



雷暴地球伽马射线闪探测研究进展及若干问题探讨

吕凡超^{1,2*}, 张义军³, 陆高鹏⁴, 祝宝友⁴, 张鸿波⁵, 徐未⁶, 熊少林⁷, 吕伟涛²

1. 南京气象科技创新研究院, 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210041;
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;
3. 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200441;
4. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;
5. 中国科学院大气物理研究所, 中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029;
6. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430072;
7. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: lyufc@cma.gov.cn

收稿日期: 2022-06-09; 收修改稿日期: 2022-10-11; 接受日期: 2022-11-02; 网络版发表日期: 2023-02-07

国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC1501500)、中国气象科学研究院基本科研业务项目(编号: 2020R004、2021Z003)和国家重大科技基础设施子午工程和中国科学院国际伙伴计划项目(编号: 183311KYSB20200003)资助

摘要 地球伽马射线闪(Terrestrial Gamma-ray Flashes, TGFs)是近来相关研究比较活跃的一类发生在雷暴中的高能辐射现象, 可在地面和近地轨道卫星平台上观测到光子能量高达几十兆电子伏特的伽马射线爆发. 观测表明 TGF 是伴随雷暴闪电发生的一种自然界比较常见的高能大气物理现象, 但其产生过程、物理机理及效应等尚不清晰, TGF 研究也已成为大气电学与高能物理这一前沿交叉领域的热点研究问题. 文章阐述了近十年来关于 TGF 探测、TGF 与闪电放电过程及雷暴活动相互关系等方面的研究进展, 并对一些尚存的问题进行了讨论. 卫星观测发现上行 TGF 与云内初始先导过程关系紧密, 一般发生在云内先导起始之后几毫秒时间内, 并可能由于其发生过程伴随的瞬时大量电子转移产生特殊的低频电磁辐射. 相比之下, 目前报道的下行 TGF 的发生环境比较复杂, 可能伴随着不同类型的闪电放电过程, 如上行正先导/下行负先导、连续电流过程、回击过程等. 由于地面观测资料较少, 与上行 TGF 相比, 下行 TGF 产生过程的研究更加缺乏. 随着精细时空探测系统的发展, 基于地面与卫星观测平台的精细协同观测将对 TGF 产生过程及其机制的研究带来更多新的认识.

关键词 地球伽马射线闪, 闪电, 雷暴, 高能辐射, 电磁探测

1 引言

随着对雷暴中放电过程观测研究的不断加强, 人

们对闪电过程及其电磁效应的理解也逐渐深入, 越来越多的放电子物理过程被揭示并获得学术界关注, 伴随雷电发生的高能物理过程即是其中之一. 最早对大

中文引用格式: 吕凡超, 张义军, 陆高鹏, 祝宝友, 张鸿波, 徐未, 熊少林, 吕伟涛. 2023. 雷暴地球伽马射线闪探测研究进展及若干问题探讨. 中国科学: 地球科学, 53(3): 421–443, doi: [10.1360/SSTe-2022-0176](https://doi.org/10.1360/SSTe-2022-0176)

英文引用格式: Lyu F, Zhang Y, Lu G, Zhu B, Zhang H, Xu W, Xiong S, Lyu W. 2023. Recent observations and research progresses of terrestrial gamma-ray flashes during thunderstorms. Science China Earth Sciences, 66(3): 435–455, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1026-y>

气学科中的高能物理现象的研究要追溯到1925年Wilson通过模拟对大气中高能电子产生过程的理论研究(Wilson, 1925). 他发现当大气中的电子在环境电场中获得的能量大于其与空气分子作用损失的能量时, 电子本身的能量会不断增大并产生逃逸过程, 随后通过韧致辐射产生伽马射线. 逃逸电子的产生需要背景电场强度大于所谓的相对论击穿电场阈值, 海平面高度上对应的电场强度为 $E_{th}=284\text{kV m}^{-1}$ (Dwyer, 2003, 2012). 观测表明, 雷暴中的电场强度可能达到 $100\sim 300\text{kV m}^{-1}$ (Marshall等, 1995; Rakov和Uman, 2003), 因此存在接近此相对论击穿电场阈值的可能性, 为雷暴中高能辐射过程及其与闪电过程关系的研究提供了必要的理论基础. 而首次从观测上证实雷暴中高能辐射过程的存在要得益于1991年4月发射的用于探测宇宙伽马射线爆发的康普顿伽马射线观测仪卫星(Compton Gamma-Ray Observatory, CGRO)(Fishman等, 1994). 搭载在CGRO卫星上的Burst and Transient Source Experiment(BATSE)探测器主要用来探测来自各个方向的高能宇宙射线爆发. 两年的观测时间内, BATSE记录到了12个来自于地球表面的高能辐射事件(Fishman等, 1994). 通过对气象同步观测资料的分析, 确定这些高能辐射事件与地面雷暴活动密切相关, 这也是地球伽马射线闪(Terrestrial Gamma-ray Flash, TGF)中地球(terrestrial)一词的由来. Fishman等(1994)的报道为TGF等雷暴中高能辐射过程的研究奠定了观测事实基础, 从而使这一研究发展到理论与观测相结合的阶段.

简单来说, TGF是一类发生在雷暴过程中的高能辐射现象, 其辐射能量可达几到几十兆电子伏特(MeV)(Smith等, 2005), 甚至更高(Marisaldi等, 2019), 往往伴随闪电的发生而产生. TGF最开始被认为是一种稀有的现象, 但随着观测方式的更新及研究的进步, 人们发现其可以发生在各种不同类型的对流性天气系统中, 是自然界中一种比较普遍的高能辐射现象, 最近的观测甚至在火山闪电过程中也发现了TGF(Briggs等, 2022). 现阶段对TGF的直接观测仍然主要来自于搭载在近地轨道卫星平台的伽马射线探测器, 这一类TGF(上行TGF)的辐射方向从雷暴主体向上到达卫星观测平台, 地面电磁探测作为同步观测手段为TGF研究提供了重要佐证. 基于TGF的卫星与地面观测, 研究人员从TGF与闪电过程的关系、TGF的产生机理等

方面进行了一系列的研究与讨论. 随后, 下行TGF(伽马射线辐射方向从雷暴主体向下到达地面)也被观测证实, 但由于观测样本相对偏少, 对下行TGF发生环境及机理的研究也还相对缺乏. 郗秀书和王俊芳(2010)已对2010年以前国内外进行的TGF研究进行了综述, 从TGF与雷暴和闪电过程的关系、观测、理论模型等方面进行了详细的介绍. Dwyer等(2012a)及Dwyer和Uman(2014)也对TGF与其他大气过程中的高能辐射现象进行了综述, 从逃逸电子产生的物理机理与特征、大气物理过程伴随的高能辐射观测, 及其与某些特殊的放电过程之间的关系进行了讨论.

自TGF被观测证实以来, 其观测和机理研究迅速发展并获得了持续关注, 目前已经成为大气电学与高能物理研究领域的一个前沿热点问题. 作为两个领域交叉研究的一个重要方面, TGF物理过程研究一方面对大气电学研究, 包括雷电放电机理与效应等基础问题的认识具有重要意义; 另一方面对揭示高能辐射在雷暴电场环境中的发生机理及其效应也具有非常重要的科学意义. 近十年来, 国内外学术界针对TGF研究, 从卫星平台观测、地面直接观测、其伴随的闪电放电事件、雷暴发生环境、产生机理等多个方面开展了一系列的研究, 发表了超过200篇的研究论文. 但目前这种高能辐射过程与闪电放电过程的关系、其物理产生机理, 以及其对公共航空及其他航空航天等人类活动带来的危害等方面的认识仍然很不清晰(Dwyer等, 2010; Dwyer和Uman, 2014; Dwyer, 2021). 而且国内对这一物理过程的研究才刚刚起步, 开展的观测与研究工作极其有限. 因此亟需对近年来国内外已有的TGF研究工作进行总结, 深入探讨可开展的工作内容, 以此推进我国在高能大气物理这一前沿交叉领域的研究. 本文将主要围绕近十多年来(主要是2010年以后)学术界针对TGF已开展的上述一系列研究进行评述.

2 TGF的卫星观测平台

对TGF开展观测的近地轨道卫星平台, 主要包括美国航空航天局运行的搭载于康普顿伽马射线观测仪卫星(Compton Gamma-Ray Observatory, CGRO)上的Burst and Transient Source Experiment(BATSE)平台(Fishman等, 1994), 美国航空航天局小卫星计划中的儒温拉玛蒂太阳高能分光成像仪(Reuven Ramaty High

Energy Solar Spectroscopic Imager, RHESSI)(Smith等, 2005), 美国航空航天局的搭载于费米伽马射线太空望远镜(Fermi)上的Gamma-ray Burst Monitor(GBM)探测器(Briggs等, 2010), 意大利的伽马射线轻型探测器(Astro-rivelatore Gamma a Immagini Leggero, AGILE)(Marisaldi等, 2010), 欧洲航天局搭载于国际空间站(International Space Station, ISS)上的大气-空间相互作用监测器(Atmosphere-Space Interactions Monitor, ASIM)(Neubert等, 2019, 2020). 随着国内高能天文观测设备相继发射升空, 中国第一颗X射线空间望远镜卫星“慧眼”硬X射线调制望远镜卫星(Insight Hard X-ray Modulation Telescope, Insight-HXMT)(Zhang S N等, 2020)和“怀柔一号”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)(Chen等, 2021)也开展了TGF观测工作. 目前, BATSE与RHESSI平台已经退役, 不再有新的数据发布. 近来也有其他卫星探测到TGF的报道, 例如BeppoSAX(Ursi等, 2017), RELEC(Bogomolov等, 2017)等, 但主要是试验性的.

国际上自2010年之后用于TGF研究的空间观测平台主要有三个, 分别是AGILE卫星、Fermi卫星和ASIM探测器. AGILE于2007年4月23日发射升空, 主要用于探测能量在18~60keV的X射线与能量范围为30MeV~30GeV的伽马射线, 其中探测地面伽马射线辐射的设备主要是碘化铯晶体(即CsI(Tl))微型量能器(MCAL), 其由30个碘化铯闪烁体探测器阵列组成, 能量测量范围为300keV~100MeV(Fuschino等, 2009; Labanti等, 2009; Marisaldi等, 2010). Fermi于2008年6月11日发射升空, 其上搭载了两种伽马射线探测器, 分别是Large Area Telescope(LAT)与Gamma-ray Burst Monitor(GBM)(Atwood等, 2009; Meegan等, 2009; Briggs等, 2010). LAT主要用来探测能量超过10MeV的光子辐射, 而GBM主要包括12个碘化钠闪烁体探测器(NaI, 能量覆盖范围为8keV~1MeV)与两个锗酸铋闪烁体探测器(BGO, 能量覆盖范围约为200keV~40MeV). GBM和LAT都能探测TGF, 但是TGF基本是由GBM报道的. 搭载于国际空间站(ISS)上的ASIM探测器于2018年4月2日发射升空, 其上具有可以同时探测中高层大气放电事件(Transient Luminous Events, TLEs)和TGF的探测器(Neubert等, 2019; Østgaard等, 2019c), 主要的仪器包括光子能量覆盖范围为15keV~20MeV的X射线与伽

马射线探测器, 以及三个闪电光度计与两个光学摄像机, 光谱测量范围为180~250nm(紫外通道)、337nm(蓝光通道)以及777.4nm(红光通道). 通过光谱与伽马射线探测的结合, 研究人员利用ASIM在中高层大气放电与TGF的研究中取得了一系列重要的成果(Østgaard等, 2019b, 2019a, 2021; Neubert等, 2020; Heumesser等, 2021; Liu F等, 2021; Bjørge-Engeland等, 2022).

国内目前利用两个卫星平台开展了TGF的观测试验. “慧眼”硬X射线调制望远镜(Insight-HXMT)是中国第一颗空间天文卫星(Zhang S N等, 2020). “慧眼”卫星于20世纪90年代末提出, 2011年正式立项, 2017年6月15日在酒泉卫星发射中心成功发射. Insight-HXMT的高能X射线望远镜(HE)在200keV~1MeV能区可获得高质量的光变和能谱观测数据, 其地面覆盖范围可达到南北纬度43°区域. 对比之下, Fermi-GBM仅能探测到发生于中国南部地区、纬度低于25°N的TGF. 因此Insight-HXMT有望获得中国较大地域范围内TGF的发生情况. “怀柔一号”引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GECAM)是中国研究团队自主研发的第二颗能够实现TGF探测的卫星平台(Lv等, 2018; Li等, 2020; Chen等, 2021), 项目于2016年提出, 2020年12月10日在西昌卫星发射中心成功发射, 主要用于探测引力波高能电磁对应体、伽玛暴、磁星爆发、太阳耀斑及地球伽马射线闪等高能辐射过程. GECAM由两颗微小卫星组成, 两颗卫星共轨运行在600km高度, 29°倾角的低轨圆形轨道上. 每颗卫星配置有25个伽马射线探测器(GRD)和8个荷电粒子探测器(CPD), 分别探测能量范围8keV~2MeV和300keV~5MeV的高能粒子, 因此对来自地面雷暴的TGF及其他高能辐射过程(如地球电子束等)具有较好的探测能力. 因国内卫星平台运行时间相对较短, 目前利用国内卫星平台开展的观测研究还较少, 仅有Zhang等(2021)利用“慧眼”与Zhao等(2021)利用“怀柔一号”对TGF与闪电过程的时序关系及相关性进行了分析, 除此之外尚未见其他公开报道的研究工作. 但“慧眼”与“怀柔一号”两个空间天文卫星项目将极大增强国内TGF观测的能力, 对中国研究团队开展雷暴高能辐射的研究具有重要作用.

以上主要介绍了TGF卫星观测平台的基本信息, 部分卫星平台的技术参数对比亦可参考陆高鹏等(2020)的表1. 目前对TGF的研究也主要来自卫星平台

对雷暴中上行TGF的探测, 从TGF与闪电放电过程, TGF辐射源特征及TGF与雷暴活动之间的关系等多个方面进行了报道。

3 TGF的地面观测

近来地面观测发现, 雷暴也能产生一种传播方向由雷暴主体朝向地面的伽马射线辐射(下行TGF)。TGF的地面直接探测利用了与卫星平台类似的测量系统, 主要为碘化钠闪烁体(NaI)探测器。但地面伽马射线探测器对下行TGF的直接观测极少, 主要原因是在低层高密度大气中传播时伽马射线流强衰减很快, 传播距离较短, 需要在距离TGF发生位置较近的观测点(百米量级)架设伽马射线探测器。地面观测发现下行TGF伴随的闪电过程比较复杂, 在人工触发闪电的回击过程、人工触发闪电上行正先导、自然闪电地闪回击之后、自然闪电初始下行负先导及双极性闪电的两次回击间隙等过程中都观测到伽马射线的爆发。国内国民核生化灾害防护国家重点实验室于2016年开始进行地面伽马射线探测器的测试开发(李小强等, 2018, 2019), 张雄等(2022)对其最新设计的探测系统TEROS进行了详细报道。

下行TGF首先在人工触发闪电过程中被观测到, Dwyer等(2004a)利用NaI探测器在距离人工触发闪电接地点约650m的地面上探测到了能量超过10MeV的伽马射线辐射。这些伽马射线辐射发生在人工触发闪电的初始发展阶段(金属导线气化之后约20ms), 伴随了相对较强的初始先导脉冲电流, 与发生在回击前直窜先导或回击过程中的X射线辐射区别明显(Dwyer等, 2003, 2004b; 李小强等, 2019)。Hare等(2016)也在人工引雷试验火箭引发的上行正先导发展过程中观测到一例TGF, 光学与电场同步观测及模拟结果表明伽马射线辐射与先导发展过程中的初始连续电流脉冲在时间上相对一致, Dwyer(2021)也利用改进的RREA模型成功模拟了与上行正先导发展相关的TGF过程。这都表明了上行正先导连续发展可能为逃逸电子雪崩过程提供了所需的电场环境。

下行TGF同样也发生在自然闪电过程中, 但与人工触发闪电过程相比, 存在一定的差异。地面伽马射线探测器在自然闪电负极性地闪回击之后几百微秒, 探测到了能量为几至几十MeV的伽马射线辐射, 而且

