

# 于高山之巅仰望星辰——小记“拉索”对史上最亮伽马射线暴的观测

查敏<sup>†</sup>

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2023-07-14收到

<sup>†</sup> email: zham@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20230806

## 1 “拉索”的实验观测

北京时间2022年10月9日晚,费米卫星记录到天空中的一个伽马射线暴(以下简称伽马暴),根据国际惯例命名为GRB221009A。其巨大的伽马射线流量引起了多个国际实验探测器发生了饱和效应。随后经过全球多个探测器的对比,大家一致认为,这是人类历史上已知的最亮的伽马暴<sup>[1-3]</sup>,它被称为史上最亮伽马暴,英文缩写为BOAT (the brightest of all time)。

在这次伽马暴爆发期间,我国的高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observa-

tory, LHAASO, 简称“拉索”)表现出色,不仅获取了高质量的万亿电子伏特观测数据,还首次测量到了伽马暴万亿电子伏特余晖的光度上升阶段,同时发现了极早期余晖的光变拐折现象(图1)。相关的研究成果于2023年6月9日在线发表于*Science*杂志<sup>[4]</sup>。

在本次观测中,“拉索”首次精确测量高能光子爆发的完整过程。“拉索”收集到的信号细节表明,探测到的光子来源于主爆之后的余晖。简单来说,伽马暴事件的“主爆”,也称为瞬时辐射,是初始阶段的巨大爆炸,表现为强烈的低能伽马射线辐射。而接近于光速的爆炸物与周围环境气体碰撞产生余晖<sup>[5]</sup>。最近几年以来,已经有多个大气切连科夫望远镜观测到了伽马暴万亿电子伏特能量的余晖<sup>[6-7]</sup>。但是由于切连科夫望远镜需要一定时间转到伽马暴的方向,目前的观测只看到了余晖的下降阶段,并没有描绘出甚高能余晖完整的时间演化过程。然而,这次史上最亮的伽马暴给人们带来了惊喜。相比于大气切连科夫望远镜,“拉索”凭借着大视场、全天候、高灵敏度的独特优势,恰逢史上最亮的伽马暴GRB221009A在爆发期间刚好处在“拉索”的观测视野范围内。人们终于第一次完整地看到了高能余晖从上升到下降的演化过程,在万亿电子伏特的能段,补足了余晖光变曲线上缺失的重要信息(图2)。

详细来说就是“拉索”首次精确地观测了伽马暴余晖的完整过程,记录了万亿电子伏特伽马射线流量增强和衰减的整个阶段,如图1所示。由图可明显发现在不到两秒的时间内流量增强了100多倍,之后的缓慢增长行为符合余晖的预期特征。早期如此快速的增强现象超出了以往理论模型的预期,究竟存在着什么样的机制?此次发

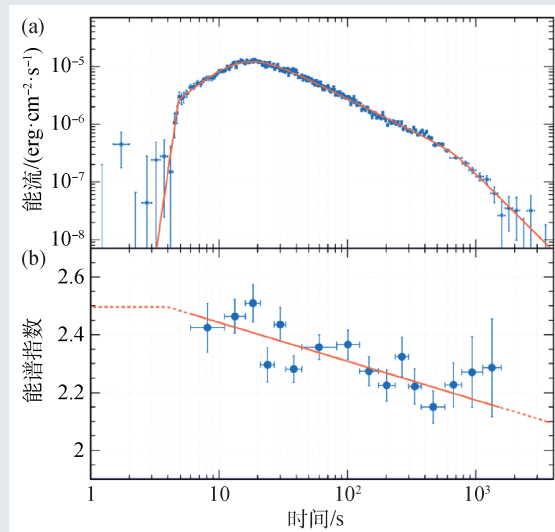


图1 “拉索”观测到的3千亿到5万亿电子伏特能量范围的GRB221009A余晖辐射的光变过程(a)以及能谱指数演化与函数拟合(b)。“拉索”首次实现了伽马射线暴千亿电子伏特以上余晖辐射过程的完整观测,不仅发现了余晖辐射过程的快速增长现象,同时也发现了伽马射线暴GRB221009A余晖辐射过程的快速衰减现象

