

费米耀变体的多波段辐射关系研究^{*}

刘鑫涛 张皓晶[†]

(云南师范大学物理与电子信息学院 昆明 650500)

摘要 收集了Fermi Large Area Telescope第4期源表第3次修订版(Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog Data Release 3, 4FGL-DR3)耀变体(Blazar)样本的多波段辐射流量密度, 所收集的数据覆盖了射电1.4和143 GHz、近红外(J、H和K)、可见光(u、g、r、i和z)、紫外(far ultraviolet和near ultraviolet)、X射线以及 γ 射线0.1–100 GeV间的6个能段(0.1–0.3、0.3–1、1–3、3–10、10–30和30–100 GeV). 分析了耀变体及其子类样本的高能 γ 射线各能段之间以及 γ 射线各能段与射电至X射线多波段辐射之间的相关性. 各波段流量之间的线性回归拟合结果显示: γ 射线各能段之间, 相关系数大于0.7的比例为70%, 置信水平高于95%的比例为95%; γ 射线与同步辐射之间, 相关系数大于0.4的占比为42%, 置信水平大于95%的占比为94.4%, 有一定的相关性; 未确定类型耀变体(Blazar of Unknown Types, BCU)的高能 γ 射线与同步辐射之间的相关性很弱, 相关系数均小于0.4. 分析表明: BCU样本的拟合斜率介于蝎虎天体(BL Lac Object, BLL)样本与平谱射电类星体(Flat-Spectrum Radio Quasar, FSRQ)样本之间, 应是BCU样本由BLL与FSRQ的混合导致. 同步辐射与 γ 射线辐射的相关性表明, BLL的高能 γ 射线主要由同步自康普顿散射(Synchrotron Self-Compton, SSC)机制主导产生, X射线可能是同步辐射与逆康普顿散射(Inverse Compton, IC)辐射的混合.

关键词 星系: 核, γ 射线: 星系, 方法: 数据分析, 辐射机制: 非热

中图分类号: P157; 文献标识码: A

1 引言

耀变体是射电噪活动星系核的特殊子类, 观测上多以多波段剧烈的光变^[1]及光学与射电波段的高偏振度^[2]为特征. 根据分光光谱是否具有明显发射线特征, 耀变体被分为平谱射电类星体(Flat-Spectrum Radio Quasar, FSRQ)和蝎虎天体(BL Lac Object, BLL), 前者等值宽度(Equivalent Width, EW) $>5 \text{ \AA}$, 后者EW $<5 \text{ \AA}$ ^[3]. FSRQ较BLL有更高的光度与更低的同步辐射峰值频率, 而BLL在从硬X射线到TeV能段的范围内表现出极高的辐射

强度^[4]. 未确定归属于FSRQ或BLL子类的耀变体被称为未确定类型耀变体(Blazar of Unknown Types, BCU). 耀变体的光变现象被认为是激射的喷流朝向观测者造成的^[5–6], 由于相对论的聚束效应其喷流辐射被大大增强而主导整个辐射^[7]. 耀变体低能辐射部分(射电至软X射线)被普遍认为是由同步辐射产生, 而高能辐射部分(硬X射线^[8], γ 射线)来自逆康普顿散射(Inverse Compton, IC). 但耀变体 γ 射线的起源仍有待进一步深入研究, 主要问题是在IC过程的散射光子和高能带电粒子上有很多争议^[9–11]. 外康普顿(External Compton, EC)

2024-09-13收到原稿, 2024-12-27收到修改稿

^{*}国家自然科学基金项目(11063004)和云南省中青年学术和技术带头人后备人才(2017HB020)资助

[†]kmzhanghj@163.com

机制认为散射光子主要来自尘埃环、宽线区或吸积盘^[12],而同步自康普顿散射(Synchrotron Self-Compton, SSC)机制认为散射光子由高能带电粒子产生的同步辐射^[13]主导.关于耀变体同步辐射与 γ 射线的关系的讨论有很多,Abdo等^[14]分析了耀变体PKS 1510-089光学波段与 γ 射线之间的强相关性,Rajput等^[15]发现4个FSRQ的光学与GeV波段的流量变化关系是不同的,庾满先等^[16-17]分析了Fermi耀变体的 γ 射线多波段辐射与射电辐射的关系,Yang等^[18]与Fossati等^[19]讨论了耀变体同步辐射的峰频与 γ 射线的关系,张顺等^[20]发现光学波段与 γ 射线的关系在耀变体中存在差异.本文从Fermi Large Area Telescope第4期源表第3次修订版(Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog Data Release 3, 4FGL-DR3)耀变体的包括 γ 射线在内多波段的辐射流量数据出发,分析耀变体 γ 射线与同步辐射的各个波段在辐射流量上的相关性,讨论Fermi 4期观测源表中的不同类型耀变体(BLL和FSRQ) γ 射线辐射的主导机制以及它们之间的差异.

2 样本选取与数据

2.1 样本选取

本文以4FGL-DR3目录中的耀变体作为分析样本. Fermi巡天望远镜于2008年发射并工作,主要任务是探测宇宙中的高能 γ 射线,其搭载的Large Area Telescope拥有大视野的探测范围. Fermi望远镜探测的 γ 射线源中耀变体占了重要的比重,这些耀变体被统称为费米耀变体.本文收集的高能 γ 射线(0.1–100 GeV)辐射流量数据来自Abdollahi等^[21]. Abdollahi等^[21]计算4FGL-DR3目录耀变体8个能段(能段1–8分别对应0.05–0.1、0.1–0.3、0.3–1、1–3、3–10、10–30、30–100和100–1000 GeV) 12 yr的平均流量,并给出检验统计量(Test Statistic, TS)值.本文综合考虑数据的可靠性因素后在分析时使用TS>4 (对应标准差 $\sigma>2$)的数据.本文因能段1和8的数据的TS值普遍较低(均值分别为2.3和2.7,其中少部分TS为0)而放弃这两个能段的数据.此外Abdollahi等^[21]将其分析的源与

4FGL目录进行了关联,本文选择有4FGL关联源的耀变体,筛选后共3437个源.本文将各能段的流量数据转换为能段中间频率的流量密度,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$,数据见表1 (由于数据很多,表1只列出部分源,完整的数据见附录B1).

