



如何理解高能伽玛射线暴?

戴子高^{1*}, 吴雪峰², 梁思维³

1. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210046;

2. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034;

3. 广西相对论天体物理重点实验室, 广西大学物理科学与工程技术学院, 南宁 530004

* 联系人, E-mail: dzg@nju.edu.cn

2018-01-08收稿, 2018-04-23修回, 2018-04-24接受, 2018-08-06网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2014CB845800)、国家自然科学基金(11573014, 11725314, 11533003)和中国科学院战略性先导科技专项(XDB23040000)资助

摘要 伽玛射线暴(简称伽玛暴或gamma ray burst, GRB)是来自宇宙深处的、短时标的伽玛射线突然增强的现象, 是宇宙大爆炸之后最猛烈的爆发现象. 伽玛暴可分为长暴(持续时间 $T_{90} > 2\text{ s}$)和短暴($T_{90} < 2\text{ s}$). 观测发现, 长暴起源于大质量恒星的塌缩, 而短暴起源于双致密星的并合. 除了瞬时伽玛辐射, 伽玛暴分别在暴后周、月和年时间量级上还会产生X射线、光学和射电余辉. 理论上, 伽玛暴的瞬时辐射被认为产生于相对论喷流内部的能量耗散过程, 而多波段的余辉则产生于相对论喷流与外部介质之间的相互碰撞引起的外激波. 因此, 伽玛暴是研究致密天体(恒星级质量黑洞和中子星)诞生、引力波辐射、相对论激波、极高能宇宙线、高能中微子等极端物理现象以及高精度检验基本物理原理的天文实验室, 也是早期宇宙恒星形成和演化、高红移星系、高红移宇宙学的重要探针. 伽玛暴的研究横跨今天文学、宇宙学、物理学等学科, 是当前国际竞争最激烈的自然科学基础研究领域之一. 2017年8月17日, LIGO(laser interferometer gravitational wave observatory)/Virgo引力波天文台和Fermi卫星同时分别探测到引力波事件GW170817和短时标伽玛暴GRB170817A, 开辟了多信使天文学的新时代. 本文结合相关的关键科学问题评述了伽玛暴和引力波电磁对应体研究领域的最新研究进展, 并基于伽玛暴学科领域的发展态势和我国现有的研究基础, 讨论如何抓住机遇、布局跨学科的重大研究计划, 促进国内与伽玛暴相关科学设备成果的最大化, 全面提升我国在这个领域的国际影响力.

关键词 伽玛射线暴, 高能天体物理, 引力波, 多信使, 基本物理

伽玛射线暴(简称伽玛暴或gamma ray burst, GRB)于1967年被美国Vela军事卫星意外发现. 康普顿空间伽玛射线天文台上的BATSE探测器发现存在长持续时标($T_{90} > 2\text{ s}$)和短持续时标($T_{90} < 2\text{ s}$)的两类伽玛暴. 1997年BeppoSAX卫星首次对长伽玛暴GRB970228进行精确定位, 随后多波段余辉、宿主星系及其宇宙学红移被观测到, 证实这是来自宇宙深处的极端高能的现象. 该重大突破同年

被Science列入年度十大科学突破. 1999年观测发现长伽玛暴和黑洞诞生有关, 尤其是2003年HETE-II卫星发现长暴与Ic型超新星成协, 证实长暴与大质量恒星死亡相关, 又两度被Science列为年度世界十大科学突破. 2005年Swift卫星首次对短伽玛暴进行精确定位, 其余辉、宿主星系和红移等被观测到, 发现短暴很可能起源于宇宙学距离上的两个致密天体并合, 特别是2017年引力波天文台LIGO(laser interferometer grav-

引用格式: 戴子高, 吴雪峰, 梁思维. 如何理解高能伽玛射线暴? 科学通报, 2018, 63: 2450–2464

Dai Z G, Wu X F, Liang E W. How to understand high-energy gamma-ray bursts (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2018, 63: 2450–2464, doi: 10.1360/N972018-00034

itational wave observatory)/Virgo和Fermi卫星同时分别探测到引力波辐射GW170817和短暴GRB170817A,证实两者起源于一个双中子星并合事件^[1,2].这是人类首次通过多信使发现双中子星并合事件,引起了全球瞩目.这些发现被*Science*列为2017年度世界十大科学突破之首.因此,与伽玛暴相关的观测发现先后5次入选*Science*年度十大科技成就.

上述重大发现表明,伽玛暴不仅是恒星级质量黑洞和中子星的诞生、引力波辐射、相对论激波、极高能宇宙线、高能中微子等极端物理现象的天文实验室,而且是宇宙早期恒星形成和演化、高红移星系、高红移宇宙学的重要探针,对其研究横跨当今天文学、宇宙学、物理学等学科.尤其是GW170817/GRB170817A的观测发现开辟了人类探索宇宙的新时代.伽玛暴及其相关的多信使观测和理论研究已成为当前自然科学研究领域中空间巨大、发展最为迅猛的领域之一.值得指出的是,即使GW170817和短暴GRB170817A发生在不利于我国境内地基观测台站探测的空间方位,但是我国的硬X射线调制望远镜(hard X-ray modulation telescope, HXMT)^[3]和南极光学巡天望远镜(AST3-2)^[4]在GW170817电磁对应体的国际联测中也做出了重要贡献.目前,我国的一系列重大空间天文卫星、地面观测设备均把伽玛暴列为重要甚至首要科学目标.这些观测设施将抓住难得的科学发展机遇,推动我国在这个领域研究达到国际先进水平.本文将重点评述伽玛暴的中心引擎、瞬时辐射和余辉、多信使、宇宙学应用、对基本物理原理的高精度检验等方面的最新研究进展.

1 前身星和中心引擎

1.1 前身星

长暴和短暴分别起源于大质量恒星塌缩^[5,6]和双致密星并合^[7,8]已经被观测证实.引力波探测打开了认识伽玛暴前身星的新窗口.从理论分析到数值模拟,人们对双致密星并合和塌缩星释放的引力辐射给出了充分详实的理论预言^[9].在GW170817之后,随着LIGO的升级更新和更多引力波探测设施的投入使用,引力波天文学将正式步入舞台.更多的双中子星并合和黑洞-中子星并合、塌缩星的引力波及其电磁对应体将被

探测到.这将为研究中心引擎、恒星演化、致密物态、黑洞物理等提供极为有效的手段,进而逐步揭开伽玛暴前身星的神秘面纱.

1.2 中心引擎

伽玛暴如何产生如此巨大的能量可以归为中心引擎.虽然对中心引擎的研究近年取得了较大进展,但还有诸多问题亟待解决,仍是伽玛暴领域的热点和难点.目前主要的中心引擎模型包括中微子主导吸积流模型、磁机制下的黑洞超吸积模型、磁星模型、中子星相变模型等.

当黑洞吸积系统的吸积率达到或超过 $\sim 0.001M_{\odot} s^{-1}$ 时,中微子辐射将取代光子辐射成为主导冷却机制,即中微子主导吸积流模型.中微子在盘外空间湮灭形成火球,进而产生伽玛暴. Liu等人^[10]研究了该模型的结构、光度、演化和组分等,指出该模型可以解释短暴延展辐射和X射线耀发现象,其进动行为可解释近似对称的伽玛暴光变曲线.在黑洞超吸积下,以Poynting能流的形式提取黑洞转动能的Blandford-Znajek机制^[11]亦可解释伽玛暴和晚期X射线耀发^[12]. Lei等人^[13]指出该机制的强磁场可有效抑制伽玛暴喷流“重子污染”.他们还提出磁耦合机制会显著增强火球功率,并可解释伽玛暴快速光变行为^[14].在黑洞吸积框架内,吸积盘质量作为致密星并合后抛出质量的下限,可用于限制前身星类型^[15,16].

在双中子星并合或塌缩星中,都可能产生一颗旋转极快、磁场极强的大质量中子星,即磁星.磁星模型可以很好地解释伽玛暴瞬时辐射和短暴延展辐射^[17].我国学者利用磁星模型对伽玛暴X射线平台的理论解释取得了巨大成功^[18~21],获得了国际同行的认可. Dai等人^[22]在2006年提出新生中子星的磁重联过程可以解释强烈的X射线耀发现象,其间歇性和持续时标与观测一致,尤其对于解释短暴的X射线耀发有显著优势. Lü等人^[23,24]发现一些长暴和短暴的X射线平台后伴随着陡降,这表明磁星(或夸克星)在旋转变慢后会塌缩为黑洞. Chen等人^[25]指出一些X射线平台-陡降后的鼓包可能对应着磁星塌缩后诞生黑洞的吸积过程.当低质量的X射线双星中的中子星伴星约 $0.5M_{\odot}$ 时,中子星有可能发生相变,成为奇异星,并释放大约 10^{52} erg的能量.奇异星内部温度极高,壳层质量很小,所以这

个机制避免了“重子污染”问题. 因此伽玛暴可能产生于中子星相变^[26~28].

2 瞬时辐射和余辉辐射

伽玛暴的瞬时辐射和余辉辐射一般认为产生于一个相对论性喷流, 分别通过内部能量耗散和外部激波过程辐射出来.

