

慧眼卫星观测高能爆发现象

李承奎 熊少林 宋黎明 蔡策 易祁彬 赵海升
肖硕 张镇 赵一 罗琦

(中国科学院高能物理研究所 100049)

慧眼卫星(Insight-HXMT)作为我国首个空间X射线天文台,不仅能进行宽波段、大视场的X射线扫描巡天以及定点观测,研究黑洞、中子星、磁星等致密天体的短时标光变和宽波段能谱,而且也可作为高灵敏度、宽视场的伽马射线监测器,探测伽马射线暴(GRB)、引力波高能电磁对应体(GW EM)、太阳耀发(SFL)和地球伽马闪(TGF)等高能爆发现象。

如图1所示,慧眼卫星配备三台X射线望远镜,分别是高能X射线望远镜(HE),中能X射线望远镜(ME)和低能X射线望远镜(LE)。慧眼卫星主要使用高能望远镜监测伽马暴等各类爆发现象。

慧眼卫星高能望远镜(简称HXMT/HE)的主探测器采用了碘化钠(NaI)和碘化铯(CsI)复合晶体方案(如图2),其中NaI主要探测从准直器视场内入射的X射线和伽马射线,而CsI一方面可作为NaI的反符合探测器,用来降低NaI的本底,另一方面可以探测穿透卫星的伽马光子,其能量约200 keV~5

MeV,这些伽马光子可以从各个方向穿透卫星,也就是说CsI监测伽马射线的视场为全天,但因为慧眼卫星处于550千米的低轨道,地球遮挡了约三分之一的天区^①。

与其他相似能段的伽马暴探测器(如Fermi/GBM, Swift/BAT, Konus-Wind)相比, HXMT/HE CsI探测器在>200 keV能段具有超大的有效面积(超过1000 cm²,如图3),且时间分辨率高(约2 μs),视场覆盖大约67%的全天天区,因此HXMT/HE CsI是监测GRB、SFL等高能爆发现象的利器。

1. 慧眼观测伽马暴

GRB是来自遥远宇宙的伽马射线在短时间内突然增强的高能爆发现象,是目前观测到的最剧烈的爆发现象之一。如前所述,由于CsI探测器在200 keV至5 MeV的高能段具有超大的有效面积和高时间分辨率,擅长探测短硬伽马暴,即能谱较硬、持续时间较短的伽马暴,比如GRB 170921C,慧眼探测的信噪比好于Fermi/GBM和INTEGRAL/SPI-ACS(图4)。

为了进一步增强CsI探测器在MeV能区的伽马射线全天监测能力,在普通增益模式(Normal Gain,简称NG)的基础上,慧眼卫星新增了一种低增益模式(Low Gain,简称LG),使CsI的探测能区进一步扩大。当慧眼卫星进行某些不需要HE的碘化钠(NaI)探测器的观测时(例如小天区扫描观测),HE将切换至低增益模式,从而利用CsI更好地监测伽马暴等爆发天体。

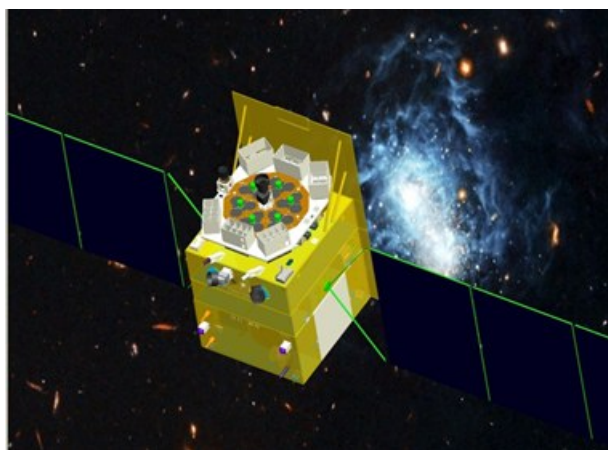


图1 慧眼卫星在轨观测示意图,其中卫星顶部的中央是高能望远镜(HE),中能望远镜(ME)和低能望远镜(LE)各包含三个机箱,分别置于右上靠近遮阳板和左下远离遮阳板的位置

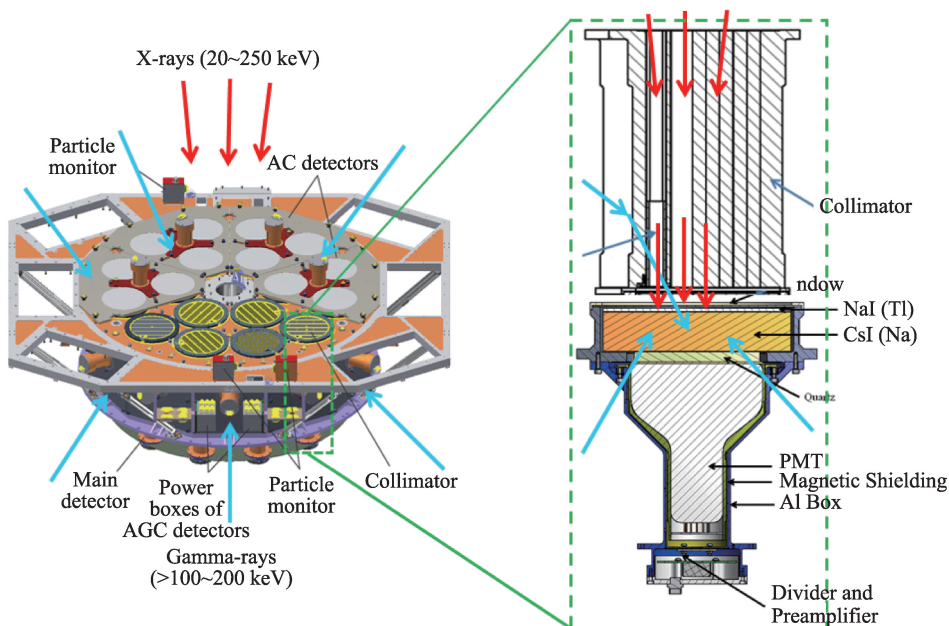


图2 慧眼卫星高能望远镜(HXMT/HE)主探测器的两种观测方式的示意图。红色箭头代表从准直器视场范围内入射的X射线光子,主要由NaI晶体探测。蓝色箭头代表各个方向入射的伽马射线,可穿透卫星的结构材料,主要由CsI晶体探测。右侧虚线框是对HE主探测单个模块的放大图。顶部是HE准直器,中部是NaI/CsI复合晶体,底部是用于读出晶体发光的光电倍增管(PMT)

