

# Fermi耀变体的 $\gamma$ 射线多波段辐射与射电辐射的关系\*

庹满先<sup>1</sup> 邓进杰<sup>1</sup> 杨江河<sup>1,2†</sup> 张月莲<sup>1</sup> 陈秀慧<sup>1</sup> 汪胜辉<sup>1</sup>  
曲孝海<sup>1</sup> 聂建军<sup>1</sup> 樊军辉<sup>2‡</sup>

(1 湖南文理学院数理学院 常德 415000)

(2 广州大学天体物理中心 广州 510006)

**摘要** 从Fermi 3期源表(3FGL)中选择了一个含935个耀变体(blazar)的样本, 包括415个平谱射电源(Flat Spectrum Radio Quasar, FSRQ), 520个蝎虎天体(BL Lac object, BL Lac), 其中高同步峰BL Lac (HBL) 233个, 中同步峰BL Lac (IBL) 144个, 低同步峰BL Lac (LBL) 143个。研究了总样本、FSRQ、BL Lac及其子类HBL、LBL的射电1.4 GHz与 $\gamma$ 射线在0.1、0.3、1、3、10 GeV处辐射流量密度的关系。结果显示: 所有样本的射电1.4 GHz与5个波段 $\gamma$ 射线的辐射流量都有强相关, 相关系数在0.48–0.81之间, 机会概率均小于 $10^{-4}$ ; 对于不同的样本相关系数随着 $\gamma$ 射线辐射频率的变化有不同的变化趋势, 所有样本在5个波段的相关系数平均值随 $\gamma$ 射线频率的增加而减小。该结果暗示, 随着频率的升高, blazar的 $\gamma$ 射线辐射主导机制在发生变化, 在相同频率处, 不同类型天体的辐射主导机制存在差异; HBL的 $\gamma$ 射线辐射主要由同步自康普顿主导, 而LBL的其他成份比HBL的更复杂; FSRQ的 $\gamma$ 射线起源较BL Lac的复杂。

**关键词** 星系: 活动, 蝎虎天体: 普通, 类星体: 普通, 伽马射线: 星系, 辐射机制: 非热, 方法: 统计

中图分类号: P157; 文献标识码: A

## 1 引言

由于耀变体(blazar)具有一些极端的观测性质, 如偏振度较高且变化幅度大、高光度、快速光变、视超光速运动及高能 $\gamma$ 射线辐射等, 因而成为活动星系核(Active Galactic Nuclei, AGNs)的一个极端子类<sup>[1–9]</sup>。按照发射线强弱的不同, blazar可分为平

2019-09-09收到原稿, 2020-01-20收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11733001、U1431112、U1531245、11403006), 广东省自然科学基金项目(2017 A030313011、2019 B030302001), 广东省和广州市天体物理重点学科, 湖南省自然科学基金项目(2015JJ2104), 湖南省教育厅研究基金项目(16C1081、19C1263), 湖南文理学院博士科研启动基金项目(19BSQD38)资助

† yjianghe@163.com

‡ fjh@gzhu.edu.cn

谱射电源(Flat Spectrum Radio Quasar, FSRQ)和蝎虎天体(BL Lac object, BL Lac). FSRQ有强发射线, 而BL Lac没有或仅有很弱的发射线.

Blazar在射电到 $\gamma$ 射线波段都有很强的辐射, 它们各个波段的连续谱很复杂, 不能用单个幂律谱来描述. Blazar的能谱分布(Spectral Energy Distribution, SED)具有双峰结构, 第1个峰位于远红外到软X射线之间, 其主要来源为同步辐射; 第2个峰位于MeV到TeV波段<sup>[10-13]</sup>, 主要由逆康普顿辐射产生, 一些BL Lac天体的第2个峰可用强子模型很好地解释<sup>[14-16]</sup>. 根据同步辐射峰频的高低, blazar可分为3类<sup>[3, 10]</sup>, 即: 低同步峰频blazar (LSP), 中同步峰频blazar (ISP)和高同步峰频blazar (HSP). 对于BL Lac天体, 该3类分别为LBL (低同步峰BL Lac)、IBL (中同步峰BL Lac)和HBL (高同步峰BL Lac). 本文所使用的分类主要来自文献[3], 其以同步峰频( $\nu_p/\text{Hz}$ )的分类标准为: LSP,  $\lg(\nu_p/\text{Hz}) < 14$ ; ISP,  $14 < \lg(\nu_p/\text{Hz}) < 15.3$ ; HSP,  $\lg(\nu_p/\text{Hz}) > 15.3$ .

