

# 史无前例的发现：最亮伽马暴的太电子伏余辉

戴子高

(中国科学技术大学天文学系 230026)

2023年6月9日国际著名杂志 *Science* 在线发表我国高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, 简称 LHAASO 或“拉索”)的最新成果“极亮伽马射线暴 221009A 的窄喷流的太电子伏余辉(A tera-electron volt afterglow from a narrow jet in an extremely bright gamma-ray burst 221009A)”<sup>[1]</sup>。观测完整地显示伽马射线暴(简称伽马暴或 GRB)的极早期余辉的甚高能段光变曲线,揭示了极端相对论喷流核区的半张角、演化和辐射机制。本文分析该发现在伽马暴领域的重要性。为此,本文首先介绍伽马暴的研究进展,并指出 TeV 伽马射线观测是该领域的一个圣杯,然后给出“拉索”的观测成果和意义。

## 1. 发现伽马暴

伽马暴是在宇宙空间发生的短时标的伽马射线闪耀现象。首次发现这类现象纯属偶然。1963年,美国、英国和苏联签订了“部分禁止核试验条约”。该条约明确禁止在大气、水下和太空等地方进行核武器试验。因为核弹爆炸会释放大量的伽马射线,为了监测该条约的遵守情况,美国发射了一系列专门探测伽马射线的 Vela 卫星,其中 Vela 4A 和 4B 在 1967 年 7 月 2 日发现首例伽马暴 GRB 670702(见图 1),其持续时间约为 10 秒,峰值光子能量为兆电子伏( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ )。随后在 1969 年 7 月至 1972 年 7 月, Vela 5A、5B、6A 和 6B 又探测到 16 例伽马暴。这些暴的持续时间在不到 0.1 秒到 30 秒之间,光子能量约为 0.2 MeV 到 1.5 MeV,流量约

为  $10^{-5} \text{ erg/cm}^2$  到  $2 \times 10^{-4} \text{ erg/cm}^2$ 。经过细致分析,美国 Los Alamos 科学实验室的三位科学家 Ray Klebesadel、Ian Strong 和 Roy Olson 确认这些事件是宇宙起源的伽马射线爆发现象,于是 1973 年 7 月 1 日他们首次在美国《天体物理杂志》上以快报的形式发表文章,宣告发现伽马暴<sup>[2]</sup>,从而开创了伽马暴研究领域。由于该领域的研究进展特别巨大,其观测发现已经五次(1997、1999、2003、2005、2017年)被 *Science* 杂志评为年度世界十大科学突破,这在天文学史上非常罕见。

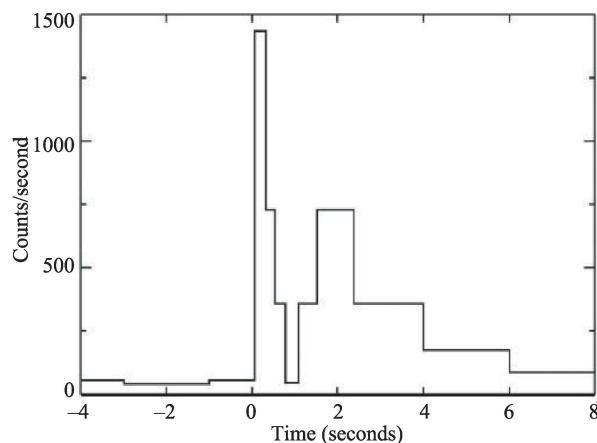


图1 GRB 670702的光变曲线

## 2. 建立标准模型

尽管从 1973 年至 1991 年伽马暴的样本数有所增加,但是由于卫星定位精度差,且缺少距离信息,关于伽马暴物理的研究进展不大,特别是其起源一直是未解之谜。1991 年至 1997 年,康普顿伽马射线天文台(简称 CGRO 卫星)上的 *BATSE* 探测器专门