2.1 瞬时辐射

伽玛暴瞬时辐射的光变曲线常常表现为一种不规则的快速变化的单脉冲或多脉冲结构, 持续时间差别比较大, 从几毫秒到数百秒甚至数千秒都有. 典型伽玛暴的能谱是光滑连接的分段非热谱. 近年发现在某些伽玛暴能谱中有多种成分叠加的情况(图 1), 如热谱成分^[30]、额外的幂律谱成分^[31]等. 其中额外的幂律谱可从keV能段一直延伸到GeV, 然后可能出现截断^[32]. Zhang 等人^[29]2011年通过对17个Fermi/GBM和LAT伽玛暴的能谱拟合发现, 对于不同的伽玛暴, 这3个成分不一定会出现. 另外, 伽玛暴的峰值能量也会随时间发生演化, Lu等人^[33]利用Fermi卫星观测数据很好地展示了这种演化特征. 伽玛暴的瞬时辐射除了在keV和MeV能段辐射之外, 在某些伽玛暴中, GeV的辐射也被探测到. 一般来讲, GeV的辐射比MeV的辐射要延迟一些, 而且辐射持续时标要长. 在极个别伽玛暴事例中(如GRB080319B), 人们还观测到了明亮的光学瞬时辐射^[34].

2.2 余辉辐射

伽玛暴余辉辐射能段很宽, 能谱和光变均常常表现为多转折幂律形式. 伽玛暴X射线余辉非常普遍, 在精确定位中约90%的暴能探测到其辐射. 据Zhang等人^[35]和Nousek等人^[36]对Swift卫星的观测总结, X射线余辉辐射一般有5个不同的辐射阶段: 快速衰减相、缓慢衰减或平台辐射相、正常衰减相、晚期类喷流转折相和随机耀发相, 如图2所示. 在Swift卫星之前, 光学余辉一般在暴后10 h左右被探测到, 然而极早期的光学余辉却很难被探测到. 而在Swift时代, 能够快速捕捉到极早期光学余辉的辐射. 光学余辉与X射线余辉类似, 但其行为比后者更复杂. 据Li等人^[37]的统计分析, 其光

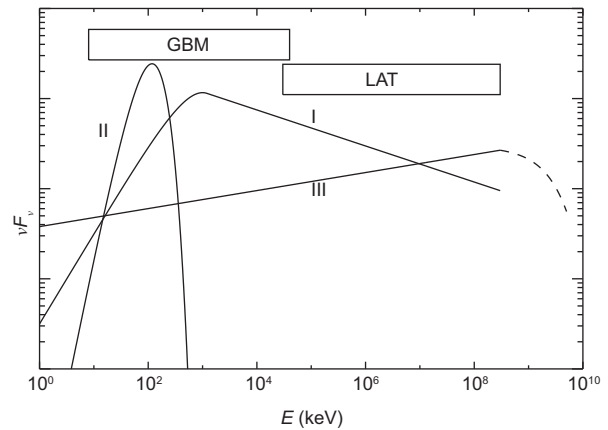


图1 伽玛暴瞬时辐射能谱的3种可能成分: (I) Band谱成分、(II) 热成分和(III) 额外幂律谱成分^[29]

Figure 1 Cartoon picture of three elemental spectral components that shape GRB prompt emission spectra: (I) a Band-function component, (II) a quasi-thermal component, and (III) an extra power-law component^[29]

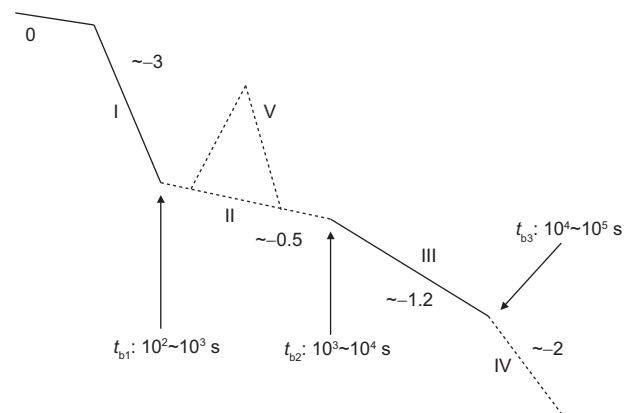


图2 伽玛暴X射线余辉光变曲线合成卡通图^[35]

Figure 2 Synthetic cartoon X-ray light curve^[35]

变曲线大体上也会展现出与X射线余辉相对应的几个阶段. 独特之处是, 在极早期会出现光学闪现象, 被认为是抛射物中反向激波的作用, Wu等人^[38]和Fan等人^[39,40]分别研究了环境、抛射物磁化程度和中子含量等因素对该辐射成分的影响. 与此同时, 在长暴和短暴的后期光学余辉中则分别会出现超新星和千新星(或巨新星、合并新星)辐射成分, 后者的发现更是近年来天文学研究特别是引力波天文学的重大突破^[41]. 相比于X射线和可见光, 射电余辉的观测相对比较困难, 目前只有约30%的样本被观测到. 射电余辉一般持续时间比较长, 几天、几个月、甚至几年的都有, 它是伽玛暴电磁辐射中持续时间最长的. 近年来Fermi卫星的高

能伽玛射线望远镜LAT从几个伽玛暴中观测到了持续时间超过瞬时辐射、流量随时间幂律衰减的GeV辐射,被认为是外激波余辉辐射在高端端的自然延伸^[42].

伽玛暴余辉辐射在发现前就被Mészáros 和Rees^[43]提出的外激波模型所预言. 其后, Dai和Lu^[44]提出外激波环境可能为前身星的星风, 并进一步指出暴后可能形成一颗中子星从而对外激波注入能量^[18,26]. 与此同时, Huang等人^[45]建立了一个可统一描述从相对论性演化到非相对论性的外激波动力学方程, 引起广泛关注. 从模型角度, 余辉光变曲线中的正常衰减相和喷流拐折均可在标准外激波模型中得到很好的解释, 而其他3种成分则成为Swift时代研究的一个重点. 首先, 早期快速衰减辐射被认为来自于辐射源高纬度区域的滞后辐射, Liang 等人^[46]利用Swift数据分析了这一阶段的能谱演化和时间零点的位置, 支持了这一理论解释. 其次, 对缓慢衰减和平台辐射的发现, 强有力地支持了由Dai和Lu所预言的能量注入模型. 最后, 对于X射线耀发现象, 它们与瞬时辐射存在很多相似之处, 因而被普遍认为起源于中心能源在暴后的长时间间歇性活动. Dai等人^[22]提出, 这种暴后活动可能是由于磁星内部的强磁场浮出星体表面发生重联所导致的, 并同时首次基于观测指出双中子星并合可能产生一颗大质量的中子星. Wang等人^[47]对这些X射线耀发的能量、持续时间、等待时间等做了仔细的统计分析, 发现其与太阳耀斑存在一些相似性, 有力支持了磁星磁重联模型.

3 引力波电磁对应体的观测和理论

2015年9月14日, LIGO第一次直接探测到了双黑洞并合引力波事件GW150914, 宣示着人类正式开启了引力波探测窗口. 地面引力波探测器(如LIGO/Virgo)的主要探测目标是恒星级致密天体(如双黑洞、双中子星以及中子星-黑洞)的并合. 理论上通常认为, 由于双黑洞周围很难有物质存在, 因此双黑洞并合不会产生可探测的电磁波对应体^[48]. 但是, 就在LIGO探测到第一例双黑洞并合引力波事件GW150914后不久, Fermi卫星宣称探测到了一个疑似的电磁对应体^[49]. 由于其他望远镜都没有探测到这个源, 而且Fermi卫星公布的信号又太弱了, 所以很多研究组都在质疑这个对应体的真实性^[50]. 对于双中子星并合以及中子星和黑洞并合,

由于中子星本身会携带大量的物质, 因此人们一直认为这两种并合现象一定会产生多种明亮的电磁辐射信号. 在并合的过程中, 中子星会被潮汐力撕裂, 一小部分物质由于离心力被甩了出去, 而大部分物质会向中心沉降并在中心形成了一个新的中心天体^[51]. 对于黑洞和中子星并合, 中心天体一定是黑洞. 而对于双中子星并合, 中心天体可以是黑洞, 也可以是更大质量的中子星^[22,52,53]. 当中心天体是黑洞时, 通常认为有三方面的信号产生: (1) 新形成的黑洞吸积周围物质并产生沿黑洞自转轴方向的极端相对论性喷流, 由此产生短暴及其多波段余辉辐射. (2) 由于上述的抛射物中富含中子, 因此会合成大量的放射性元素, 这些元素在衰变的过程中将产生类似超新星过程的光学辐射(见下节). (3) 非相对论运动的并合抛射物与周围星际介质相互作用产生长时间(几年)持续的射电辐射^[54]. 当中心天体是中子星时, 由于磁星在快速旋转过程中通过坡印廷流向外释放能量, 双中子星并合伴随的电磁辐射将变得更加丰富且明亮(图3). 首先, 如果此时仍然存在短暴及其余辉的话, 余辉阶段的辐射性质将由于晚期的能量注入发生变化, 如X射线光变曲线中出现平台效应等^[24,55,56], 在偏离喷流方向, 甚至有可能出现“孤儿”X射线平台辐射^[52]. 其次, 如果后期产生的坡印廷流注入到上文提到的抛射物中, 一方面将加热并合抛射物, 使得前面提到的并合新星更亮^[57], 另一方面将加