研究多波段辐射之间的关系(如: 2个波段的流量、光度或某个参数之间的关系)是弄清楚blazar辐射机制及波段之间辐射起源关联的有效方法之一<sup>[17-18]</sup>. 为了弄清blazar的高能 $\gamma$ 射线辐射机制以及 $\gamma$ 射线辐射与低能多波段辐射机制之间的关联, 不少作者研究了高能 $\gamma$ 射线波段与低能多波段辐射之间的关系. 但由于受样本量及观测设备精度的限制, 所得结果并不完全一致. 如: Dondi等<sup>[19]</sup>用EGRET (Energetic Gamma Ray Experimental Telescope)数据研究了 $\gamma$ 射线波段和较低能波段辐射的关系, 发现 $\gamma$ 射线与射电光度相关较其与其他波段(如光学和X射线波段)光度关系更好; Xie等<sup>[20]</sup>收集了16个有 $\gamma$ 射线噪blazar天体的近红外和 $\gamma$ 射线辐射流量, 发现 $\gamma$ 射线与红外波段的光度关系较 $\gamma$ 射线与光学或X射线之间关系更好; Fan<sup>[21]</sup>发现 $\gamma$ 射线流量和射电流量有相关存在, 但是 $\gamma$ 射线流量与光学流量或与X射线流量之间却没有相关; Fan等<sup>[22]</sup>研究发现 $\gamma$ 射线与射电230 GHz辐射在高态时有相关, 但是 $\gamma$ 射线波段和射电5 GHz辐射的相关关系很弱; Huang等<sup>[23]</sup>研究了 $\gamma$ 射线和射电辐射之间的关系, 发现不同类星体的射电辐射与其他辐射存在不同程度的关联; Yang等<sup>[24]</sup>用EGRET数据研究了高、中、低态的 $\gamma$ 射线辐射与射电8.4 GHz辐射之间的关系, 发现在高态时两者有强相关, 低态时无相关; 最近, Fan等<sup>[25]</sup>讨论了 $\gamma$ 射线与射电波段之间的关系, 发现高频射电辐射与 $\gamma$ 射线辐射的相关性强于低频射电辐射. 这些研究均只考虑了 $\gamma$ 射线单频辐射与低能多波段辐射之间的关系, 且使用的样本量均不太大. 因此,  $\gamma$ 射线辐射与低能辐射多波段之间关系研究是不完整的, 关于blazar多波段之间的辐射关系, 特别是 $\gamma$ 射线与低能波段辐射之间的关系, 有必要用更大的样本及 $\gamma$ 射线多波段数据做进一步的研究.

本文用Fermi 3期源表(3FGL)<sup>[26]</sup>的 $\gamma$ 射线多波段数据研究了blazar  $\gamma$ 射线多能段辐射与射电辐射的关系, 讨论了blazar不同子类在两波段上辐射机制的关联. 文章中频率 $\nu$ 处的谱指数 $\alpha_\nu$ 定义为 $f_\nu \propto \nu^{-\alpha_\nu}$ , 式中,  $f_\nu$ 为 $\nu$ 处的流量密度.

## 2 样本及数据处理方法

### 2.1 样本选择

Fermi大天区望远镜自2008年运行以来已发布了5次数据, 分别为0FGL (亮源表)<sup>[27]</sup>、1FGL (1期源表)<sup>[28]</sup>、2FGL (2期源表)<sup>[29]</sup>、3FGL (3期源表)<sup>[26]</sup>和4FGL (4期源表)([https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/8\\_yr\\_catalog/](https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/8_yr_catalog/)), 各源表中所包含

的blazar分别为119、665、1063、1717、2938个。4FGL于2018年3月发布,但在4FGL中没有公布源的 $\gamma$ 射线多波段光子流量及光变指数等数据。因此,本文将以3FGL为基础样本,研究blazar射电1.4 GHz辐射与 $\gamma$ 射线多波段辐射的关系。

3FGL中共3033个源,其中有1717个是blazar。1717个blazar中有573个BCU(未知类型耀变体)、660个BL Lac和484个FSRQ。由于本文仅讨论FSRQ、HBL、LBL的射电与 $\gamma$ 射线多波段辐射的关系,因此样本中不包含BCU源,再删除在多波段中观测 $\gamma$ 射线光子流量误差大于66.6%的源,最后本文的研究样本仅含935个blazar,其中,415个FSRQ,520个BL Lac。关于blazar的分类,本文参照了文献[3]及[27]对blazar的分类。射电1.4 GHz的流量密度全部来自美国航空航天局河外数据库(NED, <http://ned.ipac.caltech.edu/>)。最后的样本源及原始数据见表1(表1为部分源数据,完整源数据见表3附录)。表1中各列含义如下:第1列,源的3FGL名称;第2列,源的红移 $z$ ;第3列,源的分类C,其中F、B、H、I、L分别表示FSRQ、BL Lac、HBL、IBL和LBL;第4列,从NED获得的射电1.4 GHz流量密度 $f_{1.4}$ 及其误差,单位为mJy;第5列,为 $\gamma$ 射线光子谱指数 $\Gamma$ 及其误差;第6~10列,分别为 $\gamma$ 射线在0.1~0.3、0.3~1、1~3、3~10、10~100 GeV能段的光子流量 $N$ ,上下标数字分别为以GeV为单位的能量上下限,单位分别为 $10^{-9}$ 、 $10^{-10}$ 、 $10^{-10}$ 、 $10^{-11}$ 、 $10^{-11}$  photon  $\cdot$  cm $^{-2}$   $\cdot$  s $^{-1}$ ,表中已将单位统一转化为 $10^{-11}$  photon  $\cdot$  cm $^{-2}$   $\cdot$  s $^{-1}$ 。

