

# 打造星地间高速信息通道, 精准捕捉稍纵即逝的 宇宙闪光

## ——GECAM卫星科学应用 系统的建设使命

郑世界

(中国科学院高能物理研究所 100049)

2017年,人类迎来了天文学上的一场盛宴。8月17日,美国激光干涉引力波天文台(LIGO)和欧洲的引力波天文台(Virgo)宣布探测到了双中子星并合后产生的引力波事件(GW170817)。其后,美国国家航空航天局(NASA)的费米卫星探测到了一例在引力波发生后1.7秒后出现的短伽马射线暴GRB170817A,其空间位置与地面引力波事件一致,猜测这两个事件可能来自同一个起源。对这两个时间的定位区间进行联合分析,将引力波事件限制在了更小的目标天区。接下来地面和空间大量的望远镜“火力全开”,对这个天区进行了全面搜寻,分别从伽马射线、X射线、紫外、光学、红外一直到射电波段都探测到了这个从1.3亿光年外发出的信号,从而确认了发生引力波事件的电磁对应体<sup>①</sup>。与2015年人类首次探测的引力波事件相比,这次我们得以“看到”发生引力波的天体并合过程,也标志着引力波天文学的新纪元<sup>②</sup>。从这次事件中也可以看出,为了抓住宇宙中这些稍纵即逝的信号,需要天地间的多个设备间紧密合作,并且能够把发现的信号及时发出去,以便引导其他设备的后随观测。

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,简称GECAM)是为抓住当前引力波天文研究的重要机遇而提出的、专门探测引力波暴高能电磁对应体的的小型空间高能望远镜项目。它的主要观测目标包括双致密星并合引力波产生的高能辐射、伽马暴(GRBs)、磁星暴发及快速射电暴(FRBs)等宇宙中的这些剧烈的暴发现象。这些暴发现象在宇宙空间随机随时出现,且持续的时间非常短,通常是分钟、秒乃至毫秒量级内出现。为了捕捉宇宙中这些稍纵即逝的光,GECAM进行了专门的设计,由两颗微小卫星以180度相位绕着地球运行,以确保卫星的观测不会被地球遮挡,可以实现对宇宙中暴发现象“全天无死角”的监测<sup>③</sup>。同时我们还需要将卫星上发现的暴发现象尽快对全球发布,以引导其他卫星或地面设备进行后随观测,以实现重要天文事件多波段、多信使的立体化研究。为实现以上目标,我们将致力于打造星地间的高速信息通道,实现“三快一准”(即反应快、处理快、发布快、定位准)的目标,更快更高效地

捕捉宇宙间那些稍纵即逝的闪光。

## 1. 从外空发送“短信”

通常情况下,卫星上探测得到的天文现象和天文数据,只有通过地面的接收天线下载到地面后,地面人员才能进一步分析处理。对 GECAM 卫星来说,它的轨道周期是 90 分钟,即约 90 分钟绕地球一圈,但每圈中最多约 10 分钟会经过中国境内的数据传输站进行下传数据。同时由于卫星轨道会发生进动现象,即由于地球摄动力的影响使卫星轨道发生逐渐的“漂移”,因此使得卫星的某些圈次不会经过中国上空,导致最长在 12 小时内地面无法接收到卫星上的观测数据和信息。在这种情况下,星地之间的这条信息线路会发生几十分钟乃至十几小时的断路,无法将大量重要事件及时传下来。为此,借助我国自主研发并建立的星间链接,我们能够把卫星上探测到的重要事件信息通过“短信”方式发送到地面,启动快速处理。

GECAM 卫星的信息传递流程如图 1 所示。宇宙中的天文现象发生后(例如伴随引力波发生后的伽马射线暴,磁星爆发等),当产生的高能辐射扫过地球时,其高能的光子将被一颗或两颗 GECAM 卫星探测到。当监测到的高能光子增长流量达到星上设定的触发阈值后,卫星上会自动开展分析计算,得到这些暴发的具体信息(包括发生的时间、方位、强度等),并立即将这些信息以及关键数据发送给星间链接系统,并最快在 1 分钟内即可通过全球短报文服务下传到地面,经过地面自动处理,再经过约一分钟的时间,即可生成报告通过全球伽马暴坐标网络(GCN)对外发布,以便引导后随观测。图 2 是一个示例图,我们可以报告该 GRB 在天球上的定位(a),以及这个 GRB 的爆发曲线(b)。