观测伽马暴,其能段为 10 keV(千电子伏)至 100 MeV,灵敏度为  $3 \times 10^{-8}$  erg/cm<sup>2</sup>/s,远高于以前的卫星。在六年里,BATSE 探测到 2704 例伽马暴,它们的持续时间从几毫秒到数千秒不等,其光变曲线复杂多变,呈现单脉冲或者多脉冲形状,而伽马暴的能谱明显是非热谱。按照持续时间  $T_{90}$ (即辐射流量从 5% 累积至 95% 的时间间隔)的分布,伽马暴可以简单地分为  $T_{90}$  大于 2 秒的长伽马暴和  $T_{90}$  小于 2 秒的短伽马暴。尤其重要的是,这些伽马暴的空间分布是高度各向同性,意味着它们很可能起源于银河系晕或宇宙学距离,因为银河系晕或宇宙学距离上的天体分布都是各向同性的。当然,这两种不同的起源表明伽马暴到地球的距离可以有五个量级的差别(即~10 千秒差距或~1 千兆差距,1 秒差距 = 3.26 光年),进而要求爆发能量有十个量级的差别,即从至少~ $10^{41}$  erg 或~ $10^{51}$  erg。另一方面,由于伽马暴光变的上升时标短至 0.1 毫秒,光在这么长时间内传播 30 千米距离,表明伽马暴的中心引擎应该是致密天体(即恒星质量的黑洞或中子星)。在这么小

的区域内,释放如此大的能量,辐射区内的光子-电子散射光深一定远大于 1,其结果是辐射区只能产生黑体辐射,这与观测到的非热谱明显有矛盾。解决的办法是辐射区以相对论速度运动,即在相同的观测时间内辐射区膨胀到更远的距离,这样显著降低了辐射区的光深。例如,对于宇宙学起源,为了确保光子-电子散射光深不超过 1,伽马暴辐射区的洛伦兹因子必须大于 100,表明其运动速度至少是 0.9999 倍光速。这么高速度的抛射物如何产生?爆炸过程中会有怎样的引力波辐射和电磁对应体?物理上,在刚诞生的抛射物内,由于光子-光子湮灭光深和光子-电子散射光深都远超过 1,在巨大的辐射压作用下抛射物一定会向外被加速到极端相对论速度(见图 2)。随后,抛射物内部的不同速度物质之间的碰撞产生内激波,被激波加速的电子通过同步辐射可以产生伽马暴的瞬时 MeV 辐射,这些被加速的电子还可以通过同步自康普顿(Synchrotron-Self-Compton,简称 SSC)散射产生更高能量的伽马光子,同时被一起加速的质子也有可

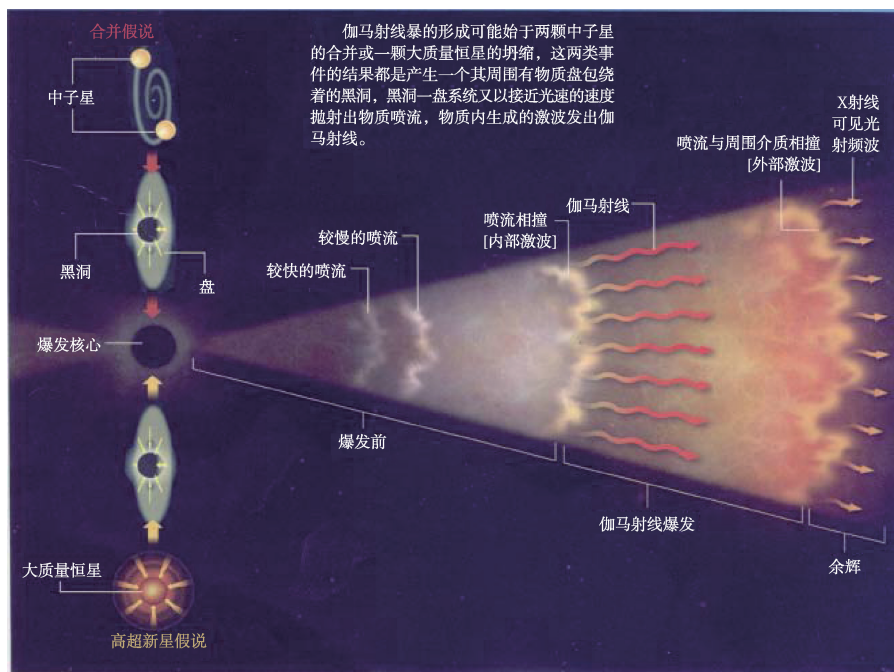


图2 伽马暴及其余辉的标准模型,即伽马暴起源于大质量恒星塌缩和双中子星并合(或者黑洞-中子星并合),这些过程产生中心引擎(即快速转动的黑洞或中子星)和极端相对论喷流,随后喷流内部不同速度的抛射物之间的碰撞引起伽马暴的瞬时辐射,喷流与介质之间的碰撞导致多波段余辉辐射