表1 样本(完整表格见表3附录)

Table 1 Sample of blazars (See Appendix for complete samples)

3FGL name	$z$	C	$f_{1.4}$ /mJy	$\Gamma$	0.01 $N_{0.1}^{0.3}$	0.1 $N_{0.3}^1$	0.1 $N_1^3$	$N_3^{10}$	$N_{10}^{100}$
					$/(10^{-11} \text{ photon} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$				
J0001.2-0748	0.57	I	$209 \pm 6.3$	$2.15 \pm 0.09$	$4.09 \pm 2.63$	$20.84 \pm 4.5$	$5.22 \pm 1.09$	$21.07 \pm 5.07$	—
J0001.4+2120	1.11	F	$218 \pm 6.5$	$2.31 \pm 0.18$	$15.24 \pm 2.39$	$36.4 \pm 5.45$	$3.57 \pm 1.02$	—	—
J0006.4+3825	0.23	F	$573 \pm 17.2$	$2.62 \pm 0.08$	$22.24 \pm 3.97$	$35.08 \pm 5.77$	$5.84 \pm 1.25$	—	—
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

## 2.2 数据处理方法

### 2.2.1 射电数据

表1中所有样本的射电1.4 GHz辐射流量均从NED中获得。若在NED中某个源有多个1.4 GHz流量,本文将选择误差较小且较接近平均值的那个值。所获流量密度再用公式

$$f = f^{\text{ob}} (1 + z)^{(\alpha_{\nu} - 1)}, \quad (1)$$

进行K改正。(1)式中:  $f$ 为K改正后的真实流量密度;  $f^{\text{ob}}$ 为观测流量;对于未测得红移的源,取同类源红移的平均值,在本文中FSRQ平均红移 $\bar{z}_{\text{FSRQ}} = 1.20$ , BL Lac平均红移 $\bar{z}_{\text{BL}} = 0.57$ ;在进行K改正时,取 $\alpha_{1.4 \text{ GHz}} = 0$ [3, 30]。

### 2.2.2 $\gamma$ 射线数据

在3FGL表中给出了 $\gamma$ 射线在0.1~0.3、0.3~1、1~3、3~10和10~100 GeV 5个波段的积分光子流量密度(单位: photon  $\cdot$  cm $^{-2}$   $\cdot$  s $^{-1}$ )。用其分别计算出0.1、0.3、1、3和10 GeV处

以Jy为单位的流量密度( $f_{0.1 \text{ GeV}}$ 、 $f_{0.3 \text{ GeV}}$ 、 $f_{1 \text{ GeV}}$ 、 $f_{3 \text{ GeV}}$ 和 $f_{10 \text{ GeV}}$ ), 计算公式<sup>[5-7]</sup>为

$$f(E) = 6.626 \times 10^{-4} \cdot \frac{1 - \Gamma}{E_U^{(1-\Gamma)} - E_L^{(1-\Gamma)}} \cdot N \cdot E^{(1-\Gamma)}. \quad (2)$$

(2)式中,  $f(E)$ 为 $\gamma$ 射线在 $E$  GeV处以Jy为单位的流量密度,  $\Gamma = \alpha_\gamma + 1$ ;  $E_L$ 和 $E_U$ 分别为观测波段的下、上限能量, 例如若观测波段为0.1–0.3 GeV, 则 $E_L = 0.1 \text{ GeV}$ ,  $E_U = 0.3 \text{ GeV}$ . 以上计算的流量密度再用(1)式K改正. K改正时未知红移用同类源的平均值代替.