2.2 射电、光学及X射线波段数据

Abdollahi等^[21]用贝叶斯概率估计其样本中耀变体最可能的对应源,本文在NASA/IPAC河外星系数据库(NASA/IPAC Extragalactic Database¹, NED)检索这些对应源在射电1.4 GHz,近红外(Near-Infrared, NIR)的J、H和K波段,可见光(Optics)的u、g、r、i和z波段,紫外(Ultraviolet, UV)的远紫外(Far UV, FUV)和近紫外(Near UV, NUV)波段的平均流量密度数据.其中可见光数据来自Sloan Digital Sky Survey Data Release 6 (SDSS DR6),而SDSS的数据自DR2开始不再进行消光处理,需要进行消光补偿. NED根据Schlafly等^[22]的工作计算了各个方向的消光星等,本文依据这些消光星等对可见光数据进行了消光补偿.射电143 GHz数据来自Massaro等^[23]. X射线(0.1–2.4 keV)数据来自Ackermann等^[24].射电至X射线多波段辐射的流量密度数据见表2 (由于数据很多,表2只列出部分作为参考,完整的数据见附录B2).

3 结果

3.1 γ 射线多能段辐射流量密度之间的关系

一些文献在分析 γ 射线多波段辐射之间的关系时,通常用0.1–100 GeV间的总辐射计算 γ 射线流量,这样处理可能会掩盖 γ 射线辐射的一些细节特征^[16].为了减小这一影响,本文直接使用来自Fermi/LAT观测的多能段数据来讨论它们之间的关系.本文根据Abdollahi等^[21]给出的各能段流量计算了相应能段中间能量处的流量密度,结果如表1所示.为了方便,本文遵循Abdollahi等^[21]的规则将从低到高的6个能段分别用编号2–7表示,即:“2”表示能段0.1–0.3 GeV,以0.2 GeV处的流量密度进行相关性分析;“3”表示能段0.3–1 GeV,以0.65 GeV处的流量密度进行相关性分析;依此类推.耀变体总样本及其子类样本的 γ 射线2–7能段两两之间流量密度的线性回归拟合结果如表3所示.

¹<https://ned.ipac.caltech.edu/>

表 1 γ 射线各能段流量密度(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$)
Table 1 Flux density of different γ -ray energy bands (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$)

4FGL Source	Class	0.1–0.3 GeV		0.3–1 GeV		1–3 GeV		3–10 GeV		10–30 GeV		30–100 GeV	
		F0.2 GeV	TS	F0.65 GeV	TS	F2 GeV	TS	F6.5 GeV	TS	F20 GeV	TS	F65 GeV	TS
4FGLJ1912.4–1222	BCU	4.55×10^{-38}	1.10	1.82×10^{-38}	7.32	5.01×10^{-39}	13.13	7.66×10^{-40}	9.97	9.72×10^{-41}	4.22	1.12×10^{-44}	0.00
4FGLJ1417.9+2543	BLL	9.65×10^{-41}	0.00	3.59×10^{-42}	0.00	5.58×10^{-40}	4.24	2.90×10^{-40}	8.38	2.79×10^{-40}	11.43	1.06×10^{-40}	9.55
4FGLJ0319.8+1845	BLL	1.19×10^{-42}	0.00	6.85×10^{-43}	0.00	1.49×10^{-39}	8.11	5.42×10^{-40}	9.44	2.66×10^{-40}	9.67	1.10×10^{-40}	8.74
4FGLJ0502.9+6533	BLL	7.21×10^{-42}	0.00	1.22×10^{-39}	1.17	4.33×10^{-40}	2.80	1.30×10^{-40}	3.46	6.18×10^{-41}	4.46	4.60×10^{-41}	5.30
4FGLJ1257.6+2413	BLL	1.23×10^{-38}	1.05	7.80×10^{-41}	0.00	3.71×10^{-40}	3.18	4.90×10^{-41}	1.44	5.39×10^{-41}	4.10	1.25×10^{-41}	3.04
4FGLJ1442.7+1200	BLL	9.43×10^{-43}	0.00	3.21×10^{-39}	4.50	1.17×10^{-39}	7.82	7.58×10^{-40}	13.64	3.12×10^{-40}	11.73	1.09×10^{-40}	9.41
4FGLJ1422.6+5801	BLL	5.54×10^{-39}	1.60	1.28×10^{-42}	0.00	4.76×10^{-40}	5.48	2.91×10^{-40}	9.17	1.41×10^{-40}	9.26	5.07×10^{-41}	8.20
4FGLJ0507.9+6737	BLL	1.71×10^{-38}	1.75	7.19×10^{-39}	9.47	3.68×10^{-39}	19.64	2.00×10^{-39}	32.46	1.23×10^{-39}	34.46	5.69×10^{-40}	31.95
4FGLJ2347.0+5141	BLL	2.50×10^{-38}	2.80	1.77×10^{-38}	16.98	9.49×10^{-39}	36.18	3.43×10^{-39}	41.07	1.20×10^{-39}	31.37	3.96×10^{-40}	21.92
4FGLJ0349.4–1159	BLL	1.37×10^{-38}	2.05	2.66×10^{-39}	3.88	8.79×10^{-40}	6.38	5.23×10^{-40}	11.78	1.91×10^{-40}	8.60	6.01×10^{-41}	6.14
4FGLJ1241.9+0636	BLL	4.22×10^{-42}	0.00	8.12×10^{-40}	1.47	1.51×10^{-40}	1.61	1.75×10^{-40}	4.79	5.89×10^{-41}	4.29	2.57×10^{-45}	0
4FGLJ1031.3+5053	BLL	4.03×10^{-39}	0.81	5.58×10^{-39}	10.63	2.79×10^{-39}	20.71	1.26×10^{-39}	25.17	5.04×10^{-40}	19.44	2.68×10^{-40}	19.01
4FGLJ2000.0+6508	BLL	1.47×10^{-37}	8.69	6.50×10^{-38}	47.01	2.98×10^{-38}	85.94	1.14×10^{-38}	96.64	4.40×10^{-39}	74.58	1.48×10^{-39}	53.04
4FGLJ0930.5+4951	BLL	1.81×10^{-38}	0.93	1.17×10^{-39}	1.13	5.08×10^{-40}	3.23	1.53×10^{-40}	4.66	6.73×10^{-41}	4.74	4.54×10^{-41}	6.17
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3437 sources		$N(\text{TS} > 4) = 598$		$N(\text{TS} > 4) = 598$		$N(\text{TS} > 4) = 598$		$N(\text{TS} > 4) = 598$		$N(\text{TS} > 4) = 598$		$N(\text{TS} > 4) = 598$	

Note: the energy flux of each band is transported to flux density of middle frequency of each band. $N(\text{TS} > 4)$ represents the number of data points with corresponding TS values higher than 4.