能借助于强子-光子( $p-\gamma$ )过程产生高能伽马光子和高能中微子。

在 *BATSE* 时代,人们已经意识到,在伽马暴的瞬时辐射期间和之后,相对论抛射物将不可避免与周围介质碰撞,产生正向激波和反向激波,其中相对论正向激波向外扫过介质,而反向激波向内扫过抛射物。在反向激波穿越抛射物后,正向激波仍将继续扫过介质。在此过程中,当扫过的介质质量越来越大,正向激波将减速,其洛伦兹因子将越来越小,直至进入非相对论阶段。被正向激波加速的电子通过同步辐射和 SSC 将可能产生多波段的余辉辐射。随着正向激波的洛伦兹因子减小,余辉辐射将会衰减。至此,建立了伽马暴和余辉的标准模型<sup>[3,4]</sup>。

### 3. 发现多波段余辉

1996年 *BeppoSAX* 卫星发射之后不久,X射线、光学和射电波段的余辉被发现,同时宿主星系及其红移被测量。这些观测开创了余辉新时代,极大地促进了伽马暴研究的蓬勃发展,支持了伽马暴和余辉的标准模型,即从中心引擎抛射出极端相对论喷流,其内部不同速度物质之间的碰撞引起内激波或其他能量耗散过程,产生主暴阶段的瞬时 MeV 伽马辐射;而此后,相对论喷流与周围介质之间的碰撞引起外激波,包括扫向介质的正向激波和扫向喷流的反向激波,这些激波产生多波段余辉辐射。然而,因为 *BeppoSAX* 卫星的定位精度仅为3角分,这个精度不高,所以为了在一个比较大的天区识别出伽马暴的余辉辐射,卫星需要对X射线辐射进行成像,并花比较长的时间才能获得衰减的辐射亮度,因而随后X射线观测必须在数小时后才能进行,这样早期余辉信息就无法获得。

与 *BeppoSAX* 卫星相比,2004年11月20日发射的 *Swift* 卫星具有高灵敏度和快速定位的特点(其中X射线望远镜在20秒到70秒之内指向暴源并将定位精度提高到不到4角秒)。正因如此,*Swift* 卫星探测到的从早期到晚期的完整X射线余辉光变曲线包含如下成分(见图3):(1)在伽马暴瞬时辐射结束

后,X射线辐射流量将首先以幂律形式急剧下降,下降指数约为3甚至更大;(2)在暴后几百秒左右的时候,光变曲线开始变平,流量下降变缓,下降指数一般介于0到1之间,明显小于余辉标准模型所预言的光变指数,这一缓降相(即“平台”)可以持续几千秒或者更长的时间;(3)随后可以看到标准模型所预言的“正常相”光变曲线,下降指数约为1到1.2;(4)大概几万秒之后,光变曲线可能再次变陡,下降指数增大到2左右;(5)X射线耀发现象对所有类型的伽马暴被发现,这种现象出现的时间并不确定,在早期陡降相、缓降相以及正常相等各个阶段都有可能出现,并且在同一个暴的余辉中可以多次出现。关于余辉平台,在 *Swift* 卫星观测之前,超强磁化毫秒脉冲星能量注入效应已预言了这一现象<sup>[5]</sup>。该效应已经成为余辉平台的标准解释和磁星作为中心引擎的判据。