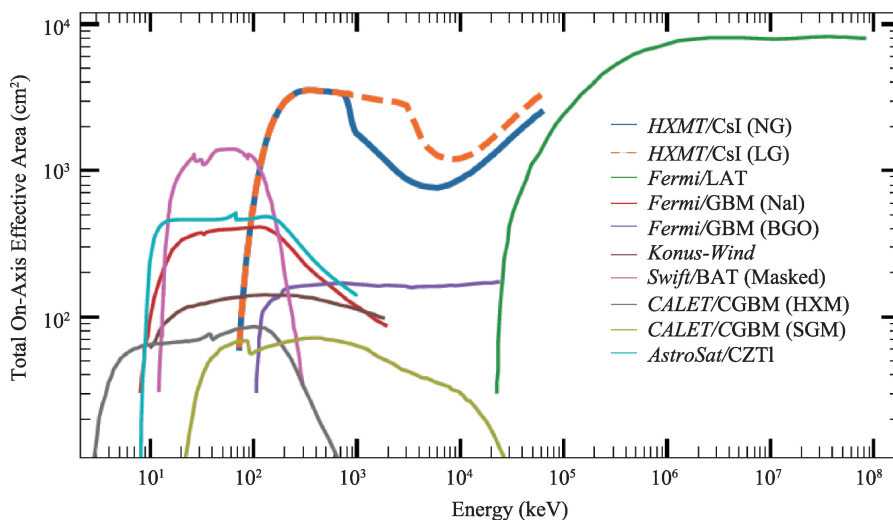


图3 HXMT/HE CsI探测器观测伽马暴时的有效面积随能量的分布以及与其他卫星有效面积的对比。其中,深蓝色为CsI探测器的普通增益模式(NG),橙色虚线为低增益模式(LG)^②

为了获得各个角度入射光子的响应矩阵,我们利用Geant4软件构建了完整的慧眼卫星的质量模型,模拟了769个入射方向的光子在卫星内的作用过程以及在HE主探测器上的沉积能量,然后利用模拟结果计算了慧眼HXMT/HE观测GRB的响应矩阵,并写入标定数据库供伽马暴数据分析软件使

用。我们使用HXMT/HE跟Fermi/GBM都探测到的伽马暴进行了两个探测器之间的交叉标定,表明HXMT/HE的响应矩阵是准确的,如图5所示^②。

慧眼在轨只记录了每个整秒的死时间,对于各个事例以及秒以下的死时间都没有记录。对GRB精细的光变数据分析需要用到秒以下的死时间,因

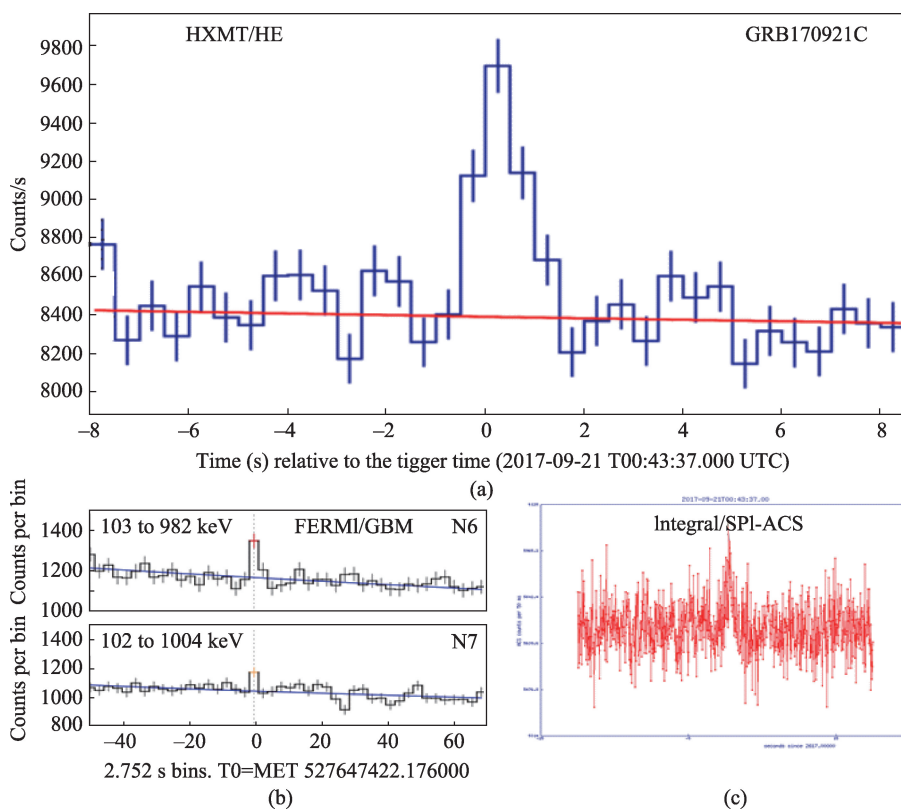


图4 GRB170921C的光变曲线。(a)为HXMT/HE的光变曲线,(b)为Fermi/GBM的光变曲线,(c)为INTEGRAL/SPI-ACS的光变曲线。HE、GBM和SPI-ACS的信噪比分别为12、8和4