3.2 γ 射线多能段与射电至紫外波段流量密度之间的关系

耀变体的观测辐射以非热辐射为主导, 在低态时其热辐射有可能会表现出来^[25-26]. 由于热辐射不造成显著影响, Yang等^[27]与Mingaliev等^[28]通过多项式拟合得到耀变体同步辐射的峰频分布. 因此本文将从NED与文献获取的1.4 GHz至紫外波段的数据视为同步辐射的数据, 在此基础上分析这些波段与 γ 射线在流量上的相关性并讨论SSC机制的适用性. 在本文的相关性分析中, NIR波段J、H和K 3个频率的流量密度与 γ 射线不同能段的流量密度的线性回归拟合结果差异甚小, 且历史文献表明这3个频率的光变曲线相互之间几乎是以零时间延迟同步变化的^[29-31], 所以本文用这3个频率

的流量密度之和作为NIR的拟合数据. 光学波段的情况与NIR波段相同^[30-32], 线性回归拟合结果之间的差异甚小. 但UV波段的NUV与FUV两个频率的流量密度与 γ 射线不同能段的流量密度之间的相关性表现出较大差异, 因此分开讨论. 同时由于射电波段两频段波长相差甚远, 也分开讨论. 同步辐射与 γ 射线在辐射流量密度上的相关性分析结果表明, 对于不同类别的耀变体样本, γ 射线与各波段同步辐射之间的相关性存在很大差异. 总体而言BLL样本的 γ 射线与同步辐射的相关性最为显著, FSRQ样本次之, BCU样本最弱. 兼顾数据量与代表性, 选取 γ 射线能段3 (0.3–1 GeV)与能段6 (10–30 GeV)的拟合结果展示在表4, 完整的结果见附录A.

表 2 1.4 GHz至X射线各波段流量密度(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$)
Table 2 Flux density of different wavebands from 1.4 GHz to X-ray (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$)

4FGL Source	F1.4 GHz	F143 GHz	NIR			Optics	
			J	H	K	u	g
			F243 THz	F180 THz	F139 THz	F836 THz	F617 THz
4FGLJ1912.4+1222	1.26×10^{-27}	—	—	—	—	—	—
4FGLJ1417.9+2543	—	—	—	—	—	—	—
4FGLJ0319.8+1845	—	—	1.43×10^{-29}	1.45×10^{-29}	1.82×10^{-29}	—	—
4FGLJ0502.9+6533	7.82×10^{-28}	—	2.20×10^{-30}	4.74×10^{-30}	3.13×10^{-29}	—	—
4FGLJ1257.6+2413	1.47×10^{-28}	—	1.76×10^{-29}	1.85×10^{-29}	2.27×10^{-29}	1.26×10^{-30}	2.05×10^{-30}
4FGLJ1442.7+1200	—	—	—	—	—	—	—
4FGLJ1422.6+5801	1.32×10^{-28}	—	—	—	—	1.70×10^{-30}	1.92×10^{-30}
4FGLJ0507.9+6737	2.62×10^{-28}	—	—	—	—	—	—
4FGLJ2347.0+5141	2.51×10^{-27}	—	2.33×10^{-28}	2.94×10^{-28}	2.67×10^{-28}	—	—
4FGLJ0349.4+1159	—	—	—	—	—	—	—
4FGLJ1241.9+0636	1.65×10^{-28}	—	—	—	—	1.08×10^{-30}	1.24×10^{-30}
4FGLJ1031.3+5053	3.79×10^{-28}	—	1.78×10^{-29}	1.95×10^{-29}	2.20×10^{-29}	5.20×10^{-30}	6.00×10^{-30}
4FGLJ2000.0+6508	2.50×10^{-27}	—	1.53×10^{-28}	1.79×10^{-28}	1.68×10^{-28}	—	—
4FGLJ0930.5+4951	2.14×10^{-28}	—	—	—	—	1.08×10^{-30}	1.60×10^{-30}
...	...	...	...	...	...	...	...
3437 sources	N=2521	N=358	N=289			N=750	N=750

表 2 续
Table 2 Continued

4FGL Source	Optics			UV		X-ray
	r	i	z	NUV	FUV	
	F477 THz	F389 THz	F325 THz	F1.29 PHz	F1.95 PHz	
4FGLJ1912.4-1222	—	—	—	—	—	—
4FGLJ1417.9+2543	—	—	—	1.81×10^{-30}	1.19×10^{-30}	8.94×10^{-32}
4FGLJ0319.8+1845	—	—	—	—	—	8.94×10^{-32}
4FGLJ0502.9+6533	—	—	—	—	—	5.43×10^{-32}
4FGLJ1257.6+2413	—	—	—	—	—	—
4FGLJ1442.7+1200	—	—	—	1.46×10^{-30}	1.06×10^{-30}	4.57×10^{-32}
4FGLJ1422.6+5801	2.15×10^{-30}	2.48×10^{-30}	2.70×10^{-30}	—	—	8.28×10^{-32}
4FGLJ0507.9+6737	—	—	—	—	—	1.19×10^{-31}
4FGLJ2347.0+5141	—	—	—	—	—	—
4FGLJ0349.4-1159	—	—	—	1.27×10^{-30}	8.88×10^{-31}	1.02×10^{-31}
4FGLJ1241.9+0636	1.56×10^{-30}	1.78×10^{-30}	2.05×10^{-30}	—	—	5.83×10^{-33}
4FGLJ1031.3+5053	7.46×10^{-30}	8.55×10^{-30}	9.57×10^{-30}	4.57×10^{-30}	3.32×10^{-30}	1.85×10^{-31}
4FGLJ2000.0+6508	—	—	—	4.98×10^{-30}	3.45×10^{-30}	3.77×10^{-31}
4FGLJ0930.5+4951	2.21×10^{-30}	2.95×10^{-30}	3.56×10^{-30}	6.90×10^{-31}	5.02×10^{-31}	8.91×10^{-32}
...		...		...	...	...
3437 sources		N=750		N=1132	N=713	N=710

Note: N represents the number of data points of corresponding bands.