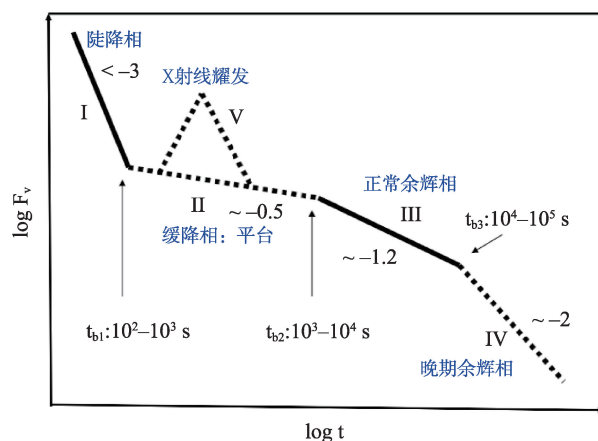


图3 *Swift* 卫星观测到的完整X射线余辉光变曲线,即出现五个演化阶段:陡降相、缓慢衰减相(平台)、正常余辉相、晚期余辉相和X射线耀发<sup>[4]</sup>

在余辉时代,伽马暴的起源已经被确定(见图2)。观测发现长伽马暴 GRB 030329 与超新星 SN 2003dh 成协<sup>[6]</sup>,这提供了长伽马暴起源于大质量恒星塌缩的直接证据。另外,许多伽马暴的介质是星风环境或者晚期余辉出现超新星成分,也揭示了这个起源机制。短伽马暴的发生位置通常在宿主星系的外围区域,远离星系中心,而宿主星系的年龄偏老,质量较大,短伽马暴的介质密度也很低,这些性质均间接地表明短伽马暴起源于双中子星的

合并。该起源的直接证据是GW170817及其电磁对应体的发现,将在第5小节叙述。

#### 4. 观测到高能光子

2008年6月11日发射的*Fermi*卫星主要观测高能伽马射线持续源和暂现源,它包括伽马暴监视器(GBM)和大面积望远镜(LAT),其中GBM可被伽马暴独立触发,再由LAT对该事件进行后随观测。迄今探测到的最高能量超过100 GeV(其中1 GeV =  $10^9$  eV)的光子产生于GRB 080916C、GRB 090510、GRB 130427A、GRB 180720B和GRB 190114C等。由于*Fermi*/LAT探测到相对较多数目的高能光子,因而可以分析光谱和光变。*Fermi*/LAT发现伽马暴高能辐射有以下几个新特点<sup>[1]</sup>:(1)伽马暴的高能光子相对于keV/MeV光子普遍出现得要晚一些,很多暴的第一个脉冲只看到keV/MeV辐射,而看不到100 MeV以上的高能辐射。(2)在瞬时辐射阶段,有些伽马暴(如GRB 080916C、GRB 090926)从keV/MeV到GeV的能谱可以用一个“Band”函数拟合得很好,即光子数谱:当 $E < (\alpha - \beta)E_0$ ,  $N(E) = A(E/100 \text{ keV})^\alpha \exp(-E/E_0)$ ,而当 $E \geq (\alpha - \beta)E_0$ ,  $N(E) = A[(\alpha - \beta)E_0/100 \text{ keV}]^{\alpha - \beta} (E/100 \text{ keV})^\beta \exp(\beta - \alpha)$ ,其中A是谱的归一化系数, $E_0$ 是谱的转折能量, $\alpha$ 和 $\beta$ 分别是低能段和高能段的光子谱指数;有些伽马暴(如GRB 090510、GRB 090902B)从keV/MeV到GeV的能谱需要用两个成分模型才能拟合,即除了通常的“Band”谱成分外,还存在一个额外的幂律成分。(3)在keV/MeV辐射结束后,100 MeV以上的光子辐射还在继续,有些暴的高能辐射持续到暴后几千秒,这些伽马射线余辉有一定的规律性,即流量几乎呈现幂律衰减,但衰减指数陡于标准余辉模型的预言。(4)GRB 190114C同时触发*Swift*卫星和*Fermi*卫星,随后MAGIC(大气伽马射线成像切伦科夫望远镜)探测到该暴的持续一千多秒的高能辐射(0.2~1 TeV)<sup>[7]</sup>。观测数据表明这些辐射可能产生于被外激波加速的高能电子的SSC散射机制。