表1 HE主探测器两种增益模式及探测器的记录能量范围。其中低增益模式主要用于CsI进行伽马射线全天监测

| 增益模式 | NaI记录能量范围 (keV) | CsI记录能量范围 (keV) | 备注 |
|----------|-----------------|-----------------|------------------|
| 正常增益(NG) | 20 ~ 250 | 40 ~ 600 | PMT正常高压,开启自动增益控制 |
| 低增益(LG) | 100 ~ 1250 | 200 ~ 3000 | 降低PMT高压,关闭自动增益控制 |

此我们通过对死时间规律的研究,建立了一套计算任意时间范围内死时间的方法,特别是秒以下的死时间,从而提升了光变和能谱的准确性^③(图6)。此外,利用这个死时间计算方法,还可以估算HE在入射计数率特别高时产生的电子学传输饱和而而丢失的事例个数。

因为所有18个CsI探测器的指向相同,即使卫星材料对伽马光子的吸收和散射效果在各个入射方向有所不同,但慧眼卫星独自对GRB的定位能力仍然不强,因此我们发展了一套改善的交叉相关方法(MCCF),联合慧眼卫星数据和其他卫星的数据对GRB进行时延联合定位,能够获得比普通的交叉相关方法更好的定位结果,显著缩小误差范围^④(图7)。

截至2021年2月30日,慧眼卫星工作状态良好,观测到超过280个伽马暴(GRB),大部分的GRB都发布了GCN,对GRB的统计性质的工作也在进行当中。

2. 慧眼观测引力波电磁对应体

引力波是弯曲时空中的涟漪,是爱因斯坦广义相对论的预言。引力波是否真的存在,以及能否被直接探测到,是长久困扰科学界的难题。科学家们一直在努力直接探测引力波,从而以极高的精度来进一步检验广义相对论。直到2015年9月,激光干涉引力波天文台(LIGO)第一次探测到来自双黑洞并合的引力波事件(标记为GW 150914),它作为第

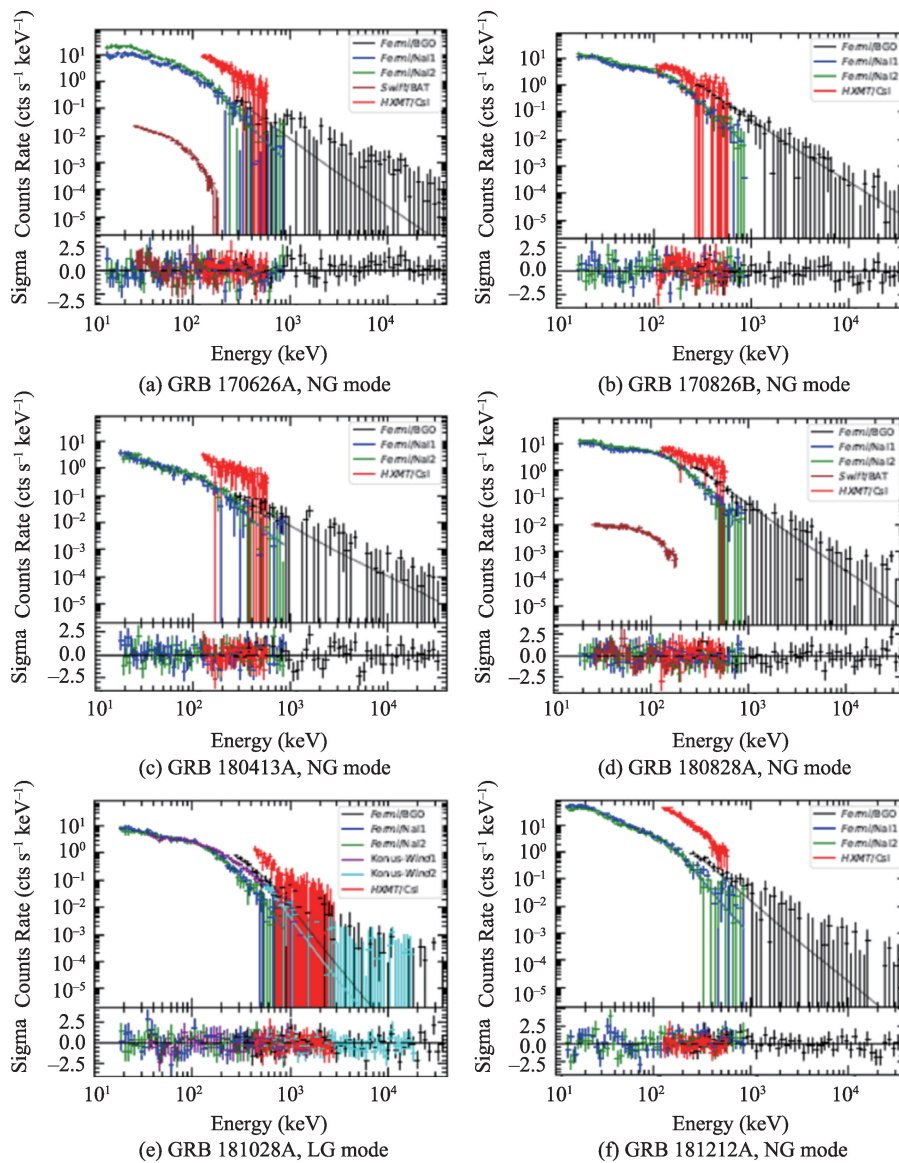


图5 慧眼HXMT/HE跟Fermi/GBM联合对多个GRB进行交叉标定²⁾

一个引力波的直接观测证据开启了引力波天文学时代。

而在这之后不久又有一个振奋人心的事件发生了,那就是双中子星并合引力波GW 170817和伽马暴GRB 170817A的联合观测,它是短暴由双中子星并合产生的直接观测证据。对于这个引力波电磁对应体,紫外、光学、软X射线以及射电探测器也探测到了相应波段的电磁信号。对于物理学来说,这为我们测定引力波的速度,理解高频引力波的辐射和传播,研究洛伦兹破缺等一系列重大的基础问题打开了众妙之门;而对于天文学来说,可以