表 3 γ 射线各能段流量密度之间的相关性
Table 3 Correlation between flux density of different γ -ray energy bands

Blazar Sample	γ -ray Band		Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
	Fit X	Fit Y					
Total	2	3	594	0.988	2.54×10^{-1}	1.65×10^{-4}	0
		4	587	0.934	5.51×10^{-2}	8.72×10^{-5}	0
		5	545	0.742	9.08×10^{-3}	3.52×10^{-5}	0
		6	383	0.347	1.07×10^{-3}	1.48×10^{-5}	<0.001
		7	203	0.081	8.17×10^{-5}	7.07×10^{-6}	0.249
	3	4	1697	0.975	2.26×10^{-1}	1.26×10^{-3}	0
		5	1468	0.820	4.01×10^{-2}	7.31×10^{-4}	0
		6	1031	0.455	5.88×10^{-3}	3.58×10^{-4}	0
		7	545	0.195	8.13×10^{-4}	1.75×10^{-4}	<0.001

表3 续
Table 3 Continued

Blazar Sample	γ -ray Band		Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
	Fit X	Fit Y					
Total	4	5	2026	0.923	1.95×10^{-1}	1.81×10^{-3}	0
		6	1439	0.626	3.50×10^{-2}	1.15×10^{-3}	0
		7	760	0.368	6.52×10^{-3}	5.99×10^{-4}	0
	5	6	1633	0.869	2.31×10^{-1}	3.25×10^{-3}	0
		7	851	0.660	5.46×10^{-2}	2.13×10^{-3}	0
	6	7	822	0.925	2.86×10^{-1}	4.09×10^{-3}	0
BLL	2	3	161	0.980	3.41×10^{-1}	5.43×10^{-4}	0
		4	161	0.911	1.05×10^{-1}	3.76×10^{-4}	0
		5	160	0.773	2.90×10^{-2}	1.89×10^{-4}	0
		6	150	0.582	7.54×10^{-3}	8.65×10^{-5}	<0.001
		7	125	0.401	1.75×10^{-3}	3.61×10^{-5}	<0.001
	3	4	667	0.971	3.24×10^{-1}	3.10×10^{-3}	0
		5	665	0.874	9.51×10^{-2}	2.06×10^{-3}	0
		6	608	0.714	2.71×10^{-2}	1.08×10^{-3}	0
		7	420	0.546	6.81×10^{-3}	5.11×10^{-4}	0
		BLL	4	5	1006	0.962	3.12×10^{-1}
6	894			0.852	9.57×10^{-2}	1.97×10^{-3}	0
7	593			0.710	2.59×10^{-2}	1.06×10^{-3}	0
5	6		1004	0.959	3.31×10^{-1}	3.11×10^{-3}	0
	7		648	0.864	9.70×10^{-2}	2.23×10^{-3}	0
6	7		637	0.960	3.11×10^{-1}	3.59×10^{-3}	0
FSRQ	2	3	372	0.993	2.51×10^{-1}	1.54×10^{-4}	0
		4	366	0.972	5.34×10^{-2}	6.78×10^{-5}	0
		5	332	0.913	8.47×10^{-3}	2.08×10^{-5}	0
		6	211	0.768	9.43×10^{-4}	5.45×10^{-6}	0
		7	68	0.559	6.28×10^{-5}	1.15×10^{-6}	<0.001
	3	4	595	0.992	2.16×10^{-1}	1.14×10^{-3}	0
		5	1468	0.820	3.50×10^{-2}	5.13×10^{-4}	0
		6	266	0.823	4.03×10^{-3}	1.71×10^{-4}	0
		7	82	0.598	2.68×10^{-4}	4.02×10^{-5}	<0.001

表3 续
Table 3 Continued

Blazar Sample	γ -ray Band		Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
	Fit X	Fit Y					
FSRQ	4	5	506	0.981	1.66×10^{-1}	1.47×10^{-3}	0
		6	272	0.877	1.98×10^{-2}	6.59×10^{-4}	0
		7	83	0.641	1.32×10^{-3}	1.76×10^{-4}	<0.001
	5	6	273	0.949	1.28×10^{-1}	2.57×10^{-3}	0
		7	85	0.725	8.93×10^{-3}	9.30×10^{-4}	<0.001
	6	7	78	0.853	7.99×10^{-2}	5.61×10^{-3}	0
BCU	2	3	61	0.950	3.28×10^{-1}	1.40×10^{-3}	0
		4	60	0.929	8.54×10^{-2}	4.48×10^{-4}	0
		5	53	0.905	1.70×10^{-2}	1.12×10^{-4}	0
		6	23	0.908	2.97×10^{-3}	2.99×10^{-5}	<0.001
		7	10	0.602	3.47×10^{-4}	1.63×10^{-5}	0.066
	3	4	435	0.950	2.33×10^{-1}	3.67×10^{-3}	0
		5	315	0.851	4.12×10^{-2}	1.44×10^{-3}	0
		6	157	0.688	6.87×10^{-3}	5.82×10^{-4}	0
		7	43	0.223	5.69×10^{-4}	3.89×10^{-4}	0.151
	4	5	514	0.918	1.81×10^{-1}	3.46×10^{-3}	0
		6	273	0.730	3.02×10^{-2}	1.72×10^{-3}	0
		7	84	0.353	3.84×10^{-3}	1.12×10^{-3}	<0.001
	5	6	356	0.861	1.77×10^{-1}	5.55×10^{-3}	0
		7	118	0.518	2.83×10^{-2}	4.34×10^{-3}	<0.001
	6	7	107	0.709	2.00×10^{-1}	1.95×10^{-2}	0

Notes: Fit X and Fit Y represent serial number of γ -ray band; Count represents the number of data points used in corresponding fitting; ρ is correlation coefficient; Slope is slope of the straight line in linear regression fitting; P>F represents the reliability of fitting, and it's generally assumed that there is no linear relation in corresponding fitting when this value is higher than 0.05.

