

# 立方星与高能天文观测

唐睿婧

(北京交通大学 100091)

1957年10月4日,苏联发射了世界上第一颗人造卫星,标志着人类迈入了一个崭新的时代——太空时代。就天文学而言,太空时代依托卫星等空间平台开展的天文观测突破了地球大气的限制,拓展了可供观测的电磁波段,开启了宇宙X射线等高能天文观测研究的新窗口,带来了诸多重要的新发现。

以高能天文中的X射线天文为例。从第一颗专用于X射线天文研究的乌呼鲁卫星(Uhuru)到美国宇航局(NASA)大型轨道天文台计划(Great Observatories)之一的钱德拉X射线天文台(Chandra X-ray Observatory,简称CXO),再到未来的先进高能天体物理望远镜(Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics,简称Athena)和天猫座X射线天文台(Lynx X-ray Observatory,简称Lynx),国际高能天文卫星的发展日新月异。2017年6月15日,硬X射线调制望远镜卫星(Hard X-ray Modulation Telescope,简称HXMT)于酒泉卫星发射中心成功发射升空,实现中国X射线天文卫星零的突破。2018年3月,美国《科学》杂志报道了中国科学家发起并领导的大型国际合作项目——增强型X射线时变与偏振空间天文台(enhanced X-ray Timing and Polarimetry mission,简称eXTP),称其将稳固中国在X射线天文领域领导者的地位。相比于慧眼卫星,下一代的旗舰级天文台eXTP的“体型”更加庞大,所携带科学仪器的复杂度也已远超同期的X射线天文卫星。

总的来说,Athena,Lynx和eXTP将朝着大型空间天文台方向发展,此外还有一类X射线天文卫星却在追求小型化,它们希望借助于立方星平台实现专属的X射线探测能力。

## 一、什么是立方星

人造卫星是人类制造并发射至绕地球轨道或其他空间轨道的一种航天器,它可以按照重量、用途、轨道等不同的标准进行分类。如果按照重量来分类的话,人造卫星一般包括大型卫星(Large satellite, $>1000$  kg)、中型卫星(Medium satellite, $500\sim 1000$  kg)和小型卫星(Small satellite, $<500$  kg)。小型卫星又可细分为小卫星(Minisatellite, $100\sim 500$  kg)、微卫星(Microsatellite, $10\sim 100$  kg)、纳卫星(Nanosatellite, $1\sim 10$  kg),以及质量更小的皮卫星(Picosatellite)和飞卫星(Femtosatellite)(如图1所示)等。

近年来,传统的大中型卫星因研制成本高、研发周期长等问题而难以应对日益增长的空间科学和其他应用需求。低成本、小质量(尤其是质量为 $1\sim 100$  kg的微卫星和纳卫星)的卫星越发得到人们的青睐。立方星(CubeSat)就是一种采用单位模块化设计的微纳卫星(微卫星和纳卫星的统称)。按照国际通用标准,单位模块被称为1U,对应的尺寸是 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ ,质量一般不超过 $1.33$  kg。立方星可以根据实际需要以类似于搭积木的方式扩展为2U、3U、6U(模块化)乃至更大的卫星或不局限

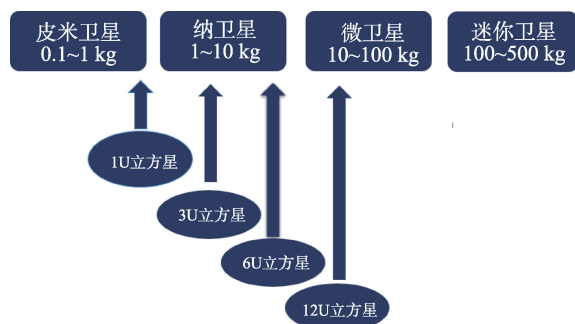


图1 小型卫星按照重量的分类

于整数倍(如图2所示)。

自1999年美国加州理工州立大学(California Polytechnic State University, 简称 Cal Poly)和斯坦福大学(Stanford University)的几位研究人员提出立方星的概念后,这一卫星家族的“新星”得到了快速的发展。近年来,立方星的发射数量正在以每年上百颗的速度增长。据Nanosats Database统计,全世界至今已经发射近两千多颗立方星。凭借着标准化的设计以及研制成本低、研发周期短、功能密度大、灵活性高等优势,立方星大幅降低了高校、科研机构 and 商业公司参与航天任务所需的技术、资金、人才等资源要求,也为空间科学带来了更多的选择。