帮助我们限制中子星状态方程,测定哈勃常数,使我们更加清晰地了解到爆周环境、重元素起源等,具有重大意义,揭开了多信使天文学时代的序幕。慧眼卫星也在这一事件中扮演了重要角色,其高能望远镜(HXMT/HE)在观测视场、能段以及时间分辨率等方面具有独特的优势。

HXMT/HE对GW 170817发生天区进行了完整的监测,限定了GRB 170817A在MeV能区辐射的上限。图8展示了HE所能观测到的天图区域,其视场完全覆盖了Fermi/GBM的定位区域以及LIGO和Virgo联合定位区域和最终确认的引力波源

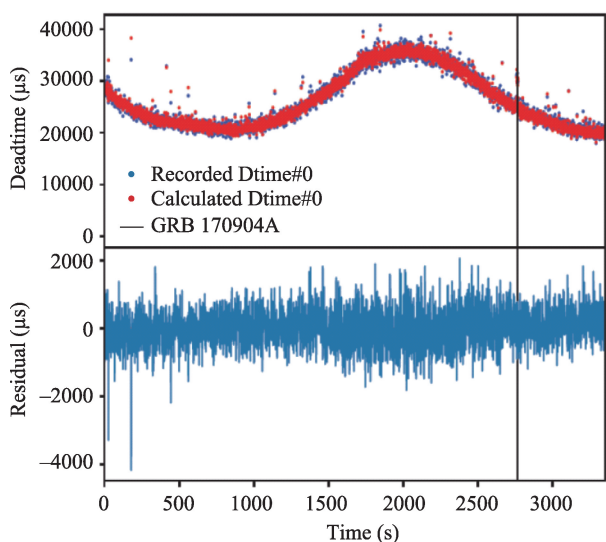


图6 估算死时间与实际的死时间的对比。红色点为计算的死时间,蓝色点为实际记录的死时间^②

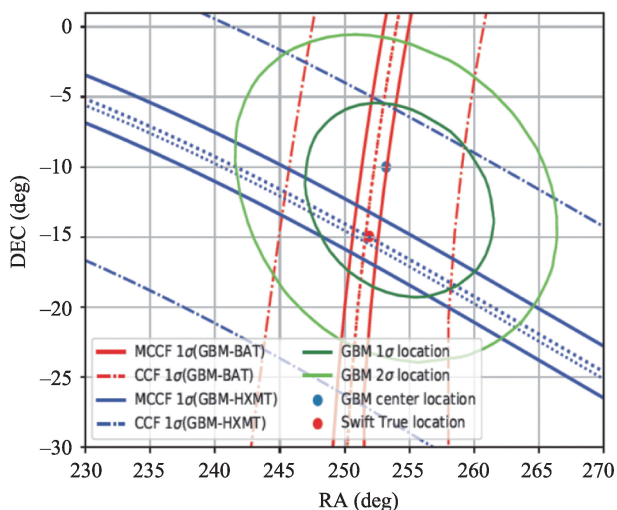


图7 利用MCCF对GRB180402A进行时延联合定位。红色实线为MCCF的误差,红色虚线为CCF的误差^③

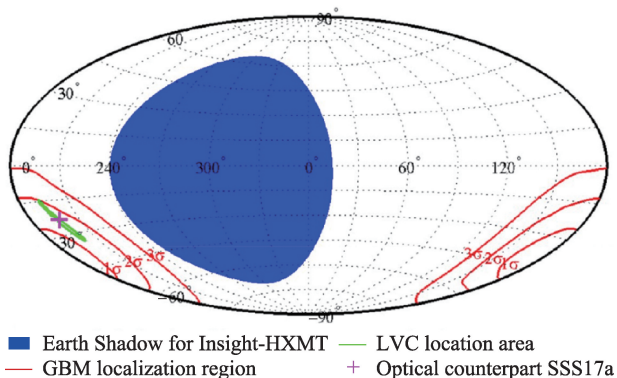


图8 HXMT/HE 探测器的视场图^⑤

位置,并且在触发时刻没有被地球遮挡。我们检查了HE的18个CsI探测器各种时标的光变曲线,如图9所示,没有发现任何显著的超出。

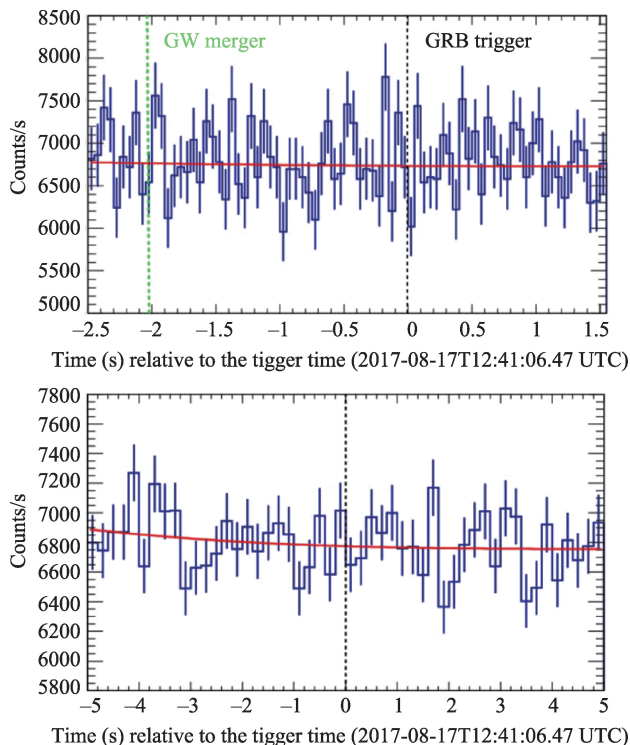


图9 HXMT/HE 18个CsI探测器不同并道宽度的光变曲线,横坐标轴的时间零点是GRB170817A的触发时间^⑥

此外,我们利用HE CsI探测器的响应矩阵,结合其他卫星测量的GRB 170817A的定位和能谱,计算该伽马暴在18个CsI探测器的预期计数,发现各个CsI探测器的预期计数有些差异,如图10所示。我们进而根据预期的计数在各个探头和能道的分布来画光变曲线,仍没有发现任何显著超出,所以得出结论HE没有探测到GRB 170817A,同时也表明该伽马暴在200 keV以上的流量非常低,这也跟GBM和INTEGRAL/SPI-ACS的观测相吻合。

