级粒子通量分布在不同极角和方位角下相似，这证实了 Battiston 等人（2023）报告的 GRB 221009A 期间电子通量测量数据具有各向同性。在航天器自旋过程中记录的通量数据，分别由 THB 和 THC 的 SST 与 ESA 数据合并而成，如图4a和图4b所示，其时间分辨率为 0.125 秒。为提高结果的统计显著性，我们通过累加 32 个能道以及来自两颗航天器的数据，将其降采样至 0.25 秒的分辨率。GRB221009A 发生期间，THB 与 THC 之间的距离相当于 ~0.1 光秒；考虑到源的几何结构（Pillera等人，2022），实际最大时间偏移为 ~0.07 s，因此我们将 THB 和 THC 的测量数据合并为一个合并时间序列。

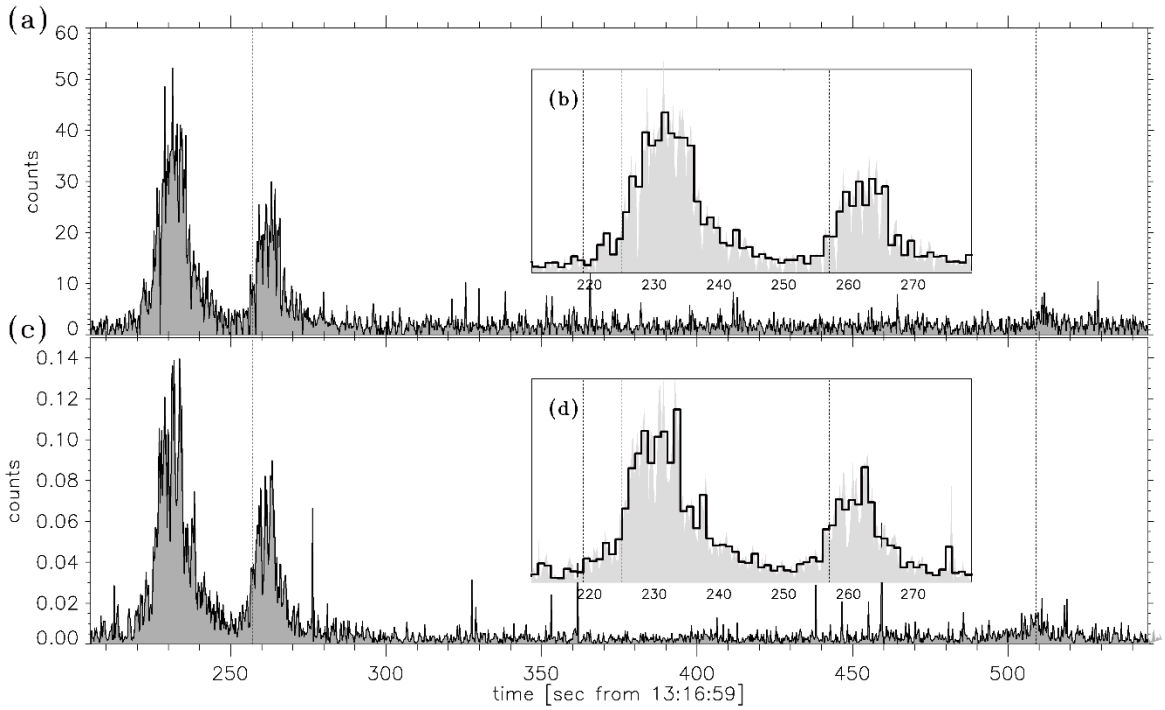

图 4. (a) — THB 和 THC 的 ESA 质子通量计数合并光变曲线，能量范围为 8 eV 至 20 keV。(b) — (a) 中

THB 和 THC ESA 探测器的计数光变曲线显示于图4a中，SST 探测器记录的合并通量光变曲线显示于图4b中。在 13:16:59 UT（以下简称 T0）出现的触发脉冲并未在粒子通量扰动背景上显现，三个峰连续分辨开来，且没有任何饱和迹象：第一个主峰开始前的肩部位于 T0+219 s（SST）和 T0+220 s（ESA）；第一个主峰位于 T0+225 s；第二个峰位于 T0+256 s（SST 和 ESA）；第三个峰位于 T0+509 （SST）和 T0+511 （ESA）。Battiston 等人（2023）根据 HEPP-L 报道的 GRB 221009A 时间轮廓，以及 Liu 等人（2022）根据搭载于低地球轨道航天器上的 HEBS 数据报道的时间标记（肩部为 T0+219 s，第一个峰为 T0+225 s，第二个峰为 T0+256 s，第三个峰为 T0+509 ）由垂直虚线标出。THEMIS 航天器同步的定时不确定度（~0.1 s）和时间分辨率不允许我们分辨 THB 和 THE 上记录的伽马射线暴信号与低地球轨道航天器上记录的数据之间的时间偏移；Battiston 等人（2023）对后者进行了详细介绍。因此，我们给出时间分辨率为 1 秒的 ESA 和 SST 数据版本，以便与 HEPP-L（Battiston 等人，2023）和 HEBS（Liu 等人，2022）的 1 秒光变曲线进行比较。两个主峰在图4b（ESA）和图4d（SST）中进行了放大。图4b中时间分辨率为 1 秒的 ESA 计数光变曲线与 Liu 等人（2022）和 Battiston 等人（2023）给出的 GRB 221009A 轮廓的 1 秒分辨率光变曲线非常吻合：第一次爆发的前两个次峰（T0+225-236）s 被 ESA 和 SST，以及 HEPP-L 和 HEBS 以相似方式分辨出来；SST 分辨出了之后的两个次峰（其中较晚的一个可在 HEPP-L 光变曲线中看到），这两个次峰也可在时间分辨率为 0.05 s 的 HEBS 数据中看到；位于（T0+256-266 s）的第二次爆发包含 4 个次峰（其中 3 个由 SST 分辨出），证实了 HEPP-L 和时间分辨率为 0.05 s 的 HEBS 数据的测量结果。与 HEBS 伽马射线探测器直接观测结果的良好一致性表明，

