

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.01.23

# 伽马暴GRB 221009A的观测角限制

林一清<sup>1,2</sup>

(1. 福建省光电技术与器件重点实验室, 厦门理工学院, 厦门, 福建361024; 2. 光电与通信工程学院, 厦门理工学院, 厦门, 福建361024)

**摘要:** 伽马射线暴GRB 221009A, 被称为“史上最亮”(BOAT), 在所有波长下被许多卫星设备探测到。它的红移 $z = 0.151$ , 是迄今为止观测到的具有最高各向同性能的伽马暴 $E \sim 1.5 \times 10^{48} \text{ J}$ 。伽马暴的辐射起源于相对论喷流, 因此它们的各项同性能可能取决于喷流的内禀能量、喷流的张角和相对喷流的观测角。这里我们根据长暴的 $E_{\text{p},i} - E_{\text{iso}}$ 关系和 $\Gamma - E_{\text{iso}}$ 关系估算了GRB 221009A的观测视线与喷流边缘的夹角 $\theta'_{\text{obs}}$ , 和洛伦兹因子 $\Gamma$ 。我们的结果表明 $\Gamma = (4.23 \pm 2.81) \times 10^3$ , 观测角 $\theta'_{\text{obs}} = 0.03 \pm 0.01^\circ$ 。这个结果表明对于GRB 221009A, 我们的观测视线和喷流边缘的夹角非常小, 即: GRB 221009A是正轴观测, 这可能是GRB 221009A具有最高各向同性能的原因之一。

**关键词:** 伽马射线暴; 喷流; 相对论过程

**中图分类号:** P172.3 **文献标识码:** A

## 1 引言

伽马射线暴 (Gamma-Ray Bursts, GRBs) 是恒星层次、来自于宇宙空间 (红移分布范围从 $z = 0.0085$ 到 $z = 9.4$ ) 的伽马射线在短时间内忽然增强的剧烈爆发现象。经典的GRBs分类是简单地根据GRBs瞬时辐射的持续时间 $T_{90}$  ( $T_{90}$ 指光子数累积数从5%到95%), 把GRBs分为长暴( $T_{90} > 2\text{s}$ )和短暴( $T_{90} < 2\text{s}$ )两种类型<sup>[1]</sup>。长短暴的瞬时辐射可能分别由大质量恒星塌缩和双致密星(双中子星或中子星和黑洞)并合所发射的相对论的准直外流(喷流)产生。观测上, 伽马暴的各向同性能分布几乎跨度了八个量级 ( $E_{\text{iso}}$ 从 $\sim 10^{39} \text{ J}$ 到 $\geq 10^{47} \text{ J}$ ), 且 $E_{\text{iso}}$ 通常跟随着一个简单的幂律分布, 这个幂律分布在高于 $(1 - 3) \times 10^{47} \text{ J}$ 处有一个截断<sup>[2]</sup>。在55年对GRBs的观测中, GRB 170817A具有最低的各向同性能 $E_{\text{iso}} \sim 10^{39} \text{ J}$ , 几次能量最大的爆发 $E_{\text{iso}}$ 达到 $\sim 10^{47} \text{ J}$ 。但是, 一直不能确认是否存在各向同性能超过 $\sim 10^{48} \text{ J}$ 的GRBs, 直到GRB 221009A的观测<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2012-08-07; 修回日期: 2012-11-29

资助项目: 福建自然科学基金(2021J011215); 厦门市青年创新项目(3502Z20206077)