根据几十年以来对短伽马暴的研究,双中子星并合引力波最有可能的电磁对应体是短暴和它的余辉,这一观点已被GW170817和GRB170817A所证实。另一方面,短伽马暴会携带有其他的辐射成分,比如主暴(main burst)之前的前兆辐射(precursor)或者之后的延展辐射(extended emission)。尽管HE没有直接探测到任何来自GW170817的显著的

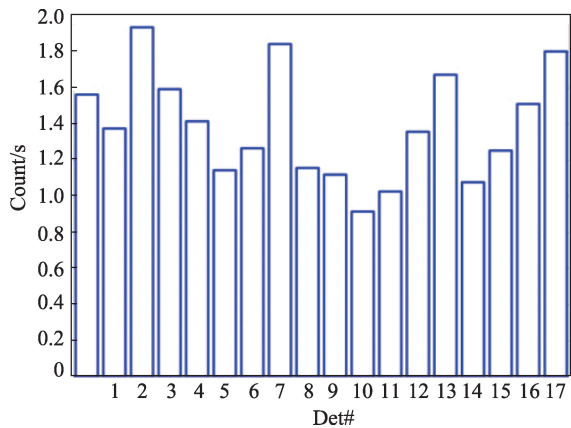


图10 GRB170817A在HXMT/HE 18个CsI探测器上的预期计数分布,总的预期计数~50个^⑤

高能辐射 (0.2~5 MeV),但HE数据给出了此伽马暴主暴及其前兆辐射和延展辐射在 MeV 能区的上限。这些上限结果是根据探测器的响应矩阵,针对不同的能谱模型(包括典型的 Band 谱,康普顿谱,幂律谱)和辐射持续时标来计算得到的,如图 11,该测量结果可以帮助我们更好地理解来自双中子星并合在 MeV 能区的电磁辐射的性质以及短暴相对论喷流的物理过程。

3. 慧眼观测快速射电暴的高能辐射和磁星爆发

快速射电暴 (Fast Radio Burst, FRB) 是一种极其剧烈的射电爆发现象,持续时间极短,通常只有几毫秒,而释放的能量却相当高,它的典型峰值流量在央斯基量级,毫秒间释放的能量甚至可以超过太阳一个月所释放的能量总和。尽管已经发现了

很多FRB,但它们物理起源和产生机制长期以来没有明确的定论。

目前已发表的FRB中,除了大部分是非重复的爆发(像伽马暴和超新星一样只爆发一次),还有一小部分FRB重复爆发,且有些FRB的重复爆发具有周期性。然而重复与非重复的现象到底是观测效应(受限于探测器的灵敏度和监测覆盖度等),还是真实的性质,这个问题也在不断地探索和研究中。

科学家们构建了很多的理论模型去尝试理解和解释所观测到的FRB爆发现象。而为了更进一步地研究和甄别这些模型,除了依赖于FRB的探测技术不断进步和数据分析不断完善,对FRB的多波段探测,特别搜寻跟FRB对应的伽马射线辐射变得尤为重要。

2020年4月28日,FRB的观测研究取得了重大进展。当时慧眼卫星正在对处于活跃期的磁星(编号为SGR J1935+2154)进行“机遇目标”(Target of Opportunity,简称ToO)定点观测,加拿大的CHIME[®]和美国的STARE2[®]探测到一个快速射电暴(编号为FRB 200428)来自这颗磁星方向,而且在这个FRB到达地球的8.6秒之前,慧眼卫星的三台望远镜都探测到来自这颗磁星的性质独特的X射线爆发。而8.6秒的时间延迟正好是射电穿行星际介质比X射线多花的时间。有趣的是,慧眼卫星首先发现磁星爆发的光变曲线存在双峰结构,前后两个峰的间隔约30 ms,与FRB的双峰间接几乎完全一致,极有可能是伴随FRB产生的,因此慧眼卫星首次发现了FRB的高能辐射。

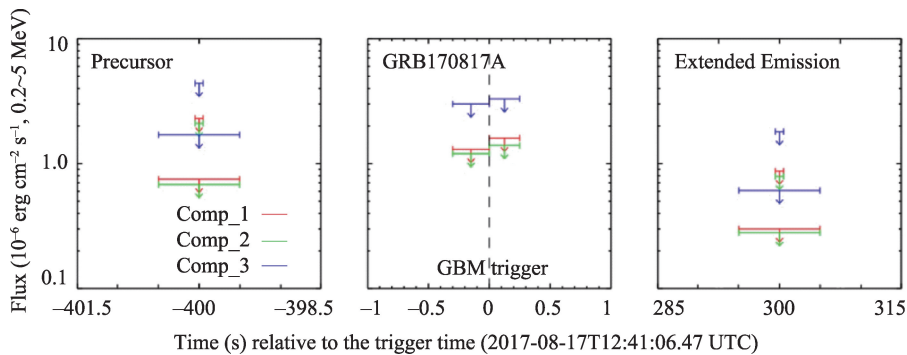


图11 GRB170817A在HXMT/HE上的3sigma 上限分析结果^⑤

实际上大视场的射电望远镜对FRB的定位误差较大,无法独立确证这个FRB来自这颗磁星。而慧眼卫星基于其独特的准直器设计和定位方法,对这个磁星爆发进行了精确定位,证认其来自于磁星SGR J1935+2154^⑦,这意味着首次发现了磁星可以产生快速射电暴,也是人类史上首次破解了FRB的起源之谜。同时,探测到跟FRB对应的高能辐射对于深入理解FRB和磁星爆发的物理机制至关重要。