## 二、立方星在 高能天文观测中的应用

高能天文学是通过观测高能电磁辐射(极紫外光、X射线、伽马射线)、中微子和宇宙线粒子等宇宙“信使”来研究各种天体和宇宙现象的一门学科。

由于地球大气的散射和吸收,X射线和部分伽马射线能段的高能天文观测无法在地面进行,只能将探测仪器搭载在气球、火箭、卫星等空间平台在高层大气或太空中开展相应的研究。在过去,发射天文卫星之类的航天任务有着比较高的门槛,这实际上阻碍了空间高能天文观测的普及;但立方星的出现改变了这种情况,让更多的研究机构和科研团队有机会独立研制并发射运行高能天文卫星。

立方星的设计采用外形拼接,类似于搭积木一般的原理。这种设计构想使人们能够根据项目需求将多个模块化功能单元拼接在一起,从而实现各种不同功能的组合,实现“一加一大于二”的效果。如图3所示,从整体星模块的拼接角度来看,可将探测伽马射线望远镜和X射线偏振仪组合,实现一个星体具备多种功能的效果。从每个小正方体单元的角度看,仍可采用这种拼接的设计思路,将镜子部分、探测器以及电子学后端器件堆叠,这种

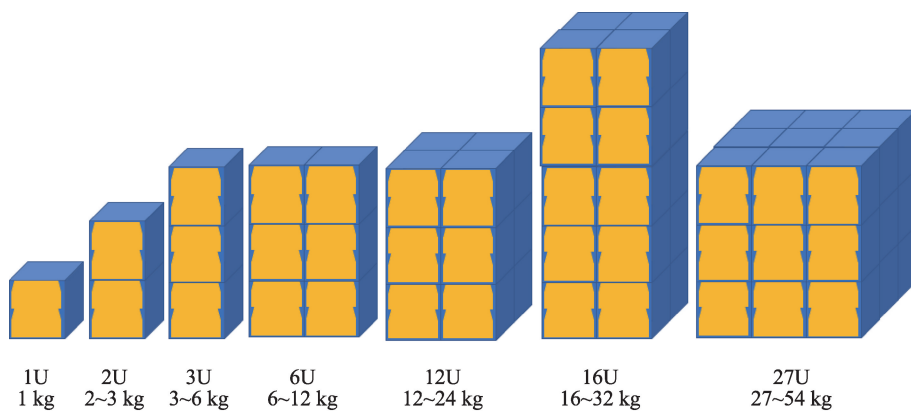


图2 常见立方星模块的堆积方式

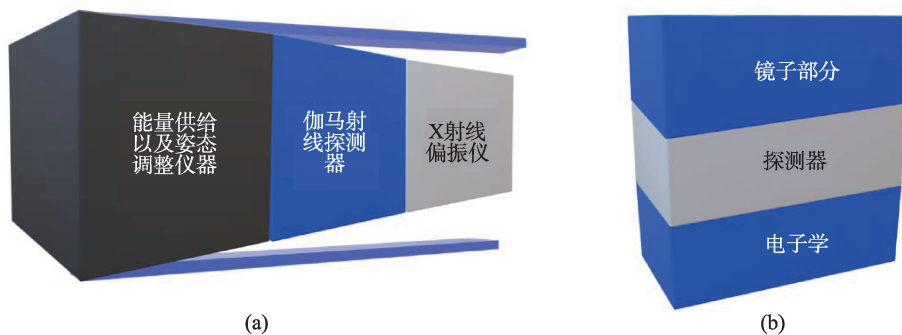


图3 立方星结构可采用堆叠性设计的例子 (a)整星的拼接设计(3U设计,1U为卫星姿态调整控制,1U为伽马射线探测器,1U为X射线偏振翼);(b)X射线偏振仪单元内部的组合示意

设计理念可更加灵活地应对不同需求,同时简化制造流程,使其可进行批量生产。其赋予整个系统更高的适应性、可扩展性和模块性。不仅能够提升系统的效率和性能,还能降低研发、生产和维护的复杂度。

图4呈现了一些高能天文卫星的发射时间及其重量统计数据。从这些数据中可以直观地观察到,制造大型卫星所需的时间较长,且其重量已经接近甚至超过了一千倍立方星(星座)的重量。随着立方星技术的引入,天文学卫星的发射频率显著增加,一些项目甚至以超高频率连续发射卫星系列,这种多发的特性使得可以首先发射具有验证性和先导性的实验星,通过这些初期实验,进一步降低后续任务的风险。这种高频发射对于大型卫星目前来说尚未实现。通过对比大型卫星与立方星(星座)的图片,立方星的结构相近并且更加规整。