通讯作者: 林一清, yqlin@xmut.edu.cn

GRB 221009A是迄今观测到的具有最高各向同性能( $E_{\text{iso}} \sim 10^{48} \text{J}$ )<sup>[3]</sup>的伽马射线暴, 被称为“史上最亮”(“brightest-of -all-time”, 简称BOAT), 打破了最高光子能量、最亮伽马射线等宇宙中人类观测伽马射线暴的多项记录。它被多个卫星在所有的波段上探测到, 如: Fermi/GBM (GCN31565)<sup>[4]</sup>, Fermi-LAT (GCN 32637)<sup>[5]</sup>, Swift/BAT/XRT (GCN 32632)<sup>[6]</sup>, Konus-Wind (GCN 31604)<sup>[7]</sup>, 以及中科院高能所的三大科学装置, 慧眼卫星(Insight- HXMT)<sup>[8]</sup>, 高能爆发探索者(HEBS)(GCN 32751)<sup>[9]</sup>和中国高海波宇宙线观测站(LHAASO, 拉索) (GCN 32677)<sup>[10]</sup>。尽管GRB 221009A是有史以来探测到的具有最高各向同性能的伽马暴, 但是它的瞬时辐射和余辉特征都和已知的长暴分布延伸到高能阶段一致, 意味着它仍然可能是一颗大质量恒星死亡的结果, 该恒星在驱逐其外层后塌缩形成黑洞或者磁星的典型的释能机制<sup>[11]</sup>。这次塌缩产生的伽马射线爆发包含了一个狭窄的、高度准直的喷流(张角 $\sim 1.0^\circ$ ), 周围环绕着更广泛的气体外流<sup>[3,11]</sup>。作为有史以来探测到的最亮的, 离我们相对较近( $z = 0.151$ )的GRB, GRB 221009A可能提供一个揭示隐藏在那些不那么亮的爆发中的一些有趣特征的机会<sup>[11]</sup>。

根据传统的观点, GRBs的辐射来源于相对论喷流, 并且不管长暴还是短暴都是准直的, 长暴具有典型的张角 $\sim 5^\circ$ , 但是对于相对论喷流是如何发射和准直的, 喷流的几何结构和成分仍是一个长期存在的迷<sup>[3]</sup>。人们普遍认为长暴具有比较高的各向同性能和比较小的喷流张角, 其核心区域比外部区域要明亮的多。GRBs表现出来的明亮度取决于喷流的内禀能量、喷流的张角和相对喷流的观测角。Laskar等人2023年的研究揭示GRB221009A的异常亮度可能是由于喷流非寻常的准直程度, 而不是本质上的高能量<sup>[12]</sup>, 即: 不是喷流内禀的高能量导致GRB 221009A的异常亮度, 比较窄的喷流张角 $\theta_j$ 和比较小的相对喷流的观测角 $\theta_{\text{obs}}$ 才是可能导致GRB 221009A异常亮度的原因。有多个工作提出GRB 221009A的喷流张角和相对喷流的观测角比较小<sup>[12-17]</sup>, 如: Zhang等人2024年提出张角 $\theta_j \sim 0.6^\circ$ 的铅直喷流(**pencil-beam jet**)<sup>[17]</sup>, An等人2023年提出喷流张角 $\theta_j \sim 0.7^\circ$ <sup>[3]</sup>, Cao等人2023年提出这个辐射可以用一个半张角为 $\theta_j \sim 0.8^\circ$ 的相对论喷流模型来解释<sup>[15]</sup>, 等等。综上所述, GRB 221009A的辐射可能来源于迄今为止所观测到的最小的喷流张角。上述文献也考虑了喷流并没有沿着观测视线的情况, 提出相对喷流的观测角可能很小, 但是并没有给出具体确切的数值。Zou等人2018年根据短暴的静止系的峰值能量 $E_{p,i}$ 和各向同性能 $E_{\text{iso}}$ 之间的关系式 $E_{p,i} - E_{\text{iso}}$ 和洛伦兹因子 $\Gamma$ 与各向同性能 $E_{\text{iso}}$ 之间的关系式 $\Gamma - E_{\text{iso}}$ 估算了GRB 170817A的观测角<sup>[18]</sup>。这里我们用同样的方法估算GRB 221009A的观测视线和喷流边缘线的夹角 $\theta'_{\text{obs}}$ , 和洛伦兹因子 $\Gamma$ 。

## 2 理论方法

伽马射线暴能谱 $\nu f_\nu$ 的峰值能量 $E_p$ 是GRBs一个很重要的物理量, 它与一些观测量(如: 流量, 光度或者各向同性能)之间存在着相关性, 如: Amati等人2002年发现各向同性能 $E_{\text{iso}}$ 和静止系中峰值能量 $E_{p,i}$  ( $E_{p,i} = E_p(1+z)$ )之间存在紧密的联系 $E_{p,i} = C(\frac{E_{\text{iso}}}{10^{48} \text{J}})^\eta$ <sup>[19]</sup>,