产生TGF的地闪过程也具有较强的地闪回击电流(Dwyer等, 2012b; Tran等, 2015)。Abbasi等(2017, 2018)与Belz等(2020)利用望远镜阵列面探测器(Telescope Array Surface Detector, TASD)、闪电成像阵列(Lightning Mapping Array, LMA)(Rison等, 1999)及快电场变化的同步测量, 观测到了伴随下行初始负先导(先导起始后约1~2ms)的伽马射线爆发, 模拟发现这一过程可能伴随了数目为 10^{12} ~ 10^{14} 的高能电子爆发。但这与卫星平台观测到的典型TGF伴随的 10^{17} 左右的雪崩电子数目相差了几个数量级(Dwyer和Smith, 2005; Carlson等, 2007; Cummer等, 2014; Mailyan等, 2016; Bowers等, 2017), 而且最大能量也相对较弱, 这些下行伽马射线辐射是否与典型TGF过程相同尚存争议。李小强等(2018)发现自然负地闪过程中回击之前观测到的伽马射线爆发与负极性梯级先导脉冲具有较好的对应关系。最近Kereszy等(2022)对一例伴随伽马射线爆发的双极性地闪过程进行了分析, 在回击间隙的负先导过程中观测到了多次伽马射线爆发。自2017年以来, 日本冬季雷暴中的下行TGF受到越来越多的关注。Wada等(2019b)利用地面探测器在一次冬季雷暴中发现下行TGF可能包含了多次伽马射线爆发, 最大能量超过了10MeV, 其中能量大于1MeV的电子数目超过了 10^{18} 。日本冬季雷暴中的闪电过程产生了辐射强度极强的TGF, 有的甚至伴随了光致核反应, 导致了中子甚至氮氧同位素的产生(Bowers等, 2017; Enoto等, 2017; Smith等, 2018)。

另外, 利用搭载在飞机上的伽马射线探测器在雷暴发展高度上也开展了TGF的观测试验(Smith等, 2011; Bowers等, 2018)。研究人员利用搭载在飞机上的高能辐射探测器(Airborne Detector for Energetic Lightning Emissions, ADELE)对普通雷暴和飓风眼墙对流区域中的TGF进行了观测。但由于飞机在雷暴过程中进行穿云飞行具有极高的危险性, 目前试验报道极其有限。Smith等(2011)利用ADELE首次在14km的飞行高度上探测到了来自于水平距离10km左右的与普通云闪相关的伽马辐射, 并对其能谱特征进行了模拟分析。Bowers等(2018)对飞机观测与模拟进行了对比, 表明其观测的伽马射线辐射极有可能来自于上行TGF对应的反向正电子束的韧致辐射过程。这与Pu等(2020)报道的一例被卫星平台观测到的与负地闪下行负先导同步的TGF可能具有较为类似的过程。地面电磁场与

Fermi-GBM伽马射线的同步观测表明, Pu等(2020)报道的下行TGF发生在负极性闪电回击前约3ms的负极性先导发展过程中. 他们推测在负先导向下发展过程中, 云内正先导末端向上朝主负电荷区发展, 两者之间的强电场导致逃逸电子的爆发产生下行TGF, 而卫星平台观测到的伽马射线可能来自于逃逸电子爆发对应的反向正电子束产生的上行伽马射线. 地面电磁观测系统的同步测量对TGF过程的研究提供了重要的依据.

与上行TGF类似, 下行TGF同样与闪电过程关系密切, 但其伴随的放电过程类型较为复杂, 可能与起始先导过程(包括自然闪电下行负先导及人工触发闪电上行正先导等)和回击后过程相关, 最新的报道也在双极性闪电过程的回击间隙观测到了TGF(Kereszy等, 2022). 另一方面, 不同观测获得的下行TGF辐射能量有差异, 例如Abbasi等(2018)与Wada等(2019b)估算的电子数目相差几个数量级, 而且伽马射线辐射源的产生位置也略有不同, 这些不同放电过程中TGF是否存在产生机制的差异尚不确定, 是否与不同雷暴的发生环境相关也不明确. 相对于上行TGF, 目前下行TGF的观测研究还比较缺乏. 最近, Abbasi等(2022)报道了来自于高速光学观测、甚高频干涉仪、快电场及TASD对一例下行TGF的同步观测, 结果表明TGF的发生与下行负先导初始击穿脉冲的发展, 及高速摄像记录的光辐射亮度在几十微秒的时间尺度上密切相关. 这与利用ASIM观测的伴随TGF过程的光谱特征类似(Østgaard等, 2019b), 从一定程度上支持了TGF产生机制中的闪电先导模型(Abbasi等, 2022). 地面观测的下行TGF与卫星观测的上行TGF发生机制是否有区别也尚不清楚(Berge和Celestin, 2019).

4 TGF与闪电放电过程的时序关系

TGF与闪电放电过程的关系研究主要分为两个方面, 一是TGF与闪电电磁辐射过程的时序关系, 用于理解TGF的发生是否与特定的闪电放电过程有关; 二是研究TGF伴随的独特电磁辐射信号的特征, 用于理解TGF产生过程自身的特性. 本章节主要对TGF与闪电放电的时序关系进行讨论, 第二个方面将在下一章进行重点讨论.

TGF与闪电放电过程的关系主要通过伽马射线探

测器(卫星平台或地面探测系统)与地面电磁探测系统的同步观测进行分析. 起初研究发现, 多数TGF与地面闪电定位系统(如全球闪电定位网WWLLN, 美国国家闪电定位网NLDN等)记录的闪电事件在毫秒尺度上具有较好的对应关系, 因此TGF的产生与雷暴闪电活动之间的紧密关系得以确认(Cummer等, 2005; Cohen等, 2006, 2010a; Inan等, 2006; Connaughton等, 2010, 2013; Inan等, 2010; 郗秀书和王俊芳, 2010; Gjesteland等, 2017; Mailyan等, 2018, 2020). 而从较高时空精度上对TGF与闪电电磁辐射脉冲时序关系的分析, 进一步明确了卫星平台观测到的TGF与来自雷暴中向上发展的初始云内先导过程的紧密相关性(Cummer等, 2005, 2011, 2014; Stanley等, 2006; Lu等, 2010; Shao等, 2010; Dwyer和Cummer, 2013; Østgaard等, 2013; Lyu等, 2018; Lindanger等, 2022), 也表明了TGF的发生与初始先导过程及云内强电场环境的联系.

Cummer等(2005)发现TGF伴随的闪电过程往往具有较小的电荷距转移量, 说明其可能与云内放电相关. 随后Stanley等(2006)和Shao等(2010)的观测也表明TGF伴随的闪电过程与雷暴中10~15km的云内放电过程关系密切. Lu等(2010)利用闪电成像阵列LMA及地面同步观测系统对RHESSI探测到的一例TGF进行了分析, 发现其发生在主负电荷区(中心高度约8.5km)与上部主正电荷区(中心高度约13km)之间, 与向上发展的云内先导相关. Cummer等(2015)综合TGF的发生时刻对其伴随的云内先导脉冲的发展高度进行了计算, 结果表明TGF主要产生在云内初始先导起始之后几毫秒之内, 并且处于先导发展的中间阶段. Lyu等(2018)对发生在LMA探测范围内的3例TGF进行了详细研究, 首次从10 μ s的时间精度上对上行TGF伴随的低频辐射以及甚高频辐射特征进行了分析, 进一步证明了TGF与云内初始先导过程的关系. 尽管如此, 也有部分RHESSI及Insight-HXMT的观测个例表明TGF可能发生在闪电起始事件之前的几毫秒之内(Shao等, 2010; Zhang等, 2021), 这种不同的表现形式是否对应着不同的TGF产生机制还需要更多的研究, 而且此类TGF的发生与其后跟随的闪电起始过程之间是否有关还尚不清楚. Zhang H等(2020)分析了发生在赤道地区雷暴中的TGF伴随的低频电磁辐射, 结果表明较强的低频脉冲与TGF在200 μ s的时间窗内基本同步. Mailyan等(2020)对Fermi观测的TGF与地面闪电定位系统

GLD360观测时间同步的电磁脉冲事件进行了统计,发现约有70%的TGF在发生时刻200 μ s内伴随了时间同步的电磁脉冲,而且电磁脉冲的强度与TGF能谱及其卫星的水平距离存在相关性,这一发现表明这些电磁脉冲可能与TGF具有某些直接的联系。但是需要注意,由于TGF辐射源的时空不确定性等问题,这些电磁脉冲是否直接与TGF相关难以在此时间尺度上直接确认。

5 TGF伴随的独特电磁辐射

随着观测手段及设备的发展,同步观测系统的时空精度也越来越高,人们对TGF与闪电放电过程的关系研究也从TGF与雷暴活动及闪电过程的相关性,逐渐发展到TGF与闪电过程中特殊的放电事件及TGF自身电磁辐射信号的研究等方面。这些研究,尤其是TGF与特殊的闪电放电事件及TGF自身射频辐射特征等,都需要通过具有较高时空精度的观测定位系统进行时空同步分析与理论验证。

理论表明,TGF过程可能伴随着数量极大的瞬时电子转移,因此可能伴随一定的电流过程并产生低频电磁辐射(Dwyer等, 2013),对TGF过程产生的低频电磁辐射进行直接探测与研究,有助于对TGF产生机理的理解。学术界之前多关注于TGF与闪电过程的关系,但时间上与TGF密切相关的部分低频脉冲信号极有可能直接来自于TGF过程,因此TGF是否同时产生某些特殊的电磁辐射信号是TGF研究的另一个重要方面。目前这方面的研究主要集中在与TGF密切相关的两种低频脉冲放电过程,一种是时间尺度较宽的低频脉冲,另一种是辐射强度极强的云内脉冲。这两类电磁脉冲具有类似的时间尺度,但是否具有相同的产生机理尚不明确。

对TGF过程产生低频辐射的研究最早开始于Cummer等(2011)对微秒时间尺度上TGF与低频电磁脉冲之间的关系分析。他们发现了一种比正常闪电先导脉冲时间尺度更宽的低频脉冲(脉宽为50~100 μ s,普通闪电先导的脉宽为10~30 μ s),其对应的电流源时间尺度与卫星探测系统测得的伽马射线的时间尺度具有较好的一致性,说明这类时间尺度较宽的低频脉冲极有可能是直接来自于TGF产生过程,数值模拟结果也进一步支持了上述结论(Dwyer和Cummer, 2013; Berge

等, 2022)。最近, Pu等(2019)通过对TGF同步的电磁观测数据进行了再分析,进一步证实了这种较宽的低频脉冲可能是TGF产生过程的一个重要表现特征(图1)。

伴随着下行TGF的电磁辐射也可能具有类似的特征。Wada等(2020)与Hisadomi等(2021)对日本冬季雷暴观测中的下行TGF及其伴随的闪电事件进行了分析。其中部分TGF与一类产生较强峰值电流的负极性放电事件关系密切,地面电磁场的同步观测记录表明其低频波形可能与最近发现的EIP类型(Lyu等, 2015; Lyu和Cummer, 2018)的事件类似。随后, Wada等(2022)对目前冬季雷暴中观测到的多例TGF事件进行了总结,其中包括了Enoto等(2017), Wada等(2019b, 2020)与Hisadomi等(2021)报道的多个个例。这些TGF基本发生在闪电的初始阶段,但是其伴随的低频辐射特征表现不同,可以概括为三种形式:(1)低频脉冲强度一般,可能出现多次伽马射线爆发;(2)低频脉冲强度较强,例如负极性强云内脉冲事件(Wada等, 2020; Hisadomi等, 2021),袖珍型地闪(Wu等, 2021),或山顶强放电事件MEP(Lyu等, 2021b),一般仅有单次伽马射线爆发;(3)Bowers等(2017)报道的上行正先导过程。而且正如前文所述,目前报道的下行TGF伴随的闪电过程极其复杂,例如Florida地区报道的TGF发生环境多与闪电回击过程相关(Kereszy等, 2022)。因此,对下行TGF直接相关的电磁辐射的研究也较为初步,还需要开展更进一步的观测及理论研究。

近来一项关于TGF伴随的低频辐射的系统性研究是发现了强云内脉冲事件。Lyu等(2015)以及Lyu和Cummer(2018)通过对雷暴中强云内放电过程的分析,发现了一类与普通闪电放电过程区别明显的云内放电过程,命名为Energetic In-cloud Pulses(EIPs)。统计表明,EIP具有极强的低频辐射,是除双极性窄脉冲事件(Narrow Bipolar Event, NBE)之外峰值电流强度最强的云内放电事件。观测表明,EIP以正负两种极性(+EIPs和-EIPs)的形式分别发生在不同的闪电初始先导过程中。+EIP发生时刻短时时间窗(约200 μ s)内同步的星载伽马射线探测器都观测到了TGF,说明+EIP与这部分上行TGF具有一一对应的关系(Lyu等, 2016b, 2021c)。利用两者之间的关系(尤其是+EIP与TGF的关系)并通过对EIP的识别, Lyu等(2021c)还发现了之前被Fermi与RHESSI遗漏的TGF(图2),从理论与具体应用角度证明了部分TGF可以通过对EIP的测量进行探

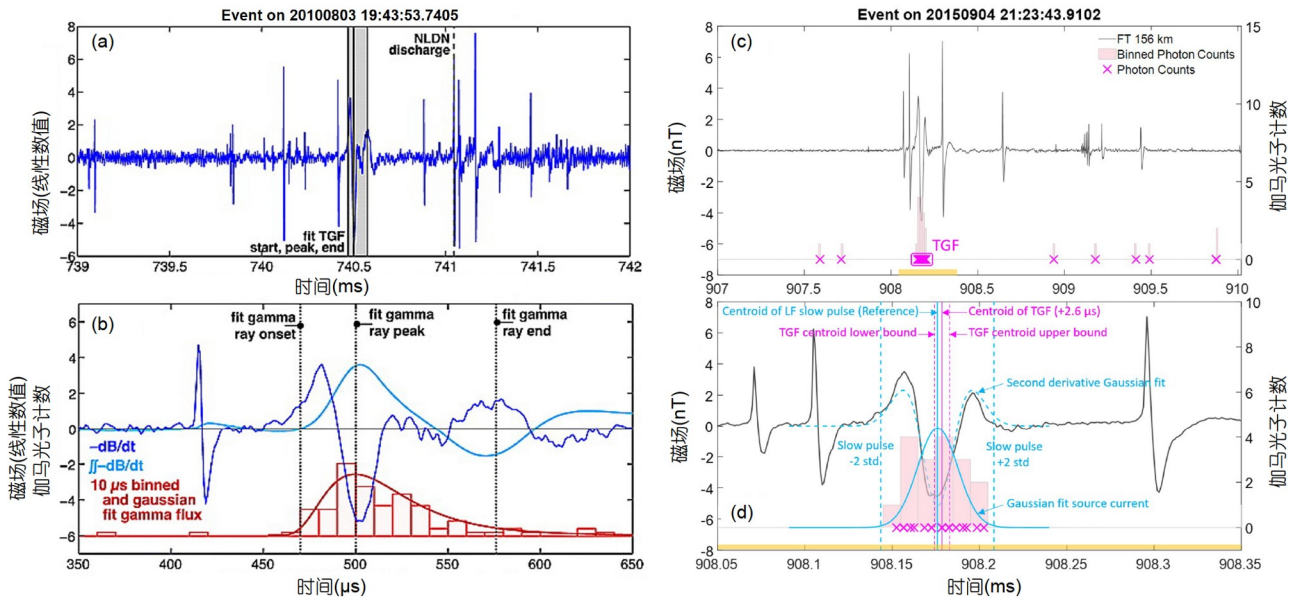


图 1 伴随TGF的特殊低频脉冲, 发生在云内上行负先导过程中的TGF及与其直接相关的低频脉冲同步观测

此类低频脉冲具有与普通云内先导脉冲明显不同的波形特征, 但与TGF过程时间尺度类似的高斯电流过程具有较一致的对应关系. 引自Cum-mer等(2011)及Pu等(2019)