表的观测结果将会引发科学界对伽马暴能量注入、光子吸收、粒子加速等机制的深入探讨。

除了余晖在极早期阶段的上升，“拉索”还看到了余晖在700 s后出现了快速下降，这一现象被认为是我们看到了喷流的边缘。以前天文学家也观测到了很多相关的实验证据，但是这些现象往往都出现在几个小时之后。“拉索”的这次观测，是人们第一次在数百秒时就看到了余晖的光变拐折，这对我们理解喷流及其产生机制有巨大的帮助。光变拐折曲线可以解释为爆炸后的喷射物是喷流状的结构，当辐射张角扩展到喷流的边缘时造成亮度快速下降。由于这个亮度转折发生时间极早，由此测出喷流的张角也极小，仅 $0.8^\circ$ 。这是迄今知道的最小张角的喷流，意味着观测到的实际上是一个典型内亮外暗喷流的最明亮的核心。正是由于观测者碰巧正对着喷流最明亮的核心，自然地解释了为什么这个伽马射线暴是历史上最亮的。在这个事件持续的十分钟内，“拉索”记录到的光子数超过了过去几年对“标准烛光”蟹状星云的观测积累。如果把选择条件降低，测量到的伽马光子数甚至可以达到10万。对比同能区其他实验装置，甚至是专门设计来追踪伽马暴的设备，它们测到的光子数目仅在千个以下的水平，且都只测到了爆炸过后60 s以后的余晖。

鉴于此次爆发千年不遇的稀缺性，这个观测结果预期将在今后几十甚至上百年内保持最佳。凭借对上万个伽马暴的观测，科学家们已经建立了似乎完美的理论模型，甚至于对它深信不疑了。“拉索”实现了其他实验未能达到的高能量波段光变过程的教科书式的完整观测，对理论模型的精确检验提供了实验基础。

截至目前，本次伽马暴爆炸事件还有其他的许多新发现，科学家们还在不懈地深耕“拉索”的数据，力图揭示更多的奥秘，敬请等待“拉索”的后续数据分析成果。

## 2 实验背景介绍

伽马暴是宇宙大爆炸之后最剧烈的天体爆炸现象，是指来自天空中某一方向的伽马射线突然

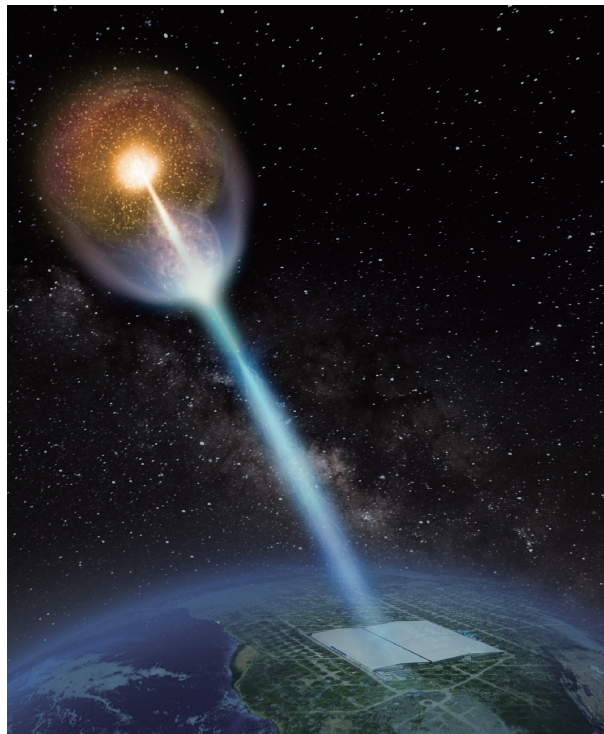


图2 “拉索”探测伽马射线暴(GRB221009A)艺术图(由中国科学院供图)