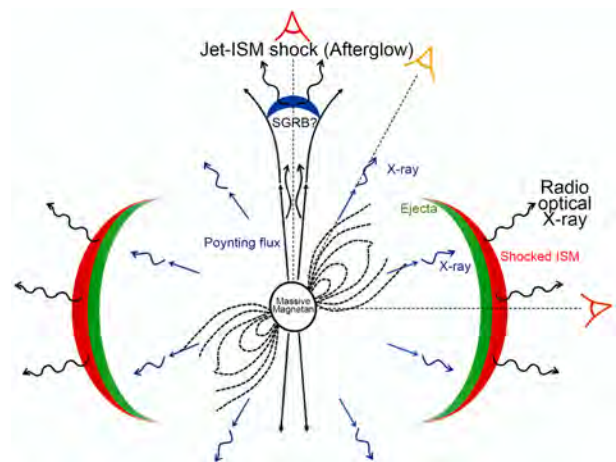


图3 双中子星并合中心产物为磁星情况下电磁信号成分示意图^[58]
Figure 3 Illustration of several EM emission components appearing after the merger. A massive millisecond magnetar is formed at the central engine^[58]

速并合抛射物,使其与星际介质相互作用产生相对论性激波,并由此产生较强的多波段电磁辐射^[58].

在首个双中子星并合引力波事件GW170817引力波信号触发LIGO探测器1.74 s后, Fermi卫星的GBM探测器探测到了一个持续时间为2 s左右的短暴. 10 h之后,一批地面光学望远镜在NGC4993星系中找到了一个快速增亮的光学信号. 考虑到NGC4993的距离与引力波信号给出的距离十分吻合,另外随后的观测表明该光学信号的光变以及光谱演化行为均和理论预言符合得很好,因此该光学信号被证认为GW170817的光学对应体. 9 d后, Chandra望远镜经过长时间曝光又探测到了一个较暗的X射线信号. 考虑到之前Swift-XRT给出的观测上限,这个X射线信号很可能对应着X射线的一次晚期增亮现象. 最后, VLA望远镜在16.2 d后探测到了一个射电波段对应体. 截至目前,该射电信号仍然在增亮. GW170817多波段电磁对应体的探测充分验证了前面的理论模型^[51]. GW170817与GRB170817A的成协观测证实了双中子星并合事件确实是伽玛暴的起源之一,光学对应体的发现更是证实了双中子星并合事件确实是宇宙中快中子核合成的重要发生地,由此基本解决了宇宙中超重元素的起源问题^[59].

4 千新星的观测和理论

1974年, Lattimer和Schramm^[60]提出黑洞与中子星的双星系统在并合之前,中子星被黑洞潮汐瓦解,有相当一部分的物质(约0.05倍中子星质量)以0.1倍光速被抛射到星际空间中,其主要成分为快中子俘获核合成形成的元素. 1998年, Li和Paczynski^[61]提出中子星与中子星或恒星级质量黑洞并合过程中抛出的放射性重元素通过衰变持续加热抛射物,可以产生类似超新星的紫外、光学辐射为主的暂现源. 2005年, Kulkarni^[62]建议将这类暂现源命名为巨新星(macronovae),并讨论了并合可能产生的大质量中子星对这类暂现源辐射的影响. 2010年, Metzger等人^[63]基于详细的核物质计算结果和辐射转移过程,第一次较为严格地给出了抛射物辐射的光变曲线,并命名为千新星(kilonovae). 2013年, Yu等人^[57]考虑到并合产生的大质量中子星(毫秒磁星)可能为抛射物注入远大于重元素衰变的能量,

并可能使抛射物达到相对论性的速度,重新计算了新的抛射物辐射特征,并将此类暂现源统一命名为并合新星(mergernovae).

2013年, Kasen等人^[64]发现,快中子俘获核合成的物质中镧系元素将主导抛射物质的光深,其不透明度是以铁族元素物质为主的超新星的几十倍. Tanvir等人^[41]利用哈勃空间望远镜对一个短伽玛暴GRB130603B进行了H波段的观测,发现该暴爆后9.4 d H波段的星等为25.8星等,而V波段暗于27.7星等,与伽玛暴余辉不一致,而与千新星理论模型预言一致. 2015~2016年,以紫金山天文台领导的国际团队,通过分析伽玛暴的历史数据,在GRB060614^[65,66]和首个发现余辉的短暴GRB050709^[67]中,均发现了与千新星一致的信号. 2015年, Gao等人^[68]在短暴GRB080503的数据中,也发现了并合新星的信号. 2017年, Gao等人^[69]发现GRB050724、GRB070714B和GRB061006中也有来自并合新星辐射的迹象. 2017年,人类首次观测到了引力波事件(GW170817)、短暴(GB170817A)和千新星(AT2017gfo)三者成协事件^[1,2]. 此次,全球有40多台光学红外望远镜投入到光学对应体AT2017gfo的观测中^[2],其中包括紫金山天文台牵头在南极运行观测的光学巡天望远镜AST3-2^[4],得到了很好的光谱数据和光变曲线. 令人惊讶的是,这些观测结果,与此前千新星的数值模拟结果非常一致^[70].

5 多信使

引力波GW170817及其电磁对应体的发现,使人类研究宇宙同一天体的信息载体从电磁波延伸到了引力波,标志着天文学研究进入多信使时代. 未来人类利用电磁波、引力波、中微子、宇宙线这4种基本信使探索宇宙天体,必然对天体的研究更全面、更深入. 伽玛暴是宇宙中少数几类可探测的多信使天体之一.

5.1 高能辐射与Fermi卫星

伽玛暴除了早期的keV-MeV辐射和多波段(X射线、光学、射电)的余辉辐射, Fermi卫星还探测到了超过一百个伽玛暴在早期瞬时辐射阶段以及后期阶段都有能量大于100 MeV的高能光子辐射,高能光子的最高能量已达90 GeV^[31]. Fermi卫星发现伽玛暴高

能辐射的一些新特征: (1) 高能辐射能持续较长时间, 如GRB130427A的GeV辐射持续到暴后约1 d^[71]. 这种长时间的高能辐射一般认为是由于外激波过程产生, 然而由于喷流速度的下降, 受电子最大加速能量的限制, 同步辐射机制不能解释晚期的能量高的光子起源^[72], 逆康普顿散射机制在晚期阶段很可能变得重要. (2) Fermi卫星发现许多暴的高能辐射存在所谓的“额外成分”, 即在标准的Band函数基础上叠加一个幂律成分, 如GRB090510、GRB090926A等. 这个成分的起源尚不完全清楚, 提出的辐射包括光球辐射被电子逆康普顿散射过程以及强子辐射过程. (3) Fermi卫星发现有一些暴的高能辐射的能谱存在截断^[32], 很可能是高能光子被低能光子吸收造成的. 基于这个吸收, 研究者第一次能直接确定伽玛暴喷流的相对论洛伦兹因子^[32]. Tang等人^[73]发现了更多这样的事例, 并发现喷流的洛伦兹因子跟伽玛能量存在正相关.

5.2 宇宙线和中微子信使

宇宙线是来自地球之外的极高能带电粒子, 其起源至今仍是未知之谜. 能量高于 10^{18} 电子伏特的宇宙线一般认为来自于银河系外的天体. 伽玛暴由于其极端相对论的喷流和强磁场被认为是加速极高能宇宙线的重要候选天体之一^[74]. 与低光度伽玛暴成协的巨超新星遗迹由于大的爆发能量和中等相对论的速度也被认为是这些极高能宇宙线的重要候选天体^[75]. Asano等人^[76]提出伽玛暴的高能伽玛辐射可以用强子模型解释, 这与伽玛暴加速极高能宇宙线的模型相一致.

由于伽玛暴的高光度和小尺度, 加速出的高能宇宙线与伽玛暴的光子可能会有效地发生光介子反应, 并产生高能中微子^[77]. 当相对论喷流受外部介质减速时产生外激波, 外激波会加速电子并产生余辉阶段的辐射, 同样外激波也可能加速宇宙线并产生高能中微子. 2009年至今, 位于南极的冰立方(IceCube)中微子探测器对几百个伽玛暴进行了中微子搜寻^[78]. 由于伽玛暴是短暂爆发, 而且方向已知, IceCube通过搜寻在伽玛暴爆发前后、在爆发方向的中微子事件, IceCube没有发现与伽玛暴成协的高能中微子, 得到了中微子流量的上限. 这个上限已经低于Waxman-Bahcall预言的流量^[77], 这对伽玛暴中的强子辐射过程给出了严格的限制^[79], 并在一定程度上对伽玛暴作为极高能宇宙线候

选体的模型提出了挑战. 由于IceCube的观测是针对典型光度的伽玛暴, 研究者仍不能排除一类低光度伽玛暴贡献中微子的可能性. 国际上有一些模型提出低光度伽玛暴仍然是超高能中微子的候选者^[80].