目前,国际天文界已提出了多个高能天文立方星任务,其中一些已成功在轨运行。这些任务充分利用了立方星的灵活性,既有独立的单颗卫星,也有多颗卫星组成的观测星座。下面,本文将介绍几

个典型的基于立方星(星座)的高能天文观测任务。

## 1. Polarlight

极光计划(Polarimeter Light, 简称 Polarlight)是清华大学牵头,中科院高能所、意大利国家核物理研究所比萨分所(INFN-Pisa)、宁波工程学院、北方夜视和长沙天仪研究院等单位参与研制的空间天文X射线偏振探测实验,于2018年10月29日搭载铜川一号立方星(6U)发射,运行在近地轨道(low earth Sun-synchronous orbit)上。立方星总共为6U设计,其中1U为Polarlight(如图5所示)。1U的有效空间内集成了偏振气体像素探测器、芯片读出电子学、高压模块以及数据采集系统等,采用垂直集成封装的方式将探测器系统压缩到了1U的尺寸以内,实现了 $1.4 \times 1.4 \text{ mm}^2$ 的有效面积,探测能段覆盖了2~8 keV,能量分辨率为 $19\% @ 6 \text{ keV}^{[1]}$ 。

极光的一个主要研制目的是为中国下一代旗舰级X射线天文台eXTP做关键的偏振技术在轨验证。此外,极光通过对蟹状星云(Crab Nebula)脉冲星的观测,发现了其自转突变前后的偏振变化,该