如前所述,慧眼卫星除了进行定点观测,其CsI探测器有着很大的几何面积($\sim 5100 \text{ cm}^2$)和非常高的时间分辨率($2 \mu\text{s}$),用来搜索能量范围在几百keV至几个MeV、时标在毫秒甚至亚毫秒量级的快速射电暴的可能的伽马射线对应体,是非常理想的仪器。

慧眼卫星的中外科学家团队利用HE CsI的数

据来探索这种可能性。数据样本选用了从慧眼2017年6月发射以来至2019年8月份,共有46个快速射电暴,除去卫星处于南大西洋异常区的样本,最后剩下39个。在尽可能宽的时间范围内搜索暂现源信号,时标从亚毫秒量级到秒量级,由于没有快速射电暴的伽马射线对应体具有何种光变结构的先验信息,根据本底水平、不同的探测器以及时变结构,使用了不同的算法来进行搜索。图13分别显示了以两个FRB的爆发时间为参考零点的总探测器扣除本底的光变曲线。对减去本底的净计数,除以相应的计数误差,没有发现跟正态分布的显著偏离,因此说明这两个候选体是本底涨落的可能性更大。

尽管没有搜到比较显著的FRB伽马射线对应体,利用HE CsI数据计算了FRB伽马射线对应体

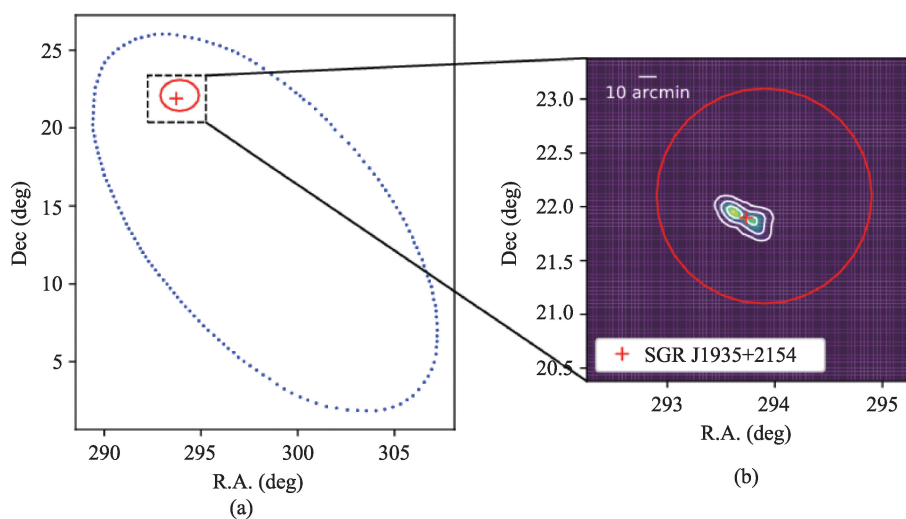


图12 慧眼证认FRB来自磁星,(a)中蓝色椭圆为STARE2定位范围;(b)红色区域为CHIME定位范围,轮廓图为慧眼定位,十字星位置为SGR J1935+2154^⑦

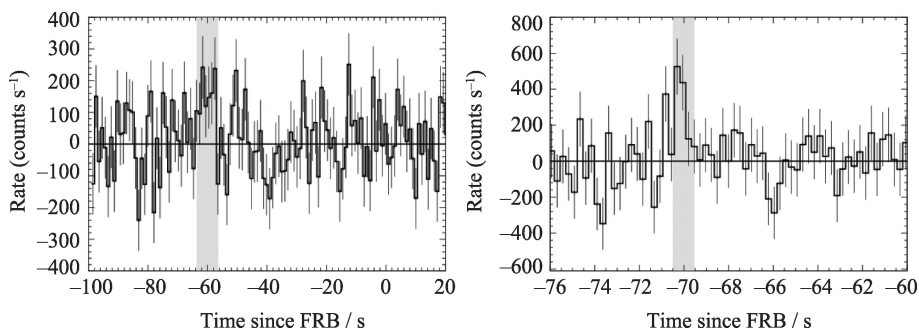


图13 扣除本底的两个疑似候选体的光变曲线^⑧

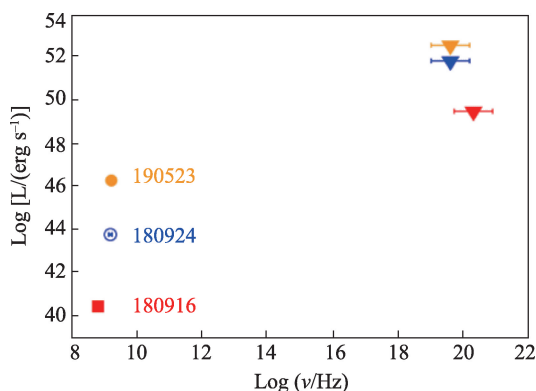


图14 FRB的射电光度和1 ms 伽马射线的上限^⑨

的各向同性光度和能量的上限。图14展示了三个有红移测量的快速射电暴的光度随光子频率(也即光子能量)的变化。假设光度函数只随频率变化,并且呈幂律分布,则我们可以限制射电和伽马射线之间的平均幂律分布指数。这个信息可以给出伽马射线和射电光度的比值上限^⑨。

4. 慧眼观测太阳耀发

太阳耀斑是一种剧烈的太阳活动,其发出强烈的电磁辐射及高能粒子对空间环境造成重要影响,严重时甚至会危及航天器和航天员的安全,并对地面的通讯造成干扰,因此研究太阳耀斑的产生机理及过程对预测耀斑的发生和影响有重要意义。耀斑对应太阳上储存磁能的突然释放,进而使得等离子体被加热,大量电子离子等被加速到非常高的能量,并与等离子体背景相互作用,从而产生辐射。硬X射线和伽马射线段的研究一直是研究耀斑的主要窗口。一般认为硬X射线来自电子在等离子体中的韧致辐射,它主要与非热电子有关,非热电子通过薄靶模型和厚靶模型辐射X射线(前者电子谱基本不变,而后者电子谱发生改变),X射线谱一般是幂律分布的,其谱指数可用于反推电子注入谱,这对理解电子的行为有帮助。