其中 $C$ 和 $\eta$ 为比例系数。由于不同物理起源的GRBs遵循不同的轨迹，所以在研究暴的能量特征时这个关系经常被做为一种独特的分类方案<sup>[20]</sup>。近期Sun等人收集了从1997年2月到2019年1月已知红移的45个短暴和275个长暴数据再次拟合了Amati关系,得到具有 $1\sigma$ 不确定性的拟合参数<sup>[21]</sup>:

$$\log E_{p,i} = C_1 + C_2 \log E_{iso} \quad (1)$$

短暴 $C_1 = -15.61_{-2.14}^{+2.51}$ ,  $C_2 = 0.36_{-0.05}^{+0.04}$ , 长暴 $C_1 = -17.83_{-0.98}^{+0.93}$ ,  $C_2 = 0.39 \pm 0.02$ ,  $E_{p,i}$ 的单位为keV.

另外, 洛伦兹因子 $\Gamma$ 作为理解GRBs物理的一个重要参数, 它与GRBs的一些观测量, 如峰值能量 $E_p$ 、各向同性能 $E_{iso}$ 和各向同性光度 $L_{iso}$ 之间也存在相关性, Liang等人2010年得到洛伦兹因子 $\Gamma$ 和各向同性能 $E_{iso}$ 间的关系式<sup>[22]</sup>:

$$\log \Gamma = C_3 + C_4 \log E_{iso,45} \quad (2)$$

其中 $C_3 = 2.26 \pm 0.03$ ,  $C_4 = 0.25 \pm 0.03$ , 它们之间的相关系数 $\kappa = 0.91$ 。  $E_{iso,45} = E_{iso}/10^{45} \text{ J}$ 。

考虑一个均匀且有陡变边缘模型的偏轴喷流, 正轴的各向同性能 $E_{iso,on}$  和偏轴时各向同性能 $E_{iso,off}$ 的关系, 以及正轴的峰值能量 $E_{p,on}$ 和偏轴时峰值能量 $E_{p,off}$ 之间的关系分别为<sup>[23]</sup>:

$$E_{p,off} = a^{-1} E_{p,on}, E_{iso,off} = a^{-3} E_{iso,on} \quad (3)$$

设中心机制出来的喷流的半张角为 $\theta_j$ ,  $\theta_{obs}$ 为视线与喷流轴间的夹角,  $\theta'_{obs} \equiv \theta_{obs} - \theta_j$ 是偏轴观测视线和喷流边缘之间的夹角。则当洛伦兹因子 $\Gamma \gg 1$ , 且 $\theta'_{obs} \ll 1$ 时,

$$a = \frac{1 - \beta \cos \theta'_{obs}}{1 - \beta} \simeq 1 + (\Gamma \theta'_{obs})^2 \quad (4)$$

其中 $\beta = \sqrt{1 - 1/\Gamma^2}$ .

我们分别用观测的各向同性能 $E_{iso}$ 和峰值能量 $E_p$ 表示偏轴的各向同性能 $E_{iso,off}$ 和峰值能量 $E_{p,off}$ , 得到:

$$\log \Gamma = C_3 + \frac{C_4}{1 - 3C_2} (3C_1 + 156C_2 - 3 \log E_p + \log E_{iso,45}) \quad (5)$$

$$\log a = \frac{1}{1 - 3C_2} (C_1 + 52C_2 - \log E_p + C_2 \log E_{iso,45}) \quad (6)$$

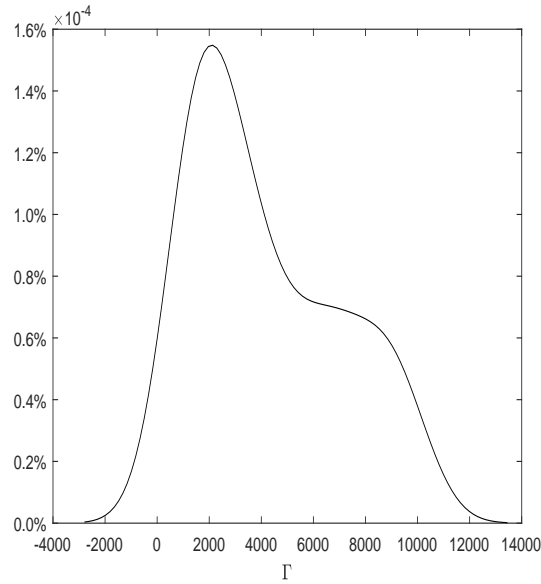
这样, 我们就可以在已知GRBs各向同性能和峰值能量的情况下, 根据公式(5)和(6)计算出洛伦兹因子 $\Gamma$ 和 $a$ , 再带入公式(4)计算出偏轴观测视线与喷流边缘之间的夹角 $\theta'_{obs}$ 。

