

# GECAM 卫星有效载荷里的硬核技术

李新乔

(中国科学院高能物理研究所 100049)

个人名片:

姓名:引力波暴高能电磁对应体全天监测器卫星

简称:GECAM 卫星

籍贯:中国科学院(工程总体单位:国家空间科学中心;卫星总体单位:微小卫星创新研究院;项目提出及科学载荷研制单位:高能物理研究所)

体貌特征:双子座、微纳卫星、多目星君

入星志愿:对引力波伽马暴、快速射电暴、磁星爆发等高能天文事件开展高灵敏、高性能探测

出星年月:2020年12月

出星地:西昌卫星发射中心



看了GECAM卫星的名片,不知各位看官是不是已经迫不及待地想要了解这对出自我国科学家之手的双子科学新星了呢? 敬请往下看:

本文将分为四个小节来对GECAM卫星科学载荷的内涵进行简要介绍:寻找神秘的波动之光、练就眼观六路的神通、晶莹剔透中的科学之美、借星间通信链路开展信息速递。让我们开始吧!

## 1. 寻找神秘的波动之光

几亿光年以外,两颗走到生命尽头的巨大恒星完成了它们生命力最为灿烂的辉煌——超新星爆发之后,变成了两颗中子星。中子星? 是什么? 它是宇宙当中一类致密天体,致密? 有多密? 这么说吧,它的密度比孙悟空的金箍棒变成绣花针大小的时候还大! ——每立方厘米的中子星的质量有十亿吨! 也就是说,质量比太阳大一倍的中子星,它的直径只有十几千米。话说得有点远了,书归正题。这两颗中子星彼此吸引,相互绕转,并逐渐接近。随着它们之间的距离越来越远,相互绕转的速度也越来越快,直到它们最终碰撞到一起。一次宇宙中最为绚烂的烟花演出开始了:它们相撞的能量是如此之高,以至于发出的光超过了它们所在星系的所有恒星的光芒——这是一次伽马射线爆发。伴随着巨大的伽马暴的,还有一股能量扰动着弯曲的时空,释放开去。这股被弯曲时空传递的波动能量就是引力波。引力波和与之相伴的伽马暴都携带着丰富的物理信息,穿越亿万光年,向我们展现和描绘这一重大物理事件的始末。天文学家通过多信使、多波段观测和数据分析的手段对其中所携带的信息进行解读,可以检验已有的理论模型并发展新的理论模型。从而揭示这一宇宙高能过程的内在规律。

顾名思义,引力波就是引力引起的时空波动。引力波是科学巨匠爱因斯坦在一百年前在广义相

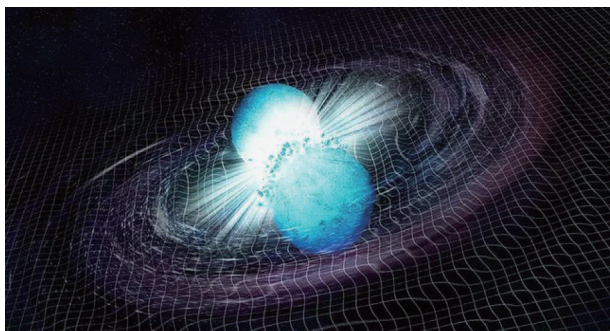


图1 双致密星合并辐射引力波和伽马暴想象图(图片来自网络)

对论中所预言。广义相对论中,任何一个有质量的物体都会使自己周围的空间变得弯曲,通过空间的弯曲向周围的其他物体传递引力。引力伴随物质而存在,自然而然地,引力波也伴随引力而存在。只是通常情况下,引力波极其微弱,以至于没有任何科学仪器能够测得到它们。即便是来自前面所说的两个致密天体猛烈碰撞产生的引力波,传播到地球,其信号也是十分微弱,对探测仪器的灵敏度要求也是非常高的。引力波是那么瑰丽,以至于自从爱因斯坦预言了引力波,其后的一百年当中,引得无数物理学家、天文学家前赴后继地去寻找。找寻引力波的历史过程本文就不做赘述了,只提两件具有里程碑意义的事件:1) 2015年9月14日 LIGO 宣布观测到第一个引力波信号,从而打开了引力波天文观测的窗口。2) 2017年10月16日,人类首次直接探测到来自双中子星合并的引力波,并同时“看到”其发出的电磁信号。该事件象征着多信使引力波天文学时代的到来。