3.3 X射线与射电波段、光学波段及 γ 射线多能段流量密度之间的关系

在耀变体的双峰形能谱上, X射线出现在同步辐射与IC辐射交界的区域. 因此分析不同能段的X射线(通常分为甚软、软、硬、甚硬X射线)与各个波段的相关性有助于更全面地认识高能带电粒

子与同步辐射的相互作用, 但此类数据的报道很少^[33]. 为此本文收集了0.1–2.4 keV能段的X射线数据, 通过流量密度之间的相关性分析探讨与之相关的辐射机制. 在X射线与同步辐射各波段及 γ 射线各能段的流量密度的相关性分析中, 不同耀变体子类样本的结果表现出显著的差异. 总体上

FSRQ样本的X射线与同步辐射各波段及 γ 射线各能段的相关性最强(但在紫外波段弱于BLL样本), BCU样本本次之. BCU样本的数据不足, 但可以看出其X射线与 γ 射线的相关性极弱. 线性回归的拟合结果见表5.

表 4 同步辐射与 γ 射线相关性的部分结果
Table 4 Partial results on the correlation between synchrotron radiation and γ -ray

γ -ray Band	Other Band	Blazar Sample	Count	ρ	P>F
3	1.4 GHz	Total	1350	0.513	<0.001
		BLL	520	0.548	<0.001
		FSRQ	506	0.442	<0.001
		BCU	324	0.239	<0.001
	143 GHz	Total	350	0.546	<0.001
		BLL	86	0.665	<0.001
		FSRQ	257	0.525	<0.001
		BCU	—	—	—
	NIR	Total	113	0.258	0.006
		BLL	89	0.376	<0.001
		FSRQ	14	−0.615	0.019
		BCU	10	0.195	0.590
	Optics	Total	394	0.283	<0.001
		BLL	188	0.534	<0.001
		FSRQ	172	0.216	0.005
		BCU	34	−0.002	0.992
	NUV	Total	665	0.183	<0.001
		BLL	308	0.352	<0.001
		FSRQ	307	0.136	<0.001
		BCU	50	0.038	0.792
	FUV	Total	415	0.241	<0.001
		BLL	240	0.486	<0.001
		FSRQ	158	0.060	0.450
		BCU	17	−0.257	0.320
6	1.4 GHz	Total	1318	0.303	<0.001
		BLL	813	0.326	<0.001
		FSRQ	226	0.383	<0.001
		BCU	279	0.196	0.001
	143 GHz	Total	249	0.385	<0.001
		BLL	81	0.451	<0.001
		FSRQ	161	0.429	<0.001
		BCU	—	—	—

表4 续
Table 4 Continued

γ -ray Band	Other Band	Blazar Sample	Count	ρ	P>F
6	NIR	Total	198	0.339	<0.001
		BLL	160	0.391	<0.001
		FSRQ	—	—	—
		BCU	29	0.063	0.747
	Optics	Total	374	0.540	<0.001
		BLL	289	0.677	<0.001
		FSRQ	70	0.186	0.123
		BCU	15	−0.012	0.996
	NUV	Total	689	0.521	<0.001
		BLL	484	0.636	<0.001
		FSRQ	147	0.115	<0.001
		BCU	58	0.379	0.003
	FUV	Total	498	0.568	<0.001
		BLL	381	0.679	<0.001
		FSRQ	84	0.068	0.537
		BCU	33	0.300	0.090

表 5 X射线与射电至 γ 射线多波段的流量密度相关性
Table 5 Correlation of flux density between X-ray and multibands from radio to γ -ray

Blazar Sample	Fit Y	Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
Total	1.4 GHz	549	−0.199	−0.257	0.054	0
	143 GHz	157	0.434	0.346	0.058	0
	NIR	113	0.223	0.159	0.066	0.018
	Optics	202	0.530	0.433	0.049	0
	NUV	380	0.419	0.329	0.037	0
	FUV	316	0.476	0.358	0.037	0
	0.1–0.3 GeV	219	0.183	0.118	0.043	0.007
	0.3–1 GeV	488	0.026	0.021	0.036	0.570
	1–3 GeV	622	0.069	0.056	0.033	0.088
	3–10 GeV	672	0.176	0.145	0.031	0
	10–30 GeV	600	0.324	0.249	0.030	0
	30–100 GeV	432	0.433	0.312	0.031	0

表5 续
Table 5 Continued

Blazar Sample	Fit Y	Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
BLL	1.4 GHz	387	-0.081	-0.085	0.053	0.111
	143 GHz	44	0.222	0.150	0.101	0.147
	NIR	100	0.226	0.155	0.068	0.024
	Optics	151	0.437	0.335	0.056	0
	NUV	265	0.444	0.349	0.044	0
	FUV	232	0.495	0.386	0.045	0
	0.1-0.3 GeV	92	0.200	0.102	0.053	0.057
	0.3-1 GeV	308	0.082	0.058	0.040	0.150
	1-3 GeV	427	0.089	0.069	0.037	0.067
	3-10 GeV	489	0.181	0.146	0.036	0
	10-30 GeV	471	0.292	0.224	0.034	0
	30-100 GeV	379	0.417	0.303	0.034	0
FSRQ	1.4 GHz	141	0.425	0.474	0.085	0
	143 GHz	113	0.539	0.458	0.068	0
	NIR	-	-	-	-	-
	Optics	51	0.700	0.882	0.129	0
	NUV	108	0.313	0.316	0.093	0
	FUV	79	0.284	0.258	0.100	0.011
	0.1-0.3 GeV	124	0.362	0.325	0.076	0
	0.3-1 GeV	168	0.325	0.348	0.079	0
	1-3 GeV	167	0.275	0.321	0.087	0
	3-10 GeV	153	0.198	0.236	0.095	0.014
	10-30 GeV	97	0.369	0.386	0.100	0
	30-100 GeV	29	0.489	0.351	0.120	0.007
BCU	1.4 GHz	21	-0.553	-0.542	0.187	0.009
	0.3-1 GeV	12	-0.009	-0.007	0.245	0.979
	1-3 GeV	28	0.075	0.046	0.121	0.705
	3-10 GeV	36	-0.122	-0.061	0.085	0.477
	10-30 GeV	32	0.186	0.067	0.064	0.309
	30-100 GeV	24	-0.102	-0.039	0.081	0.636