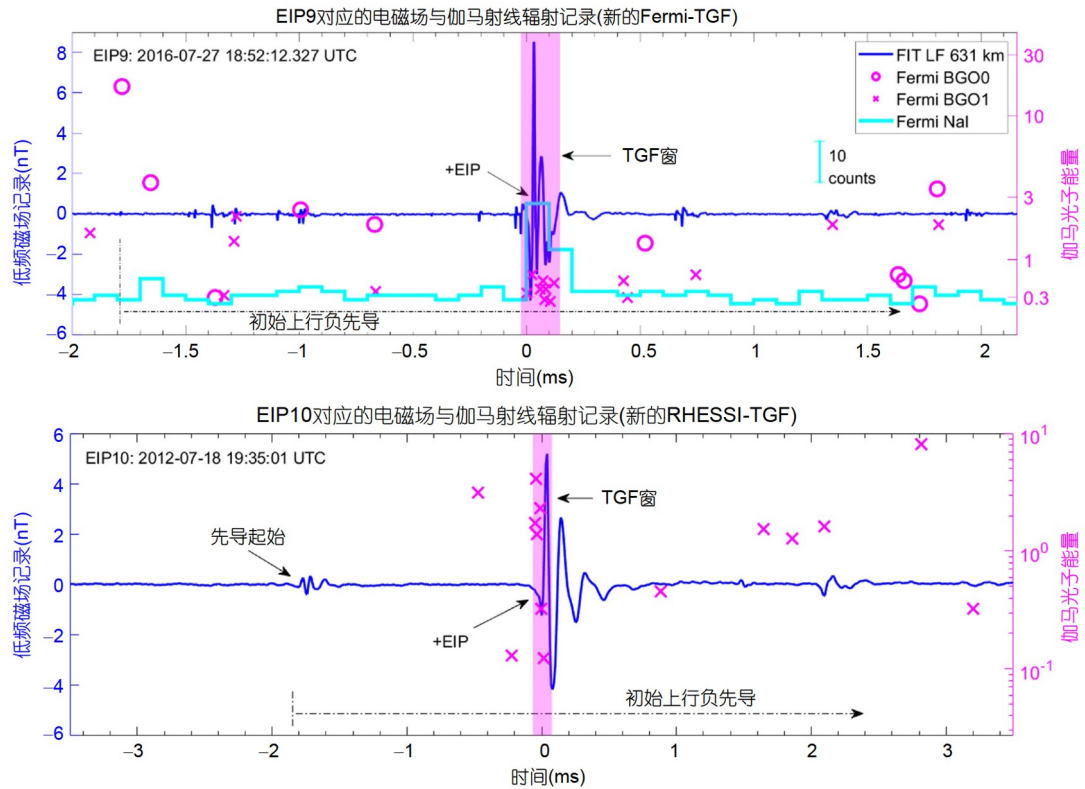


图 2 两例利用EIP搜索发现的卫星平台遗漏的TGF

蓝色线表示地面磁场传感器记录的低频信号, 粉色阴影窗表示卫星伽马射线探测器再处理后发现的TGF. 由于某些原因, 这两例事件被常规的TGF识别方式遗漏, 但是通过对EIP的搜索被重新识别出来. 引自Lyu等(2021c)

测. 这一结果对丰富TGF的探测方式, 尤其是地基测量系统实现远距离的TGF观测具有重要意义.

通过对EIP的识别及多种观测方式的结合, 例如地基三维定位系统(Rison等, 1999; Bitzer等, 2013; Karunarathne等, 2013; Lyu等, 2014; Wang等, 2016; 史东东等, 2018; Fan等, 2018; Wu等, 2018; Chen等, 2019; Qie和Zhang, 2019; Tian等, 2019; Liu B等, 2020; Zhu等, 2020; Ma等, 2021)、新型的具有较高时空分辨率的甚高频干涉仪观测系统(Sun等, 2013; Stock等, 2014; Shao等, 2018; Lyu等, 2019; Tilles等, 2020)及卫星观测平台(Briggs等, 2013; Østgaard等, 2021)等, 进行高时空精度的EIP协同观测, 可以对产生TGF的放电过程进行更精细的研究, 探索EIP或TGF的产生机理及其与其他放电过程的关系. Cummer等(2014)利用此类低频脉冲的传播特性, 对TGF发生过程的高度、伴随的电流参数及逃逸电子数目等进行了估算. Tilles等(2020)利用甚高频干涉仪、快电场、磁场以及LMA等的综合观测(图3), 对发生在观测站点约30km的一例+EIP及其伴随的负极性先导的发展过程进行了详细的分析, 结果证实了+EIP发生过程伴随着较强的甚高频与低频辐射(Lyu等, 2015, 2018), 但是甚高频辐射与低频辐射可能来自两个相互独立的过程(Fan等, 2022). 甚高频辐射来源于闪电先导的快速流光过程(Rison等, 2016;

Tilles等, 2019), 而低频辐射可能与大量相对论电子逃逸导致的电流过程(Dwyer等, 2005; Dwyer, 2012; Liu和Dwyer, 2013)密切相关. 这一研究虽然缺少伽马射线探测设备的直接观测, 但结果不仅证实了EIP/TGF与活跃的闪电先导密切相关(Lyu等, 2018), 也说明了+EIP低频辐射与TGF的直接关系(Lyu等, 2016b, 2021c), 进一步为在地面通过特殊的射频辐射信号进行TGF的探测提供了理论与观测支持.

大量高能电子的移动与空气分子的相互作用产生伽马射线辐射, 同时大量电子移动带来的瞬时电流过程可能产生极强的低频电磁辐射, 这从理论上也解释了+EIP与TGF可能是同一过程的两种表现形式(Lyu等, 2016b). 需要指出的是, 目前观测表明, 并不是所有的TGF都产生类似的+EIP过程, 约有10%的TGF伴随了这种+EIP过程(Lu等, 2011; Lyu等, 2015). 另一方面, 近来报道的一类与EIP类似的电流幅度稍弱的慢脉冲过程(Cummer等, 2011; Lyu等, 2018; Pu等, 2019), 两者都发生在云内初始先导过程中, 具有相似的脉冲特征(时间尺度一般大于50 μ s, 与先导脉冲区别明显), 且都与TGF在微秒级时间尺度上同步. 两者与TGF的关系及产生过程可能类似, 但是具体的物理机理尚不明确, 尚需要利用精细时空定位系统对其产生过程做进一步的观测研究.

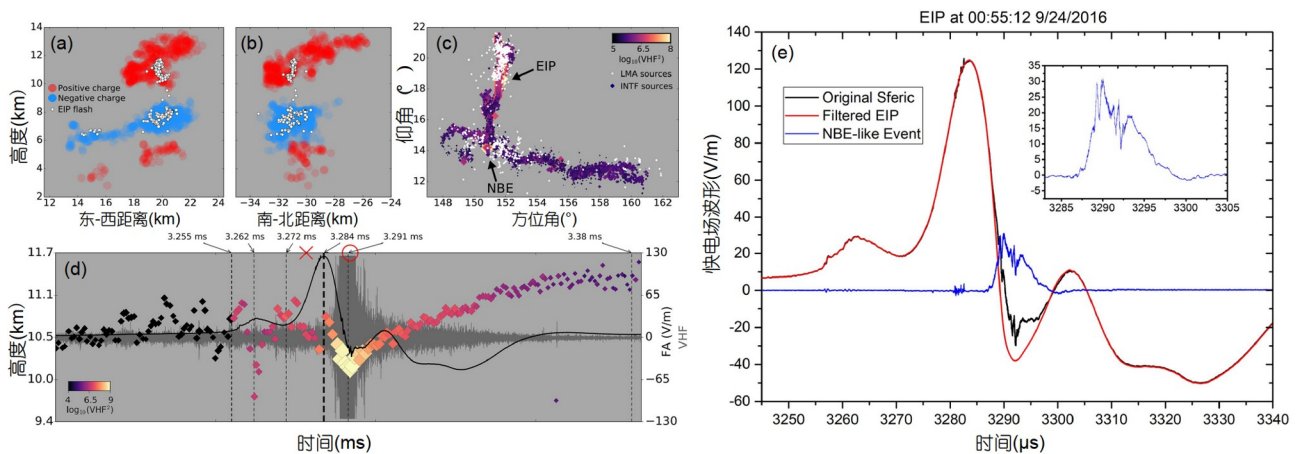


图3 利用地面快电场测量系统、闪电成像阵列(LMA)、甚高频宽带干涉仪系统对一例发生在30km左右的EIP事件的同步观测

(a)和(b)为LMA观测获得的EIP产生阶段内雷暴的电荷结构及产生EIP的闪电过程的三维定位; (c)为宽带干涉仪及LMA对产生EIP的闪电过程的定位结果; (d)为EIP产生期间快电场及甚高频测量的信号波形及甚高频宽带干涉仪的定位结果; (e)为利用集合经验模态分解方法(Fan等, 2020)对快电场宽带信号的分解结果, 可以看出快电场测量的原始信号可以分成一类快速击穿过程(蓝色线)及可能与逃逸电子反馈机制导致的电子雪崩过程相关的电流过程(红色线). 引自Tilles等(2020)

6 TGF的源区位置

模拟表明TGF过程的伽马射线辐射与TGF源的几何特征及初始能量有紧密的关系(Berge和Celestin, 2019), TGF辐射源的位置及特性对于理解其产生机理及其与闪电过程的关系等具有至关重要的作用. 最初发现TGF时, 其被认为可能与中高层大气放电过程有关, 伽马射线辐射源的高度可能发生在40km以上(Fishman等, 1994; Taranenko和Roussel-Dupré, 1996). 但是随着RHESSI卫星的进一步观测以及对BATSE数据的再分析(Cummer等, 2005; Dwyer和Smith, 2005; Carlson等, 2007; Østgaard等, 2008), 发现TGF可能发生在20km以下的雷暴云内. 而且地面同步观测也逐渐证实了这一点(Inan等, 2006; Stanley等, 2006; Lu等, 2010; Shao等, 2010; Cummer等, 2011, 2014, 2015; Xu等, 2012; Lyu等, 2018; Mailyan等, 2019; Pu等, 2019; Tilles等, 2020; Zhang等, 2021). 自从约2005年开始, 学术界对TGF源的大概位置有了比较一致的认识, 也进一步明确了TGF与雷暴闪电放电过程的关系.

Cummer等(2005)分析了TGF伴随的放电事件的电荷距变化, 发现其计算值比理论上预测的发生在较高位置的逃逸击穿过程伴随的电荷距变化小2个量级左右, 由此提出TGF可能发生在30km以下的位置. Dwyer和Smith(2005)、Carlson等(2007)、Østgaard等(2008)及Xu等(2012)基于蒙特卡罗模拟方法对伽马射线在大气中传播的能谱特性及其与辐射源高度的关系进行了分析, 发现TGF辐射源的发生位置可能限定在20km以下. 正如前绪章节中所述, 卫星平台观测的上行TGF主要与雷暴云内主负电荷区及其上部正电荷区之间的云内负先导的发展有密切关系(Stanley等, 2006; Lu等, 2010; Shao等, 2010; Cummer等, 2011; Lyu等, 2018; Pu等, 2019), 上行TGF的发生位置基本被限定在雷暴中两个电荷区之间, 而且TGF的发生往往与雷暴中较强的环境电场或活跃的云内先导发展过程有关. 因此, TGF的源区位置可能被限定在雷暴云体之内. Cummer等(2014, 2015)利用低频电磁信号在地面-电离层形成的波导腔中传播时的反射特性, 估算了伴随TGF的云内先导脉冲的发展高度, TGF产生时先导位于12km左右, 处于初始先导发展的中间阶段. Pu等(2019)利用与TGF密切相关的低频脉冲的电流特征参数与伽马射线分布特征之间的时间相关性进行了统计, 发现TGF的

高度约为12~16.6km, 与之前结果基本一致. 对下行TGF而言, Abbasi等(2018)及Wada等(2019b)估算发现高度可能在2~5km, 与下行负先导发展过程相关. 越来越多证据表明TGF是发生在雷暴云内的过程, 而且不太可能直接伴随着红色精灵(Red Sprite)等中高层大气放电事件. 最新的观测与模拟表明一些特殊的伴随TGF的过程(例如EIP等)由于其极强的瞬时电磁辐射会引起电低层电离层的扰动, 产生淘气精灵(Elves)这类中高层放电现象(Liu N等, 2017; Østgaard等, 2019b, 2021; Neubert等, 2020; Bjørge-Engeland等, 2022), 但这与红色精灵等其他中高层大气放电过程的产生机理明显不同.

Lyu等(2016b, 2021c)也利用EIP与TGF的紧密关系对TGF的发生高度进行了估计. 统计表明, 正极性EIP多数发生在10~13km的范围内, 平均发生高度为11.3km(Lyu等, 2021a), 这与之之前通过云内先导发展高度对TGF高度的估计基本一致. Tilles等(2020)近距离观测到的正极性EIP发生在主负电荷区(6~8km)与主正电荷区(10~12km)之间. 根据EIP与TGF的密切关系, Lyu和Cummer(2018)通过不同类型EIP在雷暴中的可能位置对上行及下行TGF的发生位置进行了推测(图4). 雷暴中上行TGF发生在主负电荷区与上部主正电荷区之间, 而下行TGF有可能发生在主负电荷区与下部正电荷区之间, 或者在下行负极性先导接近地面的高度上, 但下行TGF在雷暴中的发生位置还需要更进一步的研究.

综上所述可以看出, 目前主要通过以下几种方式对TGF源区位置进行估算, 例如伴随TGF的闪电先导的发展位置(Cummer等, 2015; Abbasi等, 2018), 模拟获得的不同高度伽马射线辐射能量与地面观测获得的TGF辐射能量的对比(Wada等, 2019b), 地面电磁信号特征与卫星平台观测获得的光子辐射特征的时间相关性对比(Pu等, 2019), 与TGF相关的特殊射频辐射信号(如EIP)的高度估算(Cummer等, 2014; Lyu等, 2021a)等方式. 由于缺乏直接的定位手段, 来自地面的闪电电磁辐射协同观测在未来一段时间内将继续作为重要辅助手段之一为TGF的辐射源高度研究提供佐证.

7 TGF相关的雷暴气象学环境

关于TGF的观测研究主要集中在TGF发生过程与

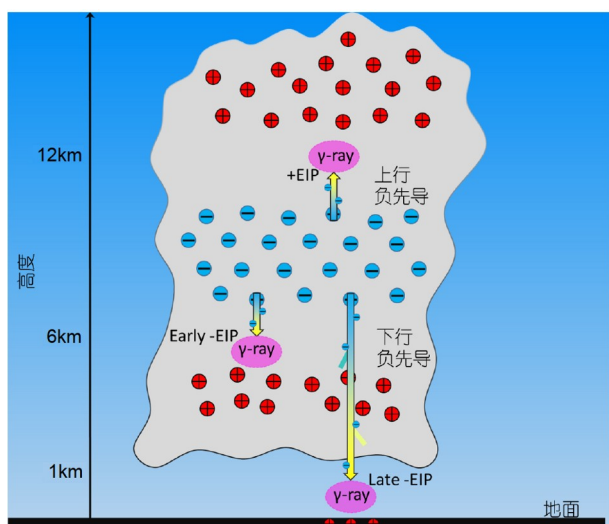


图4 TGF在雷暴中的可能位置及其与闪电先导过程的关系概念图

其中伴随正极性EIP的TGF发生在主负电荷区与上部主正电荷区之间, 而伴随负极性EIP的TGF可能发生在主负电荷区与下部正电荷之间或者在下行负极性先导接近地面的高度上. 引自Lyu和Cummer (2018)

闪电放电之间的关系, 及TGF产生过程的理论研究, 目前只有少数针对TGF发生的雷暴环境进行报道. 在最初TGF被发现之后, BATSE对TGF也进行了持续的观测, 但是由于BATSE固有的系统设计问题(较长的触发时间窗, 决定了只有部分强的TGF被观测到), 9年中只有78例TGF被观测到(小于10TGFs/年)(Nemiroff等, 1997; Inan, 2005). 新型TGF卫星探测平台的观测也逐渐证实了TGF在雷暴中频繁的发生频率. 目前Fermi探测器可以在其运行轨道范围内实现每年记录到850个以上的TGF, 据此可以推算出全球范围内TGF的发生个数大约为每天1100(Briggs等, 2013)~1200(Tierney等, 2013). 观测表明, 雷暴中不同强度的对流区域都可能产生TGF(Chronis等, 2016). 因此, TGF与闪电发生率、雷暴对流强度、雷暴对流微物理特征等的关系, 以及其在特殊对流性天气系统(如热带气旋等)中的表现特征等TGF与雷暴气象学环境等方面的研究也逐渐获得重视.