### 3 结果

按照以上数据处理方法, 可得到射电1.4 GHz流量密度(Jy)和 $\gamma$ 射线5个波段(0.1–0.3、0.3–1、1–3、3–10、10–100 GeV)分别在0.1、0.3、1、3、10 GeV处的流量密度 $f_{0.1 \text{ GeV}}$ 、 $f_{0.3 \text{ GeV}}$ 、 $f_{1 \text{ GeV}}$ 、 $f_{3 \text{ GeV}}$ 、 $f_{10 \text{ GeV}}$ . 分别做 $\lg f_{1.4 \text{ GHz}}$ 与 $\lg f_{0.1 \text{ GeV}}$ 、 $\lg f_{0.3 \text{ GeV}}$ 、 $\lg f_{1 \text{ GeV}}$ 、 $\lg f_{3 \text{ GeV}}$ 、 $\lg f_{10 \text{ GeV}}$ 的关系, 结果如图1所示, 其线性拟合结果如表2所示. 表2中:  $y \sim x$ 表示纵横坐标所对应量之间的相关; Sam.为分类样本(T为总样本、F为FSRQ、B为BL Lac、H为HBL、L为LBL);  $r$ 、 $n$ 、 $p$ 分别为两个量相关的相关系数、样本量和机会概率. 线性拟合结果方程表示为 $y = (a \pm \Delta a) + (b \pm \Delta b)x$ .

### 4 讨论

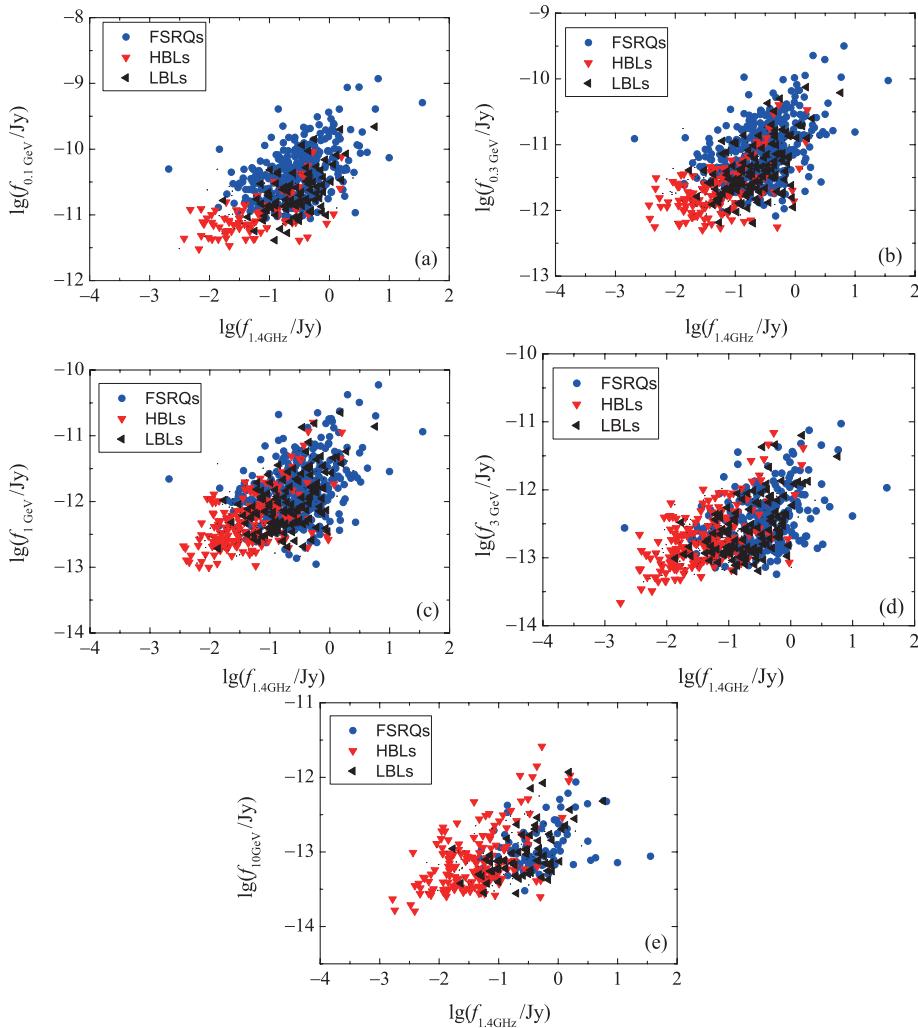
#### 4.1 不同样本的流量相关

从图1及表2可知, 对于总样本、FSRQ、BL Lac及其子类HBL、LBL, 射电1.4 GHz流量与 $\gamma$ 射线5个波段的流量均有好的正相关关系, 相关系数在0.551–0.807之间, 机会概率均小于 $10^{-4}$ . 但从表2的结果不难发现, 对于不同的样本及在不同的 $\gamma$ 射线波段这种相关程度存在差别. 在5个波段上各样本的相关系数平均值分别为: 0.787 (HBL) > 0.705 (BL Lac) > 0.685 (Total) > 0.668 (FSRQ) > 0.616 (LBL). 因此, 总的看, 对于不同的样本, 射电与 $\gamma$ 射线辐射的相关性, BL Lac样本的要好于FSRQ样本; 对于BL Lac的子类, HBL的相关性要好于LBL的相关性.