人类现在虽然已经有能力探测到引力波信号,引力波信号的定位依赖于其到达地面探测器网络中不同探测器的时间差,即使是按照整个地球的尺寸去探测,地面探测器网络的空间定位能力也只能达到~10平方度——这是地面探测器网络空间定位能力的极限。实际上,引力波探测器所能提供的典型定位误差有几百平方度(如图2)。这使得其他波段望远镜的后随观测受到了极大影响:即使再对引力波事件发生的距离进行一定程度的限制,在这么

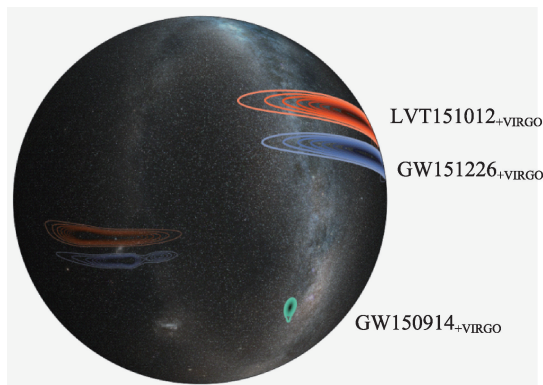


图2 地面引力波探测器对引力波的典型定位情况(Credit: LIGO/ Leo Singer(Milky Way image: Axel Mellinger))

大范围内寻找与之对应的电磁信号源,对于以角分乃至角秒精度开展观测的望远镜来说也无异于大海捞针。其中很重要的观测时机往往在距离引力波事件发生的短短几秒之内。

从而,作为后随观测的需要,亟需有一台能够及时以较高精度及时给出引力波暴的发生方向的卫星——GECAM卫星应运而生。GECAM卫星可以对和引力波暴几乎同时发生的同源伽马暴的能谱和光变进行连续高精度观测,同时可以给出精度较高的引力波事件的方向信息,把地面引力波设备定位的几十到上百平方度范围缩小到平方度量级。这就引出了GECAM卫星的另一项本领。

## 2. 练就眼观六路的神通

我私底下给GECAM卫星取了个诨名,在前面的名片中已经提到过了,叫做“多目星君”。之所以给她取这个名字,主要是因为我们赋予了她多只“眼睛”。

GECAM的眼睛与我们人类的眼睛乃至动物的眼睛有所不同,她的眼睛是用来观看我们所看不见的X射线、伽马射线以及高能带电粒子的。X射线和伽马射线是能量很高的光子,有着很强的穿透能力,其中,伽马射线的能量和穿透性要高于X射线。人们已经将X射线的强穿透性广泛应用在安检、医疗、探伤等很多领域。我们体检时拍摄胸片



图3 地面引力波探测器无法准确引导后随观测

的胸透仪、机场和车站的安检机都是利用了X射线。虽然X射线和伽马射线也都是光子,但我们的肉眼并不能感应到它们。想要看到X射线和伽马射线,需要利用特殊的探测仪器——GECAM的眼睛就是这种仪器。

来自遥远的高能天体源的X射线和伽马射线虽然能量很高,但是却被地球大气强烈地吸收。因此,对高能天体源的探测只能在大气层之外的宇宙空间进行。由于爆发源距离我们非常地遥远,以至

于伽马暴发射的伽马射线到达地球时都是平行光。伽马暴发生的时间和方向都具有随机性,因此,探测伽马暴的科学仪器往往需要有大的视场,并且处在常开状态,随时监测大天区范围内的每个方向。对于单颗处于近地轨道的天文卫星来说,即使卫星上的探测器视场覆盖所有方向,地球也会遮挡一少半的天空。此外,在南大西洋上空有一片粒子沉降区(称之为南大西洋异常区),在该区域有大量高能粒子聚集,很多卫星在该区域关机。因此,