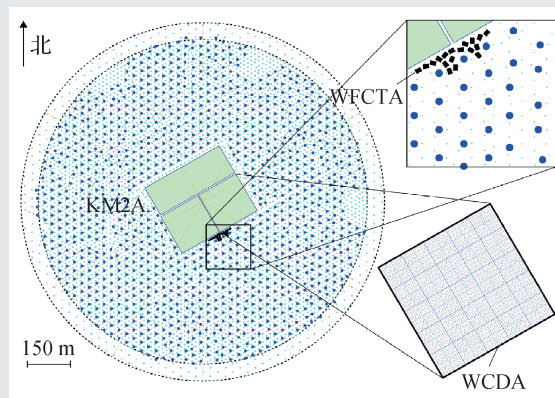


图3 高海拔宇宙线观测站的构成与布局

增强的闪烁现象。最初是1967年由用于监测核试验的Vela卫星发现的<sup>[8]</sup>。从发现以来，伽马暴一直是天体物理学家关注的热点。在观测时间上伽马暴短至千分之一秒，长则数小时。短时间的伽马暴是由两颗邻近的致密星体(黑洞或中子星)并合产生，而长时间的伽马暴是由巨大恒星(超级恒星)在燃料耗尽时塌缩爆炸产生。拥有非热形态的拐折幂律谱，光变曲线复杂且具备快速变化，有着不规则的多脉冲形态。一次伽马暴释放的各向同性辐射能可以达到约 $10^{53}$  erg的量级，甚至更高。