#### 5. 发现引力波电磁对应体

激光干涉引力波天文台LIGO/Virgo开启了多信使时代。在2017年8月17日,LIGO和Virgo同时探测到首例由双中子星合并产生的引力波事件<sup>[8]</sup>,即GW170817。双中子星并合事件可分为三个阶段:旋进、并合和铃宕。而旋进阶段也可分为三个时间段:当双颗中子星彼此离得很远时,从它们的旋进产生的引力波波形可以给出啁啾质量,进而得到两颗中子星质量的一个组合表达式;当两颗中子星越来越近时,广义相对论效应变得越来越显著,从此时的引力波波形可以得到两颗中子星的质量比;当两颗中子星靠得更近时,彼此的潮汐作用引起中子星形变,增加了系统质量四极矩的变化率,增大了引力波光度,加快了并合进程,从此时的引力波波形可以得到中子星的潮汐形变度,进而限制中子星的物态,因为中子星的潮汐形变强烈依赖于内部状态方程。根据GW170817获得的啁啾质量和质量比,人们获得了两颗中子星的质量,分别为1.36~1.60 $M_\odot$ 和1.17~1.36 $M_\odot$ ,这些值正好与银河系内观测到的中子星质量分布一致,而且远小于探测到的恒星级黑洞质量。因此,GW170817起源于双中子星并合事件。GW170817有三类不同的电磁对应体被发现<sup>[9]</sup>:(1)在GW170817之后1.74秒,*Fermi*/GBM观测到持续时间约为2秒的短暴GRB 170817A,但是该暴很弱,其瞬时辐射光度却比通常短暴的低三到四个多量级,而伽马射线的特征能量只比通常短暴的小几倍,这个结果被认为是由于相对论喷流偏离观测者的视线方向。(2)在暴后仅11小时,一个光学暂现源(即千新星AT2017gfo)在GW170817的宿主星系NGC4993中被探测到。在标准模型中,千新星被认为起源于并合过程产生的超重元素衰变。(3)X射线余辉在并合后9天首次被Chandra卫星探测到,射电余辉辐射则在并合后16天被VLA观测到,另外光学余辉也被发现。观测表明在暴后155天内多波段余辉一直在增亮,而之后以指数约为2的幂律函数衰减。令人惊讶的

是, X射线余辉在3年后偏离了这个衰减函数, 呈现出衰减变缓趋势。该趋势揭示中心引擎可能是大质量的强磁化的毫秒脉冲星<sup>[10]</sup>。GW170817及其电磁对应体的发现被 *Science* 评为2017年度世界十大科学突破之首。

## 6. 探测到 TeV 余辉

虽然伽马暴领域取得了以上进展, 但仍有几个关键问题没有解决: 伽马暴的喷流有结构吗? 如果有的话, 是什么样的结构? 其结构对于揭示爆发过程有什么影响? TeV 辐射机制是什么? 等等。对这些问题的研究需要极早期 TeV 余辉的观测发现, 因为较低波段的余辉辐射在极早期阶段将不可避免受到瞬时辐射的污染。“拉索”幸运地探测到最亮伽马暴 GRB 221009A 的极早期 TeV 余辉<sup>[1]</sup>。

2022年10月9日13:16:59.99UT, GRB 221009A 被许多高能卫星(如 Fermi/GBM, Swift/BAT, insight-HXMT, GECAM-C, Konus-Wind 和 INTEGRAL 等)探测到。这些卫星发现该暴瞬时辐射的流量约为  $0.031 \text{ erg/s/cm}^2$ , 因此这是史上探测到的最亮伽马暴<sup>[11,12]</sup>。该暴的持续时标约为600秒, 宿主星系的红移为0.151, 瞬时辐射的各向同性能量被估算为  $\sim 1.5 \times 10^{55} \text{ erg}$ 。然而, 由于该暴满足通常长暴的相关关系(比如能谱峰值光子能量与各向同性能量之间的 Amati 关系), 因此这是一例正常的伽马暴<sup>[13]</sup>。因为流量反比于距离的平方, 而爆发率正比于距离的三次方(假定近邻宇宙是欧几里得空间), 那么爆发率反比于流量的  $3/2$  次方, 根据此关系可以简单地估计, 最亮暴的最佳发生率为每7400年爆发一次<sup>[9]</sup>, 而16置信度的范围为每3300年至16500年爆发一次, 所以我们可以得出结论: GRB 221009A 是万年一遇的爆发事件, 是一例特别难得的伽马暴!