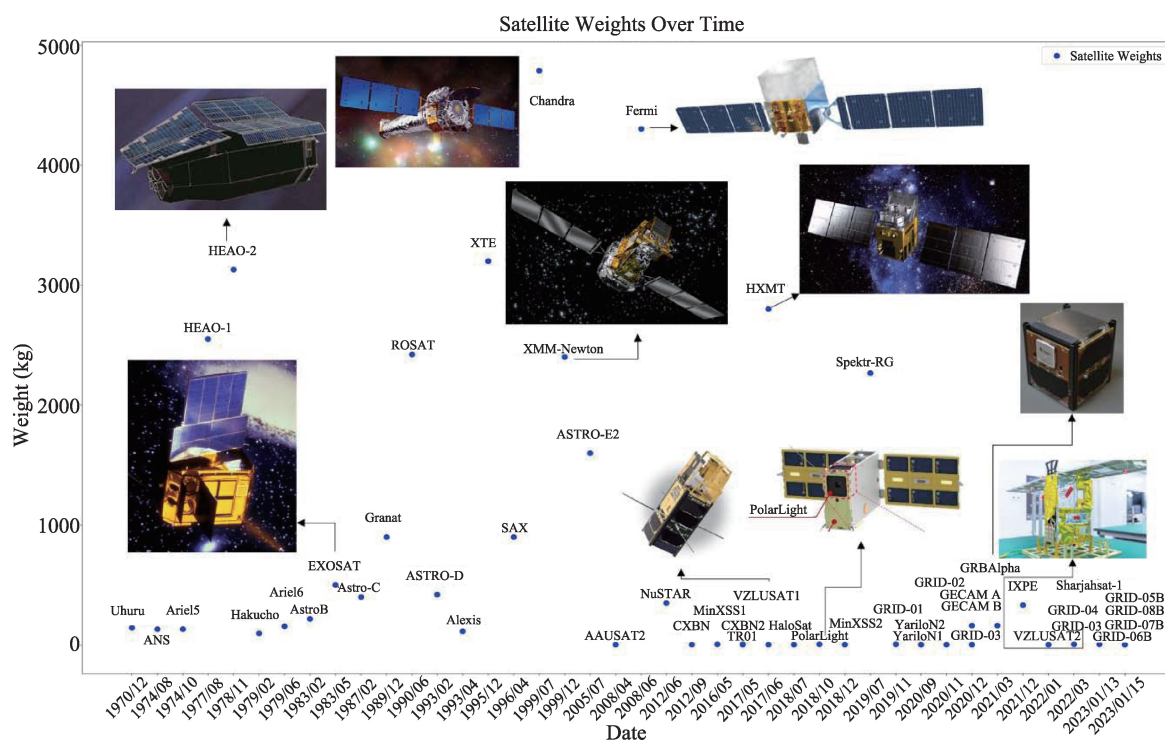


图4 部分高能天文卫星的发射时间以及其重量图

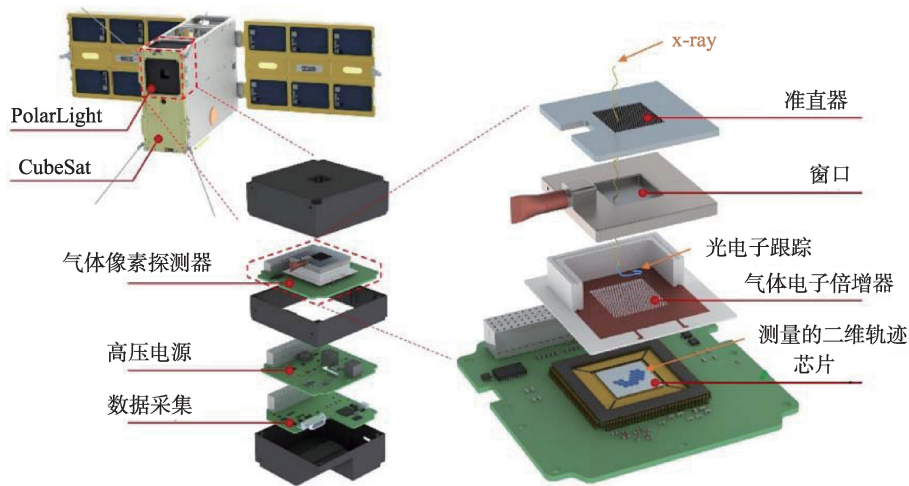


图5 极光在铜川一号上的搭载示意图以及采用了垂直集成封装的极光探测器结构示意图

成果登上《自然·天文》封面,被认为“重启了停滞40多年的软X射线偏振探测窗口”。极光的成功,充分体现了“小”卫星的“大”科学潜力。

## 2. GRID

天格计划(The Gamma-Ray Integrated Detectors, 简称GRID)是由清华大学发起,主要由天仪研究院和长光卫星提供卫星平台,南京大学、中科院高能所等20余所学校和单位共同合作参与的空间科学项目,卫星研发的核心主力是本科生。该项目是针对10 keV~2 MeV的短伽马射线暴而提出的,首要目标是探测引力波对应的伽马射线天文事件。从2016年发起计划到现在已在低地球轨道(500~600 km)上部署8颗立方星,形成星座系统,利用多星组合的方式实现大天区的覆盖从而实现短伽马射线暴的检测,并基于星座中不同卫星观测的时间相

应延迟实现伽马射线暴的自主定位。该项目的第一个试验载荷与极光一起成功搭载在立方星铜川一号(6U)上,并于2018年成功发射。探测器只占据了0.5U的载荷空间,探测面积达到了58 cm<sup>2</sup>,可测能量范围为10 keV~2 MeV,能量分辨率在662 keV处为9%<sup>[2]</sup>。GRID-02和GRID-03在试验星的基础上进行了改进,减小了死时间,优化了数采模块,实现了在轨处理性能的提高<sup>[2,3]</sup>,并先后于2020年11月和12月发射升空。后续天格计划又已发射5颗立方星。

为了实现模块化设计,GRID的单个探测器的尺寸设计为5 cm × 9.4 cm × 9.4 cm,占据0.5U的空间,剩余的空间则用于安装电子学。将整个探测器系统的尺寸限制在了0.5U<sup>[2]</sup>。由以上对结构的描述可看出立方星模式化的性质。后面推出的天格载荷则基于此进行改进并施行批量生产<sup>[3]</sup>。