更详细的科学观测数据会通过地面测控中心的接收天线下载到地面,经过解析、预处理、标定、快视等一系列处理后,生成标准的科学数据产品,以便进行更详细的科学分析。

## 2. 暴发事件的深度搜索及重新定位

接下来,为了解决“更准”“更全面”的问题,我们需要对观测数据进行了深度挖掘。GECAM 卫星对暴发事件的在轨触发,由于受到星上硬件设备的约束,如重量、功耗、计算能力等,因此只能对那些比较强的暴发现象进行触发和粗略定位。我们在地面上建立了强力的计算阵列,处在随时待命状态。一旦接受到新的数据,利用地面庞大的计算能力,我们就可以对这些数据进行深度的挖掘,可以得到更多的“弱爆发”进行全面分析。地面深度搜索包含盲搜索和目标搜索。盲搜索可以实现不同时间尺度,不同时间相位起点,不同能量区间,单星、双星数据联合分析等搜索方式,对所有可能的暴发事件做一个全面普查。目标搜索是通过结合其他卫星已发布的有价值事件信息可对其进行有针对性的目标搜索。

我们建立了针对触发/暴发事件搜索、定位的创新性算法设计,为处理引力波电磁对应体的暴发事件数据处理所开发的软件所使用<sup>④</sup>。算法联合全部探测器多个能道的观测数据(每颗卫星有 25 个探测器,每个探测器可以合并 8 个能道)的数据,利用信号(暴发源)发生的时间、方向和能谱等信息,建立能谱模板定位库。另外,构造包含观测数据和仪器响应数据的似然比函数,通过一系列中间计算过程,得到真实信号存在条件下测量到观测数据的概率与只有本底存在的条件下得到观测数据的概率比值(似然比值)。设定阈值条件,当似然比值超过阈值时,就认为存在触发信号。暴发事件搜索算法流程如图 3 所示。

GECAM 的两颗卫星上天后会逐渐分开,分处于地球的两端,相互之间没有直接通讯,成为一对永不再见面的“孪生兄弟”。这样,即使两颗卫星看到了同一个爆发,也只能向地面报告自己的结果,却不知道自己的孪生兄弟是否也看到了。在地面上,我们可以清晰地掌握两颗卫星的观测情况,就可以做更精确的分析。如果两颗卫星看到了同一个爆发,有了更多的探测数据,相当于我们的探测器增大了。想象一下,探测器的面积变为原来的两倍,其探测灵敏度会提高 1.4 倍,其定位误差也会大大减小。不仅如此,由于 GECAM 两颗卫星距离超