2013年IceCube首次探测到地球之外的高能中微子, 开辟了高能中微子天文学的新时代. IceCube探测到的中微子能量高达几个PeV, 它们的到达方向呈现各向同性分布, 表明这些中微子应该来自于银河系之外的天体. 由于高能中微子的产生过程必然伴随高能伽玛光子的产生, 而这些高能光子在传播途中被背景光子吸收, 但这些光子的能量会通过电子对级联过程(cascade)传递到低能光子, 从而贡献GeV能量的各向同性宇宙伽玛背景辐射. 由于费米卫星已经探测到GeV能量的宇宙背景辐射的强度, 而且有其他源(如Blazars)也贡献这个背景, 这就要求高能中微子伴随的背景辐射不能超过费米卫星的观测值. 因此宇宙各向同性伽玛背景对高能中微子的源有限制作用. 低光度伽玛暴的喷流如果在传播过程中被压制, 它们可能只产生中微子, 而不贡献高能光子, 因此低光度伽玛暴仍然被认为是高能中微子起源的重要候选天体之一^[81]. 由于高红移处产生的高能光子会被吸收, 高红移的超新星遗迹和巨超新星遗迹也是重要候选天体^[82].

6 伽玛暴宇宙学

目前观测到的红移最高的伽玛暴是GRB090429B, 红移高达9.4, 因此伽玛暴是研究高红移宇宙的理想工具, 包括限制宇宙膨胀、暗能量、恒星形成率等.

6.1 宇宙膨胀和暗能量

1998年, 两个独立的超新星组分别发现了宇宙的加速膨胀^[83, 84], 并且获得了2011年的诺贝尔物理学奖. 这些组利用Ia型超新星研究宇宙膨胀历史和暗能量. 但是Ia型超新星的最大红移仅为1.9, 而伽玛暴覆盖了较大的红移范围, 因此伽玛暴可以弥补Ia型超新星和宇宙微波背景辐射之间缺失部分的数据^[85]. 与Ia型超新星一样, 需要伽玛暴的光度关系才能把伽玛暴作为标准烛光. Dai等人^[86]首次利用Ghirlanda关系得到 $\Omega_m = 0.35 \pm 0.15$. Liang和Zhang^[87]利用Liang-Zhang关系研究了宇宙学参数. Schaefer^[88]利用伽玛

暴的5个光度关系建立了红移到6.9的哈勃图. Wang等人^[89]首次结合伽玛暴和多种天文观测限制暗能量, 得到的结果如图4所示. 由图4可知, 发现伽玛暴的等高线图的长轴方向与超新星的长轴方向大致垂直, 这表明对宇宙学参数的限制更紧密. 另外, 利用高红移的伽玛暴可以研究暗能量状态方程的演化^[90,91], 而Li等人^[92]同时拟合了Ghirlanda关系和宇宙学参数, Amati等人^[93]利用他们得到的关系研究了宇宙学参数. 除此之外, 还有一些研究采用了上述关系并限制宇宙学参数^[85]. 研究者预期, 未来的更多观测(如SVOM卫星)将建立更大的样本, 给出弥散更小的光度关系和误差更低的宇宙学参数.

6.2 高红移恒星形成率

长暴起源于大质量恒星死亡, 因此高红移的伽玛暴成为研究高红移处恒星形成率的重要工具^[94]. 由于大质量恒星寿命较短, 一般只有几百万年, 所以可以近似把死亡率视为恒星形成率. 然而Swift卫星的观测表明, 伽玛暴的爆发率不是严格等于恒星形成率, 两者之间差了一个随红移演变的因子 $(1+z)^\delta$, 其中 δ 取值在0.5~1.5^[95~97]. 但是这个问题的研究严重依赖于仪器的选择效应和可能的伽玛暴光度宇宙学演化^[98]. 所以

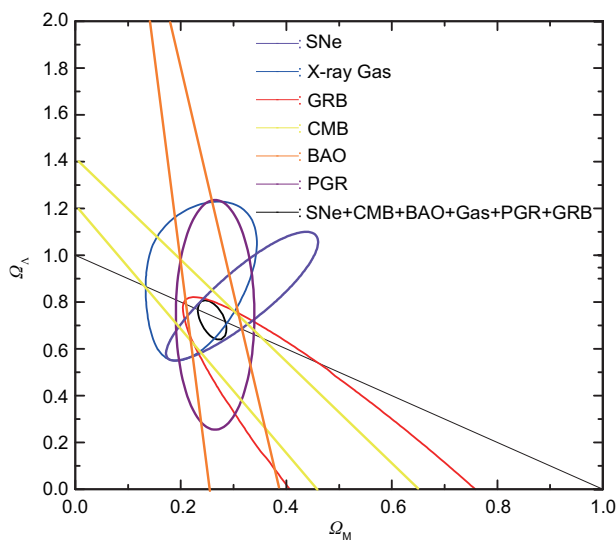


图4 伽玛暴和其他天文观测对标准宇宙学模型 Λ CDM的限制^[89]
Figure 4 Joint constraints on the Λ CDM model from GRBs and other observational datasets^[89]

建立一个完备的伽玛暴样本非常重要. 基于SVOM的观测, 我们将建立伽玛暴的完备样本, 解决选择效应和光度演化的问题. 利用Swift的样本, 最近的一些研究^[99~101]用Lynden-Bell方法^[102]去除选择效应和光度演化, 发现低红移处的伽玛暴率显著高于高红移处的伽玛暴率, 这可能是由不同于典型长暴的低红移、低光度的伽玛暴的贡献^[99,103,104]. 近年来的研究表明高红移处由伽玛暴推断的恒星形成率要高于由高红移星系得到的恒星形成率^[97,105], 这可能归结于金属丰度演化^[97]、初始质量函数的演化^[91]、光度函数的演化^[106]等.

7 偏振的观测和理论

伽玛暴的光变和能谱观测只能给出辐射区辐射强度的信息, 无法进一步诊断喷流的结构、磁化程度和辐射区磁场位形. 偏振的研究可能会为解决这些科学问题提供重要的线索. 偏振起源于不对称性. 几何不对称性是辐射区流体的空间分布在观测者视线方向上不是轴对称的, 而内禀磁场位形的不对称性则来自于辐射区内部磁场的大尺度规则构型导致的在观测者视线方向呈非轴对称分布. 据此, 伽玛暴偏振的理论模型大致可以分为两类: 几何模型^[107]和内禀模型^[108,109]. Zhang和Yan^[110]在2011年提出了伽玛暴瞬时辐射的“内激波诱导磁重联”(ICMART)模型, 并预言了偏振度在单个伽玛暴脉冲演化过程中呈现衰减行为. Dai^[111]在2004年提出相对论星风泡模型来解释伽玛暴X射线余辉的平台, 并预言X射线平台期会有较高的线偏振度; Lan等人^[108]基于该模型, 详细给出了不同对称性模型下X射线平台期线偏振的演化; Wu等人^[107]在2005年研究了双成分喷流模型下伽玛暴光学余辉的偏振演化; Lan等人^[109]计算了不同磁场位型下伽玛暴光学余辉的偏振演化, 并指出可以通过偏振观测来区分伽玛暴的中心引擎.

伽玛暴及其余辉偏振观测目前得到了一些结果. 在GRB021206的瞬时辐射中观测到了 $(80 \pm 20)\%$ 的线偏振度^[112], 但是后来发现这个结果不正确; 在GRB100826A的瞬时辐射中首次观测到了偏振方位角有剧烈改变^[113]; 在GRB090102的光学余辉中首次探测到了反向激波区域辐射的线偏振达到10%^[114];

在GRB120308A的光学余辉中首次探测到了辐射由反向激波主导到正向激波主导过度期间的偏振^[115];在GRB121024A的光学余辉中首次观测到了来自正向激波区域辐射的 $(0.61 \pm 0.13)\%$ 的圆偏振^[116]. 未来随着空间X射线和伽玛射线偏振探测计划的推动和实施, 以及地面大型光学望远镜开展伽玛暴光学辐射的偏振探测, 将能有效地限制伽玛暴喷流结构与磁场位形, 为深入了解伽玛暴能源机制和中心引擎提供关键线索.

8 对基本物理原理的高精度检验

借助伽玛暴得天独厚的观测优势, 我们可对相对论的一些基本原理和假设(如广义相对论中的等效原理以及狭义相对论中的光子零静止质量和洛伦兹不变性假设等)进行高精度检验.