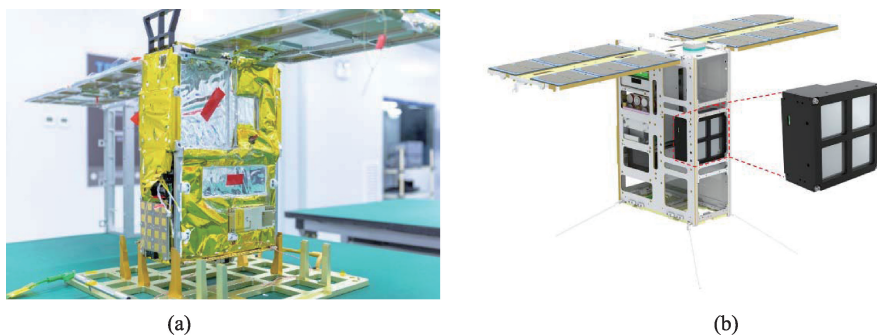


图6 (a)GRID-03立方星实体图<sup>[4]</sup>; (b)GRID-01在铜川一号卫星中的位置以及探测器所处的结构<sup>[5]</sup>

### 3. HaloSat

HaloSat(Soft X-ray Surveyor)是由美国爱荷华大学(University of Iowa)和NASA联合研制的立方星项目,采用了6U的设计,整星尺寸为10 cm×20 cm×34 cm,于2018年发射入轨。HaloSat的科学目标是通过研究环绕银河系热气体中的X射线来寻找宇宙中丢失的物质。这个6U立方星中的2×2U组成了探测器系统,包括了3个独立的硅漂移探测器以及对应的读出电子学系统,单个探测器有效面积为25 mm<sup>2</sup>,探测能段为0.4~7 keV,能量分辨率为

~85 eV@0.677 keV, ~137 eV@5.895 keV, 视场为10°。卫星平台的电子学系统采用模块化的设计,共占据了2U的空间<sup>[7]</sup>。

HaloSat的观测有助于加深人们对银河系热晕的认识,并为相关的研究提供独特的数据集,这对于理解星系演化、恒星形成和宇宙重子缺失等问题具有重要意义。通过分析HaloSat的X射线观测数据,研究人员发现银河系被一团称为环星系周围介质(circumgalactic medium,简称CGM)的热气所包围,这为寻找缺失的重子提供了新的研究证据<sup>[8]</sup>。

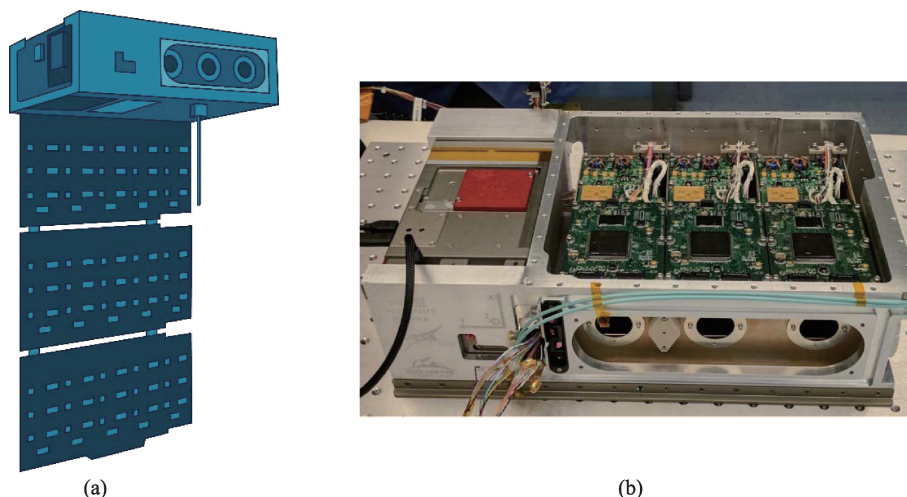


图7 (a)HaloSat整星的模型图<sup>[6]</sup>;(b)HaloSat内部结构图<sup>[7]</sup>,左部中后方银色大长方体为航天电子设备仪器,左侧前部为探测器的电子学模块,右侧的三个为X射线探测器仪器,有校准垫圈和一个覆盖在平面镜子上的盖子用于在最前面的光学校准

### 4. HERMES

HERMES(The High Energy Rapid Modular Ensemble of Satellites)是一个部署在近地轨道上的纳卫星星座项目,旨在建立一个从几keV到2MeV的全天监视器,用于探测和定位瞬态事件,如伽马射线暴等。该纳卫星星座计划分为HTP(HERMES Technological Pathfinder)和HSP(HERMES Scientific Pathfinder)两部分,由意大利航天局和欧盟等资助,各提供三颗完整的卫星,形成一个3+3的3U立方卫星星座。HERMES-TP/SP要求载荷的探测能段满足 $\leq 5$  keV,  $\geq 500$  keV。其载荷有四个部分:探测器阵列、后端电子学、供电单元和载荷数据处理单元。采用垂直封装的设计思路,将探测器系统尺寸

限制在了1U以内<sup>[9]</sup>,最终可以在较宽的能段范围内以亚微秒的时间分辨率实现对高能暂现源的快速定位和研究。此外,计划于2023年下半年发射的SpIRIT(Space Industry-Responsive-Intelligent-Thermal Nanosatellite)立方星搭载了HERMES的部分载荷,此联合项目将用于测试仪器的情况<sup>[10]</sup>。由6颗立方体卫星组成的“HERMES-TP/SP”星座计划目前预计将于2024年中期发射<sup>[11]</sup>。