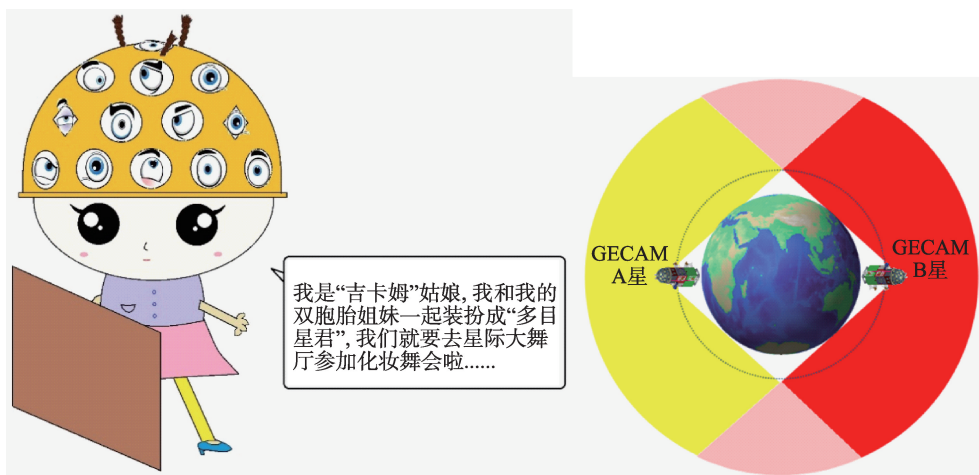


图4 GECAM卫星卡通照及两颗卫星在轨运行视场示意图

单颗近地卫星无法实现全天区的实时观测。为了能够实现对全天区伽马暴的实时连续观测,GECAM采取双星联合的方式。两颗全同的GECAM卫星在轨飞行时均背向地球,同时,两颗星和地心始终保持三点一线。每颗GECAM卫星的视场可以覆盖除地球遮挡视场之外的所有天区,双星视场存在交叉区域,并且具备在南大西洋异常区开机工作的能力。这样,GECAM卫星实现了全时全天的视场覆盖。练就了眼观六路的神通。

此外,卫星上的科学探测器只是看得范围宽还不行。就好比一个人,即使他能同时看四面八方的方向,但他是近视眼,只能看清眼前半米距离内的物体,那我们也不能说这个人的视力好,只能说这个人视力范围宽。对于天文望远镜来说,除了表征望远镜观测范围的“视场”指标,还有一项重要指标:表征望远镜“视力”的指标,也就是对弱信号的观测能力——称之为探测灵敏度。从概念上讲,望远镜的灵敏度是表征望远镜能观测的最小光子流量的物理量。对于探测X射线和伽马射线的天文望远镜来说,灵敏度对应其观测弱X/伽马天体源的能力,即望远镜的灵敏度越高,能够观测X/伽马天体源的信号越弱。

X/伽马射线天文望远镜的灵敏度既与望远镜自身的科学探测仪器对X/伽马光子的响应能力有关,又与望远镜周围以及望远镜自身产生的杂散信号背景有关。举例来说,同样是肉眼在晴夜观看天

上的星星,在偏远的乡村可以看到满天星斗,而在繁华的都市则看不到几颗星星。这就是因为城市的背景杂散光太强,弱一些的星星的光被背景光淹没了。GECAM卫星选择了相对较小的29度倾角,约600千米高的圆轨道,这样可以较好地避开地球辐射带和南大西洋异常区等背景信号过高的区域。同时,GECAM卫星载荷探测器自身产生的背景信号也保持在较低水平。加之单颗卫星的探测器的总探测面积超过了1100 cm<sup>2</sup>,保证了其对弱天体源的光子信号的收集和探测能力。GECAM卫星发射后,将是几年之内在轨运行的探测伽马暴的灵敏度最高的天文卫星。

看得宽、看得远、看得清离不开高科技的“眼睛”,GECAM的每一只“眼睛”都晶莹剔透,经过了我们的精雕细琢,练就火眼金睛。

### 3. 晶莹剔透中的科学之美

GECAM的“眼睛”与人眼其实是有很多相似之处的。我们知道,人眼由角膜、虹膜、瞳孔、晶状体、玻璃体、视网膜、视神经等部分组成。人眼就像是非常精密的自动调焦成像的相机,“拍摄”对象是可见光。人眼对应的,GECAM的“眼睛”伽马射线探测器和荷电粒子探测器也拥有很多与人眼相似的结构。如图5所示。为了方便起见,我把这些部位整理到一个表格里进行比照见表1。通过对比我们