Splitt等(2010)利用NCEP-NCAR与ECMWF的气象探空、GOES, 以及Meteosat系列等地球静止遥感卫星、TRMM卫星的云水云冰产品与闪电成像仪(LIS), 以及地面全球闪电定位网WWLLN的综合观测数据对RHESSI观测的TGF在雷暴中的发生特征进行了统计,

表明TGF活动与雷暴活动在日变化, 季节变化以及地域变化特征上具有相似的关系. Xian等(2021)基于RHESSI、Fermi和HXMT三个卫星观测平台的观测数据, 利用掩星方法分析了全球尺度上TGF探测时的对流层温度廓线, 发现东南亚地区的夏季对流层顶高度普遍比加勒比海地区高1km左右. 通过统计TGF与雷暴闪电过程的季节性与地域性变化特征, Smith等(2010)发现两者之间的部分差别与对流层顶发展高度可能存在某些关系, 并指出这种联系可能是由于TGF的产生与雷暴中位置较高的闪电相关, 或者只有位置较高的TGF被卫星平台观测到. 对TGF与闪电峰值发生率之间的关系研究表明, TGF的发生时刻可能较闪电峰值晚约几十分钟(Smith等, 2010), 但Ursi等(2019)发现TGF多数发生于雷暴闪电活动峰值的 $\pm 5\text{min}$ 之内. Fabr6等(2019)对非洲地区的闪电活动与TGF发生频率之间的关系研究表明, 雷暴中的TGF活动与闪电活动之间的正相关关系并不显著, 强烈的闪电活动与TGF的发生频率并不对称. Larkey等(2021)研究表明TGF倾向于发生在闪电活动开始减弱且发生频率较低的时段, 但TGF发生时段内闪电的强度强于雷暴活动的其他时段. 不同的研究个例中, TGF的发生与闪电发生率及闪电活动之间的关系并不明确, 因此尚需进一步的统计研究.

Ursi等(2019)利用Meteosat系列地球静止卫星的观测数据综合分析了RHESSI、AGILE以及Fermi三个卫星平台探测到的278例TGF的母体雷暴特征, 发现多数TGF与雷暴深对流系统的发展阶段相关. Zhang H等(2020)对赤道地区雷暴中的TGF的母体雷暴特征进行了分析, 发现TGF发生在雷暴发展的成熟阶段, 而且往往在较强但不是最强的雷暴中, 与Maiorana等(2021)利用ASIM在中纬度地区的观测结果也比较一致. Tiberia等(2021)利用GPS卫星测得的对流层水汽含量、ECMWF的ERA5在分析资料、GOES卫星测量的黑体辐射亮温, 葵花8卫星获得的云顶温度以及WWLLN记录的闪电活动等对AGILE探测的TGF母体雷暴的时间演变进行了分析, 表明TGF倾向于发生在比较普通的雷暴对流环境中. TGF在一些比较特殊的对流系统中也被观测到, Roberts等(2017)对发生在热带对流系统以及强气旋系统中TGF的发生环境进行了对比, 发现TGF基本发生在热带对流系统内部, 而强气旋系统中的TGF往往发生在外雨带附近, 并且多处于系统的增

强阶段, 这与气旋系统中强闪电活动的发生环境基本一致(Zhang等, 2015; Xu等, 2017). 值得注意的是, 目前观测表明尽管TGF在气旋中心眼墙附近被观测到, 但在距离气旋中心100~150km的范围内没有发现TGF(Bowers等, 2018). TGF母体对流系统的空间尺度没有明显的特征, 在尺度较小的对流单体雷暴及尺度较大的中尺度对流系统或气旋系统中都有TGF的观测报道. 但TGF的产生与对流系统中发展高度较高的雷暴可能具有紧密的联系(Splitt等, 2010), 而且雷暴发展带来的电荷结构及电场环境的变化都可能对TGF的产生有一定的影响.

TGF雷暴在云水含量特征上可能具有与其他雷暴不同的特征, Barnes等(2015)分析了TRMM卫星与RHESSI的同步观测数据, 对有无TGF的雷暴微物理环境特征进行了对比研究, 发现TGF雷暴具有相对较多的云水, 云冰含量, 而且TGF的发生率占TRMM闪电成像仪观测到的雷暴中总闪电的数目相对固定, 说明TGF在雷暴发生过程中产生率变化不大. Chronis等(2016)利用地基天气雷达(NEXRAD)分析了Fermi卫

星观测到的24例TGF的雷暴发生环境, 对雷暴回波顶高、垂直积分液态云水含量、雷达反射率特征、CAPPI以及对流有效位能CAPE等特征参数进行了分析. 结果表明产生24例TGF的雷暴强弱各不相同, 雷暴的微物理过程并没有表现出典型的特征(其中四例TGF母体雷暴的雷达回波特征如图5所示).

对TGF在雷暴中发生环境的研究表明, TGF的发生与雷暴中闪电的发生率之间有一定的联系, 但是TGF母体雷暴的类型, TGF发生时刻与雷暴发展阶段及闪电活动的关系, 以及不同区域中TGF母体雷暴的差异等还需要进一步的研究. 后期基于最新TGF观测平台(如国际ASIM、国内HXMT及GECAM等)与卫星或地基雷暴观测平台对TGF与雷暴动力及微物理过程的关系研究将进一步解答这些问题.

8 TGF的物理理论模型及产生机制

高能电子加速之后的韧致辐射过程产生伽马射线辐射(Wilson, 1925), 这些高能电子的数目有可能通过

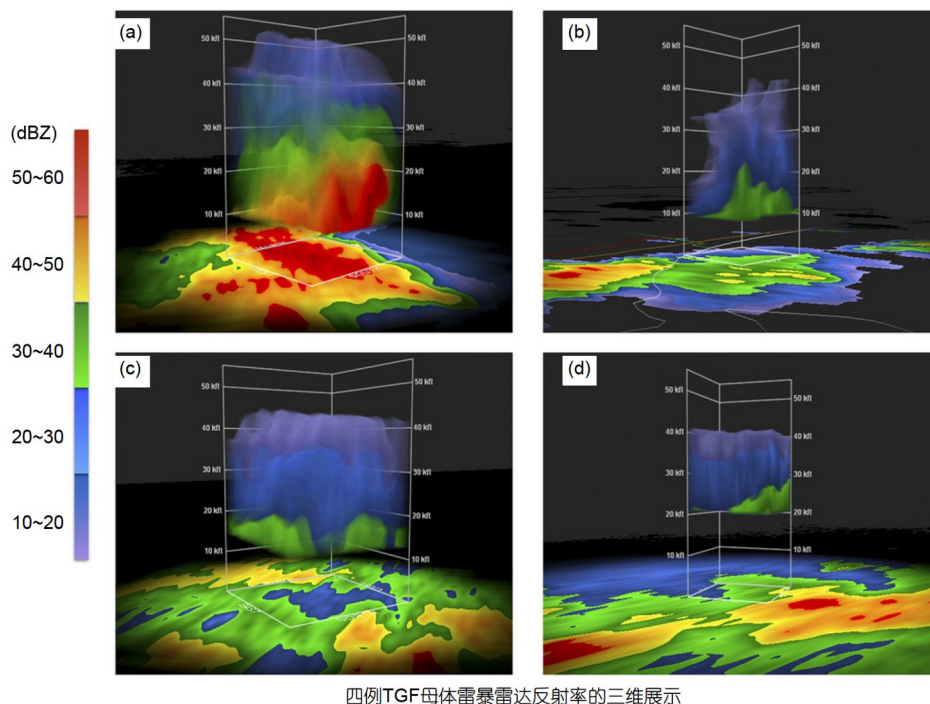


图5 四例产生TGF的雷暴中, 在TGF位置10km×10km范围内的雷达回波的三维展示
可以看出, 在较强对流核心区, 对流核心外围等区域都有TGF发生. 引自Chronis等(2016)¹⁾

1)© American Meteorological Society.

相对论逃逸电子雪崩机制(Relativistic Runaway Electron Avalanche, RREA)被加强(Gurevich等, 1992), 但是对普通电子加速到高能电子的机理还不明确, 观测仪表明其发生与雷暴及雷暴中闪电放电过程密切相关. 空气中的自由电子可以在雷暴大尺度或局部强电场作用下被加速, 从而获得能量, 但是由于运动过程中与空气分子的非弹性碰撞导致损失能量, 只有极少数的电子有可能打破能量平衡, 而获得极高的能量. 理论研究表明, 只有当自由电子在极强的电场($>260\text{kV cm}^{-1}$)状况下获得超过150~200eV的能量时才会产生系统性的逃逸电子雪崩过程, 促使电子能量倍增(Dwyer等, 2012a). 对这类高能电子在较短时间尺度内的产生机制还存在争议.

目前雷暴TGF的产生机理主要有两种解释(Dwyer和Uman, 2014). 一种是闪电先导模型, 认为是自由电子在与闪电先导(Lightning Leader)发展相关的局部强电场中产生逃逸而辐射伽马射线(Moss等, 2006; Carlson等, 2010; Dwyer等, 2010; Celestin等, 2012; Celestin和Pasko, 2012; Babich等, 2015). 这一模型的提出主要依据Gurevich于1960年提出的热逃逸击穿机制(Gurevich, 1961), 目前逃逸电子的产生过程及与先导发展的位置关系尚不清楚, 极有可能与先导头部的强电场相关. 另外一种相对论反馈模型(Relativistic Feedback, RFD)(Dwyer, 2003, 2008, 2012; Liu和Dwyer, 2013), 认为在一定空间尺度的强电场环境中来自正电子或高能光子的正反馈造成相对论逃逸电子雪崩产生倍增效应, 进而产生高能电子流并辐射伽马射线. 与先导模型相比, 这一模型通过正反馈实现逃逸电子的多次增长.

两种模型主要的区别在于产生高能电子的强电场的形式及电子加速方式不同. Dwyer(2003, 2008, 2012)提出的相对论反馈模型(RFD)中, 由于正反馈机制的存在, 由电子对产生机制生成的正电子通过后向反射可以返回初始能量电子的位置并在一定尺度的强电场中被再次加速, 从而实现高能电子数目快速增长. Liu和Dwyer(2013)进一步发展了相对论反馈模型, 提出了闪电流光-先导发展对相对论反馈模型的可能作用. 而闪电-先导模型强调的也正是与闪电先导-流光头部发展相关的局部强电场, 电子在先导头部的局部强电场中被加速. Dwyer(2021)对可能的伴随正先导的TGF过程进行了模拟, 结果发现与地面观测的TGF具有相似的特征. 因此, 两种模型都可以解释高能粒子的产生,

而且也都提出了与闪电先导发展相关的强电场在能量电子加速中的作用. 但目前卫星平台观测的TGF能谱特性呈现多样性(Mailyan等, 2016, 2019), 地面测量的TGF伴随的低频电磁脉冲也不能完全明确TGF的产生倾向于哪种机制(Dwyer等, 2017). 正如Østgaard等(2019b)及Abbasi等(2022)对TGF发生过程伴随的光学信号的讨论, 目前尚没有统一的认识, 而多种同步观测资料的结合将极大地促进对TGF的产生机制的理解. 可能在条件满足的情况下, 两种机制在某些TGF的产生过程中都起到了一定的作用. 对卫星平台观测到的上行TGF而言, 雷暴中处于主负电荷区与主正电荷区的上行负先导的发展都可能为两种模型提供了所必需的条件. 梯级先导发生步进过程之前, 低能电子可能被先导头部与上部电荷区之间的电场加速. 另外, 不同极性的先导在对应电荷区发展过程中产生的流光电晕区可能带来极强的环境电场, 促使局部电场快速增强并使电子加速到逃逸区, 正反馈机制带来的倍增效应进一步加速了高能电子数目的增长, 进而促使高能电子与空气分子碰撞产生韧致辐射.

9 不确定问题及未来研究方向讨论

雷暴及其放电过程伴随着多种形式的高能辐射过程, 如X射线、伽马射线晕(Gamma-Ray Glows)、地球电子束(Terrestrial Electron Beams, TEBs), 以及本文重点讨论的地球伽马射线闪TGF等. X射线与TGF的区别主要在于伽马射线能量量级, 一般小于1MeV, 目前观测表明地面观测的X射线与地闪回击前的梯级先导或梯级-直窜先导密切相关(Moore等, 2001; Dwyer等, 2004b, 2011). 雷暴过程中的伽马射线晕(Gamma-Ray Glows)是指雷暴过程中长时间的X-ray射线或伽马射线辐射, 一般持续时间为秒级或分钟级, 明显长于TGF中短时脉冲类型的伽马射线辐射(Torii等, 2011; Dwyer等, 2012a; Dwyer和Uman, 2014; Østgaard等, 2019a; Wada等, 2019a), 在地面上观测到的Gamma-Ray Glows也被命名为雷暴地面增强(Thunderstorm Ground Enhancement, TGE)(Chilingarian和Mkrtychyan, 2012). Gamma-ray Glows往往与雷暴本身相关, 与单个闪电过程之间的关系并不明显, 尽管地面测量到的伽马辐射有时会随某些闪电过程骤减(Wada等, 2018). 地球电子束(TEBs)是一类伴随TGF过程产生的高能电子束

(Dwyer等, 2008). 在约40km以上的高度上, TGF产生的伽马射线仍然会与大气分子相互作用, 通过康普顿散射再次产生高能电子并通过电子对生成机制产生高能正电子, 这些高能粒子可以在稀薄的高层大气中沿着地球磁场线持续传播, 形成高能电子束, 被近地轨道卫星平台捕获(Cohen等, 2010b; Briggs等, 2011; Carlson等, 2011; Xiong等, 2012). 尽管TEBs被捕获的概率明显低于TGF, 但与TGF相比, 卫星平台观测的TEBs过程往往持续时间更长, 并且能量也明显更高(Dwyer和Uman, 2014). 不同类型的高能辐射过程与雷暴中的TGF都存在一定的关系, 文中并未展开讨论. 本文着重对国内外有关TGF的研究进行了总结, 从七个方面对TGF研究相关的科学问题进行了重点讨论.

相比发现之初, TGF探测研究在近十年获得了极大关注, 在其理论模型, 伴随的放电过程及与雷暴闪电活动的关系研究方面都取得了显著进展. 但是由于其尚存争议的产生机制、不明确的伽马射线辐射源特性、复杂的闪电先导发展特征、伽马射线的特殊观测方式, 以及由此带来的协同观测时间不确定性等问题, TGF相关的探测研究尚有很多问题未被解决. 因此, 对TGF的观测研究仍然需要加强, 我国也亟须进一步开展与TGF等雷暴高能辐射过程相关的研究. 未来可以初步考虑在以下几个方面开展相关工作.

(1) 下行TGF的地面观测: 这一方面涉及的主要问题包括地面伽马辐射观测试验及下行TGF的发生环境研究, 需要进一步明确与下行TGF相关的闪电放电过程. 上行TGF往往可以穿透雷暴云顶, 被运行在高度为600km左右的近地轨道卫星探测平台观测到, 而下行TGF主要利用在地面近距离架设的伽马射线探测器进行观测. 每年有不少于上千例的上行TGF被卫星平台探测到, 但相比之下, 下行TGF观测个例极少, 目前仅有几十例的下行TGF被报道. 由于研究样本偏少, 与下行TGF相关的诸多问题还缺乏统一的认识. 如第三部分及第五部分所述, 下行TGF伴随的闪电放电类型呈现多样性, 发生环境更复杂, 与卫星平台观测的上行TGF产生机制是否相同还尚不明确. 除下行TGF, 地面观测系统也观测到了伴随闪电放电的能量稍弱的X射线辐射, 两者都伴随了逃逸电子雪崩过程, 但是具体的产生机制与场景可能不尽相同. 这些都需要更多的观测研究进行明确. 国内已开展了针对人工触发闪电过程中下行TGF的探测(李小强等, 2019; 张雄等,

2022), 具备了一定的基础条件, 通过加强与闪电放电过程的同步观测将在下行TGF相关的研究中取得重要进展.