以上结果表明,  $\gamma$ 射线与射电辐射流量密度间存在较强的关联, 也就是说它们的辐射机制存在较强的关联. 如果射电辐射来自同步辐射, 那么 $\gamma$ 射线辐射主要来自同步自康普顿辐射. 在 $\gamma$ 射线波段, BL Lac中的同步自康普顿辐射成份应多于FSRQ, HBL中的同步自康普顿辐射成份应多于LBL.

#### 4.2 相关性随 $\gamma$ 射线频率的变化

从表2可得到, 所有样本在5个波段上相关系数的平均值分别为: 0.703 (0.1 GeV) > 0.688 (0.3 GeV) > 0.682 (1 GeV) > 0.660 (3 GeV) > 0.594 (10 GeV). 因此, 总的看, 所有样本在5个波段上的相关性随着 $\gamma$ 射线频率的升高而减弱. 按照“假设射电辐射来自同步辐射, 若 $\gamma$ 射线辐射与射电辐射相关性越强, 则 $\gamma$ 射线辐射来自同步自康普顿辐射的成份就越多”的观点, 可得到,  $\gamma$ 射线辐射频率越高, 其同步自康普顿辐射成份越少. 为了弄清不同样本在 $\gamma$ 射线多波段辐射与射电1.4 GHz辐射的关联, 本文给出了不同样本的射电与 $\gamma$ 射线辐射相关系数与 $\gamma$ 射线频率的关系, 结果如图2所示.

图 1 射电辐射与 $\gamma$ 射线多波段辐射的相关Fig. 1 The correlations between radio and multi-bands  $\gamma$ -ray emissions

从图2可知, 不同类型的天体, 其 $\gamma$ 射线多波段辐射与射电辐射的相关性随频率的变化规律不相同.

对于总样本, 相关系数与 $\gamma$ 射线辐射频率的变化呈抛物线型, 顶点(相关性最好)在  $10^{23}$  Hz左右, 相关系数在0.55–0.81之间变化(图2 (a)).

对于FSRQ样本, 随着频率的升高, 相关性先是快速增加, 再逐渐减小, 相关系数在0.55–0.73之间变化(图2 (a)); 对于BL Lac样本, 随着频率的升高, 相关性呈近似线性减小的趋势, 相关系数在0.63–0.77之间变化(图2 (a)).

对于BL Lac的子样本HBL, 相关系数有一个先增加再减小的趋势, 但相关系数变化很小, 相关系数在0.76–0.81之间变化(图2 (b)); 对于LBL, 相关系数呈近似线性减小的趋势, 相关系数在0.57–0.68之间变化(图2 (b)). 因此, HBL的这种相关性整体上要远好于LBL的.

表 2 射电1.4 GHz流量与5波段 $\gamma$ 射线流量相关的线性拟合结果Table 2 The linear fitting results for the flux correlations between radio 1.4 GHz and five bands of  $\gamma$ -ray emission