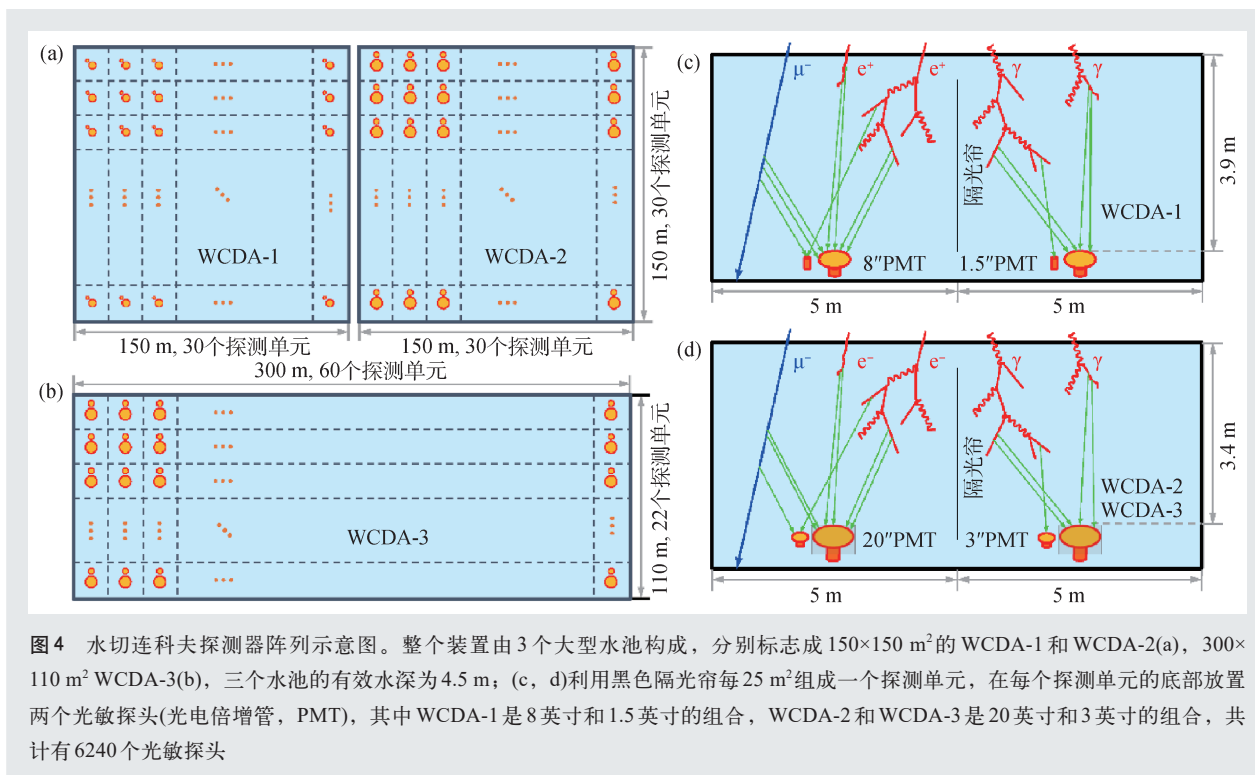


图4 水切连科夫探测器阵列示意图。整个装置由3个大型水池构成，分别标志成 $150 \times 150 \text{ m}^2$ 的WCDA-1和WCDA-2(a)， $300 \times 110 \text{ m}^2$  WCDA-3(b)，三个水池的有效水深为4.5 m；(c, d)利用黑色隔光帘每 $25 \text{ m}^2$ 组成一个探测单元，在每个探测单元的底部放置两个光敏探头(光电倍增管, PMT)，其中WCDA-1是8英寸和1.5英寸的组合，WCDA-2和WCDA-3是20英寸和3英寸的组合，共计有6240个光敏探头

“拉索”于2021年7月建成并全部投入运行，采用通用的国际合作模式，实现设施平台与观测数据的开放共享。目前，已有32个国内外天体物理研究机构成为“拉索”的国际合作成员单位，成员约280人。

“拉索”位于四川省稻城县海子山，平均海拔4410 m，占地面积约1.36平方公里。“拉索”由三个阵列组成：5216个电磁粒子探测器与1188个缪子探测器联合构成的1平方公里的地面簇射粒子探测器阵列(KM2A)、3120个探测单元构成的 $78000 \text{ m}^2$ 的水切连科夫探测器阵列(WCDA)、18台望远镜构成的广角切连科夫望远镜阵列(WFCTA)，可以宽波段、多手段地测量来自于高

能天体的伽马射线和宇宙线，开展天体物理等方面的研究，图3是“拉索”的构成与布局图。

本次观测成果主要由其中的水切连科夫探测器阵列提供，探测示意图如图4所示。该探测器利用36万吨纯净水作为介质，通过水底放置的6240支不同尺寸的光敏探头，测量伽马射线或宇宙线在大气层中运动与作用过程的次级产物如低能伽马光子、正负电子等，它们会在水中产生切连科夫光信号。该阵列对伽马射线的观测能量范围跨域两个量级，在千亿电子伏特到十万亿电子伏特之间，且具有宽视场、全天候的特点，对伽马暴这样的突发天体现象的捕捉式观测具有突出优势。

## 参考文献

- [1] Lesage S, Veres P, Briggs M S *et al.* 2023, arXiv:2303.14172
- [2] An Z H, Antier S, Bi X Z *et al.* 2023, arXiv:2303.01203
- [3] Burns E, Svinkin D, Fenimore E *et al.* APJL, 2023, 946(1): L31
- [4] LHAASO Collaboration. Science, 2023, DOI: 10.1126/science.adg9328
- [5] Zhang B. The Physics of Gamma-ray Bursts. Cambridge University Press, 2018
- [6] MAGIC Collaboration. Nature, 2019, 575(7783): 455
- [7] HESS Collaboration. Science, 2021, 372(6546): 1081
- [8] Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A. ApJ, 1973, 182: L85