等效原理是爱因斯坦广义相对论和其他引力理论的重要基石. 弱等效原理可以通过对比暂现源同时释放的不同粒子(如光子、中微子甚至引力波)或不同频率的同一种粒子在银河系引力场(甚至更大尺度的引力场)中传播对应的后牛顿参数 γ 值(描述单位质量引起的空间弯曲度)的差别是否为零来检验. 1988年, Longo^[117]、Krauss和Tremaine^[118]分别利用来自超新星1987A的中微子和光子到达地球的时间差, 检验了弱等效原理. 2015年, Gao等人^[119]利用来自伽玛暴的不同能量光子(从光学到GeV)到达地球的时间差, 在 10^{-7} 精度上验证了弱等效原理. 该结果比之前的超新星限制至少要提高了一个量级.

洛伦兹不变性是爱因斯坦狭义相对论的一个基本假定. 当理论物理学家试图统一量子力学和广义相对论时, 他们发现该假设可能需要打破, 即所谓的洛伦兹不变性破缺. 由于伽玛暴的能谱时延很短、光子能量很高且发生在很远的宇宙学距离上, 伽玛暴被认为是限制洛伦兹不变性破缺最理想的高能辐射源. 利用最近IceCube团组声称的5个可能与伽玛暴成协的TeV中微子, Wei等人^[120]对一阶和二阶洛伦兹不变性破缺分别作出了高精度的限制. Wei等人^[121]还首次提出GRB160625B的能谱时延拐折特征可对洛伦兹不变性破缺作出强有力的保守限制.

光子静止质量是否为零是物理学领域长期关注的基本问题之一. 限制光子静止质量的最直接且没

有任何模型依赖的方法就是探测光速的频率依赖性. 以前利用这种色散方法最好的天文学检验是由伽玛暴GRB980703的射电余辉相对瞬时辐射的26 h的时间延迟给出的, 为 $4.2 \times 10^{-44} \text{g}^{[122]}$. 基于Schaefer^[122]的工作, Zhang等人^[123]利用更多的伽玛暴射电余辉, 把伽玛暴对光子静止质量的上限限制提高了半个量级.

9 我国的伽玛暴探测项目

进入21世纪, 我国空间探测项目加快了发展步伐. 在中国科学院战略性先导科技专项的支持下, 在引力波电磁对应体的探测上也有考虑和相关部署. 伽玛暴偏振仪(POLAR)和“慧眼”硬X射线调制望远镜(HXMT)已分别于2016和2017年发射运行. 空间变源监视器(space variable objects monitor, SVOM)、爱因斯坦探针(Einstein probe, EP)、X射线时变和偏振探测器(eXTP)以及引力波高能电磁对应体全天监测器(gravitational wave high-energy electromagnetic counterpart all-sky monitor, GECAM)等项目正处于不同的阶段. 这些项目的探测性能接近或达到国外同类设备, 它们的成功实施将使我国在伽玛暴和引力波电磁对应体探测研究上达到国际先进水平. 以下简要介绍这些伽玛暴探测项目.

POLAR已于2016年9月15日搭载空间实验室“天宫2号”成功发射. POLAR探测能量范围50~500 keV, 视场为未被地球遮挡的天区(60%全天), 主要利用伽玛射线的康普顿散射探测伽玛暴瞬时辐射的线偏振度和偏振方向^[124, 125]. POLAR由中国和欧洲合作研制, 截至2017年3月31日, POLAR一共探测到55个确认的伽玛暴^[126], 其中包含10个左右的亮暴, 其偏振观测结果尚未正式发布.

慧眼望远镜于2017年6月15日发射, 是我国第一台空间X射线天文望远镜^[127]. 慧眼望远镜的主要观测目标是银河系内的X射线源(包括X射线双星、脉冲星等). 但通过创新性使用辅助探测器, 使慧眼望远镜具有探测伽玛暴瞬时辐射的能力, 其主要探测能区为200 keV~5 MeV, 视场为未被地球遮挡的天区(60%全天), 有效面积达到~100 cm², 是正在运行的探测面积最大的伽玛暴探测器之一. 截至2017年10月1日, 慧眼望远镜已探测到26个伽玛暴.

SVOM是一台功能强大的伽玛暴望远镜,由中法合作研制,预计2021年左右发射运行. SVOM配备了伽玛射线监测器(gamma ray monitor, GRM)、编码孔成像仪(ECLAIRs)、软X射线后随望远镜(MXT)以及光学后随望远镜(VT)等仪器,将探测伽玛暴瞬时辐射及其余辉辐射,是继Swift之后功能最强大最完善的伽玛暴望远镜^[128]. SVOM的总体目标是用于发现、快速定位伽玛暴,全面测量伽玛暴的辐射特征,研究宇宙演化和暗能量. 在引力波电磁对应体探测方面,SVOM将主要利用大视场(~60%全天)的GRM监测引力波事件的瞬时伽玛射线辐射,以及利用MXT和VT对引力波事件的软X射线和光学辐射进行后随观测. 跟SVOM配套的地面光学望远镜阵列(GWAC)也将是监测搜索引力波光学对应体的重要设备.

EP是我国正在研制的软X射线望远镜^[129],搭载了宽视场X射线望远镜(WXT)和后随X射线望远镜(FXT),计划在2022年左右发射. WXT采用先进的龙虾眼成像技术,视场达到3000多平方度,探测能区为0.5~4 keV,对暂现源的捕捉能力超过国际上现有最好的望远镜一个量级以上. FXT将根据WXT等给出的定位,进行更高灵敏度的后随观测. 在引力波电磁对应体的探测上,WXT凭借极大的视场,将一次性覆盖通常较大的引力波定位误差区域,快速发现软X射线对应体. 预计WXT有~10%的概率在引力波发生时正好监测到引力波区域,从而探测瞬时的软X射线电磁对应体.

GECAM是专门为探测引力波高能电磁对应体而设计的探测项目. GECAM由两颗运行在低地球轨道上的微小卫星(~100 kg)组成,具有同时覆盖100%全天的视场,能量范围6 keV~5 MeV,灵敏度 $\sim 10^{-8}$ erg cm⁻² s⁻¹,对中等亮度伽玛暴的定位精度 $\sim 1^\circ$. GECAM的低能探测范围以及高灵敏度,极有利于探测跟GRB170817A相似的引力波高能电磁对应体. GECAM提供的定位也将大大缩小引力波的定位区域,极大地提高后随观测的效率,增加发现光学对应体的可能性. 为了抓住引力波科学发现的机遇,GECAM采用“短平快廉”的探测技术方案,瞄准2020年发射运行,从而赶上与达到设计灵敏度的引力波探测器联合观测,预期发现大量引力波高能电磁对应体.

eXTP是我国主导的国际合作研制的下一代大型X射线望远镜^[130],包括能谱聚焦阵列望

镜(spectroscopic focusing array, SFA)、偏振聚焦阵列望远镜(polarimetry focusing array, PFA)、大面积探测器(large detector, LAD)以及宽视场监测器(WFM). eXTP的科学目标是研究和探索黑洞和中子星的基本物理规律,对一批黑洞和中子星的参数做出精确测量,将在解决一系列极端引力、极端磁场和极端能量(密度)等基础物理问题方面做出突破性贡献,使我国在空间X射线天文学和相关基础物理的研究进入国际领先行列. 在伽玛暴和引力波电磁对应体方面,eXTP将利用SFA和PFA测量伽玛暴软X射线余辉的演化和偏振性质,利用SFA揭示暗弱的引力波源软X射线电磁辐射,以及利用WFM监测引力波的硬X射线瞬时辐射.

10 展望

我国拥有一支活跃在伽玛暴领域前沿的研究队伍,研究工作持续得到国家自然科学基金、国家重点基础研究发展计划和国家重大研发计划、中国科学院战略性先导科技专项等资助,并形成了协同攻关团队,已经在伽玛暴的许多方面都取得了在国际上有显示度的重要成果. 今后5~10年我国学者将利用国内天文观测设备,并结合国际合作共享使用观测数据,集中力量在以下几个伽玛暴及相关热点问题开展研究.

(1) 利用HXMT、SVOM、EP、GECAM等空间设施和地面望远镜开展短暴和引力波暴关联性观测,并研究引力波暴的起源及其物理过程、中子星物态方程、宇宙超重元素起源、宇宙学哈勃常数精确测量等.

(2) 利用FAST与HXMT开展伽玛暴与快速射电暴可能成协的观测和理论研究,揭示快速射电暴的物理起源.

(3) 开展伽玛暴与黑洞、中子星物理的相关观测和理论研究,揭示这些新生致密天体的形成、吸积、极端相对论喷流产生的物理过程. 这是高能天体物理的基本科学问题.

(4) 开展伽玛暴高能辐射研究. 极高能宇宙线的起源是当今重大科学前沿课题,是我国LHAASO等重大科学计划的主要科学目标之一. 这个问题的研究不仅有助于揭开高能中微子和宇宙线起源问题,而且直接探知伽玛暴喷流组分和粒子加速,为理解伽玛暴的中

心引擎、辐射机制提供重要信息.

(5) 开展伽玛暴与恒星和星系形成演化、宇宙学相关研究. 长暴是检验恒星演化理论、超新星爆发机制的重要目标源, 也是研究宇宙恒星形成历史、金属丰度演化历史、早期宇宙再电离历史等的重要探针. 另一方面, 伽玛暴极其明亮又不受消光等因素影响, 是测量宇宙学参量和暗能量可能演化的重要探针.