4 讨论

4.1 γ 射线多能段流量密度之间的关系

本文习惯将0.1-100 GeV的 γ 射线中靠近0.1

GeV的方向称为“低能端”，靠近100 GeV的方向称为“高能端”，相关性分析结果表明4FGL耀变体 γ 射线的高能端与低能端之间存在明显的差异，且不同样本的拟合结果显示出不同的变化规律. 以

相邻能段的低能端拟合 X , 高能端作为拟合 Y , 从能段2-3、3-4、4-5、5-6和6-7的相关性强弱及线性回归拟合斜率的变化来看不同样本之间的差异(表3): 能段2-3、3-4、4-5、5-6和6-7的相关性均较强($\rho > 0.7$), 能够在可靠的置信度上讨论斜率的差异; BLL样本的回归拟合斜率依次为0.341、0.324、0.312、0.331和0.311; FSRQ样本的回归拟合斜率依次为0.251、0.216、0.166、0.128和0.080; 数据点很少的BCU样本的回归拟合斜率依次为0.328、0.233、0.181、0.177和0.200; 总样本的回归拟合斜率依次为0.328、0.233、0.181、0.177和0.200. 图1展示不同耀变体样本拟合斜率的差异. 图1中■代表BLL样本, ●代表FSRQ样本, ▲代表BCU样本, ▼代表总样本. 拟合斜率随 γ 射线能段变化的曲线因不同子类的耀变体在样本中所占数量比例的变化而不同, 可以看到图1中BCU样本的斜率变化曲线从靠近FSRQ样本到靠近BLL样本的过程, 而这大致对应了总样本中BLL/FSRQ的数量比例变化(表3): 161/372、667/595、1006/506、1004/273和637/78. 这正好说明BCU样本是由BLL和FSRQ混合构成.

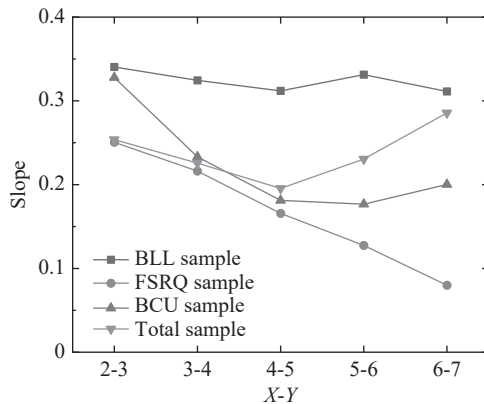


图 1 相邻 γ 射线能段之间的线性回归拟合斜率的变化

Fig. 1 Variation of the slopes which are exported from the linearization regression analysis applied to the adjacent γ -ray bands

4.2 γ 射线与射电及光学波段流量密度之间的关系

耀变体在SSC模型与EC模型上存在不少分歧.

以个例讨论: PKS 0537-441被归类为BLL, Pian等^[34]以单空间SSC模型拟合其不同状态的能谱, 但Ammando等^[35]认为SSC模型不足以解释其能谱而使用EC模型; 关于FSRQ 3C273, Sokolov等^[36]则在解释其时间延迟时使用SSC模型. 此外, Arsioli等^[37]研究低同步峰频耀变体(其样本包含104个源, 其中BLL与FSRQ数量相当)的 γ 射线辐射区域, 其结果支持以红外辐射场为主的EC机制能更好解释其样本的能谱; 在Ghisellini等^[38]关于耀变体统一理论的研究中(其样本也是BLL与FSRQ的混合), 他们在对能谱进行最基本的拟合时发现难以区分SSC模型与EC模型哪个更合适. 本文仅从各波段观测流量密度之间的相关性上研究耀变体 γ 射线的产生机制. 以能段3作为低能端的代表, 能段6作为高能端的代表, 将 γ 射线与同步辐射的相关性变化在图2至图4中展示. 其中图2表示 γ 射线能段3与同步辐射各波段的相关性变化; 图3表示 γ 射线能段6与同步辐射各波段的相关性变化; 图4表示BLL样本 γ 射线与同步辐射各波段的相关性变化. 空心数据点表示线性回归拟合 P 值小于0.05, 虚线跨越的数据点表示缺此波段的数据. 一般而言, 相关系数大于0.7或小于-0.7区间被认为是强相关, 0.4到0.7或-0.4到-0.7区间被认为是中等相关, 0.4到-0.4区间被认为是弱相关^[14], 图2-5中也将此类区间用点划线标注出来. 完整的相关性分析结果见附录A中的表1-6. 从整体上来看: BLL的同步辐射与 γ 射线有一定的相关性; FSRQ的同步辐射与 γ -ray的相关性很弱; BCU的同步辐射与 γ 射线之间几乎没有相关性. 这些结果支持BLL以SSC机制为主导的观点. 图4中两条曲线不同的走向表明, BLL的高能端 γ 射线更多地由高能同步辐射(光学与紫外波段)引起, 低能端的 γ 射线更多地由低能的同步辐射(射电波段)引起. 图2中FSRQ在射线波段与低能端 γ 射线有中等强度的相关性, 暗示SSC机制对其低能端 γ 射线很重要. 图2中FSRQ在近红外波段与低能端 γ 射线有显著的负相关性, 这可能是因为尘埃环对近红外波段的影响, 但是数据量极少, 不宜有更多的推测.