$y \sim x$	Sam.	$a \pm \Delta a$	$b \pm \Delta b$	$r$	$n$	$p$
$\lg f_{0.1 \text{ GeV}} \sim \lg f_{1.4 \text{ GHz}}$	T	$-9.699 \pm 0.001$	$0.562 \pm 0.002$	0.701	576	$< 0.0001$
	F	$-9.621 \pm 0.002$	$0.511 \pm 0.002$	0.689	342	$< 0.0001$
	B	$-10.018 \pm 0.003$	$0.565 \pm 0.006$	0.772	234	$< 0.0001$
	H	$-10.114 \pm 0.011$	$0.568 \pm 0.014$	0.779	81	$< 0.0001$
$\lg f_{0.3 \text{ GeV}} \sim \lg f_{1.4 \text{ GHz}}$	L	$-9.966 \pm 0.004$	$0.496 \pm 0.008$	0.681	86	$< 0.0001$
	T	$-10.292 \pm 0.001$	$0.666 \pm 0.002$	0.748	775	$< 0.0001$
	F	$-10.214 \pm 0.001$	$0.607 \pm 0.002$	0.725	397	$< 0.0001$
	B	$-10.531 \pm 0.002$	$0.61 \pm 0.004$	0.723	378	$< 0.0001$
$\lg f_{1 \text{ GeV}} \sim \lg f_{1.4 \text{ GHz}}$	H	$-10.502 \pm 0.005$	$0.703 \pm 0.007$	0.798	137	$< 0.0001$
	L	$-10.487 \pm 0.003$	$0.585 \pm 0.006$	0.634	127	$< 0.0001$
	T	$-11.01 \pm 0.001$	$0.651 \pm 0.002$	0.74	823	$< 0.0001$
	F	$-10.964 \pm 0.002$	$0.614 \pm 0.003$	0.698	387	$< 0.0001$
$\lg f_{3 \text{ GeV}} \sim \lg f_{1.4 \text{ GHz}}$	B	$-11.101 \pm 0.003$	$0.619 \pm 0.004$	0.714	436	$< 0.0001$
	H	$-10.972 \pm 0.005$	$0.725 \pm 0.006$	0.807	179	$< 0.0001$
	L	$-11.09 \pm 0.004$	$0.635 \pm 0.007$	0.613	129	$< 0.0001$
	T	$-11.667 \pm 0.003$	$0.552 \pm 0.003$	0.686	702	$< 0.0001$
$\lg f_{10 \text{ GeV}} \sim \lg f_{1.4 \text{ GHz}}$	F	$-11.712 \pm 0.004$	$0.569 \pm 0.006$	0.664	274	$< 0.0001$
	B	$-11.613 \pm 0.004$	$0.585 \pm 0.005$	0.684	428	$< 0.0001$
	H	$-11.405 \pm 0.007$	$0.697 \pm 0.007$	0.79	188	$< 0.0001$
	L	$-11.668 \pm 0.006$	$0.641 \pm 0.011$	0.582	118	$< 0.0001$
$\lg f_{10 \text{ GeV}} \sim \lg f_{1.4 \text{ GHz}}$	T	$-12.282 \pm 0.006$	$0.411 \pm 0.007$	0.551	393	$< 0.0001$
	F	$-12.59 \pm 0.011$	$0.351 \pm 0.019$	0.566	93	$< 0.0001$
	B	$-12.137 \pm 0.007$	$0.517 \pm 0.008$	0.633	300	$< 0.0001$
	H	$-11.88 \pm 0.01$	$0.657 \pm 0.009$	0.76	162	$< 0.0001$
$\lg f_{10 \text{ GeV}} \sim \lg f_{1.4 \text{ GHz}}$	L	$-12.367 \pm 0.013$	$0.567 \pm 0.024$	0.571	66	$< 0.0001$

根据以上分析的相关性, 可以得知不同类型天体 $\gamma$ 射线辐射的主导机制随辐射能段的变化关系。虽然轻子模型(lepton model)和强子模型(hadron model)都能较好地解释 $\gamma$ 射线的起源, 但目前对 $\gamma$ 射线的真正起源仍然不清楚。轻子模型包括同步自康普顿(Synchrotron Self-Compton, SSC)和外康普顿(External Compton, EC)过程<sup>[31–34]</sup>。在SSC过程中, 软光子起源于喷流中的同步辐射<sup>[31]</sup>, 而EC过程中的软光子直接来自附近的吸积盘<sup>[33]</sup>, 或者来自于吸积盘辐射在某个区域的再辐射<sup>[34]</sup>。强子模型认为超相对论电

子和正电子的同步辐射在质子诱导的级联反应中产生<sup>[14–16]</sup>.

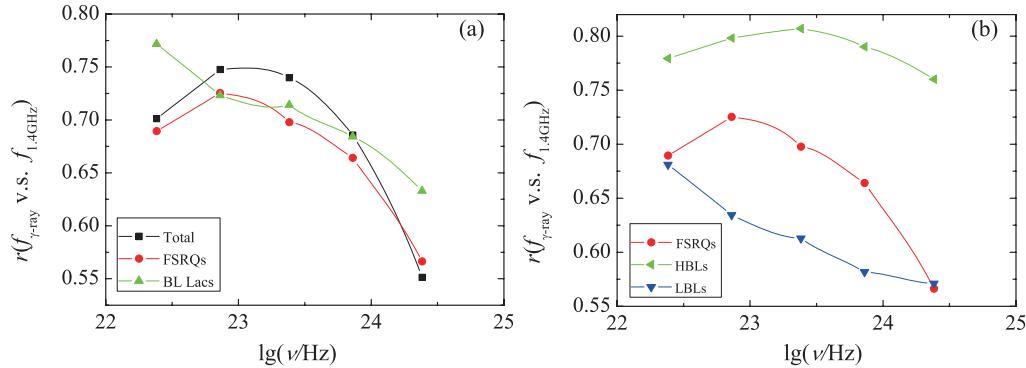


图 2 不同样本的射电与 $\gamma$ 射线辐射相关系数与 $\gamma$ 射线辐射频率的关系

Fig. 2 The relation between the correlation coefficient of  $\gamma$ -ray and radio emissions from different samples and  $\gamma$ -ray emission frequency