(6) 利用伽玛暴、引力波事件、快速射电暴对狭义

相对论和广义相对论的基本原理和假设进行多信使、高精度检验.

纵观伽玛暴研究领域的发展历史, 可以看到重要发现均是观测设备取得里程碑式突破后取得的. 针对伽玛暴领域的发展态势和我国已经具有的研究基础, 建议国家继续加大对这个领域研究的资助力度, 布局跨学科的重大研究计划, 促进我国相关科学设备成果的最大化, 全面提升我国在这个领域的国际影响力.

致谢 在本文的撰写过程中, 得到高鹤(北京师范大学)、金志平(中国科学院紫金山天文台)、刘彤(厦门大学)、王发印(南京大学)、王祥玉(南京大学)、熊少林(中国科学院高能物理研究所)、俞云伟(华中师范大学)等人的帮助和讨论, 也得到魏俊杰(中国科学院紫金山天文台)的仔细修改, 在此对他们表示衷心感谢.

参考文献

- 1 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101
- 2 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Multi-messenger observations of a binary neutron star merger. *Astrophys J*, 2017, 848: L12–L70
- 3 Li T, Xiong S, Zhang S, et al. Insight-HXMT observations of the first binary neutron star merger GW170817. *Sci China Phys Mech Astron*, 2018, 61: 031011
- 4 Hu L, Wu X, Andreoni I, et al. Optical observations of LIGO Source GW 170817 by the antarctic survey telescopes at dome A, Antarctica. *Sci Bull*, 2017, 62: 1433–1438
- 5 Woosley S E. Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes. *Astrophys J*, 1993, 405: 273–277
- 6 Galama T J, Vreeswijk P M, van Paradijs J, et al. An unusual supernova in the error box of the γ -ray burst of 25 April 1998. *Nature*, 1998, 395: 670–672
- 7 Eichler D, Livio M, Piran T, et al. Nucleosynthesis, neutrino bursts and gamma-rays from coalescing neutron stars. *Nature*, 1989, 340: 126–128
- 8 Paczynski B. Cosmological gamma-ray bursts. *Acta Astron*, 1991, 41: 257–267
- 9 Cutler C, Thorne K S. An overview of gravitational-wave sources. 2002, arXiv: 0204090
- 10 Liu T, Gu W M, Zhang B. Neutrino-dominated accretion flows as the central engine of gamma-ray bursts. *New Astron Rev*, 2017, 79: 1–25
- 11 Blandford R D, Znajek R L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1977, 179: 433–456
- 12 Wu X F, Hou S J, Lei W H. Giant X-ray bump in GRB 121027A: Evidence for fall-back disk accretion. *Astrophys J*, 2013, 767: L36–L40
- 13 Lei W H, Zhang B, Liang E W. Hyperaccreting black hole as gamma-ray burst central engine. I. Baryon loading in gamma-ray burst jets. *Astrophys J*, 2013, 765: 125–132
- 14 Lei W H, Wang D X, Zhang L, et al. Magnetically torqued neutrino-dominated accretion flows for gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2009, 700: 1970–1976
- 15 Fan Y Z, Wei D M. Short gamma-ray bursts: The mass of the accretion disk and the initial radius of the outflow. *Astrophys J*, 2011, 739: 47–53
- 16 Liu T, Lin Y Q, Hou S J, et al. Can black hole neutrino-cooled disks power short gamma-ray bursts? *Astrophys J*, 2015, 806: 58–64
- 17 Usov V V. Millisecond pulsars with extremely strong magnetic fields as a cosmological source of gamma-ray bursts. *Nature*, 1992, 357: 472–474
- 18 Dai Z G, Lu T. Gamma-ray burst afterglows and evolution of postburst fireballs with energy injection from strongly magnetic millisecond pulsars. *Astron Astrophys*, 1998, 333: L87–L90
- 19 Fan Y Z, Xu D. The X-ray afterglow flat segment in short GRB 051221A: Energy injection from a millisecond magnetar? *Mon Not Royal Astron Soc*, 2006, 372: L19–L22
- 20 Fan Y Z, Yu Y W, Xu D, et al. A supramassive magnetar central engine for GRB 130603B. *Astrophys J*, 2013, 779: L25–L28
- 21 Wu X F, Gao H, Ding X, et al. A double neutron star merger origin for the cosmological relativistic fading source PTF11agg? *Astrophys J*, 2014, 781: L10–L14
- 22 Dai Z G, Wang X Y, Wu X F, et al. X-ray flares from postmerger millisecond pulsars. *Science*, 2006, 311: 1127–1129
- 23 Lü H J, Zhang B A. Test of the millisecond magnetar central engine model of gamma-ray bursts with swift data. *Astrophys J*, 2014, 785: 74–88
- 24 Lü H J, Zhang B, Lei W H, et al. The millisecond magnetar central engine in short GRBs. *Astrophys J*, 2015, 805: 89–106

- 25 Chen W, Xie W, Lei W H, et al. Signature of a newborn black hole from the collapse of a supra-massive millisecond magnetar. *Astrophys J*, 2017, 849: 119–124
- 26 Dai Z G, Lu T. γ -Ray bursts and afterglows from rotating strange stars and neutron stars. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 4301–4304
- 27 Cheng K S, Dai Z G. Are soft γ -ray repeaters strange stars? *Phys Rev Lett*, 1998, 80: 18–21
- 28 Cheng K S, Dai Z G, Wei D M, et al. Is GRO J1744-28 a strange star? *Science*, 1998, 280: 407–409
- 29 Zhang B B, Zhang B, Liang E W, et al. A comprehensive analysis of Fermi gamma-ray burst data. I. Spectral components and the possible physical origins of LAT/GBM GRBs. *Astrophys J*, 2011, 730: 141–173
- 30 Ryde F. Is thermal emission in gamma-ray bursts ubiquitous? *Astrophys J*, 2005, 625: L95–L98
- 31 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Fermi observations of GRB 090902B: A distinct spectral component in the prompt and delayed emission. *Astrophys J*, 2009, 706: L138–L144
- 32 Ackermann M, Ajello M, Asano K, et al. Detection of a spectral break in the extra hard component of GRB 090926A. *Astrophys J*, 2011, 729: 114–125
- 33 Lu R J, Wei J J, Liang E W, et al. A comprehensive analysis of Fermi gamma-ray burst data. II. E_p evolution patterns and implications for the observed spectrum-luminosity relations. *Astrophys J*, 2012, 756: 112–124
- 34 Racusin J L, Karpov S V, Sokolowski M, et al. Broadband observations of the naked-eye γ -ray burst GRB080319B. *Nature*, 2008, 455: 183–188
- 35 Zhang B, Fan Y Z, Dyks J, et al. Physical processes shaping gamma-ray burst X-ray afterglow light curves: Theoretical implications from the Swift X-Ray telescope observations. *Astrophys J*, 2006, 642: 354–370
- 36 Nousek J A, Kouveliotou C, Grupe D, et al. Evidence for a canonical gamma-ray burst afterglow light curve in the Swift XRT data. *Astrophys J*, 2006, 642: 389–400
- 37 Li L, Liang E W, Tang Q W, et al. A comprehensive study of gamma-ray burst optical emission. I. Flares and early shallow-decay component. *Astrophys J*, 2012, 758: 27–44
- 38 Wu X F, Dai Z G, Huang Y F, et al. Optical flashes and very early afterglows in wind environments. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2003, 342: 1131–1138
- 39 Fan Y Z, Wei D M, Wang C F. The very early afterglow powered by ultra-relativistic mildly magnetized outflows. *Astron Astrophys*, 2004, 424: 477–484
- 40 Fan Y Z, Zhang B, Wei D M. Early optical afterglow light curves of neutron-fed gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2005, 628: 298–314
- 41 Tanvir N R, Levan A J, Fruchter A S, et al. A “kilonova” associated with the short-duration γ -ray burst GRB 130603B. *Nature*, 2013, 500: 547–549
- 42 Kumar P, Barniol D R. On the generation of high-energy photons detected by the Fermi Satellite from gamma-ray bursts. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2009, 400: L75–L79
- 43 Mészáros P, Rees M J. Optical and long-wavelength afterglow from gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1997, 476: 232–237
- 44 Dai Z G, Lu T. Gamma-ray burst afterglows: Effects of radiative corrections and non-uniformity of the surrounding medium. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1998, 298: 87–92
- 45 Huang Y F, Dai Z G, Lu T. A generic dynamical model of gamma-ray burst remnants. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1999, 309: 513–516
- 46 Liang E W, Zhang B, O’Brien P T, et al. Testing the curvature effect and internal origin of gamma-ray burst prompt emissions and X-Ray flares with Swift data. *Astrophys J*, 2006, 646: 351–357
- 47 Wang F Y, Dai Z G. Self-organized criticality in X-ray flares of gamma-ray-burst afterglows. *Nat Phys*, 2013, 9: 465–467
- 48 Zhang S N, Liu Y, Yi S, et al. Do we expect to detect electromagnetic radiation from merging stellar mass black binaries like GW150914? 2016, arXiv: 1604.02537
- 49 Connaughton V, Burns E, Goldstein A, et al. Fermi GBM observations of LIGO gravitational-wave event GW150914. *Astrophys J*, 2016, 826: L6–L24
- 50 Xiong S. Is the GW150914-GBM really associated with the GW150914? 2016, arXiv:1605.05447
- 51 Metzger B D. Kilonovae. *Living Rev Relativ*, 2017, 20: 3–61
- 52 Zhang B. Early X-ray and optical afterglow of gravitational wave bursts from mergers of binary neutron stars. *Astrophys J*, 2013, 763: L22–L25
- 53 Gao H, Zhang B, Lü H J. Constraints on binary neutron star merger product from short GRB observations. *Phys Rev D*, 2016, 93: 044065
- 54 Metzger B D, Berger E. What is the most promising electromagnetic counterpart of a neutron star binary merger? *Astrophys J*, 2012, 746: 48–62
- 55 Rowlinson A, O’Brien P T, Tanvir N R, et al. The unusual X-ray emission of the short Swift GRB 090515: Evidence for the formation of a magnetar? *Mon Not Roy Astron Soc*, 2010, 409: 531–540
- 56 Rowlinson A, O’Brien P T, Metzger B D, et al. Signatures of magnetar central engines in short GRB light curves. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2013, 430: 1061–1087
- 57 Yu Y W, Zhang B, Gao H. Bright “Merger-nova” from the remnant of a neutron star binary merger: A signature of a newly born, massive, millisecond magnetar. *Astrophys J*, 2013, 776: L40–L44
- 58 Gao H, Ding X, Wu X F, et al. Bright broadband afterglows of gravitational wave bursts from mergers of binary neutron stars. *Astrophys J*, 2013,