带电粒子探测器确实能够提供极具价值的强伽马暴观测数据，这得益于其较高的测量时间分辨率、较高的饱和阈值以及较长的基线，与配备伽马射线望远镜的低地球轨道航天器形成互补

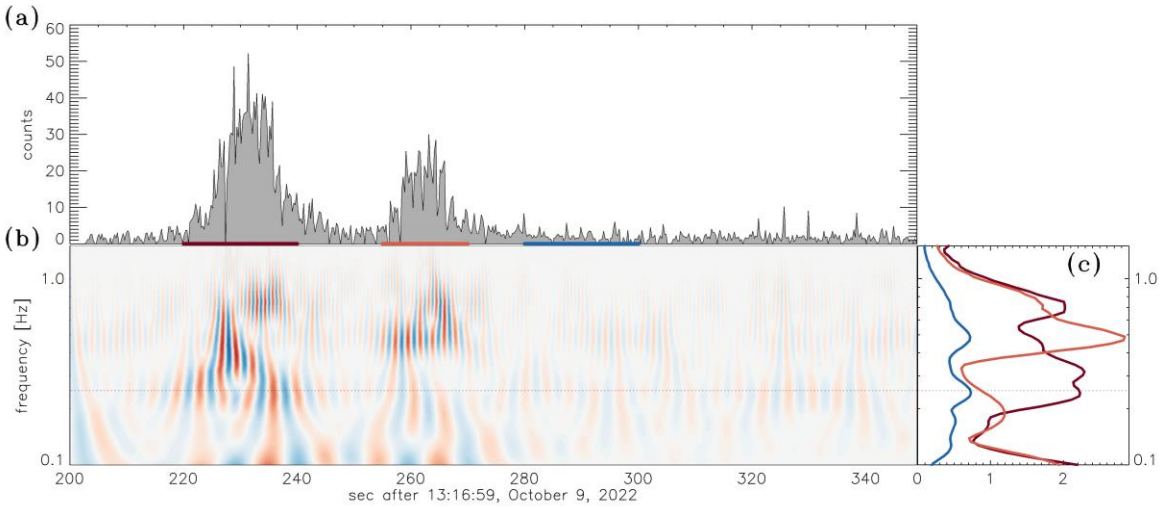

图 5. (a) – THB 和 THC ESA 质子通量计数的合成光变曲线，展示了 GRB221009A 两次主要暴发的精细结构。(b) – 光变曲线的小波分解。(b) 中的虚线表示航天器自旋频率。(c) – 在面板 (a) 中相应颜色所标示的时间区间内采集的时间平均小波谱。

从 0.25 s 采样率的数据中，我们注意到主峰具有复杂的尖峰状精细结构。图 5a 对两个主要

可分为持续时间较长和较短的两类事件，其持续时间分布的最小值约为 2 s，这表明存在两个相互独立的暴发种群（Bhat等人，2010）。

我们在其他搭载带电粒子探测器的磁层和太阳风任务的观测数据中搜寻了伽马射线暴

结论

我们首次报告了美国国家航空航天局 THEMIS 和 ARTEMIS 探测器所搭载航天器粒子探测器观测到的强伽马射线暴 GRB221009A 的影响。四艘航天器（两艘位于地球磁层内侧的探测器 THA 和 THE，以及两艘环绕月球运行的航天器 THB 和 THC）通过静电分析器（ESA）和固态望远镜（SST）对质子和电子通量的测量数据探测到了这一事件。通过结合能道和多艘航天器的数据，精细

伽马射线暴的结构得以解析，时间采样率为 每秒 4 次测量，这使粒子探测器成为研究强伽马射线暴精细结构的补充仪器。所获得的 GRB221009A 两个主要暴发精细结构尖峰的时间尺度，与长伽马射线暴的特征参数一致。