观测和理论表明 $\gamma$ 射线辐射和射电辐射都具有很强的聚束效应, 且它们均源自喷流。根据目前流行的观点,  $\gamma$ 射线辐射起源模型主要是SSC和EC, 在喷流中的SSC过程产生的 $\gamma$ 射线当达到光学薄时就辐射出来, 而这时对射电辐射来说喷流内部依然是光学厚的, 当到达喷流下游后光深变小时, 射电光子就能辐射出来了。在射电和 $\gamma$ 射线多波段的光变研究中, Lisakov等<sup>[35]</sup>发现3C273的 $\gamma$ 射线光变超前射电145–165 d。当SSC过程主导时, 射电与 $\gamma$ 波段的流量密度之间具有很强的相关性。对于EC过程, 因射电和 $\gamma$ 波段都具有很强的喷流, 这种强的聚束效应也会导致 $\gamma$ 与射电相关。一般情况下, 应该是SSC和EC都起作用, 那么由于射电和 $\gamma$ 射线辐射不是产生于同一批电子, 所以 $\gamma$ 射线与射电辐射流量密度的相关相对SSC主导时会减弱。

目前认为射电辐射主要由同步辐射产生, 若 $\gamma$ 射线辐射主要来自同步自康普顿辐射, 则我们可期待二者之间有相关, 且 $\gamma$ 射线辐射中同步自康普顿辐射成份越多, 二者的相关性应越好。按照前面的轻子模型和强子模型,  $\gamma$ 射线辐射的组份应由SSC和EC以及强子的级联辐射成份组成。如果将 $\gamma$ 射线辐射成份简单理解为由SSC辐射成份和EC辐射成份组成, 那么根据本文所得到的相关结果可知, 不同类型的天体, 在不同频率处其两种机制辐射的成份比例不同, 即主导机制不同。由于HBL的射电辐射与 $\gamma$ 射线辐射5个波段均有很好的正相关, 因此, HBL的 $\gamma$ 射线辐射主要由SSC辐射主导, 而LBL的相关性较弱, 因此, LBL的 $\gamma$ 射线辐射或许有更多的EC辐射成份。

FSRQ和LBL除了发射线的差异外, 还有很多不同, 但它们的连续谱几乎相同。它们的差异可能是演化或者是由于在共动坐标系中喷流部分与延展部分的比值不同所致<sup>[36]</sup>。在 $\gamma$ 波段, FSRQ的辐射比BL Lac强, 这可能归因于FSRQ具有较BL Lac更强的聚束效应所致。如果FSRQ的 $\gamma$ 辐射有来自于EC的贡献, 那么可能影响射电与 $\gamma$ 射线辐射的相关性。如果真是这样, 由图2中FSRQ的相关性随 $\gamma$ 射线辐射频率的变化关系可知, FSRQ的 $\gamma$ 射线起源较LBL的更复杂。

## 5 结论

本文以3FGL blazar为样本, 研究了射电1.4 GHz辐射与 $\gamma$ 射线在0.1、0.3、1、3、10 GeV处辐射的流量关系, 得到以下结论:

- (1) 射电1.4 GHz辐射与 $\gamma$ 射线5个波段的辐射均存在较强的关联, 相关性随着 $\gamma$ 射线频率的升高而变弱;
- (2) 在 $\gamma$ 射线波段, BL Lac的同步自康普顿辐射成份高于FSRQ, HBL的多于LBL;
- (3) 随着 $\gamma$ 射线辐射频率的升高,  $\gamma$ 射线辐射的主导机制在发生变化, 且不同类型天体的这种变化不同. HBL的 $\gamma$ 射线辐射主要由SSC机制主导, LBL的 $\gamma$ 射线辐射主要由EC机制主导, FSRQ的 $\gamma$ 射线辐射主导机制较BL Lac的更复杂.