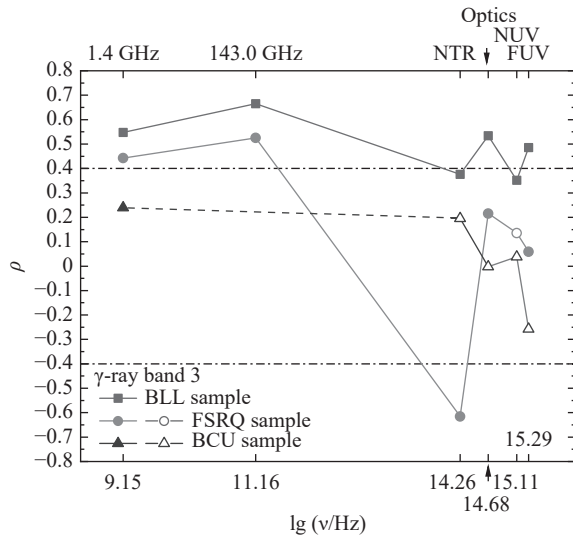


图 2 γ 射线低能端的能段3与同步辐射各波段的相关性变化. 空心数据点表示线性回归拟合 P 值小于 0.05.

Fig. 2 Variation of correlation between the flux of energy band 3, which represents the low-energy γ -ray, and the flux density of different synchrotron radiation band. Hollow data points indicate linear regression fit P -value less than 0.05.

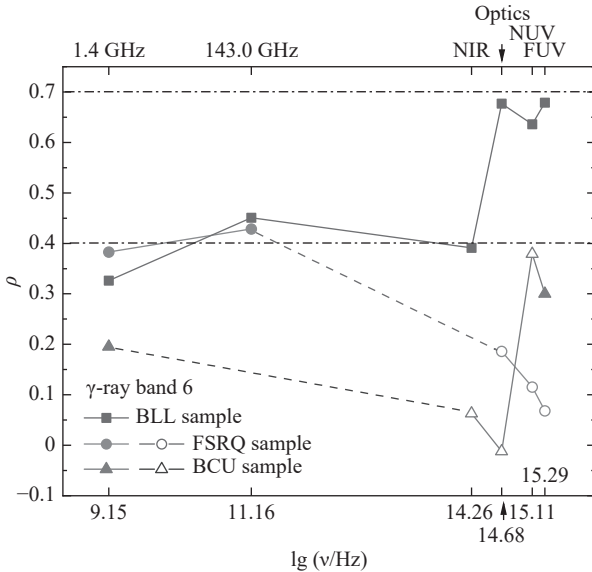


图 3 γ 射线高能端的能段6与同步辐射各波段的相关性变化. 空心数据点表示线性回归拟合 P 值小于 0.05.

Fig. 3 Variation of correlation between the flux of energy band 6, which represents the high-energy γ -ray, and the flux density of different synchrotron radiation band. Hollow data points indicate linear regression fit P -value less than 0.05.

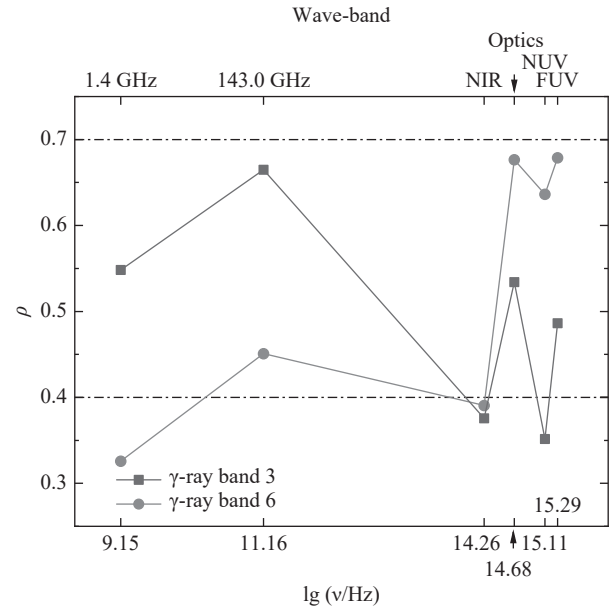


图 4 BLL样本 γ 射线与同步辐射各波段的相关性变化

Fig. 4 Variation of correlation between the γ -ray flux and the flux density of different synchrotron radiation band for BLL sample

4.3 X射线与射电波段、光学波段及 γ 射线多能段流量密度之间的关系

为了探讨X射线的辐射机制, 本文分析X射线与射电波段、光学波段及 γ 射线多能段流量密度之间的相关性变化. 在BLL样本中, X射线与远紫外波段的相关性最强, 相关系数为0.495 (表5), 并且如图5所示, 曲线的上升趋势暗示更高频率处有更强的相关性. FSRQ样本的X射线与光学波段的相关性最强, 相关系数为0.700 (表5). 观察图5同步辐射区域曲线的变化, 它们与图2、图3有相似之处(对于BLL样本来说相似的是曲线的拐点, 对于FSRQ样本来说, 若忽略数据不足的近红外波段, 相似的是曲线的形状). 再综合考虑相关性的结果, 本文认为SSC机制对FSRQ与BLL的X射线都有显著贡献, 且SSC机制对FSRQ的X射线更重要. 而Fan等^[39]认为X射线来自同步辐射或者同步辐射与IC机制的混合, 本文认为这能更好解释图5中X射线与 γ 射线的相关性变化. 图5右侧两条曲线从能段5往后呈上升趋势, 这可能是产生高能端 γ 射线的高能带电粒子经同步辐射产生部

分X射线. Tavecchio^[40]计算低磁场(不高于0.1 Gs)下以同步辐射形式辐射X射线(1–10 keV)的电子的洛伦兹因子数量级为 10^5 – 10^6 , 根据Rybicki等^[41]的计算这些电子如果逆康普顿散射近红外光子(1.8×10^{14} Hz)将会产生观测频率为 10^{24} – 10^{26} Hz的 γ 射线, 正是从能段5往后的范围. 在FSRQ样本的 γ 射线区域, 曲线从能段2到能段5 (BLL样本的曲线在这里不存在可靠的相关性, 只从趋势看是能段2到能段3)是下降趋势, 这可能是因为虽然在IC过程中产生低能端 γ 射线与部分的X射线的散

射光子来自同一辐射场, 结合4.2节的讨论这一IC过程应以SSC机制为主, 但产生两种射线的高能带电粒子在其分布谱上相距较远. 若推测耀变体X射线是高能端 γ 射线所对应带电粒子产生的同步辐射与低能端 γ 射线所对应带电粒子产生的SSC辐射的混合, 两种粒子在分布谱上距离增大此消彼长, 它们在分布谱上的分界点与图5中 γ 射线区域曲线的转折点对应, BLL的分界点在能段3–4, FSRQ的分界点在能段5.