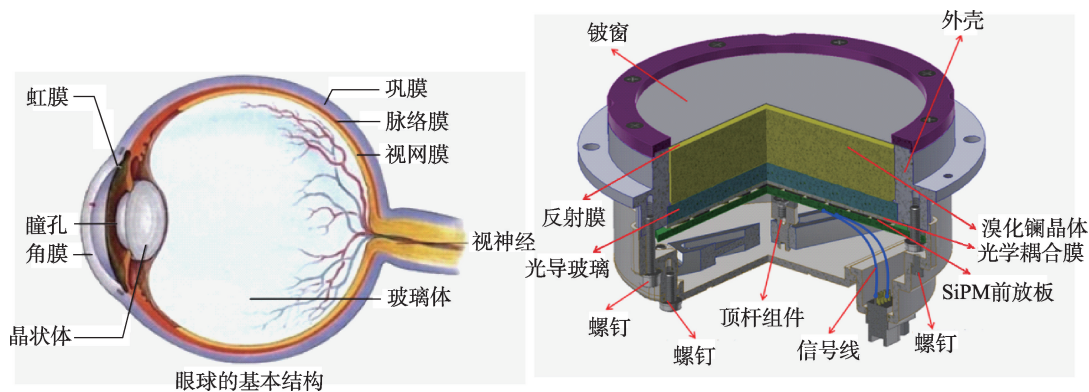


图5 人眼组成与GECAM伽马射线探测器组成对比

表1 人眼组成与GECAM伽马射线探测器组成对比

人眼组成结构	伽马射线探测器组成结构
角膜	铍窗
虹膜	反射膜
瞳孔	外壳约束的视场
晶状体	溴化镧晶体
玻璃体	光导玻璃
视网膜	光学耦合膜、SiPM前放板
视神经	信号线

可以看出,伽马射线探测器确实是名副其实的“眼睛”。同时,荷电粒子探测器与其拥有类似的结构,只是荷电粒子探测器的晶体是用的塑料闪烁体。

不过,虽说伽马射线探测器的组成结构与人眼类似,但它的探测过程还是和人眼感光过程有着很大不同的。我们知道,人眼是利用了凸透镜成像原理,使得光在视网膜上成像,再通过视网膜细胞对照射到上面的影像信息进行收集和分析,并将得到的信息通过视网膜神经传送给大脑。伽马射线探测器探测伽马射线的过程不是通过对伽马射线聚焦和成像来实现,其中并没有聚焦的过程,而是伽马射线直接穿过铍窗和反射膜,照射到溴化镧晶体后其能量被晶体吸收,并产生出大量荧光光子。这些荧光光子通过反射膜反射,透过光导玻璃和光学耦合膜之后,被后面的SiPM阵列所吸收并转化为电信号,然后电信号通过信号线传递给GECAM卫星有效载荷的大脑——载荷处理器。这里,SiPM是硅光电倍增器的英文缩写,它是一种光电转换器件。每个伽马射线探测器都由64个均匀排布的SiPM构成它的“视网膜”。

这里,我想重点介绍一下伽马射线探测器当中的核心:溴化镧晶体。GECAM卫星上的伽马射线探测器采用的是既传统又创新的技术。说它传统,是指它的探测原理同常规的闪烁探测器一样。都是利用闪烁晶体将入射的伽马射线转化成荧光,再进行光收集和光电转化处理。说它创新,是指它所用的溴化镧晶体是一种新型晶体,也是目前为止量

产晶体当中性能最好的闪烁晶体。不过,这种晶体具有极易潮解的特性,它的吸潮能力甚至比我们常用的干燥剂还强。晶体一旦潮解,发生潮解的部位将会失去产生闪烁荧光的能力。所以,溴化镧晶体需要先在干燥的手套箱内封装好之后才能使用,避免和空气中的水分子接触。

过硬的封装工艺是能够在卫星上成功使用溴化镧晶体的关键。封装晶体不单纯是把晶体封住就可以了,还受到很多条件制约。这些制约条件给封装工艺带来很多困难,比如:为了让比较低能的X射线能进入晶体,封装只能用足够薄、且原子序数最低、能够在空气中稳定存在的金属铍做成入射窗,我们的铍窗只有200微米厚,76毫米直径。铍金属与很多航天使用的粘合剂都不浸润,很难粘牢。为此,我们和晶体生产厂家一起尝试了很多种粘接方案。此外,封装后的晶体要满足火箭发射和卫星在轨运行的力学、热学、真空、辐射、噪声等环境条件的要求。这些要求堪称对封装后的晶体的最严苛的考验。为此,我们同晶体供应方一起做了很多努力,通过一版一版地完善封装方案-开展试验验证-再完善-再验证……,终于使得晶体封装工艺满足了任务的要求。尽管现在卫星尚未发射,但我们对晶体将来能够在轨良好运行拥有充分的信心。