## 参 考 文 献

- [1] Fan J H, Xie G Z. A&A, 1996, 306: 55
- [2] Fan J H, Liu Y, Li Y, et al. JApA, 2011, 32: 67
- [3] Fan J H, Yang J H, Liu Y, et al. ApJS, 2016, 226: 20
- [4] Lin C, Fan J H. RAA, 2016, 16: 103
- [5] Nie J J, Fan J H, Yang R S, et al. SCPMA, 2014, 57: 2007
- [6] Yang J H, Fan J H, Yuan Y H. SCPMA, 2012, 55: 1510
- [7] Yang J H, Fan J H, Hua T X, et al. Ap&SS, 2014, 352: 819
- [8] 杨江河, 樊军辉, 张月莲, 等. 天文学报, 2018, 59: 38
- [9] Yang J H, Fan J H, Zhang Y L, et al. ChA&A, 2019, 43: 23
- [10] Abdo A A, Ackermann M, Agudo I, et al. ApJ, 2010, 716: 30
- [11] 王雪晶, 毕雄伟, 郑永刚, 等. 天文学报, 2017, 58: 34
- [12] Wang X P, Bi X W, Zheng Y G. ChA&A, 2018, 42: 360
- [13] Urry C M, Padovani P. PASP, 1995, 107: 803
- [14] Mannheim K, Biermann P L. A&A, 1992, 253: L21
- [15] Cheng K S, Ding W K Y. A&A, 1994, 288: 97
- [16] Beall J H, Bednarek W. ApJ, 1999, 510: 188
- [17] 聂建军, 陈怡, 樊军辉, 等. 天文学报, 2020, 61: 79
- [18] Nie J J, Chen Y, Fan J H, et al. ChA&A, 2020, 44: in press
- [19] Dondi L, Ghisellini G. MNRAS, 1995, 273: 583
- [20] Xie G Z, Zhang Y H, Fan J H. ApJ, 1997, 477: 114
- [21] Fan J H. Ap&SS, 1996, 246: 119
- [22] Fan J H, Adam G, Xie G Z, et al. A&A, 1998, 338: 27
- [23] Huang L H, Jiang D R, Cao X W. A&A, 1999, 341: 74
- [24] Yang J H, Fan J H. ChJAA, 2005, 5: 229
- [25] Fan X L, Wu Q W. ApJ, 2018, 869: 133
- [26] Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. ApJ, 2015, 810: 14
- [27] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. ApJ, 2009, 700: 597
- [28] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. ApJS, 2010, 188: 405
- [29] Nolan P L, Abdo A A, Ackermann M, et al. ApJS, 2012, 199: 31
- [30] Donato D, Ghisellini G, Tagliaferri G, et al. A&A, 2001, 375: 739
- [31] Maraschi L, Ghisellini G, Celotti A. ApJ, 1992, 397: L5
- [32] Sikora M, Begelman M C, Rees M J. ApJ, 1994, 421: 153
- [33] Dermer C D, Schlickeiser R, Mastichiadis A. A&A, 1992, 256: L27
- [34] Blandford R D, Levinson A. ApJ, 1995, 441: 79

[35] Lisakov M M, Kovalev Y Y. IAU, 2014, 10: 39

[36] Fan J H. ApJ, 2003, 585: L23

## The Correlations between Radio and $\gamma$ -ray Emissions in Multi-bands for Fermi Blazars

TUO Man-xian<sup>1</sup> DENG Jin-jie<sup>1</sup> YANG Jiang-he<sup>1,2</sup> ZHANG Yue-lian<sup>1</sup>  
CHEN Xiu-hui<sup>1</sup> WANG Sheng-hui<sup>1</sup> QU Xiao-hai<sup>1</sup> NIE Jian-jun<sup>1</sup>  
FAN Jun-hui<sup>2</sup>

(1 College of Mathematics and Physics Science, Hunan University of Arts and Science,  
Changde 415000)

(2 Center for Astrophysics, Guangzhou University, Guangzhou 510006)

**ABSTRACT** A sample including 935 blazars with 415 Flat Spectrum Radio Quasars (FSRQs) and 520 BL Lac objects (BL Lacs) (233 HBLs (High synchrotron peak frequency BL Lacs), 144 IBLs (Intermediate synchrotron peak frequency BL Lacs), and 143 LBLs (Low synchrotron peak frequency BL Lacs)) is selected in Fermi 3FGL catalogue. The correlations between two flux densities of the radio 1.4 GHz and  $\gamma$ -ray at 0.1, 0.3, 1, 3, and 10 GeV are investigated for the samples of all blazars, FSRQs, BL Lacs, and subclasses of HBLs and LBLs, respectively. Results show that there are strong positive correlations between the two flux densities, with the correlation coefficients  $r = 0.48\text{--}0.81$  and the chance probabilities  $p$  all less than  $10^{-4}$ ; The correlation coefficient has different trends with the change of  $\gamma$ -ray emission frequency for different blazar samples, and the average correlation coefficients for all samples at the five respective bands decrease with the increase of  $\gamma$ -ray frequency. Therefore, with the increase of  $\gamma$ -ray frequency, the dominant mechanism of  $\gamma$ -ray radiation of blazar is changing, and at the same frequency the dominant mechanism is different for different samples. The  $\gamma$ -ray emission of HBLs may be mainly dominated by the synchrotron self-Compton, while the other mechanisms are responsible for the  $\gamma$ -ray emissions of LBLs. The origin of  $\gamma$ -ray in FSRQs is more complex than that of BL Lacs.

**Key words** galaxies: active, BL Lacertae objects (BL Lacs): general, quasars: general, gamma rays: galaxies, radiation mechanisms: non-thermal, methods: statistical













