771: 86–83

- 59 Drout M R, Piro A L, Shappee B J, et al. Light curves of the neutron star merger GW170817/SSS17a: Implications for R-process nucleosynthesis. 2017, arXiv:1710.05443
- 60 Lattimer J M, Schramm D N. Black-hole-neutron-star collisions. *Astrophys J*, 1974, 192: L145–L147
- 61 Li L X, Paczyński B. Transient events from neutron star mergers. *Astrophys J*, 1998, 507: L59–L62
- 62 Kulkarni S R. Modeling supernova-like explosions associated with gamma-ray bursts with short durations. 2005, arXiv: 0510256
- 63 Metzger B D, Martínez Pinedo G, Darbha S, et al. Electromagnetic counterparts of compact object mergers powered by the radioactive decay of r-process nuclei. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2010, 406: 2650–2662
- 64 Kasen D, Badnell N R, Barnes J. Opacities and spectra of the R-process ejecta from neutron star mergers. *Astrophys J*, 2013, 774: 25–37
- 65 Yang B, Jin Z P, Li X, et al. A possible macronova in the late afterglow of the long-short burst GRB 060614. *Nat Commun*, 2015, 6: 7323
- 66 Jin Z P, Li X, Cano Z, et al. The light curve of the macronova associated with the long-short burst GRB 060614. *Astrophys J*, 2015, 811: L22–L26
- 67 Jin Z P, Hotokezaka K, Li X, et al. The Macronova in GRB 050709 and the GRB-macronova connection. *Nat Commun*, 2016, 7: 12898
- 68 Gao H, Ding X, Wu X F, et al. GRB 080503 late afterglow re-brightening: Signature of a magnetar-powered merger-nova. *Astrophys J*, 2015, 807: 163–170
- 69 Gao H, Zhang B, Lü H J, et al. Searching for magnetar-powered merger-novae from short GRBS. *Astrophys J*, 2017, 837: 50–58
- 70 Pian E, D’Avanzo P, Benetti S, et al. Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger. *Nature*, 2017, 551: 67–70
- 71 Ackermann M, Ajello M, Asano K, et al. Fermi-LAT observations of the gamma-ray burst GRB 130427A. *Science*, 2014, 343: 42–47
- 72 Piran T, Nakar E. On the external shock synchrotron model for gamma-ray bursts’ GeV emission. *Astrophys J*, 2010, 718: L63–L67
- 73 Tang Q W, Peng F K, Wang X Y, et al. Measuring the bulk lorentz factors of gamma-ray bursts with Fermi. *Astrophys J*, 2015, 806: 194–203
- 74 Waxman E. Cosmological gamma-ray bursts and the highest energy cosmic rays. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 386–389
- 75 Wang X Y, Razzaque S, Mészáros P, et al. High-energy cosmic rays and neutrinos from semirelativistic hypernovae. *Phys Rev D*, 2007, 76: 083009
- 76 Asano K, Guiriec S, Mészáros P. Hadronic models for the extra spectral component in the short GRB 090510. *Astrophys J*, 2009, 705: L191–L194
- 77 Waxman E, Bahcall J. High energy neutrinos from cosmological gamma-ray burst fireballs. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 2292–2295
- 78 Icecube Collaboration. An absence of neutrinos associated with cosmic-ray acceleration in γ -ray bursts. *Nature*, 2012, 484: 351–354
- 79 He H N, Liu R Y, Wang X Y, et al. Icecube nondetection of gamma-ray bursts: Constraints on the fireball properties. *Astrophys J*, 2012, 752: 29–38
- 80 Murase K, Ioka K. TeV-PeV neutrinos from low-power gamma-ray burst jets inside stars. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 121102
- 81 Senno N, Murase K, Mészáros P. Choked jets and low-luminosity gamma-ray bursts as hidden neutrino sources. *Phys Rev D*, 2016, 93: 083003
- 82 Xiao D, Mészáros P, Murase K, et al. Revisiting the contributions of supernova and hypernova remnants to the diffuse high-energy backgrounds: Constraints on very high redshift injection. *Astrophys J*, 2016, 826: 133–140
- 83 Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *Astron J*, 1998, 116: 1009–1038
- 84 Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et al. Measurements of Ω_m and Ω_Λ from 42 high-redshift supernovae. *Astrophys J*, 1999, 517: 565–586
- 85 Wang F Y, Dai Z G, Liang E W. Gamma-ray burst cosmology. *New Astron Rev*, 2015, 67: 1–17
- 86 Dai Z G, Liang E W, Xu D. Constraining Ω_m and dark energy with gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2004, 612: L101–L104
- 87 Liang E, Zhang B. Model-independent multivariable gamma-ray burst luminosity indicator and its possible cosmological implications. *Astrophys J*, 2005, 633: 611–623
- 88 Schaefer B E. The hubble diagram to redshift>6 from 69 gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2007, 660: 16–46
- 89 Wang F Y, Dai Z G, Zhu Z H. Measuring dark energy with gamma-ray bursts and other cosmological probes. *Astrophys J*, 2007, 667: 1–10
- 90 Wang F Y, Dai Z G. Weak gravitational lensing effects on cosmological parameters and dark energy from gamma-ray bursts. *Astron Astrophys*, 2011, 536: A96–A102
- 91 Wang F Y, Dai Z G. An evolving stellar initial mass function and the gamma-ray burst redshift distribution. *Astrophys J*, 2011, 727: L34–L37
- 92 Li H, Xia J Q, Liu J, et al. Overcoming the circular problem for gamma-ray bursts in cosmological global-fitting analysis. *Astrophys J*, 2008, 680: 92–99
- 93 Amati L, Guidorzi C, Frontera F, et al. Measuring the cosmological parameters with the $E_{p,i}$ - E_{iso} correlation of gamma-ray bursts. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2008, 391: 577–584
- 94 Totani T. Cosmological gamma-ray bursts and evolution of galaxies. *Astrophys J*, 1997, 486: L71–L74
- 95 Kistler M D, Yüksel H, Beacom J F, et al. An unexpectedly Swift rise in the gamma-ray burst rate. *Astrophys J*, 2008, 673: L119–L122
- 96 Wang F Y. The high-redshift star formation rate derived from gamma-ray bursts: Possible origin and cosmic reionization. *Astron Astrophys*, 2013, 556: A90–A96
- 97 Qin S F, Liang E W, Lu R J, et al. Simulations on high-z long gamma-ray burst rate. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2010, 406: 558–565
- 98 Deng C M, Wang X G, Guo B B, et al. Cosmic evolution of long gamma-ray burst luminosity. *Astrophys J*, 2016, 820: 66–76