致谢

我们感谢美国国家航空航天局合同 NAS5-02099 对使用 THEMIS 任务数据的支持，感谢 D. Larson 提供 SST 数据的使用许可，以及感谢 J. P. McFadden 提供 ESA 数据的使用许可。O.V.A 感谢 J. P. McFadden 提供的宝贵讨论。O.V.A 获得了 NSF 拨款（编号 1914670）、美国国家航空航天局“与恒星共存”（LWS）计划（合同编号 80NSSC20K0218），以及美国国家航空航天局拨款合同 80NNSC19K0848、80NSSC22K0433、80NSSC22K0522、80NSSC20K0697 和 80NSSC20K0697 的资助。

参考文献

Angelopoulos, V. 2014，载于《ARTEMIS 任务》，C. Russell 和 V. Angelopoulos 编（纽约州纽约：Springer），3，https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9554-3_2Battiston, R., Neubüser, C., Follega, F. M., 等，2023，《天体物理学杂志通讯》，946（美国天文学会），L29 Bhat, P. N., Bissaldi, E., Briggs, M. S., 等，2011，AIP 会议论文集，1358（美国物理联合会），9 Dichiara, S., Gropp, J. D., Kennea, J. A., 等，2022，伽马射线暴通告，32632 Frederiks D., Lysenko A., Ridnaia A., Svinkin D., Tsvetkova A., Ulanov M., Cline T., Konus-Wind 团队，2022，伽马射线暴坐标网络，32668，1 Frederiks D., 等，2023，arXiv:2302.13383 Gotz, D., Mereghetti, S., Savchenko, V., 等，2022，伽马射线暴坐标网络，32660，1 Gompertz, B. P., Ravasio, M. E., Nicholl, M., 等，2023，《自然·天文学》，7（自然出版集团），67 Hayes, L. A., & Gallagher, P. T. 2022，《美国天文学会研究札记》，6（美国天文学会），222 Kann, D. A., & Agui Fernandez, J. F. 2022，伽马射线暴坐标网络，32762，1 Lapshov I., Molkov S., Mereminsky I., Semena A., Arefiev V., Tkachenko A., Lutovinov A., SRG/ART-XC 团队，2022，伽马射线暴坐标网络，32663，1 Laskar, T., Alexander, K. D., Margutti, R., 等，2023，《天体物理学杂志通讯》，946（美国天文学会），L23 Levan, A. J., Lamb, G. P., Schneider, B., 等，2023（arXiv），http://arxiv.org/abs/2302.07761 Liu, J. C., Zhang, Y. Q., Xiong, S. L., 等，2022，伽马射线暴坐标网络，32751，1 Lesage, S., Veres, P., Roberts, O. J., 等，2022，伽马射线暴坐标网络，32642，1 McFadden, J. P., Carlson, C. W., Larson, D., 等，2008，《空间科学评论》，141，277 Mei, A., Banerjee, B., Oganesyan, G., 等，2022，《自然》，612（自然出版集团），236 Pal, S., Hobara, Y., Shvets, A., 等，2023，《大气》，14（多学科数字出版研究所），217

Pisacane V.L.，《空间环境及其对空间系统的影响》美国航空航天学会，美国弗吉尼亚州雷斯顿市亚历山大·贝尔大道1801号，500室，邮编20191-4344。2008年。421页。Piano, G., Verrecchia, F., Bulgarelli, A., 等。2022年，《伽马射线暴坐标网络》，32657，1。Pillera, R., Bissaldi, E., Omodei, N., 等。2022年，GCN 32658，32658，1。Rastinejad, J. C., Gompertz, B. P., Levan, A. J., 等。2022年，《自然》，612（自然出版集团），223。Schwartz, S. J., Zane, S., Wilson, R. J., 等。2005年，《天体物理学杂志》，627（IOP出版社），L129。Sibeck, D. G., & Angelopoulos, V. 2008年，《空间科学评论》，141，35。Sahu, S., Medina-Carrillo, B., Sánchez-Colón, G., & Rajpoot, S. 2023年，《天体物理学杂志通讯》，942（美国天文学会），L30。Terasawa, T., Tanaka, Y. T., Takei, Y., 等。2005年，《自然》，434（自然出版集团），1110。Troja, E., Fryer, C. L., O'Connor, B., 等。2022年，《自然》，612（自然出版集团），228。Veres, P., Burns, E., Bissaldi, E., 等。2022年，《伽马射线暴坐标网络》，32636，1。de Ugarte Postigo, A., Izzo, L., Pugliese, G., 等。2022年，《伽马射线暴坐标网络》，32648，1。Ursi, A., Panebianco, G., Pittori, C., 等。2022年，《伽马射线暴坐标网络》，32650，1。Xiao, H., Krucker, S., & Daniel, R. 2022年，《伽马射线暴坐标网络》，32661，1。