与通常余辉一样, GRB 221009A 从射电至 GeV 能段的余辉都是在瞬时 MeV 辐射结束后被探测到<sup>[14]</sup>。在标准外激波模型框架下, 这样的余辉起源于相对论喷流与介质之间相互作用产生的外激波, 因而应该在(更早的)瞬时辐射阶段也会出现, 但是

与瞬时 MeV 辐射对应的多波段辐射会污染极早期余辉, 所以在瞬时阶段的多波段辐射不能作为相对论喷流与介质相互作用的探针。而极早期 TeV 余辉可以被认为是一个相当干净的理想探针, 这是因为与瞬时 MeV 辐射对应的瞬时 TeV 辐射会在  $\sim 10^{15}$  厘米半径之内发生双光子湮灭而被严重抑制, 而极早期 TeV 余辉在  $\sim 10^{17}$  厘米半径之外产生, 不受双光子湮灭反应的影响。TeV 余辉很像 B 超——B 超能监测胎儿在母亲的子宫里从胚胎开始成长的整个过程, 而 TeV 余辉可以很好地研究相对论喷流与介质之间的早期相互作用。

“拉索”的水切伦科夫探测器阵列(Water Cherenkov Detector Array, 简称 WCDA)在大约3000秒内探测到来自 GRB 221009A 的能量在0.2 TeV 至7 TeV 的64000多个光子(见图4)。对这些光子的数据分析显示, 在伽马暴触发后  $T^* \sim 230$  秒, WCDA 开始探测到 TeV 光子, 其流量先快速增加, 接着以  $\sim 1.8$  指数上升, 在随后  $t_{\text{peak}} \sim 18$  秒时达到峰值, 然后以  $\sim 1.1$  指数下降, 到  $t_{\text{jet}} \sim 670$  秒时再以  $\sim 2.2$  指数快速衰减。这个完整的光变曲线揭示了相对论喷流与介质之间的相互作用过程, 其中从  $t_{\text{peak}}$  可以估算相对论喷流的初始洛伦兹因子约为440。随着喷流的洛伦兹因子衰减, 从  $t_{\text{jet}}$  开始喷流的洛伦兹因子小于其半张

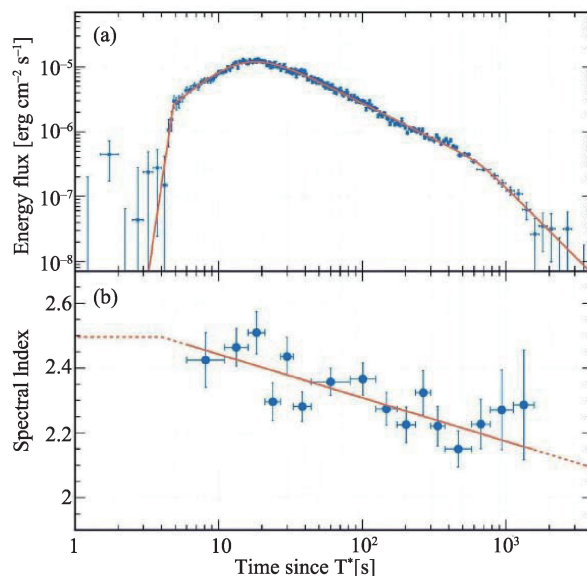


图4 LHAASO探测到的TeV余辉光变曲线和谱指数演化<sup>[1]</sup>

角的倒数,此时可视的辐射区超过了喷流的边界,导致喷流的边缘效应在光变曲线上显现出来,即 TeV 余辉的流量快速衰减,因此从  $t_{\text{jet}}$  可以估算喷流的半张角约为  $0.8^\circ$ ,这是至今发现的最小喷流半张角,意味着 LHAASO/WCDA 正好看到喷流的核区部分。根据该半张角,喷流内的瞬时 MeV 辐射能量可以被估算,仅为  $\sim 10^{51}$  erg,与从其他伽马暴估算的喷流内瞬时 MeV 辐射能量完全一致,这再一次说明 GRB 221009A 是一例正常的伽马暴。另一方面,晚期多波段余辉的拟合要求喷流的半张角比  $0.8^\circ$  大得多<sup>[14,15]</sup>。因此,我们得出结论:喷流是有结构的,至少包含两个成分。