(2) 卫星观测及其不确定性: 卫星平台探测仍然是目前雷暴TGF探测的主要手段, 搭载在卫星上的伽马探测器对TGF的识别主要取决于雷暴中TGF发生之后在沿垂直方向的某一角度范围内的向上扩散的高能光子数量. 其带来的问题包括: ① 如果卫星观测平台距离雷暴的水平距离较远, 使得探测器相对于TGF源区的垂直偏离角度较大(Briggs等, 2013), 可能使探测器不足以获得足够的光子数量, 造成部分TGF不容易被探测到或者因为探测的光子数不足以满足TGF的判断标准而被遗漏(Østgaard等, 2008; Celestin和Pasko, 2012; Briggs等, 2013; Roberts等, 2018; Xu等, 2019; Lyu等, 2021c); ② 由于雷暴中复杂的电荷结构(Schultz等, 2018; Zheng等, 2019), 局部环境电场方向具有一定的倾斜角度, 云内初始先导并不一定是垂直向上发展的(Lyu等, 2016a), 而倾斜的先导放电可能造成TGF因为初始辐射方向偏离卫星平台的位置而难以被观测到, 研究也表明, TGF源的倾斜角度也是理解卫星平台伽马射线的测量的一个重要参数(Xu等, 2019), 而且引入倾斜角度的先导模型对TGF能谱特征分析有一定的改进(Mailyan等, 2019); ③ 对于发生在深厚对流系统, 或者是相对云顶高度较低的TGF, 有两个方面的问题需要注意. 一是可能会因为上行TGF的光子能量在传输过程中的衰减(Maiorana等, 2021)导致卫星探测平台获得的高能光子数量不满足判断条件而被遗漏, 另一方面可能导致部分卫星平台探测的TGF能谱或光子数量判断不准确(Cummer等, 2014). Smith等(2010)也在对TGF与闪电活动的研究中提出了卫星观测可能存在的问题. 未来国内利用Insight-HXMT或GECAM开展TGF的卫星平台观测研究也需要考虑这几方面的不确定性, 并且需要加强对闪电放电三维动态过程的精细观测, 尤其是与TGF相关的放电过程及雷暴发展特征的精细协同观测.

(3) TGF的地面与卫星平台伽马射线同步观测: 除了部分特殊的高能辐射过程(如TEB等), 卫星平台观测主要针对的是雷暴中的上行TGF, 对下行TGF的探测概率极低. 这些都跟TGF的卫星平台探测方式(主要是探测器的灵敏度以及探测器的有效探测范围)、TGF在雷暴中的发生位置, 以及TGF相关的闪电放电类型

等都具有比较紧密的关系. 近来, Bowers等(2018)及Pu等(2020)的观测结果也表明, 对于同一TGF过程, 卫星平台和地面探测器可能分别捕获来自于相对论逃逸电子雪崩(RREA)韧致辐射与来自于反向正电子束韧致辐射对应的伽马射线. 因此卫星平台与地面伽马射线探测设备可能从不同方面获得对同一TGF过程的观测, 这尚需更多观测进行验证.

(4) 基于电磁辐射信号的TGF地面探测: 正如前所述, 由于伽马射线流强在密度较高的低层大气中的快速衰减特性, 地面TGF的直接探测相对困难. 目前TGF探测仍然主要以近地轨道卫星平台探测为主, 而TGF伴随的特殊低频电磁辐射为TGF的地面探测提供了可能(Lyu等, 2016b, 2021c), 也将极大地增进对TGF产生机制及发生环境的研究. 一般TGF过程伴随的电子能量可以达到几十甚至上百兆电子伏(Smith等, 2005, 2011; Marisaldi等, 2010, 2019; Tavani等, 2011; Celes-tin等, 2012), 但高能电子的数量尚不确定. 一个主要原因是TGF在深厚雷暴云内的准确位置尚不清楚, 导致利用模型获得的高能粒子的数量差异较大. TGF源区的确切位置与雷暴云顶高度的相对关系, 对研究TGF能谱特征及理解TGF的产生机理与辐射源的特征具有重要意义, 因此需要对TGF的辐射源位置进行相对准确的判断, 这都必需地面测量系统的协同观测. EIP及特殊的低频辐射与TGF的关系(Cummer等, 2011; Dwyer和Cummer, 2013; Lyu等, 2016b, 2021c; Pu等, 2019; Berge等, 2022)为地面协同观测提供了一种可能. 目前基本确定EIP与部分TGF具有一一对应的关系, 可以通过EIP的识别及研究对这一类TGF的产生机制以及其与雷暴中闪电放电过程的关系实施针对性的研究, 进行雷暴TGF的远距离地面探测试验, 并对TGF过程(或与TGF直接相关的放电过程)开展地面与卫星平台的高精度时空同步观测研究.

致谢 感谢两位匿名评审专家提出的宝贵建议.

参考文献

- 李小强, 蒋如斌, 张雄, 郑毅, 周红召, 王宇, 邢斌. 2018. 基于碘化钠探测器的闪电 γ 射线爆发观测研究. 原子能科学技术, 52: 1092–1098
- 李小强, 蒋如斌, 李鹏, 张雄, 郑毅, 李英男, 刘伟. 2019. 人工引雷高能辐射观测及数据分析研究. 原子能科学技术, 53: 373–378

- 陆高鹏, 熊少林, 吕凡超, 张鸿波, 徐未, 杨靖, 祝宝友, 刘非凡, 李东帅. 2020. 对流层雷暴在近地空间的高能辐射效应-地球伽马射线闪. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 50: 129506
- 史东东, 郑栋, 张阳, 张义军, 黄治钢, 吕伟涛, 陈绍东, 颜旭. 2018. 低频电场变化探测阵列建设及其初步运行结果. 中国科学: 地球科学, 48: 113–126
- 鄢秀书, 王俊芳. 2010. 地球 γ 射线闪(TGFs)及其物理机制研究进展. 地球科学进展, 25: 893–906
- 张雄, 郑毅, 曹保锋, 张爽, 李鹏, 李小强. 2022. TEROS: 雷暴高能辐射观测系统的设计与实现. 地球物理学报, 65: 4152–4162
- Abbasi R U, Abe M, Abu-Zayyad T, Allen M, Anderson R, Azuma R, Barcikowski E, Belz J W, Bergman D R, Blake S A, Cady R, Cheon B G, Chiba J, Chikawa M, Fujii T, Fukushima M, Goto T, Hanlon W, Hayashi Y, Hayashida N, Hibino K, Honda K, Ikeda D, Inoue N, Ishii T, Ishimori R, Ito H, Ivanov D, Jui C C H, Kadota K, Kakimoto F, Kalashev O, Kasahara K, Kawai H, Kawakami S, Kawana S, Kawata K, Kido E, Kim H B, Kim J H, Kim J H, Kishigami S, Kitamura S, Kitamura Y, Kuzmin V, Kwon Y J, Lan J, Lundquist J P, Machida K, Martens K, Matsuda T, Matsuyama T, Matthews J N, Minamino M, Mukai K, Myers I, Nagasawa K, Nagataki S, Nakamura T, Nonaka T, Nozato A, Ogio S, Ogura J, Ohnishi M, Ohoka H, Oki K, Okuda T, Ono M, Onogi R, Oshima A, Ozawa S, Park I H, Pshirkov M S, Rodriguez D C, Rubtsov G, Ryu D, Sagawa H, Saito K, Saito Y, Sakaki N, Sakurai N, Sampson A L, Scott L M, Sekino K, Shah P D, Shibata F, Shibata T, Shimodaira H, Shin B K, Shin H S, Smith J D, Sokolsky P, Springer R W, Stokes B T, Stratton S R, Stroman T A, Suzawa T, Takamura M, Takeda M, Takeishi R, Taketa A, Takita M, Tameda Y, Tanaka H, Tanaka K, Tanaka M, Thomas S B, Thomson G B, Tinyakov P, Tkachev I, Tokuno H, Tomida T, Troitsky S, Tsunesada Y, Tsutsumi K, Uchihori Y, Udo S, Urban F, Vasiloff G, Wong T, Yamane R, Yamaoka H, Yamazaki K, Yang J, Yashiro K, Yoneda Y, Yoshida S, Yoshii H, Zollinger R, Zundel Z. 2017. The bursts of high energy events observed by the telescope array surface detector. *Phys Lett A*, 381: 2565–2572
- Abbasi R U, Abu-Zayyad T, Allen M, Barcikowski E, Belz J W, Bergman D R, Blake S A, Byrne M, Cady R, Cheon B G, Chiba J, Chikawa M, Fujii T, Fukushima M, Furlich G, Goto T, Hanlon W, Hayashi Y, Hayashida N, Hibino K, Honda K, Ikeda D, Inoue N, Ishii T, Ito H, Ivanov D, Jeong S, Jui C C H, Kadota K, Kakimoto F, Kalashev O, Kasahara K, Kawai H, Kawakami S, Kawata K, Kido E, Kim H B, Kim J H, Kim J H, Kishigami S S, Krehbiel P R, Kuzmin V, Kwon Y J, Lan J, LeVon R, Lundquist J P, Machida K, Martens K, Matuyama T, Matthews J N, Minamino M, Mukai K, Myers I, Nagataki S, Nakamura R, Nakamura T, Nonaka T, Ogio S, Ohnishi M, Ohoka H, Oki K, Okuda T, Ono M, Onogi R, Oshima A,

- Ozawa S, Park I H, Pshirkov M S, Remington J, Rison W, Rodeheffer D, Rodriguez D C, Rubtsov G, Ryu D, Sagawa H, Saito K, Sakaki N, Sakurai N, Seki T, Sekino K, Shah P D, Shibata F, Shibata T, Shimodaira H, Shin B K, Shin H S, Smith J D, Sokolsky P, Springer R W, Stokes B T, Stroman T A, Takai H, Takeda M, Takeishi R, Taketa A, Takita M, Tameda Y, Tanaka H, Tanaka K, Tanaka M, Thomas R J, Thomas S B, Thomson G B, Tinyakov P, Tkachev I, Tokuno H, Tomida T, Troitsky S, Tsunesada Y, Uchihori Y, Udo S, Urban F, Vasiloff G, Wong T, Yamamoto M, Yamane R, Yamaoka H, Yamazaki K, Yang J, Yashiro K, Yoneda Y, Yoshida S, Yoshii H, Zundel Z. 2018. Gamma ray showers observed at ground level in coincidence with downward lightning leaders. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 6864–6879
- Abbasi R U, Belz J W, Saba M M F, Krehbiel P R, Remington J, Stanley M A, da Silva D R, Rison W, Rodeheffer D, Kieu N, Mazich J, LeVon R, Smout K, Petrizzo A, Abu-Zayyad T, Allen M, Arai Y, Arimura R, Barcikowski E, Bergman D R, Blake S A, Buckland I, Cheon B G, Chikawa M, Fujii T, Fujisue K, Fujita K, Fujiwara R, Fukushima M, Furlich G, Globus N, Gonzalez R, Hanlon W, Hayashida N, He H, Hibino K, Higuchi R, Honda K, Ikeda D, Inoue N, Ishii T, Ito H, Ivanov D, Iwakura H, Iwasaki A, H.M. Jeong, Jeong S C C, Jui H, Kadota K, Kakimoto F, Kalashev O, Kasahara K, Kasami S, Kawakami S, Kawata K, Kharuk I, Kido E, Kim H B, Kim J H, Kim J H, Kim S W, Kimura Y, Komae I, Kubota Y, Kuzmin V, Kuznetsov M, Kwon Y J, Lee K H, Lubsandorzhiev B, Lundquist J P, Matsumiya H, Matsuyama T, Matthews J N, Mayta R, Myers I, Nagataki S, Nakai K, Nakamura R, Nakamura T, Nakamura T, Nakamura Y, Nakazawa A, Nishio E, Nonaka T, Oda H, Ogio S, Ohnishi M, Ohoka H, Oku Y, Okuda T, Omura Y, Ono M, Oshima A, Ozawa S, Park I H, Potts M, Pshirkov M S, Remington J, Rodriguez D C, Rott C, Rubtsov G I, Ryu D, Sagawa H, Sakaki N, Sako T, Sakurai N, Sato K, Seki T, Sekino K, Shah P D, Shibasaki Y, Shibata N, Shibata T, Shikita J, Shimodaira H, Shin B K, Shin H S, Shinto D, Smith J D, Sokolsky P, Stokes B T, Stroman T A, Takahashi K, Takamura M, Takeda M, Takeishi R, Taketa A, Takita M, Tameda Y, Tanaka K, Tanaka M, Tanoue Y, Thomas S B, Thomson G B, Tinyakov P, Tkachev I, Tokuno H, Tomida T, Troitsky S, Tsuda R, Tsunesada Y, Udo S, Uehama T, Urban F, Warren D, Wong T, Yamamoto M, Yamazaki K, Yashiro K, Yoshida F, Zhezher Y, Zundel Z. 2022. First high-speed camera observations of the optical counterpart of a terrestrial gamma-ray flash. doi:10.48550/arXiv.2205.05115
- Atwood W B, Abdo A A, Ackermann M, Althouse W, Anderson B, Axelsson M, Baldini L, Ballet J, Band D L, Barbiellini G, Bartelt J, Bastieri D, Baughman B M, Bechtol K, Bédérède D, Bellardi F, Bellazzini R, Berenji B, Bignami G F, Bisello D, Bissaldi E, Blandford R D, Bloom E D, Bogart J R, Bonamente E, Bonnell J, Borgland A W, Bouvier A, Bregeon J, Brez A, Brigida M, Bruehl P, Burnett T H, Busetto G, Caliendo G A, Cameron R A, Caraveo P A, Carusi S, Carlson P, Casandjian J M, Cavazzuti E, Ceccanti M, Cecchi C, Charles E, Chekhtman A, Cheung C C, Chiang J, Chipaux R, Cillis A N, Ciprini S, Claus R, Cohen-Tanugi J, Condamore S, Conrad J, Corbet R, Corucci L, Costamante L, Cutini S, Davis D S, Decotigny D, DeKlotz M, Dermer C D, de Angelis A, Digel S W, do Couto e Silva E, Drell P S, Dubois R, Dumora D, Edmonds Y, Fabiani D, Farnier C, Favuzzi C, Flath D L, Fleury P, Focke W B, Funk S, Fusco P, Gargano F, Gasparrini D, Gehrels N, Gentil F X, Germani S, Giebels B, Giglietto N, Giommi P, Giordano F, Glanzman T, Godfrey G, Grenier I A, Grondin M H, Grove J E, Guillemot L, Guiriec S, Haller G, Harding A K, Hart P A, Hays E, Healey S E, Hirayama M, Hjalmarsdotter L, Horn R, Hughes R E, Jóhannesson G, Johansson G, Johnson A S, Johnson R P, Johnson T J, Johnson W N, Kamae T, Katagiri H, Kataoka J, Kavelaars A, Kawai N, Kelly H, Kerr M, Klamra W, Knödlseider J, Kocian M L, Komin N, Kuehn F, Kuss M, Landriu D, Latronico L, Lee B, Lee S H, Lemoine-Goumard M, Lionetto A M, Longo F, Loparco F, Lott B, Lovellette M N, Lubrano P, Madejski G M, Makeev A, Marangelli B, Massai M M, Mazziotta M N, McEnery J E, Menon N, Meurer C, Michelson P F, Minuti M, Mirizzi N, Mitthumsiri W, Mizuno T, Moiseev A A, Monte C, Monzani M E, Moretti E, Morselli A, Moskalenko I V, Murgia S, Nakamori T, Nishino S, Nolan P L, Norris J P, Nuss E, Ohno M, Ohsugi T, Omodei N, Orlando E, Ormes J F, Paccagnella A, Paneque D, Panetta J H, Parent D, Pearce M, Pepe M, Perazzo A, Pesce-Rollins M, Picozza P, Pieri L, Pinchera M, Piron F, Porter T A, Poupard L, Rainò S, Rando R, Rapposelli E, Razzano M, Reimer A, Reimer O, Reposeur T, Reyes L C, Ritz S, Rochester L S, Rodriguez A Y, Romani R W, Roth M, Russell J J, Ryde F, Sabatini S, Sadrozinski H F W, Sanchez D, Sander A, Sapozhnikov L, Parkinson P M S, Scargle J D, Schalk T L, Scolieri G, Sgrò C, Share G H, Shaw M, Shimokawabe T, Shrader C, Sierpowska-Bartosik A, Siskind E J, Smith D A, Smith P D, Spandre G, Spinelli P, Starck J L, Stephens T E, Strickman M S, Strong A W, Suson D J, Tajima H, Takahashi H, Takahashi T, Tanaka T, Tenze A, Tether S, Thayer J B, Thayer J G, Thompson D J, Tibaldo L, Tibolla O, Torres D F, Tosti G, Tramacere A, Turri M, Usher T L, Vilchez N, Vitale V, Wang P, Watters K, Winer B L, Wood K S, Ylinen T, Ziegler M. 2009. The large area telescope on the fermi gamma-ray space telescope mission. *Astrophys J*, 697: 1071–1102
- Babich L P, Bochkov E I, Kutsyk I M, Neubert T, Chanrion O. 2015. A model for electric field enhancement in lightning leader tips to levels allowing X-ray and γ ray emissions. *J Geophys Res-Space*