### 5. CAMELOT

CAMELOT(Cubesats Applied for Measuring and Localising Transients)是由捷克、匈牙利和日本等多所大学和天文台共同提出的立方卫星星座计划,在探

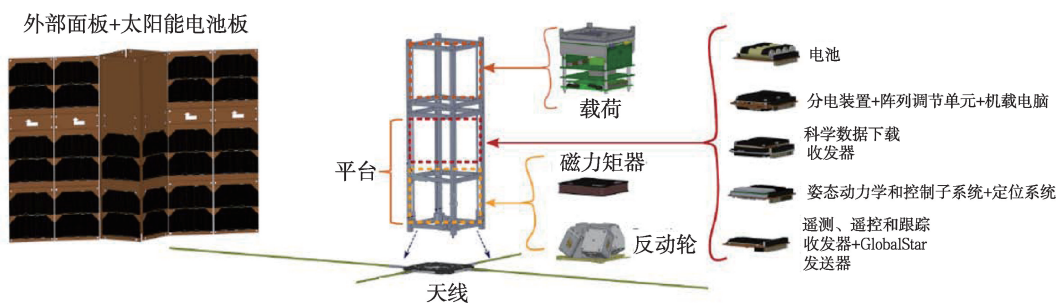


图8 HERMES有效载荷的各个层次的结构和探测器模块内部的精细划分<sup>[12]</sup>

测到伽马射线发生瞬变之后,它可以提供高灵敏和高定位精度的观测,并且可以覆盖全天区。整个项目计划在近地轨道的三个不同的轨道面部署至少9颗3U立方星,立方星将配备用多像素光子计数器(MPPCs)读出大且薄的CsI(Tl)闪烁体探测器。对于明亮的短伽马射线暴,通过多颗卫星光变曲线的相互关联,能确定到达不同卫星之间的时间差,从而实现定位,同时为了满足这一需求,卫星上也将配备GPS来确保时钟的精确同步<sup>[13]</sup>。CAMELOT先发射了GRBAlpha作为验证来进行一系列在轨验证实验。

### 1) GRBAlpha

GRBAlpha是一颗1U立方星,于2021年3月22日发射,它携带了尺寸为75 mm×75 mm×5 mm探测器,灵敏能段在70~890 keV,能量分辨率~30%,由多像素光子计数器读出<sup>[14]</sup>。GRBAlpha作为CAMELOT的试验星之一主要是对CAMELOT星座探测器技术和电子学设计进行验证以及评估它的粒子屏蔽。

### 2)VZLUSAT-1

VZLUSAT-1是一颗2U立方星,于2017年6月23日发射成功,未展开尺寸为100 mm×100 mm×230 mm,携带小型宽视场光学系统“龙虾眼”X射线望远镜(Lobster Eye,简称LE)。LE视场为3°,焦距为250 mm,可探测能段在3-60 keV区间,并位于可展开的平台上,这个小型的伸展结构可将镜子向外推出110 mm。此外VZLUSAT-1还将测试由碳纤维增强塑料(carbon fiber reinforced plastic,简称CFRP)制作的辐射屏蔽装置的性能<sup>[15]</sup>。

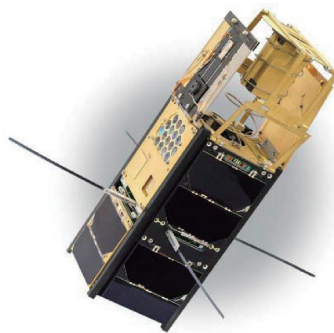


图9 VZLUSAT-1立方星的结构图,可以看出是由两个立方体拼接而成<sup>[16]</sup>

### 3)VZLUSAT-2

VZLUSAT-2是一颗3U立方星,于2022年1月13日发射,是2017年发射升空的VZLUSAT-1的升级版,依据VZLUSAT-1进行了调整和改进。VZLUSAT-2的主要载荷是灵敏能段大约在50~300 keV的GSD(Ground Sampling Distance)、轨道辐射监测器、伽马射线暴探测器、X射线探测器和其他传感器。探测器尺寸也为75 mm×75 mm×5 mm,探测能段为50~300 keV,同样采用多像素光子计数器读出<sup>[17]</sup>。VZLUSAT-2目的之一是为了在平台和载荷水平上对未来的CAMELOT进行技术验证。