一旦GECAM卫星成功使用溴化镧晶体开展天文探测,那么她将是第一颗成功大规模使用溴化镧晶体的天文卫星。也标志着我国的新型晶体生产和封装工艺走在了世界前列。

#### 4. 借星间通信链路开展信息速递

写到这一节的开头,我忽然想起了毛主席在《水调歌头·游泳》中写道:“一桥飞架南北,天堑变通途”——在GECAM卫星项目中,我们也借助了一座“桥”把卫星和地面的科学家团队之间有机地连接起来。这座“桥”就是星间通信链路。

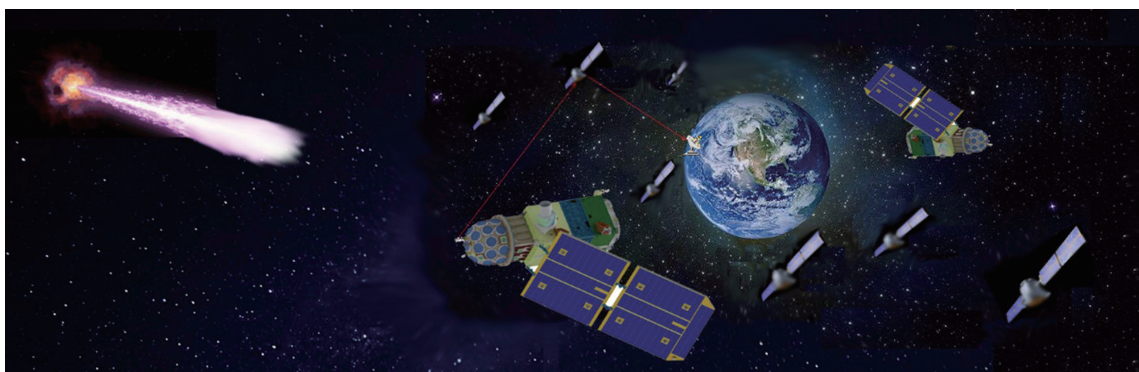


图6 通过星间通信链路传输暴发信息示意图,图中两颗单翼卫星为GECAM卫星,其余卫星为搭建星间通信链路的卫星示意图

前面已经谈到过,GECAM卫星除了对包括引力波伽马暴在内的各种天文暴发现象开展科学观测之外,还担任着一个“哨兵”的角色。当GECAM“看”到伽马暴事件之后,需要准实时地将相关的关键科学数据首先下传到地面,而后经过快速判断确证后,向全世界发布。从而引导其他科学卫星、天文望远镜的后随观测。其他科学数据在卫星过境时通过正常的数据传输通道下传到地面。

GECAM卫星是我国第一个实现利用星间通信链路对关键数据开展准实时下传的卫星,其原理与手机发短信类似,只不过星间链路通信是通过卫星无线互连的。对于GECAM卫星来说,所使用的链路是单向的下传链路,一次伽马暴发生时,卫星有效载荷上的伽马射线探测器触发在轨定位算法,在星上进行伽马暴定位。并将定位信息、光变和能谱等信息生成精简的快速下传数据。将这些最为关键而精炼的科学数据信息传递给星间链路卫星网。再通过星间链路下传到地面接收站。之后还有一系列地面链路,最终传递给中国科学院高能物理研究所的GECAM卫星科学应用系统服务器。为了确保最为关键的信息能够完整、顺利地准实时下传到地面,我们对星间传输链路和相关策略进行

了可靠性设计。在卫星发射前,对于整个通信链路的测试是一个非常重要的环节。由于我们使用的星间链路已经实现了近地空间包括地球表面的全覆盖,因此,对于星间通信链路来说,在地面的测试和在轨测试并无本质区别。

## 5. 讨论

随着引力波天文学时代的到来,引力波探测引领了近几年的天文观测热潮。GECAM卫星应潮而生,应时而动。在我国科学家和设计师队伍的不懈努力之下,克服了重重困难,将一个个硬核技术在卫星上实现。在这些技术的有力支撑下,GECAM卫星虽然个头小,但它发射后,将是近几年内国际上对伽马暴、磁星爆发、快速射电暴、地球伽马闪等爆发事件综合探测能力最强的卫星。

科学最大的意义在于发现未知,探索新奇。科学卫星作为科学研究的观测工具,打开了人类认识宇宙视野。GECAM卫星作为我国自主研发的天文卫星,必将在茫茫宇宙当中划出属于自己的轨迹。

(审校:刘晓静)