- Phys*, 120: 5087–5100
- Barnes D E, Splitt M E, Dwyer J R, Lazarus S, Smith D M, Rassoul H K. 2015. A study of thunderstorm microphysical properties and lightning flash counts associated with terrestrial gamma-ray flashes. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 3453–3464
- Belz J W, Krehbiel P R, Remington J, Stanley M A, Abbasi R U, LeVon R, Rison W, Rodeheffer D, Abu-Zayyad T, Allen M, Barcikowski E, Bergman D R, Blake S A, Byrne M, Cady R, Cheon B G, Chikawa M, di Matteo A, Fujii T, Fujita K, Fujiwara R, Fukushima M, Furlich G, Hanlon W, Hayashi M, Hayashi Y, Hayashida N, Hibino K, Honda K, Ikeda D, Inadomi T, Inoue N, Ishii T, Ito H, Ivanov D, Iwakura H, Jeong H M, Jeong S, Jui C C H, Kadota K, Kakimoto F, Kalashev O, Kasahara K, Kasami S, Kawai H, Kawakami S, Kawata K, Kido E, Kim H B, Kim J H, Kim J H, Kuzmin V, Kuznetsov M, Kwon Y J, Lee K H, Lubsandorzhiev B, Lundquist J P, Machida K, Matsumiya H, Matthews J N, Matuyama T, Mayta R, Minamino M, Mukai K, Myers I, Nagataki S, Nakai K, Nakamura R, Nakamura T, Nakamura Y, Nonaka T, Oda H, Ogio S, Ohnishi M, Ohoka H, Oku Y, Okuda T, Omura Y, Ono M, Oshima A, Ozawa S, Park I H, Potts M, Pshirkov M S, Rodriguez D C, Rubtsov G, Ryu D, Sagawa H, Sahara R, Saito K, Saito Y, Sakaki N, Sako T, Sakurai N, Sano K, Seki T, Sekino K, Shibata F, Shibata T, Shimodaira H, Shin B K, Shin H S, Smith J D, Sokolsky P, Sone N, Stokes B T, Stroman T A, Takagi Y, Takahashi Y, Takeda M, Takeishi R, Taketa A, Takita M, Tameda Y, Tanaka K, Tanaka M, Tanoue Y, Thomas S B, Thomson G B, Tinyakov P, Tkachev I, Tokuno H, Tomida T, Troitsky S, Tsunesada Y, Uchihori Y, Udo S, Uehama T, Urban F, Wallace M, Wong T, Yamamoto M, Yamaoka H, Yamazaki K, Yashiro K, Yosei M, Yoshii H, Zhezher Y, Zundel Z. 2020. Observations of the origin of downward terrestrial gamma-ray flashes. *J Geophys Res-Atmos*, 125: e2019JD031940
- Berge N, Celestin S. 2019. Constraining downward terrestrial gamma ray flashes using ground-based particle detector arrays. *Geophys Res Lett*, 46: 8424–8430
- Berge N, Celestin S, Garnung M B, Xu W, Marshall R A, Cummer S A. 2022. Modeling low-frequency radio emissions from terrestrial gamma ray flash sources. *J Geophys Res-Atmos*, 127: e2021JD036040
- Bitzer P M, Christian H J, Stewart M, Burchfield J, Podgorny S, Corredor D, Hall J, Kuznetsov E, Franklin V. 2013. Characterization and applications of VLF/LF source locations from lightning using the Huntsville Alabama Marx Meter Array. *J Geophys Res-Atmos*, 118: 3120–3138
- Björge-Engeland I, Østgaard N, Mezentssev A, Skeie C A, Sarria D, Lapierre J, Lindanger A, Neubert T, Marisaldi M, Lehtinen N, Chanrion O, Ullaland K, Yang S, Genov G, Christiansen F, Reglero V. 2022. Terrestrial gamma-ray flashes with accompanying elves detected by ASIM. *J Geophys Res-Atmos*, 127: e2021JD036368
- Bogomolov V V, Panasyuk M I, Svertilov S I, Bogomolov A V, Garipov G K, Iyudin A F, Klimov P A, Klimov S I, Mishieva T M, Minaev P Y, Morozenko V S, Morozov O V, Posanenko A S, Prokhorov A V, Rotkel H. 2017. Observation of Terrestrial gamma-ray flashes in the RELEC space experiment on the Vernov satellite. *Cosmic Res*, 55: 159–168
- Bowers G S, Smith D M, Martinez-McKinney G F, Kamogawa M, Cummer S A, Dwyer J R, Wang D, Stock M, Kawasaki Z. 2017. Gamma ray signatures of neutrons from a terrestrial gamma ray flash. *Geophys Res Lett*, 44: 10063–10070
- Bowers G S, Smith D M, Kelley N A, Martinez-McKinney G F, Cummer S A, Dwyer J R, Heckman S, Holzworth R H, Marks F, Reasor P, Gamache J, Dunion J, Richards T, Rassoul H K. 2018. A terrestrial gamma-ray flash inside the eyewall of hurricane Patricia. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 4977–4987
- Briggs M S, Fishman G J, Connaughton V, Bhat P N, Paciesas W S, Preece R D, Wilson-Hodge C, Chaplin V L, Kippen R M, von Kienlin A, Meegan C A, Bissaldi E, Dwyer J R, Smith D M, Holzworth R H, Grove J E, Chekhtman A. 2010. First results on terrestrial gamma ray flashes from the Fermi Gamma-ray Burst Monitor. *J Geophys Res*, 115: A07323
- Briggs M S, Connaughton V, Wilson-Hodge C, Preece R D, Fishman G J, Kippen R M, Bhat P N, Paciesas W S, Chaplin V L, Meegan C A, von Kienlin A, Greiner J, Dwyer J R, Smith D M. 2011. Electron-positron beams from terrestrial lightning observed with Fermi GBM. *Geophys Res Lett*, 38: L02808
- Briggs M S, Xiong S, Connaughton V, Tierney D, Fitzpatrick G, Foley S, Grove J E, Chekhtman A, Gibby M, Fishman G J, McBreen S, Chaplin V L, Guiriec S, Layden E, Bhat P N, Hughes M, Greiner J, von Kienlin A, Kippen R M, Meegan C A, Paciesas W S, Preece R D, Wilson-Hodge C, Holzworth R H, Hutchins M L. 2013. Terrestrial gamma-ray flashes in the Fermi era: Improved observations and analysis methods. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 3805–3830
- Briggs M S, Lesage S, Schultz C, Mailyan B, Holzworth R H. 2022. A terrestrial gamma-ray flash from the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcanic eruption. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL099660
- Carlson B E, Lehtinen N G, Inan U S. 2007. Constraints on terrestrial gamma ray flash production from satellite observation. *Geophys Res Lett*, 34: L08809
- Carlson B E, Lehtinen N G, Inan U S. 2010. Neutron production in terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res*, 115: A00E19
- Carlson B E, Gjesteland T, Østgaard N. 2011. Terrestrial gamma-ray flash electron beam geometry, fluence, and detection frequency. *J*

- Geophys Res*, 116: A11217
- Celestin S, Xu W, Pasko V P. 2012. Terrestrial gamma ray flashes with energies up to 100 MeV produced by nonequilibrium acceleration of electrons in lightning. *J Geophys Res*, 117: A05315
- Celestin S, Pasko V P. 2012. Compton scattering effects on the duration of terrestrial gamma-ray flashes. *Geophys Res Lett*, 39: L02802
- Chen C, Xiao S, Xiong S, Yu N, Wen X, Gong K, Li X, Li C, Hou D, Yang X, Zhao Z, Zhu Y, Zhang D, An Z, Zhao X, Xu Y, Wang Y. 2021. Design and test of a portable gamma-ray burst simulator for GECAM. *Exp Astron*, 52: 45–58
- Chen Z, Zhang Y, Zheng D, Zhang Y, Fan X, Fan Y, Xu L, Lyu W. 2019. A method of three-dimensional location for LFEDA combining the time of arrival method and the time reversal technique. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 6484–6500
- Chilingarian A, Mkrtchyan H. 2012. Role of the lower positive charge region (LPCR) in initiation of the thunderstorm ground enhancements (TGEs). *Phys Rev D*, 86: 072003
- Chronis T, Briggs M S, Priftis G, Connaughton V, Brundell J, Holzworth R, Heckman S, McBreen S, Fitzpatrick G, Stanbro M. 2016. Characteristics of thunderstorms that produce terrestrial gamma ray flashes. *Bull Am Meteorol Soc*, 97: 639–653
- Cohen M B, Inan U S, Fishman G. 2006. Terrestrial gamma ray flashes observed aboard the compton gamma ray observatory/burst and transient source experiment and ELF/VLF radio atmospherics. *J Geophys Res*, 111: D24109
- Cohen M B, Inan U S, Said R K, Gjestland T. 2010a. Geolocation of terrestrial gamma-ray flash source lightning. *Geophys Res Lett*, 37: L02801
- Cohen M B, Inan U S, Said R K, Briggs M S, Fishman G J, Connaughton V, Cummer S A. 2010b. A lightning discharge producing a beam of relativistic electrons into space. *Geophys Res Lett*, 37: L18806
- Connaughton V, Briggs M S, Holzworth R H, Hutchins M L, Fishman G J, Wilson-Hodge C A, Chaplin V L, Bhat P N, Greiner J, von Kienlin A, Kippen R M, Meegan C A, Paciesas W S, Preece R D, Cramer E, Dwyer J R, Smith D M. 2010. Associations between Fermi Gamma-ray Burst Monitor terrestrial gamma ray flashes and sferics from the World Wide Lightning Location Network. *J Geophys Res*, 115: A12307
- Connaughton V, Briggs M S, Xiong S, Dwyer J R, Hutchins M L, Grove J E, Chekhtman A, Tierney D, Fitzpatrick G, Foley S, McBreen S, Bhat P N, Chaplin V L, Cramer E, Fishman G J, Holzworth R H, Gibby M, von Kienlin A, Meegan C A, Paciesas W S, Preece R D, Wilson-Hodge C. 2013. Radio signals from electron beams in terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 2313–2320
- Cummer S A, Zhai Y, Hu W, Smith D M, Lopez L I, Stanley M A. 2005. Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma ray flashes. *Geophys Res Lett*, 32: L08811
- Cummer S A, Lu G, Briggs M S, Connaughton V, Xiong S, Fishman G J, Dwyer J R. 2011. The lightning-TGF relationship on microsecond timescales. *Geophys Res Lett*, 38: L14810
- Cummer S A, Briggs M S, Dwyer J R, Xiong S, Connaughton V, Fishman G J, Lu G, Lyu F, Solanki R. 2014. The source altitude, electric current, and intrinsic brightness of terrestrial gamma ray flashes. *Geophys Res Lett*, 41: 8586–8593
- Cummer S A, Lyu F, Briggs M S, Fitzpatrick G, Roberts O J, Dwyer J R. 2015. Lightning leader altitude progression in terrestrial gamma-ray flashes. *Geophys Res Lett*, 42: 7792–7798
- Dwyer J R. 2003. A fundamental limit on electric fields in air. *Geophys Res Lett*, 30: 2003GL017781
- Dwyer J R. 2008. Source mechanisms of terrestrial gamma-ray flashes. *J Geophys Res*, 113: D10103
- Dwyer J R. 2012. The relativistic feedback discharge model of terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res*, 117: A02308
- Dwyer J R. 2021. Terrestrial gamma-ray flashes initiated by positive leaders. *Phys Rev D*, 104: 043012
- Dwyer J R, Uman M A, Rassoul H K, Al-Dayeh M, Caraway L, Jerauld J, Rakov V A, Jordan D M, Rambo K J, Corbin V, Wright B. 2003. Energetic radiation produced during rocket-triggered lightning. *Science*, 299: 694–697
- Dwyer J R, Rassoul H K, Al-Dayeh M, Caraway L, Wright B, Chrest A, Uman M A, Rakov V A, Rambo K J, Jordan D M, Jerauld J, Smyth C. 2004a. A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning. *Geophys Res Lett*, 31: L05119
- Dwyer J R, Rassoul H K, Al-Dayeh M, Caraway L, Wright B, Chrest A, Uman M A, Rakov V A, Rambo K J, Jordan D M, Jerauld J, Smyth C. 2004b. Measurements of x-ray emission from rocket-triggered lightning. *Geophys Res Lett*, 31: L05118
- Dwyer J R, Smith D M. 2005. A comparison between Monte Carlo simulations of runaway breakdown and terrestrial gamma-ray flash observations. *Geophys Res Lett*, 32: L22804
- Dwyer J R, Rassoul H K, Saleh Z, Uman M A, Jerauld J, Plumer J A. 2005. X-ray bursts produced by laboratory sparks in air. *Geophys Res Lett*, 32: L20809
- Dwyer J R, Grefenstette B W, Smith D M. 2008. High-energy electron beams launched into space by thunderstorms. *Geophys Res Lett*, 35: L02815
- Dwyer J R, Smith D M, Uman M A, Saleh Z, Grefenstette B, Hazelton B, Rassoul H K. 2010. Estimation of the fluence of high-energy electron bursts produced by thunderclouds and the resulting