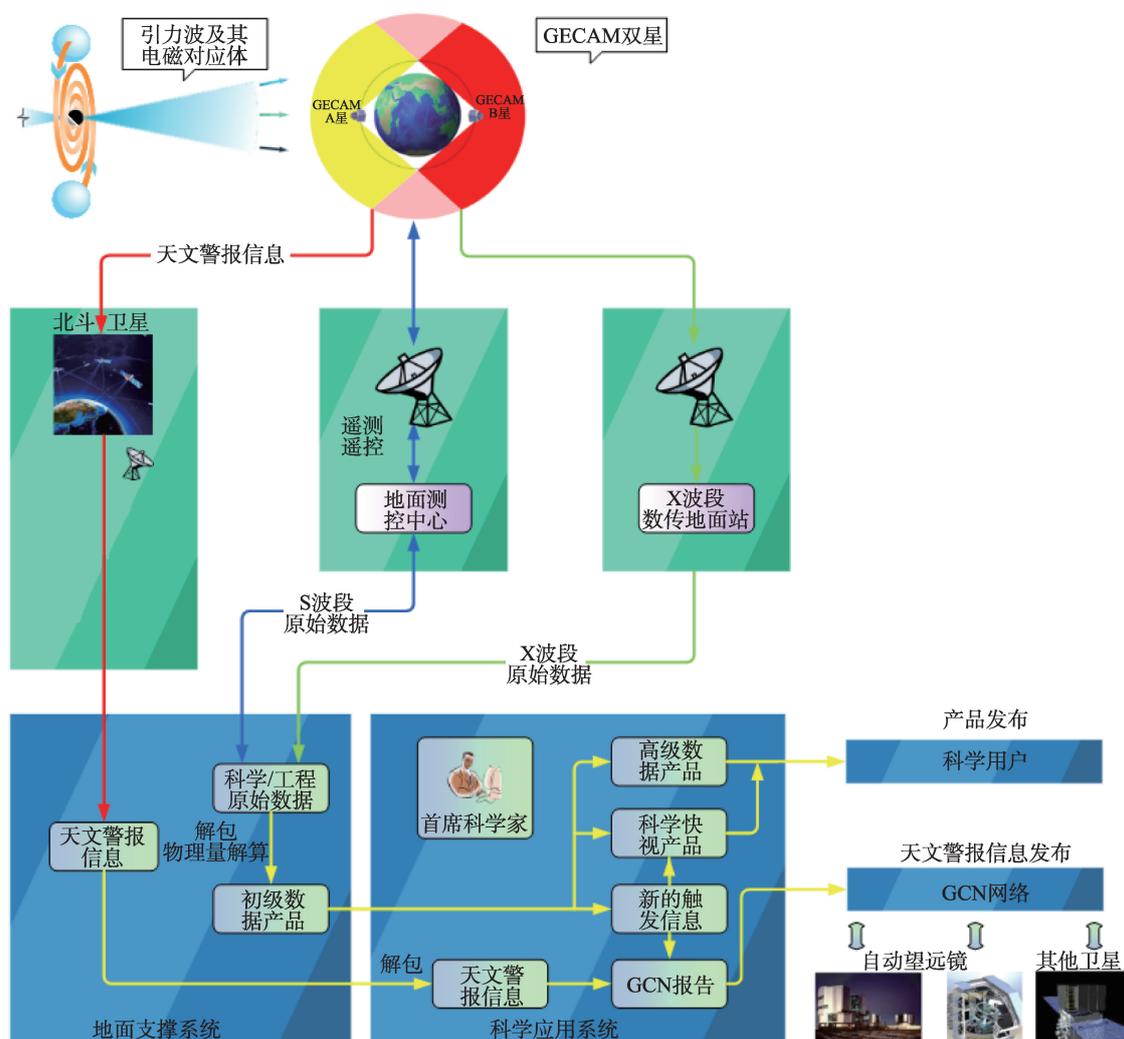


图1 GECAM信息传递

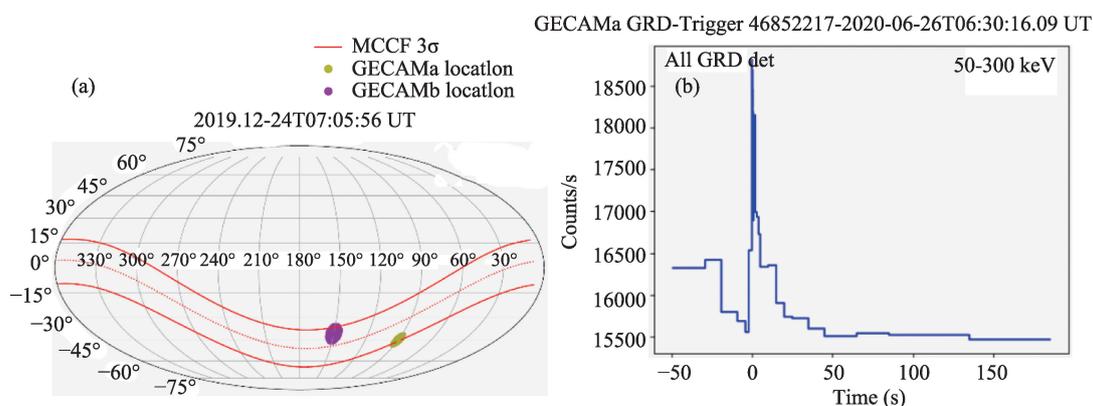


图2 天文警报报告的结果。(a)给出了GECAM对暴发事件的定位结果;(b)探测到的光变曲线

过1.3万公里,由于几何效应会导致探测到的暴发事件有延迟,且延迟时间与该暴的方向有关,这样我们也能通过该方法给出更多的定位限制,如图4所示。对于来自宇宙深处的伽马射线暴、引力波暴

等剧烈的暴发事件,被GECAM的两颗卫星探测到后,由于几何距离的不同会产生时间延迟,利用李惕碛院士提出的MCCF(改进的交叉相关)算法,我们可以通过测量的延迟量来对该暴发事件的方位