从光变曲线和能谱(见图 5)分析,TeV 辐射产生于喷流正向激波的 SSC 散射。另外,多波段余辉和 TeV 余辉的光变曲线都没有平台,说明 GRB 221009A 的中心引擎不是磁星,而是黑洞。这是一例相当长时标的伽马暴,因此它起源于大质量恒星的塌缩。在塌缩过程中应该伴随超新星爆发,然而由于余辉特别亮,相对而言超新星成分应该比较暗。观测确实显示了这个结果<sup>[16,17]</sup>。最后,GRB 221009A 的 TeV 余辉光子可能与红外背景光子湮灭,产生正负电子对。然后这些电子对在星系际磁场的洛伦兹力作用下发生偏转,并可能与微波背景光子发生逆康普顿散射,产生次级高能光子。相对

于初始 TeV 光子,次级高能光子会延迟到达观测者。这个延迟时标依赖于星系际磁场,所以原理上可以通过测量次级高能光子对初始 TeV 光子的时间延迟来限制星系际磁场。然而,由于 GRB 221009A 会在一个时间段内辐射高能光子,人们很难分清初始光子和次级光子,所以实际上可以通过考虑次级高能光子的能谱来限制星系际磁场<sup>[18,19]</sup>。对于 GRB 221009A,观测数据分析给出了暴后 3000 秒到 3 天的 LHAASO/WCDA 高能辐射谱,要求星系际磁场强度大于  $3 \times 10^{-19}$  高斯<sup>[20]</sup>。这是一个相当强的限制。

“拉索”的发现引起了两个重要问题:(1) 极窄(半张角  $\sim 0.8^\circ$ )的喷流如何形成? 未来对大质量恒星塌缩和相对论喷流穿越包层的数值模拟也许会给出这个问题的答案;(2) 对  $t_{\text{peak}}$  之前 TeV 余辉流量上升的最佳拟合要求该暴的周围气体是星际介质 (ISM),然而由于长暴起源于大质量恒星塌缩,其介质可能是星风环境,该环境很难解释 TeV 余辉的早期增亮,如何解决这个问题? 答案是基于瞬时辐射阶段的能量注入效应还是星风参数的演化或者是星风与 ISM 的作用?

### 参考文献

- [1] LHAASO Collaboration Cao, Z. et al. 2023, A tera-electron volt afterglow from a narrow jet in an extremely bright gamma-ray burst 221009A, *Science*, doi:10.1126/science.adg9328.
- [2] Klebesadel, R. W., Strong, I. B., and Olson, R. A. 1973, Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin, *Astrophysical Journal*, 182, L85.
- [3] Kumar, P. and Zhang, B. 2015, The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets, *Physics Reports*, 561, 1.
- [4] Zhang, B. 2019, *The Physics of Gamma-Ray Bursts*, Cambridge University Press.
- [5] Dai, Z. G. and Lu, T. 1998, Gamma-ray burst afterglows and evolution of postburst fireballs with energy injection from strongly magnetic millisecond pulsars, *Astronomy and Astrophysics*, 333, L87.
- [6] Hjorth, J. et al. 2003, A very energetic supernova associated with the  $\gamma$ -ray burst of 29 March 2003, *Nature*, 423, 847.
- [7] MAGIC Collaboration, Acciari, V. A. et al. 2019, Teraelectronvolt emission from the  $\gamma$ -ray burst GRB 190114C, *Nature*, 575, 455.
- [8] Abbott, B. P. et al. 2017, GW170817: Observation of Gravitational