- radiation doses received in aircraft. *J Geophys Res*, 115: D09206
- Dwyer J R, Schaal M, Rassoul H K, Uman M A, Jordan D M, Hill D. 2011. High-speed X-ray images of triggered lightning dart leaders. *J Geophys Res*, 116: D20208
- Dwyer J R, Smith D M, Cummer S A. 2012a. High-energy atmospheric physics: Terrestrial gamma-ray flashes and related phenomena. *Space Sci Rev*, 173: 133–196
- Dwyer J R, Schaal M M, Cramer E, Arabshahi S, Liu N, Rassoul H K, Hill J D, Jordan D M, Uman M A. 2012b. Observation of a gamma-ray flash at ground level in association with a cloud-to-ground lightning return stroke. *J Geophys Res*, 117: A10303
- Dwyer J R, Liu N, Rassoul H K. 2013. Properties of the thundercloud discharges responsible for terrestrial gamma-ray flashes. *Geophys Res Lett*, 40: 4067–4073
- Dwyer J R, Cummer S A. 2013. Radio emissions from terrestrial gamma-ray flashes. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 3769–3790
- Dwyer J R, Uman M A. 2014. The physics of lightning. *Phys Rep*, 534: 147–241
- Dwyer J R, Liu N, Eric Grove J, Rassoul H, Smith D M. 2017. Characterizing the source properties of terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res-Space Phys*, 122: 8915–8932
- Enoto T, Wada Y, Furuta Y, Nakazawa K, Yuasa T, Okuda K, Makishima K, Sato M, Sato Y, Nakano T, Umemoto D, Tsuchiya H. 2017. Photonuclear reactions triggered by lightning discharge. *Nature*, 551: 481–484
- Fabró F, Montanyà J, Velde O A, Pineda N, Williams E R. 2019. On the TGF/lightning ratio asymmetry. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 6518–6531
- Fan X P, Zhang Y J, Zheng D, Zhang Y, Lyu W T, Liu H Y, Xu L T. 2018. A new method of three-dimensional location for low-frequency electric field detection array. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 8792–8812
- Fan X, Zhang Y, Krehbiel P R, Zhang Y, Zheng D, Yao W, Xu L, Liu H, Lyu W. 2020. Application of ensemble empirical mode decomposition in low-frequency lightning electric field signal analysis and lightning location. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 59: 86–100
- Fan X, Krehbiel P R, Tilles J N, Stanley M A, Senay S, Edens H E, Rison W, Zhang Y. 2022. Radio interferometer observations and analysis of an energetic in-cloud pulse based on ensemble empirical mode decomposition. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 60: 1–17
- Fishman G J, Bhat P N, Mallozzi R, Horack J M, Koshut T, Kouveliotou C, Pendleton G N, Meegan C A, Wilson R B, Paciesas W S, Goodman S J, Christian H J. 1994. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin. *Science*, 264: 1313–1316
- Fuschino F, Longo F, Marisaldi M, Labanti C, Galli M, Bulgarelli A, Gianotti F, Trifoglio M, Di Cocco G, Argan A, Barbiellini G, Basset M, Boffelli F, Caraveo P, Cattaneo P W, Chen A W, Cocco V, Costa E, D’Ammando F, Del Monte E, De Paris G, Di Persio G, Donnarumma I, Evangelista Y, Feroci M, Ferrari A, Fiorini M, Foggetta L, Froyland T, Frutti M, Giuliani A, Lapshov I, Lazzarotto F, Liello F, Lipari P, Mastropietro M, Mattaini E, Mauri F, Mereghetti S, Morselli A, Moretti E, Pacciani L, Pellizzoni A, Perotti F, Picozza P, Pontoni C, Porrovecchio G, Prest M, Pucella G, Rapisarda M, Rappoldi A, Rubini A, Soffitta P, Tavani M, Trois A., Vallazza E, Vercellone S, Vittorini V, Zambra A, Zanello D, Pittori C, Verrecchia F, Cutini S, Gasparrini D, Fanari G, Preger B, Santolamazza P, Giommi P, Antonelli L.A, Colafrancesco S, Salotti L, Crosby N B, Huang T Y, Rycroft M J. 2009. AGILE View of TGFs. *AIP Conference Proceedings*, 1118: 46–51
- Gjesteland T, Østgaard N, Bitzer P, Christian H J. 2017. On the timing between terrestrial gamma ray flashes, radio atmospheric, and optical lightning emission. *J Geophys Res-Space Phys*, 122: 7734–7741
- Gurevich A V. 1961. On the theory of runaway electrons. *Soviet Phys J Exp Theor Phys (English Translation)*, 12: 904–912
- Gurevich A V, Milikh G M, Roussel-Dupre R. 1992. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Phys Lett A*, 165: 463–468
- Hare B M, Uman M A, Dwyer J R, Jordan D M, Biggerstaff M I, Caicedo J A, Carvalho F L, Wilkes R A, Kotovsky D A, Gamera W R, Pilkey J T, Ngim T K, Moore R C, Rassoul H K, Cummer S A, Grove J E, Nag A, Betten D P, Bozarth A. 2016. Ground-level observation of a terrestrial gamma ray flash initiated by a triggered lightning. *J Geophys Res-Atmos*, 121: 6511–6533
- Heumesser M, Chanrion O, Neubert T, Christian H J, Dimitriadou K, Gordillo-Vazquez F J, Luque A, Pérez-Invernón F J, Blakeslee R J, Østgaard N, Reglero V, Köhn C. 2021. Spectral observations of optical emissions associated with terrestrial gamma-ray flashes. *Geophys Res Lett*, 48: 2020GL090700
- Hisadomi S, Nakazawa K, Wada Y, Tsuji Y, Enoto T, Shinoda T, Morimoto T, Nakamura Y, Yuasa T, Tsuchiya H. 2021. Multiple gamma-ray glows and a downward TGF observed from nearby thunderclouds. *J Geophys Res-Atmos*, 126: e2021JD034543
- Inan U. 2005. Gamma rays made on earth. *Science*, 307: 1054–1055
- Inan U S, Cohen M B, Said R K, Smith D M, Lopez L I. 2006. Terrestrial gamma ray flashes and lightning discharges. *Geophys Res Lett*, 33: L18802
- Inan U S, Cummer S A, Marshall R A. 2010. A survey of ELF and VLF research on lightning-ionosphere interactions and causative discharges. *J Geophys Res*, 115: A00E36
- Karunarathne S, Marshall T C, Stolzenburg M, Karunarathna N,

- Vickers L E, Warner T A, Orville R E. 2013. Locating initial breakdown pulses using electric field change network. *J Geophys Res-Atmos*, 118: 7129–7141
- Kereszy I, Rakov V A, Ding Z, Dwyer J R. 2022. Ground-based observation of a TGF occurring between opposite polarity strokes of a bipolar cloud-to-ground lightning flash. *J Geophys Res-Atmos*, 127: e2021JD036130
- Labanti C, Marisaldi M, Fuschino F, Galli M, Argan A, Bulgarelli A, Di Cocco G, Gianotti F, Tavani M, Trifoglio M. 2009. Design and construction of the Mini-Calorimeter of the AGILE satellite. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel, Spect, Detec Asso Equip*, 598: 470–479
- Larkey R K, Sample J G, Smith D M, Lapierre J L, DiGangi E, Holzworth R H. 2021. The relationship between TGF production in thunderstorms and lightning flash rates and amplitudes. *Geophys Res Atmos*, 126: e2020JD034401
- Li Y G, Wen X Y, Sun X L, Liu X J, Liang X H, Guo D Y, Peng W X, Gong K, Li G, Wang H, Xiong S L, Liao J Y, Lu H, Wang J Z, An Z H, Zhang D L, Gao M, Chen G, Liu Y Q, Yang S, Qiao R, Zhang F, Zhao X Y, Xu Y B, Zhu Y, Li X Q. 2020. The GECAM and its payload. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 50: 129508
- Lindanger A, Skeie C A, Marisaldi M, Bjørge-Engeland I, Østgaard N, Mezentsev A, Sarria D, Lehtinen N, Reglero V, Chanrion O, Neubert T. 2022. Production of terrestrial gamma-ray flashes during the early stages of lightning flashes. *J Geophys Res-Atmos*, 127: e2021JD036305
- Liu B, Shi L, Qiu S, Liu H, Dong W, Li Y, Sun Z. 2020. Fine three-dimensional VHF lightning mapping using waveform cross-correlation TOA method. *Earth Space Sci*, 7: e00832
- Liu F, Lu G, Neubert T, Lei J, Chanrion O, Østgaard N, Li D, Luque A, Gordillo-Vázquez F J, Reglero V, Lyu W, Zhu B. 2021. Optical emissions associated with narrow bipolar events from thunderstorm clouds penetrating into the stratosphere. *Nat Commun*, 12: 6631
- Liu N, Dwyer J R. 2013. Modeling terrestrial gamma ray flashes produced by relativistic feedback discharges. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 2359–2376
- Liu N, Dwyer J R, Cummer S A. 2017. Elves accompanying terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res-Space Phys*, 122: 10,563–10,576
- Lu G, Blakeslee R J, Li J, Smith D M, Shao X M, McCaul E W, Buechler D E, Christian H J, Hall J M, Cummer S A. 2010. Lightning mapping observation of a terrestrial gamma-ray flash. *Geophys Res Lett*, 37: L11806
- Lu G, Cummer S A, Li J, Han F, Smith D M, Grefenstette B W. 2011. Characteristics of broadband lightning emissions associated with terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res*, 116: A03316
- Lv P, Xiong S L, Sun X L, Lv J G, Li Y G. 2018. A low-energy sensitive compact gamma-ray detector based on LaBr₃ and SiPM for GECAM. *J Inst*, 13: P08014
- Lyu F, Cummer S A, Solanki R, Weinert J, McTague L, Katko A, Barrett J, Zigoneanu L, Xie Y, Wang W. 2014. A low-frequency near-field interferometric-TOA 3-D Lightning Mapping Array. *Geophys Res Lett*, 41: 7777–7784
- Lyu F, Cummer S A, McTague L. 2015. Insights into high peak current in-cloud lightning events during thunderstorms. *Geophys Res Lett*, 42: 6836–6843
- Lyu F, Cummer S A, Lu G, Zhou X, Weinert J. 2016a. Imaging lightning intracloud initial stepped leaders by low-frequency interferometric lightning mapping array. *Geophys Res Lett*, 43: 5516–5523
- Lyu F, Cummer S A, Briggs M, Marisaldi M, Blakeslee R J, Bruning E, Wilson J G, Rison W, Krehbiel P, Lu G, Cramer E, Fitzpatrick G, Mailyan B, McBreen S, Roberts O J, Stanbro M. 2016b. Ground detection of terrestrial gamma ray flashes from distant radio signals. *Geophys Res Lett*, 43: 8728–8734
- Lyu F, Cummer S A. 2018. Energetic radio emissions and possible terrestrial gamma-ray flashes associated with downward propagating negative leaders. *Geophys Res Lett*, 45: 10,764–10,771
- Lyu F, Cummer S A, Krehbiel P R, Rison W, Briggs M S, Cramer E, Roberts O, Stanbro M. 2018. Very high frequency radio emissions associated with the production of terrestrial gamma-ray flashes. *Geophys Res Lett*, 45: 2097–2105
- Lyu F, Cummer S A, Qin Z, Chen M. 2019. Lightning initiation processes imaged with very high frequency broadband interferometry. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 2994–3004
- Lyu F, Qin Z, Cummer S A, Huang A, Lyu W. 2021a. Constraints on the Intrinsic Brightness of TGFs from the Source Altitude of EIPs. In: Paper presented at the 2021 AGU Fall Meeting (AE13A-05), <https://agu.confex.com/agu/fm21/meetingapp.cgi/Paper/921203>
- Lyu F, Cummer S A, Krehbiel P R, Rison W, Bruning E C, Rutledge S A. 2021b. A distinct class of high peak-current lightning pulses over mountainous terrain in thunderstorms. *Geophys Res Lett*, 48: e94153
- Lyu F, Cummer S A, Briggs M, Smith D M, Mailyan B, Lesage S. 2021c. Terrestrial gamma-ray flashes can be detected with radio measurements of energetic in-cloud pulses during thunderstorms. *Geophys Res Lett*, 48: e93627
- Ma Z, Jiang R, Qie X, Xing H, Liu M, Sun Z, Qin Z, Zhang H, Li X. 2021. A low frequency 3D lightning mapping network in north China. *Atmos Res*, 249: 105314
- Mailyan B G, Briggs M S, Cramer E S, Fitzpatrick G, Roberts O J, Stanbro M, Connaughton V, McBreen S, Bhat P N, Dwyer J R. 2016. The spectroscopy of individual terrestrial gamma-ray flashes:

- Constraining the source properties. *J Geophys Res-Space Phys*, 121: 11,346–11,363
- Mailyan B G, Nag A, Murphy M J, Briggs M S, Dwyer J R, Rison W, Krehbiel P R, Boggs L, Bozarth A, Cramer E S, Roberts O J, Stanbro M, Rassoul H K. 2018. Characteristics of radio emissions associated with terrestrial gamma-ray flashes. *J Geophys Res-Space Phys*, 123: 5933–5948
- Mailyan B G, Xu W, Celestin S, Briggs M S, Dwyer J R, Cramer E S, Roberts O J, Stanbro M. 2019. Analysis of individual terrestrial gamma-ray flashes with lightning leader models and fermi gamma-ray burst monitor data. *J Geophys Res-Space Phys*, 124: 7170–7183
- Mailyan B G, Nag A, Dwyer J R, Said R K, Briggs M S, Roberts O J, Stanbro M, Rassoul H K. 2020. Gamma-ray and radio-frequency radiation from thunderstorms observed from space and ground. *Sci Rep*, 10: 7286
- Maiorana C, Marisaldi M, Füllekrug M, Soula S, Lapierre J, Mezentsev A, Skeie C A, Heumesser M, Chanrion O, Østgaard N, Neubert T, Reglero V. 2021. Observation of terrestrial gamma-ray flashes at mid latitude. *J Geophys Res-Atmos*, 126: e34432
- Marisaldi M, Fuschino F, Labanti C, Galli M, Longo F, Del Monte E, Barbiellini G, Tavani M, Giuliani A, Moretti E, Vercellone S, Costa E, Cutini S, Donnarumma I, Evangelista Y, Feroci M, Lapshov I, Lazzarotto F, Lipari P, Mereghetti S, Pacciani L, Rapisarda M, Soffitta P, Trifoglio M, Argan A, Boffelli F, Bulgarelli A, Caraveo P, Cattaneo P W, Chen A, Cocco V, D'Ammando F, De Paris G, Di Cocco G, Di Persio G, Ferrari A, Fiorini M, Froyland T, Gianotti F, Morselli A, Pellizzoni A, Perotti F, Picozza P, Piano G, Pilia M, Prest M, Pucella G, Rappoldi A, Rubini A, Sabatini S, Striani E, Trois A, Vallazza E, Vittorini V, Zambra A, Zanello D, Antonelli L A, Colafrancesco S, Gasparri D, Giommi P, Pittori C, Preger B, Santolamazza P, Verrecchia F, Salotti L. 2010. Detection of terrestrial gamma ray flashes up to 40 MeV by the AGILE satellite. *J Geophys Res*, 115: A00E13
- Marisaldi M, Galli M, Labanti C, Østgaard N, Sarria D, Cummer S A, Lyu F, Lindanger A, Campana R, Ursi A, Tavani M, Fuschino F, Argan A, Trois A, Pittori C, Verrecchia F. 2019. On the high-energy spectral component and fine time structure of terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 7484–7497
- Marshall T C, McCarthy M P, Rust W D. 1995. Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms. *J Geophys Res*, 100: 7097–7103
- Meegan C, Lichti G, Bhat P N, Bissaldi E, Briggs M S, Connaughton V, Diehl R, Fishman G, Greiner J, Hoover A S, van der Horst A J, von Kienlin A, Kippen R M, Kouveliotou C, McBreen S, Paciesas W S, Preece R, Steinle H, Wallace M S, Wilson R B, Wilson-Hodge C. 2009. The fermi gamma-ray burst monitor. *Astrophys J*, 702: 791–804
- Moore C B, Eack K B, Aulich G D, Rison W. 2001. Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders. *Geophys Res Lett*, 28: 2141–2144
- Moss G D, Pasko V P, Liu N, Veronis G. 2006. Monte Carlo model for analysis of thermal runaway electrons in streamer tips in transient luminous events and streamer zones of lightning leaders. *J Geophys Res*, 111: A02307
- Nemiroff R J, Bonnell J T, Norris J P. 1997. Temporal and spectral characteristics of terrestrial gamma flashes. *J Geophys Res*, 102: 9659–9665
- Neubert T, Østgaard N, Reglero V, Blanc E, Chanrion O, Oxborrow C A, Orr A, Tacconi M, Hartnack O, Bhandari D D V. 2019. The ASIM mission on the international space station. *Space Sci Rev*, 215: 26
- Neubert T, Østgaard N, Reglero V, Chanrion O, Heumesser M, Dimitriadou K, Christiansen F, Budtz-Jørgensen C, Kuvvetli I, Rasmussen I L, Mezentsev A, Marisaldi M, Ullaland K, Genov G, Yang S, Kochkin P, Navarro-Gonzalez J, Connell P H, Eyles C J. 2020. A terrestrial gamma-ray flash and ionospheric ultraviolet emissions powered by lightning. *Science*, 367: 183–186
- Østgaard N, Balling J E, Bjørnsen T, Brauer P, Budtz-Jørgensen C, Bujwan W, Carlson B, Christiansen F, Connell P, Eyles C, Fehlker D, Genov G, Grudziński P, Kochkin P, Kohfeldt A, Kuvvetli I, Thomsen P L, Pedersen S M, Navarro-Gonzalez J, Neubert T, Njoten K, Orleanski P, Qureshi B H, Cenkeramaddi L R, Reglero V, Reina M, Rodrigo J M, Rostad M, Sabau M D, Kristensen S S, Skogseide Y, Solberg A, Stadsnes J, Ullaland K, Yang S. 2019c. The modular X- and gamma-ray sensor (MXGS) of the ASIM payload on the international space station. *Space Sci Rev*, 215: 23
- Østgaard N, Gjesteland T, Stadsnes J, Connell P H, Carlson B. 2008. Production altitude and time delays of the terrestrial gamma flashes: Revisiting the Burst and Transient Source Experiment spectra. *J Geophys Res*, 113: A02307
- Østgaard N, Gjesteland T, Carlson B E, Collier A B, Cummer S A, Lu G, Christian H J. 2013. Simultaneous observations of optical lightning and terrestrial gamma ray flash from space. *Geophys Res Lett*, 40: 2423–2426
- Østgaard N, Christian H J, Grove J E, Sarria D, Mezentsev A, Kochkin P, Lehtinen N, Quick M, Al-Nussirat S, Wulf E, Genov G, Ullaland K, Marisaldi M, Yang S, Blakeslee R J. 2019a. Gamma ray glow observations at 20-km altitude. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 7236–7254
- Østgaard N, Neubert T, Reglero V, Ullaland K, Yang S, Genov G, Marisaldi M, Mezentsev A, Kochkin P, Lehtinen N, Sarria D, Qureshi B H, Solberg A, Maiorana C, Albrechtsen K, Budtz-