表 1 GRB 221009A的观测数据

GRB	z	$T_{90}$	$E_{\text{iso}}/(10^{45}\text{J})$	$E_p/\text{keV}$	ref
221009A	0.151	325.8	$1500 \pm 200$	$1247.4 \pm 91.2$	3,17

## 2.1 观测数据和数值结果

GRB 221009A观测的各向同性能 $E_{\text{iso}}$ 和峰值能量 $E_p$ 如表1中所示。对系数 $C_1, C_2, C_3, C_4$ , 根据它们的中心值和误差, 按照高斯分布随机选取一系列数值(如各自选取1000个数值), 而 $E_{\text{iso}}$ 和 $E_p$ 也根据它们观测的中心值和误差, 选取相同数量的数值, 带入方程(5)和方程(6)进行计算, 得到一系列的洛伦兹因子 $\Gamma$ 和 $a$ , 再把结果带入公式(4)得到一系列偏轴观测视线与喷流边缘的夹角 $\theta'_{\text{obs}}$ , 分别做出 $\Gamma$ 和 $\theta'_{\text{obs}}$ 的分布如图1和图2所示。而这一系列 $\Gamma$ 的平均值为 $4.23 \times 10^3$ , 误差为 $2.81 \times 10^3$ ,  $\theta'_{\text{obs}}$ 的平均值为 $0.03^\circ$ , 误差为 $0.01^\circ$ , 即: 我们的计算结果表明 $\Gamma = (4.23 \pm 2.81) \times 10^3$ ,  $\theta'_{\text{obs}} = 0.03 \pm 0.01^\circ$ 。

图 1 GRB 221009A的洛伦兹因子 $\Gamma$ 的分布图。

## 3 讨论

GRB 221009A在瞬时阶段高能发射的异常强度可能是不同因素的结果, 包括一个大的能量可用于 $E_{\text{iso}} \sim 10^{48} \text{ J}$ 的能量爆发(即: 喷流的内禀能量), 比较小的喷流张角, 一个GRB喷流轴于观测者视线间相对较小的观测角 $\theta_{\text{obs}}$ , 以及它在所有伽马暴中属于离地

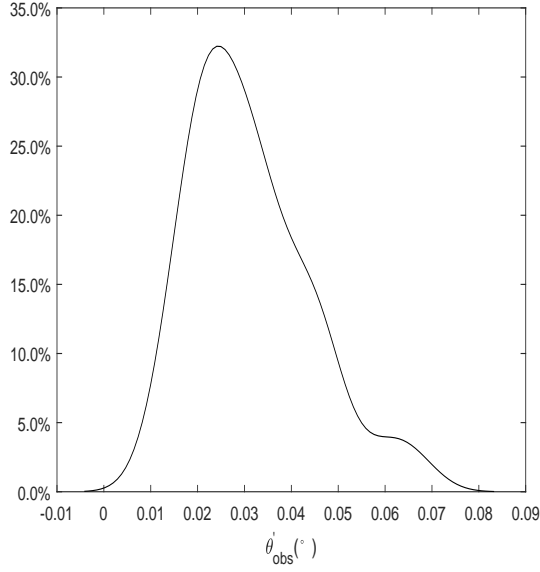


图 2 GRB 221009A的偏轴观测视线和喷流边缘线之间的夹角 $\theta'_{\text{obs}}$ 的分布

球较近的 ( $z = 0.151$ )。而Laskar等人2023年的研究排除了喷流内禀的高能量导致GRB 221009A异常亮度的原因，所以喷流的张角 $\theta_j$ 和相对喷流的观测角 $\theta_{\text{obs}}$ 也许是解释GRB 221009A异常亮度的两个重要因素。