## 三、全变源追踪猎人星座计划

“全变源追踪猎人星座”计划(Chasing All Transients Constellation Hunters,简称CATCH)是2019年由中科院高能所提出的X射线智能化天文星座,由百颗微卫星组成,旨在解决目前“巡天望远镜发现海量的暂现源(变源)”和“后随观测设备严重不

足”之间的失衡,对全天暂现源(变源)等宇宙动态事件同时进行深度后随观测,刻画极端宇宙的多参量(时变、能谱、成像、偏振)动态全景。CATCH初步规划了3个轨道面共126颗微卫星,分为3种卫星类型(A、B和C型),全部搭载中国自主研发的紧凑型、轻量化的X射线聚焦望远镜。CATCH单星采用了模块化设计,在卫星内部依据功能划分成了卫星平台电子学、探测器系统、X射线光学系统以及可折叠桅杆系统几个部分。在发射过程中,可折叠桅杆处于折叠状态,卫星发射入轨后桅杆展开将探测器系统伸出卫星,从而实现较长的X射线聚焦焦距。

CATCH的3种卫星及其有效载荷配置如下:

(1) A型卫星使用I型卫星平台,整星重量约25 kg,搭载微孔光学(Micro-pore Optics,简称MPO)聚焦望远镜和4像素SDD探测器,卫星数量108颗,实现0.5~4 keV能段的大规模时变观测;

(2) B型卫星使用II型卫星平台,整星重量约35 kg,搭载轻量化Wolter-I型聚焦镜和多像素型SDD探测器阵列(备选方案是pn-CCD探测器),卫星数量9颗,进一步实现0.3~10 keV能段的成像,能谱和时变观测;

(3) C型卫星使用II型卫星平台,整星重量约40 kg,搭载轻量化Wolter-I型聚焦镜和GMPD偏振探测器(备选方案是GPD偏振探测器),卫星数量9颗,进一步实现2~8 keV能段的偏振观测。

CATCH最初计划由立方星平台组成,但后来根据其有效载荷以及所要实现的观测需求做了优化,已经不再是简单的立方星。不过,I和II两种卫星平台依然借鉴了立方星的思想,采用了标准化的设计,便于批量化制造,并且通过引入商业航天的模式,使用工业级而非航天级的器件,压缩研制成本和研发周期。此外,CATCH还将开发星座智能化控制系统,解决多场景、多任务的同时调度和优化观测等问题,实现星座观测资源的优化配置和海量数据的分析处理,以最大程度发挥每一颗卫星的性能和星座的集群优势。

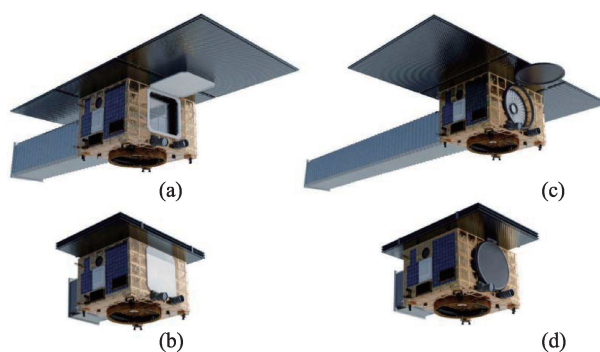


图10 CATCH项目内不同类型卫星示意图。左面板:a型卫星的在轨展开后(上)和发射过程中折叠状态示意图装(下)。右面板:b型和C型卫星在轨展开(上)和发射过程中折叠状态(下)示意图<sup>[18]</sup>

## 四、结束语

综上,立方星或借鉴立方星概念的小型卫星(以下统称立方星)有着诸多独特的优势,如研发周期短、研制成本低等,弥补了传统中大型卫星的不足,可以吸引更多的科研机构和企业加入到空间探测中。立方星的发展契合我国航天强国的战略布局,如《2021中国的航天》白皮书指出鼓励引导商业航天快速发展,提出“扩大政府采购商业航天产品和服务范围,推动重大科研设施设备向商业航天企业开放共享,支持商业航天企业参与航天重大项目研制”,而基于立方星(星座)的空间天文研究正是引入商业航天的重要契机之一。