- Jørgensen C, Kuvvetli I, Christiansen F, Chanrion O, Heumesser M, Navarro-Gonzalez J, Connell P, Eyles C, Christian H, Al-nussirat S. 2019b. First 10 months of TGF observations by ASIM. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 14024–14036
- Østgaard N, Cummer S A, Mezentsev A, Luque A, Dwyer J, Neubert T, Reglero V, Marisaldi M, Kochkin P, Sarria D, Lehtinen N, Ullaland K, Yang S, Genov G, Chanrion O, Christiansen F, Pu Y. 2021. Simultaneous observations of EIP, TGF, Elve, and optical lightning. *J Geophys Res-Atmos*, 126: e2020JD033921
- Pu Y, Cummer S A, Lyu F, Briggs M, Mailyan B, Stanbro M, Roberts O. 2019. Low frequency radio pulses produced by terrestrial gamma-ray flashes. *Geophys Res Lett*, 46: 6990–6997
- Pu Y, Cummer S A, Huang A, Briggs M, Mailyan B, Lesage S. 2020. A satellite-detected terrestrial gamma ray flash produced by a cloud-to-ground lightning leader. *Geophys Res Lett*, 47: e89427
- Qie X, Zhang Y. 2019. A review of atmospheric electricity research in China from 2011 to 2018. *Adv Atmos Sci*, 36: 994–1014
- Rakov V A, Uman M A. 2003. *Lightning Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press
- Rison W, Thomas R J, Krehbiel P R, Hamlin T, Harlin J. 1999. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. *Geophys Res Lett*, 26: 3573–3576
- Rison W, Krehbiel P R, Stock M G, Edens H E, Shao X M, Thomas R J, Stanley M A, Zhang Y. 2016. Observations of narrow bipolar events reveal how lightning is initiated in thunderstorms. *Nat Commun*, 7: 10721
- Roberts O J, Fitzpatrick G, Priftis G, Bedka K, Chronis T, McBreen S, Briggs M S, Cramer E, Mailyan B, Stanbro M. 2017. Terrestrial gamma ray flashes due to particle acceleration in tropical storm systems. *J Geophys Res-Atmos*, 122: 3374–3395
- Roberts O J, Fitzpatrick G, Stanbro M, McBreen S, Briggs M S, Holzworth R H, Grove J E, Chekhtman A, Cramer E S, Mailyan B G. 2018. The first Fermi-GBM terrestrial gamma ray flash catalog. *J Geophys Res-Space Phys*, 123: 4381–4401
- Schultz C J, Lang T J, Bruning E C, Calhoun K M, Harkema S, Curtis N. 2018. Characteristics of lightning within electrified snowfall events using lightning mapping arrays. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 2347–2367
- Shao X M, Hamlin T, Smith D M. 2010. A closer examination of terrestrial gamma-ray flash-related lightning processes. *J Geophys Res*, 115: A00E30
- Shao X M, Ho C, Caffrey M, Graham P, Haynes B, Bowers G, Blaine W, Dingus B, Smith D, Rassoul H. 2018. Broadband RF interferometric mapping and polarization (BIMAP) observations of lightning discharges: Revealing new physics insights into breakdown processes. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 10,326–10,340
- Smith D M, Lopez L I, Lin R P, Barrington-Leigh C P. 2005. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV. *Science*, 307: 1085–1088
- Smith D M, Hazelton B J, Grefenstette B W, Dwyer J R, Holzworth R H, Lay E H. 2010. Terrestrial gamma ray flashes correlated to storm phase and tropopause height. *J Geophys Res*, 115: A00E49
- Smith D M, Dwyer J R, Hazelton B J, Grefenstette B W, Martinez-McKinney G F M, Zhang Z Y, Lowell A W, Kelley N A, Splitt M E, Lazarus S M, Ulrich W, Schaal M, Saleh Z H, Cramer E, Rassoul H, Cummer S A, Lu G, Shao X M, Ho C, Hamlin T, Blakeslee R J, Heckman S. 2011. A terrestrial gamma ray flash observed from an aircraft. *J Geophys Res*, 116: D20124
- Smith D M, Bowers G S, Kamogawa M, Wang D, Ushio T, Ortberg J, Dwyer J R, Stock M. 2018. Characterizing upward lightning with and without a terrestrial gamma ray flash. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 11,321–11,332
- Splitt M E, Lazarus S M, Barnes D, Dwyer J R, Rassoul H K, Smith D M, Hazelton B, Grefenstette B. 2010. Thunderstorm characteristics associated with RHESSI identified terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res*, 115: A00E38
- Stanley M A, Shao X M, Smith D M, Lopez L I, Pongratz M B, Harlin J D, Stock M, Regan A. 2006. A link between terrestrial gamma-ray flashes and intracloud lightning discharges. *Geophys Res Lett*, 33: L06803
- Stock M G, Akita M, Krehbiel P R, Rison W, Edens H E, Kawasaki Z, Stanley M A. 2014. Continuous broadband digital interferometry of lightning using a generalized cross-correlation algorithm. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 3134–3165
- Sun Z L, Qie X S, Liu M Y, Cao D J, W D F. 2013. Lightning VHF radiation location system based on short-baseline TDOA technique—Validation in rocket-triggered lightning. *Atmos Res*, 129–130: 58–66
- Taranenko Y, Roussel-Dupré R. 1996. High altitude discharges and gamma-ray flashes: A manifestation of runaway air breakdown. *Geophys Res Lett*, 23: 571–574
- Tavani M, Marisaldi M, Labanti C, Fuschino F, Argan A, Trois A, Giommi P, Colafrancesco S, Pittori C, Palma F, Trifoglio M, Gianotti F, Bulgarelli A, Vittorini V, Verrecchia F, Salotti L, Barbiellini G, Caraveo P, Cattaneo P W, Chen A, Contessi T, Costa E, D’Ammando F, Del Monte E, de Paris G, Di Cocco G, di Persio G, Donnarumma I, Evangelista Y, Feroci M, Ferrari A, Galli M, Giuliani A, Giusti M, Lapshov I, Lazzarotto F, Lipari P, Longo F, Mereghetti S, Morelli E, Moretti E, Morselli A, Pacciani L, Pellizzoni A, Perotti F, Piano G, Picozza P, Pilia M, Pucella G, Prest M, Rapisarda M, Rappoldi A, Rossi E, Rubini A, Sabatini S, Scalise E, Soffitta P, Striani E, Vallazza E, Vercellone S, Zambra A, Zanello

- D. 2011. Terrestrial gamma-ray flashes as powerful particle accelerators. *Phys Rev Lett*, 106: 018501
- Tian Y, Qie X, Sun Y, Wang D, Yuan S, Sun Z, Lu G, Yu L, Sun H, Li L, Du C. 2019. Total lightning signatures of thunderstorms and lightning jumps in hailfall nowcasting in the Beijing area. *Atmos Res*, 230: 104646
- Tiberia A, Mascitelli A, D'Adderio L P, Federico S, Marisaldi M, Porcù F, Realini E, Gatti A, Ursi A, Fuschino F, Tavani M, Dietrich S. 2021. Time evolution of storms producing terrestrial gamma-ray flashes using ERA5 reanalysis data, GPS, lightning and geostationary satellite observations. *Remote Sens*, 13: 784
- Tierney D, Briggs M S, Fitzpatrick G, Chaplin V L, Foley S, McBreen S, Connaughton V, Xiong S, Byrne D, Carr M, Bhat P N, Fishman G J, Greiner J, Kippen R M, Meegan C A, Paciesas W S, Preece R D, von Kienlin A, Wilson-Hodge C. 2013. Fluence distribution of terrestrial gamma ray flashes observed by the Fermi Gamma-ray Burst Monitor. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 6644–6650
- Tilles J N, Liu N, Stanley M A, Krehbiel P R, Rison W, Stock M G, Dwyer J R, Brown R, Wilson J. 2019. Fast negative breakdown in thunderstorms. *Nat Commun*, 10: 1648
- Tilles J N, Krehbiel P R, Stanley M A, Rison W, Liu N, Lyu F, Cummer S A, Dwyer J R, Senay S, Edens H, Fan X, Brown R G, Wilson J. 2020. Radio interferometer observations of an energetic in-cloud pulse reveal large currents generated by relativistic discharges. *J Geophys Res-Atmos*, 125: e2020JD032603
- Torii T, Sugita T, Kamogawa M, Watanabe Y, Kusunoki K. 2011. Migrating source of energetic radiation generated by thunderstorm activity. *Geophys Res Lett*, 38: L24801
- Tran M D, Rakov V A, Mallick S, Dwyer J R, Nag A, Heckman S. 2015. A terrestrial gamma-ray flash recorded at the Lightning Observatory in Gainesville, Florida. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 136: 86–93
- Ursi A, Guidorzi C, Marisaldi M, Sarria D, Frontera F. 2017. Terrestrial gamma-ray flashes in the BeppoSAX data archive. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 156: 50–56
- Ursi A, Marisaldi M, Dietrich S, Tavani M, Tiberia A, Porcù F. 2019. Analysis of thunderstorms producing terrestrial gamma ray flashes with the meteosat second generation. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 12667–12682
- Wada Y, Bowers G S, Enoto T, Kamogawa M, Nakamura Y, Morimoto T, Smith D M, Furuta Y, Nakazawa K, Yuasa T, Matsuki A, Kubo M, Tamagawa T, Makishima K, Tsuchiya H. 2018. Termination of electron acceleration in thundercloud by intracloud/intercloud discharge. *Geophys Res Lett*, 45: 5700–5707
- Wada Y, Enoto T, Nakamura Y, Furuta Y, Yuasa T, Nakazawa K, Morimoto T, Sato M, Matsumoto T, Yonetoku D, Sawano T, Sakai H, Kamogawa M, Ushio T, Makishima K, Tsuchiya H. 2019a. Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash. *Commun Phys*, 2: 67
- Wada Y, Enoto T, Nakazawa K, Furuta Y, Yuasa T, Nakamura Y, Morimoto T, Matsumoto T, Makishima K, Tsuchiya H. 2019b. Downward terrestrial gamma-ray flash observed in a winter thunderstorm. *Phys Rev Lett*, 123: 061103
- Wada Y, Enoto T, Nakamura Y, Morimoto T, Sato M, Ushio T, Nakazawa K, Yuasa T, Yonetoku D, Sawano T, Kamogawa M, Sakai H, Furuta Y, Makishima K, Tsuchiya H. 2020. High peak-current lightning discharges associated with downward terrestrial gamma-ray flashes. *J Geophys Res-Atmos*, 125: e2019JD031730
- Wada Y, Morimoto T, Nakamura Y, Wu T, Enoto T, Nakazawa K, Ushio T, Yuasa T, Tsuchiya H. 2022. Characteristics of low-frequency pulses associated with downward terrestrial gamma-ray flashes. *Geophys Res Lett*, 49: e2021GL097348
- Wang Y, Qie X, Wang D, Liu M, Su D, Wang Z, Liu D, Wu Z, Sun Z, Tian Y. 2016. Beijing lightning network (BLNET) and the observation on preliminary breakdown processes. *Atmos Res*, 171: 121–132
- Wilson C T R. 1925. The Acceleration of β -particles in Strong Electric Fields such as those of Thunderclouds. *Math Proc Camb Phil Soc*, 22: 534–538
- Wu T, Wang D, Takagi N. 2018. Lightning mapping with an array of fast antennas. *Geophys Res Lett*, 45: 3698–3705
- Wu T, Wang D, Huang H, Takagi N. 2021. The strongest negative lightning strokes in winter thunderstorms in Japan. *Geophys Res Lett*, 48: e95525
- Xian T, Lu G, Zhang H, Wang Y, Xiong S, Yi Q, Yang J, Lyu F. 2021. Implications of GNSS-inferred tropopause altitude associated with terrestrial gamma-ray flashes. *Remote Sens*, 13: 1939
- Xiong S, Briggs M S, Connaughton V, Fishman G J, Tierney D, Fitzpatrick G, Foley S, Guiriec S, Holzworth R H, Hutchins M L. 2012. Location prediction of electron TGFs. *J Geophys Res*, 117: A02309
- Xu W, Celestin S, Pasko V P. 2012. Source altitudes of terrestrial gamma-ray flashes produced by lightning leaders. *Geophys Res Lett*, 39: L08801
- Xu W, Celestin S, Pasko V P, Marshall R A. 2019. Compton scattering effects on the spectral and temporal properties of terrestrial gamma-ray flashes. *J Geophys Res-Space Phys*, 124: 7220–7230
- Xu W, Rutledge S A, Zhang W. 2017. Relationships between total lightning, deep convection, and tropical cyclone intensity change. *J Geophys Res-Atmos*, 122: 7047–7063
- Zhang H, Lu G, Lyu F, Ahmad M R, Qie X, Cummer S A, Xiong S, Briggs M S. 2020. First measurements of low-frequency sferics

- associated with terrestrial gamma-ray flashes produced by equatorial thunderstorms. *Geophys Res Lett*, 47: e89005
- Zhang H, Lu G, Lyu F, Xiong S, Ahmad M R, Yi Q, Li D, Xian T, Yang J, Liu F, Zhu B, Pu Y, Cummer S A, Briggs M S, Qie X. 2021. On the terrestrial gamma-ray flashes preceding narrow bipolar events. *Geophys Res Lett*, 48: e92160
- Zhang S N, Li T P, Lu F J, Song L M, Xu Y P, Liu C Z, Chen Y, Cao X L, Bu Q C, Chang Z, Chen G, Chen L, Chen T X, Chen Y B, Chen Y P, Cui W, Cui W W, Deng J K, Dong Y W, Du Y Y, Fu M X, Gao G H, Gao H, Gao M, Ge M Y, Gu Y D, Guan J, Gungor C, Guo C C, Han D W, Hu W, Huang Y, Huo J, Jia S M, Jiang L H, Jiang W C, Jin J, Jin Y J, Li B, Li C K, Li G, Li M S, Li W, Li X, Li X B, Li X F, Li Y G, Li Z J, Li Z W, Liang X H, Liao J Y, Liu G Q, Liu H W, Liu S Z, Liu X J, Liu Y, Liu Y N, Lu B, Lu X F, Luo T, Ma X, Meng B, Nang Y, Nie J Y, Ou G, Qu J L, Sai N, Shang R C, Shen G H, Sun L, Tan Y, Tao L, Tuo Y L, Wang C, Wang C Q, Wang G F, Wang H Y, Wang J, Wang W S, Wang Y S, Wen X Y, Wu B Y, Wu B B, Wu M, Xiao G C, Xiong S L, Yan L L, Yang J W, Yang S, Yang Y J, Yi Q B, Yuan B, Zhang A M, Zhang C L, Zhang C M, Zhang F, Zhang H M, Zhang J, Zhang Q, Zhang S Y, Zhang S, Zhang T, Zhang W C, Zhang W, Zhang W Z, Zhang Y, Zhang Y F, Zhang Y J, Zhang Y, Zhang Z, Zhang Z, Zhang Z L, Zhao H S, Zhao X F, Zheng S J, Zhou J F, Zhu Y X, Zhu Y, Zhuang R L. 2020. Overview to the hard x-ray modulation telescope (Insight-HXMT) satellite. *Sci China-Phys Mech Astron*, 63: 249502
- Zhang W, Zhang Y, Zheng D, Wang F, Xu L. 2015. Relationship between lightning activity and tropical cyclone intensity over the northwest Pacific. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 4072–4089
- Zhao Y, Xiong S L, Yi Q B. 2021. Preliminary Results of GECAM TGF Observations. New Orleans: AGU Fall Meeting 2021. AE13A-04
- Zheng D, Wang D, Zhang Y, Wu T, Takagi N. 2019. Charge regions indicated by LMA lightning flashes in hokuriku's winter thunderstorms. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 7179–7206
- Zhu Y, Bitzer P, Stewart M, Podgorny S, Corredor D, Burchfield J, Carey L, Medina B, Stock M. 2020. Huntsville alabama marx meter array 2: Upgrade and capability. *Earth Space Sci*, 7: e01111

(责任编辑: 张宏昇)