**GRBs**静止系的峰值能量 $E_{\text{p},i}$ 与一些观测量，如：流量 $F$ ，各向同性光度 $L_{\text{iso}}$ 或者各向同性性能 $E_{\text{iso}}$ 之间都存在着相关性。同时，洛伦兹因子 $\Gamma$ 对于理解**GRBs**物理也是一个很重要的参数。理论上说，预测的 $E_{\text{p},i}$ 不仅仅依赖于各向同性光度 $E_{\text{iso}}$ ，也依赖于外流初始的洛伦兹因子 $\Gamma$ <sup>[22]</sup>。在这个工作中，我们根据长暴的 $E_{\text{p},i} - E_{\text{iso}}$ 和 $\Gamma - E_{\text{iso}}$ 关系估算GRB 221009A的观测视线和喷流边缘的夹角 $\theta'_{\text{obs}}$ 和洛伦兹因子 $\Gamma$ ，得到 $\Gamma = (4.23 \pm 2.81) \times 10^3$ ， $\theta'_{\text{obs}} = 0.03 \pm 0.01^\circ$ 。本文用长暴的 $E_{\text{p},i} - E_{\text{iso}}$ 和 $\Gamma - E_{\text{iso}}$ 关系作为估算的依据。也可以用其它观测量之间的关系以及它们与 $\Gamma$ 之间的关系对偏轴观测角进行计算。我们也用 $\Gamma - L_{\text{iso}}$ <sup>[24]</sup>关系和 $E_{\text{p},i} - L_{\text{iso}}$ <sup>[25]</sup>关系对GRB 221009A的 $\theta'_{\text{obs}}$ 和 $\Gamma$ 进行估算，结果为 $\theta'_{\text{obs}} = 0.02 \pm 0.01^\circ$ ， $\Gamma = (2.31 \pm 0.65) \times 10^3$ 。两种计算结果基本上一致。这个结果表明观测视线与喷流边缘的夹角很小，这说明对GRB 221009A的观测是正轴的，而这可能是GRB 221009A具有最高各向同性性能的原因之一。当然，也可以用 $L_{\text{iso}} - E_{\text{p},i} - \Gamma$ <sup>[22]</sup>关系来代替 $\Gamma - E_{\text{iso}}$ 或者 $\Gamma - L_{\text{iso}}$ 关系，估算GRB 221009A的观测角和洛伦兹因子。

为了简单起见，我们用 $\theta'_{\text{obs}} \equiv \theta_{\text{obs}} - \theta_j$ 作为偏轴的框架变换<sup>[18]</sup>。实际上，更细致的计算应该包括 $\theta_j$ 内不同角度的影响以及相应的到达时间。同时，我们也没有考虑结构喷流的情况。如果考虑结构式喷流，要求不同的模型并区分对于这个暴合适的模型，这可能不是决定性的。所以，如果考虑到喷流张角 $\theta_j$ 和喷流的结构，那么 $\theta'_{\text{obs}}$ 仍然可以作为一个有效的偏轴

角。

多个研究提出了GRB 221009喷流的小张角模型, Zhang等认为这种张角很小的铅直喷流可能存在于大量的GRB样本中, 但却逃脱了检测, 在余辉阶段的后期也可能探测不到<sup>[17]</sup>。在GRB喷流模型结构的假设下, GRB 221009A的喷流张角比较小意味着从地球上可以看到结构喷流中最亮的核心, 结合该暴的低红移解释了该暴的高流量和高各向同性<sup>[15]</sup>。我们可以预测有更多的各向同性能 $E_{\text{iso}} \geq 10^{48}$  J的GRBs位于更高红移处 ( $z > 0.15$ ), 但是它们的红移没有被测出来, 从而 $E_{\text{iso}}$ 未知, 或者也有可能不是所有的GRBs都有这样一个狭窄明亮的核心<sup>[3]</sup>。