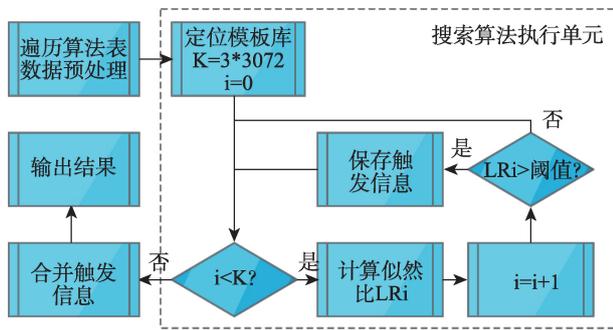


图3 暴发事件搜索流程

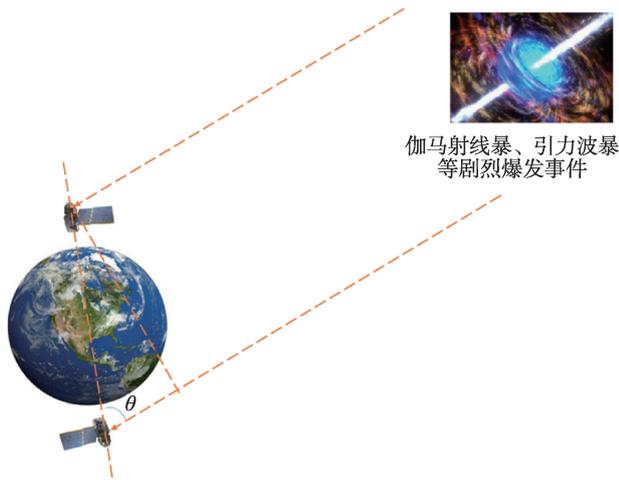


图4 双星联合定位分析示意图

给出更多的限制。如图2所示,长条形状就是通过对双星的时间延迟给出的位置限制。

### 3. 小结

针对多信使时代对重要爆发事件的快速响应需求,我们致力于打造星地间的高速信息通道,以便把在太空发现的重要事件尽快下载到地面并公开发布。2020年底,GECAM卫星预计发射并在轨运行,将有助于对引力波等重要事件的电磁对应体的发现、证认发挥重要作用。

### 参考文献

- ① Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger (Abbott, B.P.等,天体物理快报,2017) <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017ApJ...848L..12A/abstract>
- ② 欢呼! 为1.3亿光年外的那次震荡:7位科学家点评双中子星并合引力波事件 (<https://www.guokr.com/article/442436/>)
- ③ GECAM双星总体方案及关键技术概述(韩兴博等,中国科学,2020) <https://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSPMA/doi/10.1360/SSPMA-2020-0120?slug=abstract>
- ④ GECAM定位方法及模拟分析(罗琦等,中国科学,2020)<https://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSPMA/doi/10.1360/SSPMA-2020-0018?slug=abstract>

## 科苑快讯

### 天文学家首次直接观察围绕类日恒星运行的多行星系统

天文学家知道,其他恒星周围有成千上万颗行星,但只有屈指可数的行星被直接成像。其余恒星的存在,是通过它们对恒星的影响来推断的。

现在,世界上最大的光学望远镜直接发现了一个新的行星系统,这是首次在像太阳这样的恒星周围拍摄到不止一颗行星的图像。天文学家利用欧洲南方天文台(European Southern Observatory)的甚大望远镜(Very Large Telescope, VLT)观测了距离地球300光年的类太阳恒星TYC 8998-760-1。据《天体物理学杂志快报》(*The Astrophysical Journal Letters*)今天报道,研究仪器装备了一种叫做日冕仪的光学遮罩,遮挡恒星

的光线,这样就能看到围绕恒星运行的两颗行星。这有助于天文学家了解行星系统是如何进化的。TYC 8998-760-1只有1700万年,是我们45亿岁太阳的婴儿版,但其轨道上的行星与我们却大相径庭。这两颗新发现的系外行星的质量分别是地球和木星(太阳系最大的行星)的14倍和6倍,其轨道距离分别是土星的16倍和32倍。如果该恒星系统在未来的几十年里演变成类似我们的系统,天文学家还要做些解释。

(高凌云编译自2020年7月22日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org))