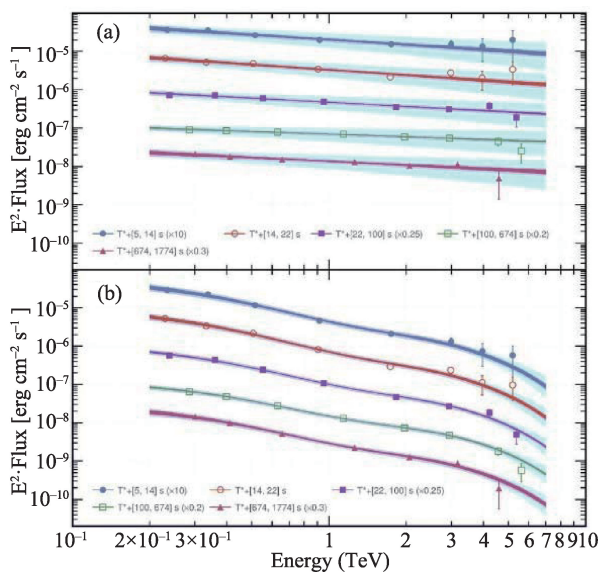


图5 LHAASO探测到的TeV余辉能谱((a)内禀谱,(b)观测谱)<sup>[1]</sup>

- Waves from a Binary Neutron Star Inspiral, *Physical Review Letters*, 119, 161101.
- [9] Abbott, B. P. et al. 2017, Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, *Astrophysical Journal Letters*, 848, L12.
- [10] Dai, Z. G., Wang, X. Y., Wu, X. F., & Zhang, B. 2006, X-ray flares from postmerger millisecond pulsars, *Science*, 311, 1127.
- [11] Burns, E. et al. 2023, GRB 221009A: The BOAT, *Astrophysical Journal Letters*, 946, L31.
- [12] An, Z. H. et al. 2023, Insight-HXMT and GECAM-C observations of the brightest-of-all-time GRB 221009A, arXiv:2303.01203.
- [13] Lan, L. et al. 2023, GRB 221009A: An Ordinary Nearby GRB with Extraordinary Observational Properties, *Astrophysical Journal Letters*, 949, L4.
- [14] Laskar, T. et al. 2023, The Radio to GeV Afterglow of GRB 221009A, *Astrophysical Journal Letters*, 946, L23.
- [15] Ren, J., Wang, Y., Zhang, L. L., and Dai, Z. G. 2023, The Possibility of Modeling the Very High Energy Afterglow of GRB 221009A in a Wind Environment, *Astrophysical Journal*, 947, 53.
- [16] Shrestha, M. et al. 2023, Limit on Supernova Emission in the Brightest Gamma-Ray Burst, GRB 221009A, *Astrophysical Journal Letters*, 946, L25.
- [17] Levan, A. J. et al. 2023, The First JWST Spectrum of a GRB Afterglow: No Bright Supernova in Observations of the Brightest GRB of all Time, GRB 221009A, *Astrophysical Journal Letters*, 946, L28.
- [18] Dai, Z. G. and Lu, T. 2002, Spectrum and Duration of Delayed MeV-GeV Emission of Gamma-Ray Bursts in Cosmic Background Radiation Fields, *Astrophysical Journal*, 580, 1013.
- [19] Dai, Z. G., Zhang, B., Gou, L. J., Meszaros, P., and Waxman, E. 2002, GeV Emission from TeV Blazars and Intergalactic Magnetic Fields, *Astrophysical Journal Letters*, 580, L7.
- [20] Huang, Y. Y., Dai, C. Y., Zhang, H. M., Liu, R. Y., and Wang, X. Y. 2023, Constraints on the intergalactic magnetic field strength from  $\gamma$ -ray observations of GRB 221009A, arXiv:2306.05970.

她用物理的情趣,引我们科苑揽胜;  
她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

科技创新、科学普及是实现创新发展的两翼。《现代物理知识》旨在普及科学知识、弘扬科学精神,设有物理知识、物理前沿、科技经纬、科学源流、教学参考、中学园地、科学书屋、科学正听和科苑快讯等栏目。诚邀在物理学及相关领域工作的科技、教育和科普等方面的专家学者,以公众喜闻乐见的文字,深入浅出、图文并茂地与读者分享现代物理知识、科学前沿成果和大科学装置进展等精彩故事,共襄“两翼齐飞”之盛举。投稿时请将稿件的Word文档发送至本刊电子邮箱 mp@mail.ihep.ac.cn, 并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

2023年《现代物理知识》每期定价15元,全年6期90元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款:  
2010~2021年单行本每期10元;2022年单行本每期15元;2010~2019年合订本每本60元。

订阅方式

- (1) 邮局订阅 邮发代号:2-824。
- (2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识\*\*年\*\*期”) 名称:中国科学院高能物理研究所 开户行:工商银行北京永定路支行 账号:0200004909014451557
- (3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;
- (4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊; 淘宝购买链接:



淘宝网购刊



微信购刊