慧眼卫星的高能望远镜(HE)的CsI晶体可以对0.2~5 MeV的伽马射线进行监测,因此CsI也可测量太阳耀斑伽马射线辐射的时变和能谱性质。图15为慧眼卫星对2017年7月3号的太阳耀斑演变

的观测,该耀斑的峰值时间为16:13:28 UTC,CsI计数曲线上呈现三个峰,耀斑时段之外的计数率为线性变化,特别是NaI及反符合探测器(ACD)触发的NaI和CsI光变计数均为线性变化,因此耀斑期间的本底可以认为是线性变化的。HXMT/HE CsI对耀斑的观测处于硬X射线波段,结合GOES卫星(0.5~8埃)以及SDO(紫外)可以研究耀斑中高能电子的产生及运动学特征等。

5. 慧眼探测地球伽马闪

地球伽马闪即 Terrestrial Gamma-ray Flash,简称TGF。地球伽马闪是指起源于地球低层大气的短暂的(典型持续时间小于1ms)、高流强的伽马射线(最高能量可达几十MeV)爆发现象,是当前高能大气物理研究中的热点方向之一。

虽然原本用于探测宇宙伽马射线暴,康普顿伽马射线天文台(CGRO)卫星的BATSE探测器于20世纪90年代颇为意外地首先发现了TGF。此后多个空间探测器,如美国的RHESSI和FERMI/GBM、意大利的AGILE以及欧洲航天局(ESA)的ASIM等卫星或空间载荷,也陆续探测到了TGF。研究表明,至少相当一部分TGF事件与对流层中的闪电和雷暴活动有关。

然而,关于TGF产生的物理机制,目前尚没有统一观点。目前存在两种主要的理论模型,即闪电先导局部区域中的热逃逸击穿(Thermal Runaway Breakdown)和大尺度雷暴电场中的相对论性逃逸电子雪崩(Relativistic Runaway Electron Avalanche, RREA)。这两种机制都可以产生大量高能电子,其在空气中产生韧致辐射(Bremsstrahlung Radiation)^⑩。前者认为先导发展过程中尖端局部区域电场远大于传统的击穿阈值,高能电子雪崩的特征长度很小(厘米量级),该区域存在少量高能电子发生逃逸。而后者则认为宇宙射线中的高能电子在进入雷暴云内强电场区时发生相对论电子逃逸击穿,高能电子急剧增加,其中可能还存在次级产物对雪崩倍增的正反馈效应^⑩,从而在短时间内产生大量的高能电子。

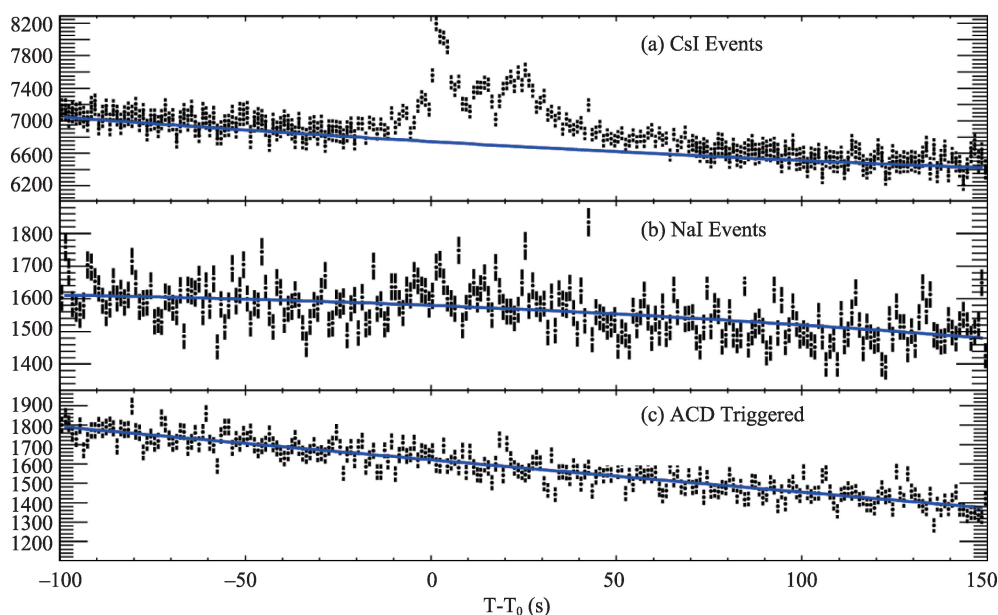


图15 HXMT对太阳2017年7月3号耀斑的观测

(a) CsI事例上可以看出清晰的耀斑信号,蓝色所示为估计的线性本底水平;(b) NaI事例上基本无耀斑信号,这是因为NaI晶体有效面积小,低能量的光子被卫星材料所屏蔽;(c) ACD(反符合探测器)触发的CsI和NaI事例,这些事例主要与空间环境的带电粒子有关。(b)和(c)均可以采用线性拟合,说明所观测的天体源和粒子本底均不会形成耀斑信号。

HXMT/HE CsI探测器在200 keV至几MeV能区可获得高质量的光变和能谱观测数据。数据分析表明,慧眼卫星具有较强的TGF探测能力,其覆盖范围可达到南北纬度 43° 区域,相比较Fermi/GBM, RHESSI, AGILE等卫星具有更宽的地理纬度范围。HXMT在轨运行期间,平均每年探测到约120个TGF候选体,其中约1/3的TGF能跟闪电关联对应起来(慧眼探测到TGF和闪电发生时刻的时间间隔小于5 ms,卫星星下点位置和闪电发生的地理位置差小于800 km)。

图16是慧眼在0.1 ms的搜索时标探测到一个TGF(编号为TGF180515),可以看到信号非常显著(显著性达到13.7倍标准偏差)。同时这个TGF180515持续时间(T90)约为0.25 ms,且有关联闪电,确认它是一个闪电产生的TGF。