- 99 Yu H, Wang F Y, Dai Z G, et al. An unexpectedly low-redshift excess of Swift gamma-ray burst rate. *Astrophys J*, 2015, 218(Suppl Series): 13–24
- 100 Petrosian V, Kitanidis E, Kocevski D. Cosmological evolution of long gamma-ray bursts and the star formation rate. *Astrophys J*, 2015, 806: 44–52
- 101 Tsvetkova A, Frederiks D, Golenetskii S, et al. The Konus-Wind catalog of gamma-ray bursts with known redshifts. I. Bursts detected in the triggered mode. *Astrophys J*, 2017, 850: 161–187
- 102 Lynden B D. A method of allowing for known observational selection in small samples applied to 3CR quasars. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1971, 155: 95–118
- 103 Liang E, Zhang B, Virgili F, et al. Low-luminosity gamma-ray bursts as a unique population: Luminosity function, local rate, and beaming factor. *Astrophys J*, 2007, 662: 1111–1118
- 104 Sun H, Zhang B, Li Z. Extra-galactic high-energy transients: Event rate densities and luminosity functions. *Astrophys J*, 2015, 812: 33–50
- 105 Wang F Y, Dai Z G. High-redshift star formation rate up to $z \approx 8.3$ derived from gamma-ray bursts and influence of background cosmology. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2009, 400: L10–L14
- 106 Virgili F J, Zhang B, Nagamine K, et al. Gamma-ray burst rate: High-redshift excess and its possible origins. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2011, 417: 3025–3034
- 107 Wu X F, Dai Z G, Huang Y F, et al. Gamma-ray bursts: Polarization of afterglows from two-component jets. *M N Royal Astron Soc*, 2005, 357: 1197–1204
- 108 Lan M X, Wu X F, Dai Z G. Testing models for the shallow decay phase of gamma-ray burst afterglows with polarization observations. *Astrophys J*, 2016, 826: 128–133
- 109 Lan M X, Wu X F, Dai Z G. Polarization evolution of early optical afterglows of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2016, 816: 73–83
- 110 Zhang B, Yan H. The internal-collision-induced magnetic reconnection and turbulence (ICMART) model of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2011, 726: 90–112
- 111 Dai Z G. Relativistic wind bubbles and afterglow signatures. *Astrophys J*, 2004, 606: 1000–1005
- 112 Coburn W, Boggs S E. Polarization of the prompt γ -ray emission from the γ -ray burst of 6 December 2002. *Nature*, 2003, 423: 415–417
- 113 Yonetoku D, Murakami T, Gunji S, et al. Detection of gamma-ray polarization in prompt emission of GRB 100826A. *Astrophys J*, 2011, 743: L30–L34
- 114 Steele I A, Mundell C G, Smith R J, et al. Ten per cent polarized optical emission from GRB090102. *Nature*, 2009, 462: 767–769
- 115 Mundell C G, Kopač D, Arnold D M, et al. Highly polarized light from stable ordered magnetic fields in GRB 120308A. *Nature*, 2013, 504: 119–121
- 116 Wiersema K, Covino S, Toma K, et al. Circular polarization in the optical afterglow of GRB 121024A. *Nature*, 2014, 509: 201–204
- 117 Longo M J. New precision tests of the Einstein equivalence principle from SN1987A. *Phys Rev Lett*, 1988, 60: 173
- 118 Krauss L M, Tremaine S. Test of the weak equivalence principle for neutrinos and photons. *Phys Rev Lett*, 1988, 60: 176
- 119 Gao H, Wu X F, Mészáros P. Cosmic transients test Einstein's equivalence principle out to GeV energies. *Astrophys J*, 2015, 810: 121–125
- 120 Wei J J, Wu X F, Gao H, et al. Limits on the neutrino velocity, Lorentz invariance, and the weak equivalence principle with TeV neutrinos from gamma-ray bursts. *J Cosmol Astro-Part Phys*, 2016, 8: 31–39
- 121 Wei J J, Zhang B B, Shao L, et al. A new test of Lorentz invariance violation: The spectral lag transition of GRB 160625B. *Astrophys J*, 2017, 834: L13–L18
- 122 Schaefer B E. Severe limits on variations of the speed of light with frequency. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 4964–4966
- 123 Zhang B, Chai Y T, Zou Y C, et al. Constraining the mass of the photon with gamma-ray bursts. *J High Energy Astrophys*, 2016, 11: 20–28
- 124 Produit N, Bao T W, Batsch T, et al. Design and construction of the POLAR detector. 2017, arXiv: 1709.07191
- 125 Xiong S, Produit N, Wu B. Expected performance of a hard X-ray polarimeter (POLAR) by Monte Carlo simulation. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2009, 606: 552–559
- 126 Xiong S, Wang Y, Li Z, et al. Overview of the GRB observation by POLAR. *Int Cosmic Ray Conf*, 2017, 301: 640–647
- 127 Li T P. Science with the hard X-Ray modulation telescope. *Inter J Modern Phys D*, 2013, 22: 1360005
- 128 Götz D, Paul J, Basa S, et al. SVOM: A new mission for gamma-ray burst studies. *Am Institut Phys Confer Series*, 2009, 1133: 25–30
- 129 Yuan W, Osborne J, Zhang C, et al. Exploring the dynamic X-ray universe: Scientific opportunities for the Einstein probe mission. *Chin J Space Sci*, 2016, 36: 117–138
- 130 Zhang S N, Feroci M, Santangelo A, et al. eXTP: Enhanced X-ray timing and polarization mission. *Space Tele Instrum 2016: Ultrav Gamma Ray*, 2016, 9905: 99051Q



戴子高

1993年6月于南京大学获理学博士学位,现为南京大学天文与空间科学学院教授、博士生导师、中国天文学会副理事长、国务院学位委员会学科评议组物理学、天文学组成员.研究领域为中子星、脉冲星、伽玛射线暴、伽玛暴宇宙学、快速射电暴、超亮超新星等.1998年获国家杰出青年科学基金,2002年被聘为“长江学者奖励计划”特聘教授.主持过多项国家重点和重大基金项目,获得多项国家级科技奖励.

Summary for “如何理解高能伽玛射线暴?”

How to understand high-energy gamma-ray bursts?

Zi-Gao Dai^{1*}, Xue-Feng Wu² & En-Wei Liang³¹ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China;² Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China;³ Guangxi Key Laboratory for Relativistic Astrophysics, Department of Physics, Guangxi University, Nanning 530004, China

* Corresponding author, E-mail: dzg@nju.edu.cn

Gamma-ray bursts (GRBs) are short-duration flashes of gamma rays occurring at cosmological distances and the most violent explosive phenomena since the cosmic big bang. GRBs were accidentally discovered by Vela military satellites of United States in 1967. The BATSE instrument onboard the Compton Space Gamma-Ray Observatory found two types of GRBs, long-duration ($T_{90} > 2\text{s}$) and short-duration ($T_{90} < 2\text{s}$). In 1997, the BeppoSAX satellite for the first time made precise localization of long GRBs, leading to the discoveries of multi-wavelength afterglows, host galaxies and cosmological redshifts of long GRBs. These milestone observations were selected by *Science* as one of the top ten scientific breakthroughs of the year. In 1999, long GRBs were found to be associated with the birth of stellar mass black holes. In 2003, the HETE-II satellite discovered the first direct association of a long GRB with a type Ic supernova, confirming that long GRBs are linked to the core collapse of massive stars. *Science* ranked these two major advances as one of the world's top ten scientific breakthroughs of the year in 1999 and 2003, respectively. In 2005, the Swift satellite made the first accurate localization of short GRBs, leading to the discoveries of afterglows, host galaxies and redshifts of short GRBs. These observations provide indirect evidence that short GRBs originate from mergers of binary systems of compact objects (at least including one neutron star) at cosmological distances. In particular, on 2017 August 17, the LIGO/Virgo gravitational wave (GW) detectors, for the first time, discovered a GW event from a binary neutron star (BNS) merger, GW170817. About 1.74 s after the merger, Fermi/GBM detected a short gamma-ray burst (named GRB170817A). Subsequently, many ground-based and space-based telescopes detected X-ray, ultraviolet, optical, nearly infrared, and radio counterparts to GW170817, especially including a multi-wavelength kilonova (named AT2017gfo). These discoveries mark the beginning of a new era of multi-messenger astronomy. To summarize, all the observations have shown that long bursts originate from the core collapse of massive stars and short bursts originate from the mergers of binary compact objects (at least including one neutron star); besides prompt gamma-ray emission, the sources of GRBs produce X-ray, optical and radio afterglows in timescales of weeks, months and years after the burst trigger, respectively. Theoretically, prompt gamma-ray emissions of GRBs are thought to arise from some energy dissipation processes in the interiors of relativistic jets and multi-wavelength afterglows arise from forward shocks due to collisions between the jets and their ambient media. Therefore, GRBs are not only astronomical laboratories of studying extremely physical phenomena (e.g., newborn compact objects including stellar-mass black holes and neutron stars, gravitational waves, ultra-high-energy cosmic rays, and high-energy neutrinos) and of testing the basic physical principles with high accuracy, but also become an important probe of the star formation and evolution in the early universe, high-redshift galaxies, and cosmology. GRBs now are a multidisciplinary field (including astronomy, cosmology, and physics) and thus one of the most competitive fundamental research fields. In this paper, we review recent researches of GRBs and electromagnetic counterparts to gravitational waves, by focusing on the relevant key scientific issues, and discuss how to seize the opportunity to plan the interdisciplinary strategy based on the development trend and the research foundation in China, to maximize domestic scientific equipment achievements, and to enhance Chinese international influence in this field.

gamma-ray bursts, high energy astrophysics, gravitational waves, multi-messenger, fundamental physics

doi: 10.1360/N972018-00034