## 4 致谢

我感谢华中科技大学邹远川教授的积极讨论。特别感谢匿名审稿老师的仔细评审以及提出来的宝贵意见改进本文。

### 参考文献:

- [1] Kouveliotou C, Meegan C A, Fishman G J, et al. *ApJL*, 1993, 413:101
- [2] Lan L, Gao H, Xiao S, et al. *ApJL*, 2023, 949:4
- [3] An Z H, Antier S, Bi X Z, et al. <https://arxiv.org/pdf/2303.01203.pdf>, astro-ph/2303.01203, 2003
- [4] Lesage S. *GRB Coordinates Network*, 2022, 31565: 1
- [5] Bissaldi E, Omodei N, Fermi-LAT Team. *GRB Coordinates Network*, 2022, 32637: 1
- [6] Dichiaro S, Gropp J D, Kennea J A, et al. *GRB Coordinates Network*, 2022, 32632: 1
- [7] Svinkin D, Frederiks D, Ulanov M, et al. *GRB Coordinates Network*, 2022, 31604: 1
- [8] Tan W J, Li C K, Ge M Y, et al. *The Astronomer's Telegram*, 2022, 15660: 1
- [9] Liu J C, Zhang Y Q, Xiong S L, et al. *GRB Coordinates Network*, 2022, 32751: 1
- [10] Huang Y, Hu S, Chen S, et al. *GRB Coordinates Network*, 2022, 32677: 1
- [11] Song X Y, Zhang S Z. *ApJ*, 2023, 957:31
- [12] Laskar T, Alexander K D, Margutti R, et al. *ApJL*, 2023, 946:23
- [13] Bright J S, Rhodes L, Farah W, et al. *Nature Astronomy*, 2023, 7:986
- [14] Negro M, Di Lalla N, Omodei N, et al. *ApJL*, 2023, 946:21
- [15] Cao Z, Aharonian F, LHAASO Collaboration, et al. *Science*, 2023, 380:1390
- [16] Tavani M, Piano G, Bulgarelli A, et al. *ApJL*, 2023, 956:23
- [17] Zhang B, Wang X Y, Zheng J H, *Journal of High Energy Astrophysics*, 2024, 41:42
- [18] Zou Y C, Wang F F, Moharana R, et al. *ApJL*, 2018, 852:1
- [19] Amati L, Frontera F, Tavani M, et al. *A&A*, 2002, 390:81
- [20] Zhang B, Zhang B B, Virgili F J, et al. *ApJ*, 2009, 703:1696
- [21] Sun H, Wang C W, Yang J, et al. <https://arxiv.org/pdf/2307.05689.pdf>, astro-ph/2307.05689, 2023
- [22] Liang E W, Yi S X, Zhang J, et al. *ApJ*, 2010, 725:2209
- [23] Rybicki, G. B. Lightman, A. P. 1979, *Radiative processes in astrophysics* (New York: Wiley-Interscience)
- [24] Lu J, Zou Y C, Lei W H, et al. *ApJ*, 2012, 751:49

[25] Ghirlanda G, Ghisellini G, Firmani C. *New Journal of Physics*, 2006, 7:123

## The viewing angle of GRB 221009A

LIN Yi-qing<sup>1,2</sup>

(1. *Fujian Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Devices, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China*; 2. *School of Opto-electronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China*)

**Abstract:** Long gamma-ray burst (GRB) GRB 221009A, known as the "brightest-of-all-time" (BOAT), triggered all satellites equipped for transient detection in all wavelengths. Relative to other GRBs ever detected by the humanity in the past half century, its fluence and peak flux are the highest. At a redshift of  $z = 0.151$ , GRB 221009A holds the record of the highest ever measured isotropic energy  $E_{\text{iso}} \sim 1.5 \times 10^{48} \text{J}$ . Prompt gamma-ray emission is thought to be the result of a highly relativistic and collimated jet with a small inclination angle with respect to the Earth. Thus, the measured isotropic energy may depend on the intrinsic energy of the jet, the opening angle of the jet, and the viewing angle of the relative jet. Here we use the relations  $E_{\text{p},i} - E_{\text{iso}}$  and  $\Gamma - E_{\text{iso}}$  of the long burst to determine the viewing angle  $\theta'_{\text{obs}}$  and the Lorentz factor  $\Gamma$  of long GRB 221009. Our results show  $\Gamma = 194.34 \pm 13.15$  and  $\theta'_{\text{obs}} = 0.86 \pm 0.06^\circ$  for long GRB 221009A. The result indicates that for GRB 221009A, the viewing angle between the line of sight and the jet edge of GRB 221009A is very small. That is, GRB 221009A may be a positive axis observation, which may be one of the reasons that GRB 221009A has the highest  $E_{\text{iso}}$ .

**Key words:** gamma-ray bursts; jets; relativistic processes