根据慧眼对TGF候选体的统计分析,大部分的TGF持续时间在0.2 ms以内,地理位置上在赤道和沿海地区分布比较密集,这跟其他卫星的探测结果相吻合。图17中黑白和彩色分界是慧眼的卫星轨道界限,彩色区域的颜色代表粒子流强,粒子流强

越高,颜色越深(蓝到红)。白色空白区域是SAA区(南大西洋异常区,粒子流强很高,为了保护探测器,慧眼卫星在SAA区关机)。每一个圆点代表一个TGF探测到时慧眼卫星所处的星下点经纬度,红色代表这个TGF探测到时同时探测到了关联闪电,白色代表没有探测到关联闪电。可以看到大部分探测到的TGF处于赤道附近,这跟赤道附近闪电发生频繁高有显著的关联。此外,大部分的TGF集中

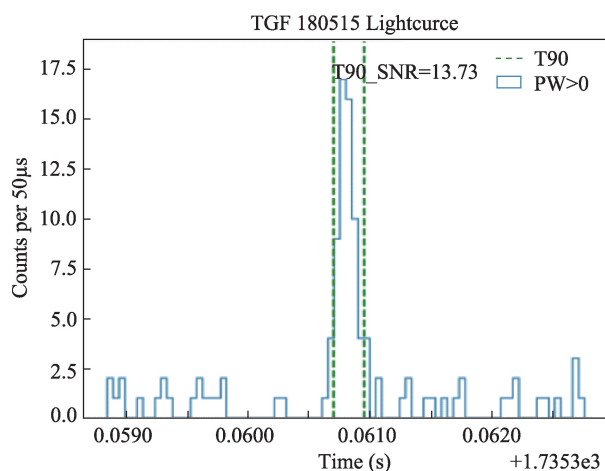


图16 慧眼探测到的TGF180515光变曲线

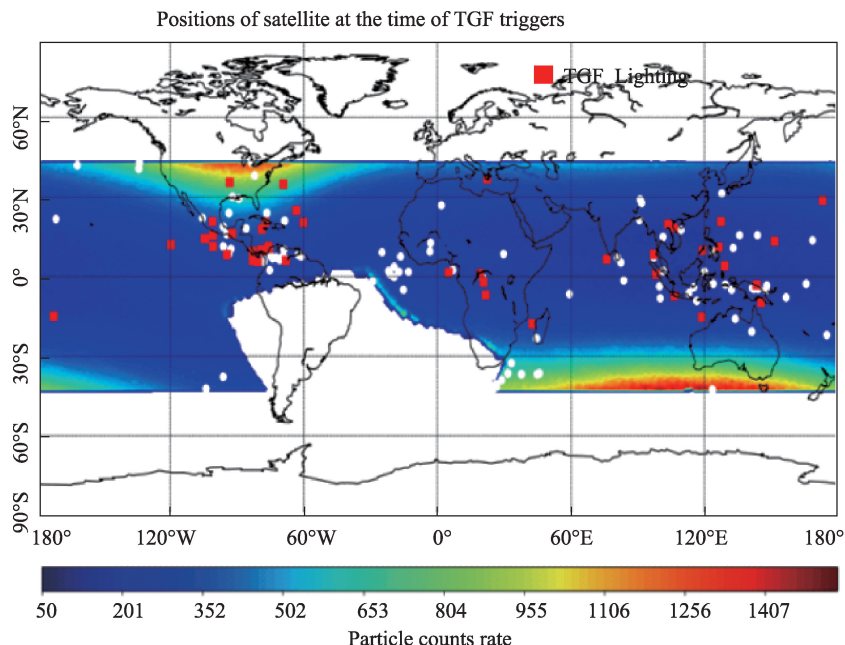


图 17 探测到 TGF 时慧眼卫星星下点的分布情况

在大陆的边缘区域,只有很少的 TGF 在大陆内部探测到(刚果盆地相对来说是容易产生 TGF 的区域),这跟大陆边界的雷电发生率比内陆更高有关。

6. 总结与展望

慧眼卫星高能望远镜(HXMT/HE)使用 NaI/CsI 的复合晶体探测器方案,其中 CsI 原本作为 NaI 探测器的符合和屏蔽使用。通过创新性使用 CsI 探测器,甚至专门为 CsI 设置新的低增益模式,使 CsI 可用于监测约 200 keV 至 5 MeV 的伽马射线,再加上慧眼卫星 CsI 探测器的面积大、时间分辨率高等优势,慧眼卫星高能望远镜(HXMT/HE)是伽马射线暂现源监测的利器,自 2017 年 6 月 15 日发射入轨以来,已对伽马暴、引力波电磁对应体、磁星爆发、太阳耀斑以及地球伽马闪等进行了大量监测研究,取得了一系列成果。慧眼卫星即将达到 4 年的考核寿命,预计将进入延寿运行阶段,有望在各类伽马射线天体的探测研究上取得一批新的重要成果。

参考文献

- ① Liu C.Z., et al, Sci. China Phys. Mech. Astron., 2020, 6349503L
- ② Luo Q., et al., JHEAp, 2020, 21, 1L
- ③ Xiao S., et al., JHEAp, 2020, 26, 58X
- ④ Xiao S. et al., 2021, In preparation
- ⑤ Li T., et al., Sci. China Phys. Mech. Astron., 2018, 61, 031011
- ⑥ The CHIME/FRB Collaboration, et al, Nature, 2020, 587, pages54C
- ⑦ Bochenek, C. D. et al., Nature, 2020, 587, pages59B
- ⑧ Li CK, et al., Nature Astronomy, 2021, tmp, 54L
- ⑨ Guidorzi C., et al., Astron. Astrophys., 2020a, 637, A69
- ⑩ Gurevich A. V., et al., Phys Lett A, 2003, 312: 228-237
- ⑪ Dwyer J. R., et al., J Geophys Res, 2008, 113: D10103