从前文提及的高能天文立方星(星座)可以看出,虽然每颗卫星限于体量仅搭载了种类较为单一的有效载荷(聚焦镜和探测器),但是通过灵活多样的设计思路,同样可以产出重要的科学成果。比如,Polarlight和HaloSat都对较为单一的科学目标做了专属优化,其中Polarlight更是验证了新的偏振探测技术;此外,GRID和CAMELOT等星座通过多星的协同观测产生了“1+1>2”的效果,而GRID由大学生主导,这促进了空间科学人才的培养;对于CATCH,人工智能的引入将解决大规模星座优化观测问题,促使其真正成为一个有机整体,成为功能强大的高能观测设备。

未来随着技术的进步,高能天文立方星(星座)

有望实现更强的观测能力,起到大中型卫星无法替代的作用,比如 CATCH 的全天同时后随观测能力。此外,低成本的立方星降低了研发风险,特别适于新的空间天文技术的验证。基于此,更多的科研机构 and 高校将依托立方星(星座)开展空间探索,并为中国的航天事业注入更多的新鲜血液。

### 参考文献

- [1] Feng, H., Jiang, W., Minuti, M., et al. (2019). PolarLight: A CubeSat X-ray polarimeter based on the gas pixel detector. *Experimental Astronomy*, 47(1-2), 225-243. <https://doi.org/10.1007/s10686-019-09625-z>
- [2] Jia-Xing Wen et al. (2021). Compact CubeSat Gamma-ray detector for GRID mission. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1016, 165782. doi: 10.1016/j.nima.2021.165782
- [3] Gao, Huaizhong et al. "On-ground calibrations of the GRID-02 gamma-ray detector." *Experimental Astronomy* 53 (2021): 103-116
- [4] "天格计划"两颗卫星载荷发射入轨并成功开始空间科学观测-清华大学. (n.d.). 清华大学. <https://www.tsinghua.edu.cn/info/1175/92130.htm>
- [5] Gao, H., Yang, D., Wen, J. et al. (2022). On-ground calibrations of the GRID-02 gamma-ray detector. *Experimental Astronomy*. 53. 10.1007/s10686-021-09819-4.
- [6] Kaaret, Philip et al. "HaloSat: A CubeSat to Study the Hot Galactic Halo." (2019). *The Astrophysical Journal*, 884(2), 162. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab4193>
- [7] HaloSat. (n.d.). NASA Universe Exploration. <https://universe.nasa.gov/resources/226/halosat/>
- [8] Kaaret, P., Koutroumpa, D., Kuntz, K.D. et al. A disk-dominated and clumpy circumgalactic medium of the Milky Way seen in X-ray emission. *Nat Astron* 4, 1072-1077 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01215-w>
- [9] Evangelista, Yuri et al. "The scientific payload on-board the HERMES-TP and HERMES-SP CubeSat missions." *Astronomical Telescopes + Instrumentation* (2020).
- [10] Riccardo Campana et al. (2022). Calibration of the first detector flight models for the HERMES constellation and the SPIRIT mission. In *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray* (Vol. 12181, p. 121815K). International Society for Optics and Photonics. doi: 10.1117/12.2584317
- [11] HERMES Pathfinder & SPIRIT family picture. (n.d.). Retrieved June 21, 2023, from <https://www.hermes-sp.eu/?p=10554>
- [12] Scala, Francesca & Zanotti, Giovanni & Curzel, et al. (2020). The HERMES mission: a CubeSat constellation for multi-messenger astrophysics.
- [13] Werner, Norbert et al. (2018). CAMELOT: Cubesats Applied for and Localising Transients mission overview. *Astronomical Telescopes + Instrumentation*. <https://doi.org/10.1117/12.2311929>
- [14] Smith, J. D., & Johnson, L. M. (2021). GRBAlpha: the smallest astrophysical space observatory — Part 1: Detector design, system description and satellite operations. *Astrophysical Journal*, 789(2), 101-115. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/789/2/101>
- [15] Vladimir Daniel, Martin Urban, Ondrej Nentvich, Veronika Stehlikova, "VZLUSAT-1: verification of new materials and technologies for space," Proc. SPIE 9978, CubeSats and NanoSats for Remote Sensing, 99780N (19 September 2016)
- [16] VZLUSAT-1 shořel V atmosfěre. (2023, June 7). Kosmonautix.cz. <https://kosmonautix.cz/2023/06/vzusat-1-shorel-v-atmosfere/>
- [17] Ripa, J, et al. "Early results from GRBAlpha and VZLUSAT-2." (2022). In *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*. <https://doi.org/10.1117/12.2629332>
- [18] Li, P., Yin, Q., Li, Z., et al. (2022). CATCH: Chasing all transients constellation hunters space mission. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1956780/v1>