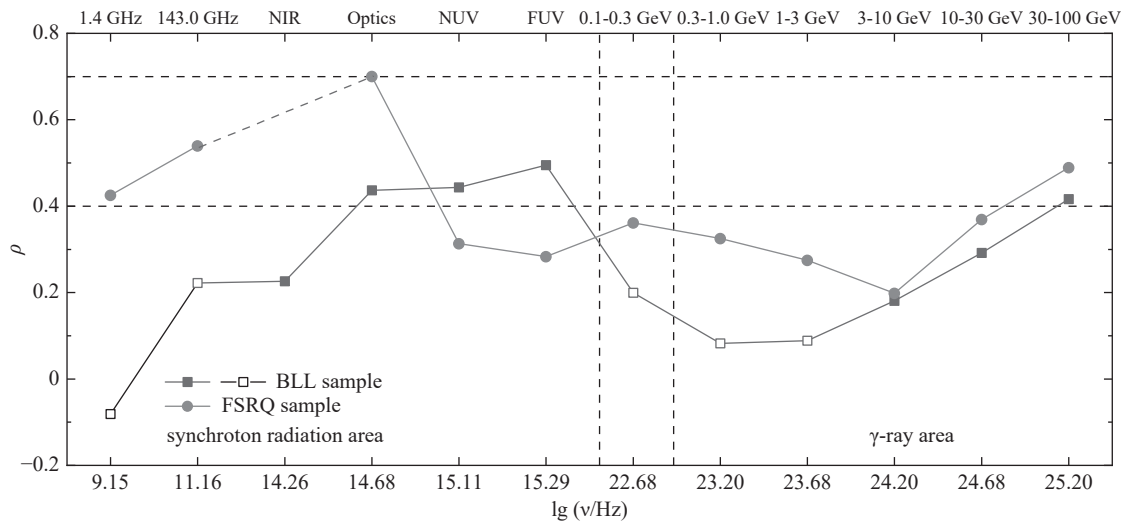


图 5 X射线各波段的相关性变化. 空心数据点表示线性回归拟合P值小于0.05.

Fig. 5 Variation of correlation between X-ray flux and different wave bands. Hollow data points indicate linear regression fit P -value less than 0.05.

5 总结

本文研究4FGL-DR3耀变体样本的 γ 射线各能段之间流量密度的关系以及 γ 射线各能段与射电波段、光学波段和X射线流量密度的关系, 主要结论如下: (1) BCU样本的回归拟合斜率介于BLL样本与FSRQ样本之间, 并且斜率的变化曲线与BLL/FSRQ的数量比例的变化一致, 其应是BLL与FSRQ的混合. (2)同步辐射与 γ 射线的相关性表明BLL的 γ 射线辐射机制以SSC为主, FSRQ的低能端 γ 射线有显著的SSC辐射成分, 而高能端 γ 射线应以EC辐射为主. (3) BLL样本与FSRQ样本的X射线与同步辐射都有显著的相关性, 且与它

们在 γ 射线波段与同步辐射的相关性结果相似, 这些暗示SSC机制在X射线能段的重要性, 结合对X射线与 γ 射线的复杂关系的分析, 两类耀变体的X射线都主要是同步辐射与以SSC为主导的IC辐射的混合.

致谢 感谢云南师范大学易庭丰老师对数据搜索与收集的建议.

参考文献

- [1] 李富婷, 张雄, 熊定荣, 等. 天文研究与技术, 2020, 17: 405
- [2] 徐小林, 张皓晶, 易庭丰, 等. 天文研究与技术, 2019, 16: 131

- [3] Urry C M, Padovani P. [PASP](#), 1995, 107: 803
- [4] Wang G G, Xiao H B, Fan J H, et al. [ApJS](#), 2024, 270: 22
- [5] Peterson B M. *An Introduction to Active Galactic Nuclei*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 122
- [6] Longair M S. *High Energy Astrophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 606
- [7] 丁楠. 耀变体喷流及光变的物理特性研究. 昆明: 云南师范大学, 2017: 22
- [8] Böttcher M. [Galax](#), 2019, 7: 20
- [9] Sobacchi E, Lyubarsky Y E. [MNRAS](#), 2020, 491: 3900
- [10] Manzoor A, Sahayanathan S, Shah Z, et al. [MNRAS](#), 2023, 525: 3533
- [11] Celotti A, Fabian A C. [MNRAS](#), 1993, 264: 228
- [12] Błażejowski M, Sikora M, Moderski R, et al. [ApJ](#), 2000, 545: 107
- [13] Lindfors E J, Valtaoja E, Türler M. [A&A](#), 2005, 440: 845
- [14] Abdo A A, Ackermann M, Agudo I, et al. [ApJ](#), 2010, 721: 1425
- [15] Rajput B, Stalin C S, Sahayanathan S. [MNRAS](#), 2020, 498: 5128
- [16] 庹满先, 邓进杰, 杨江河, 等. [天文学报](#), 2020, 61: 16
- [17] Tuo M X, Dong J J, Yang J H, et al. [ChA&A](#), 2020, 44: 428
- [18] Yang J H, Fan J H, Liu Y, et al. [Ap&SS](#), 2017, 362: 219
- [19] Fossati G, Maraschi L, Celotti A, et al. [MNRAS](#), 1998, 299: 433
- [20] 张顺, 易庭丰, 鲁赫, 等. [天文研究与技术](#), 2023, 20: 510
- [21] Abdollahi S, Acero F, Baldini L, et al. [ApJS](#), 2022, 260: 53
- [22] Schlafly F, Finkbeiner D P. [ApJ](#), 2011, 737: 103
- [23] Massaro E, Maselli A, Leto C, et al. [Ap&SS](#), 2015, 357: 75
- [24] Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. [ApJ](#), 2015, 810: 14
- [25] Perlman E. [PoS](#), 2009, 2008: 009
- [26] Sambruna R M, Tavecchio F, Ghisellini G, et al. [ApJ](#), 2007, 669: 884
- [27] Yang J H, Fan J H, Liu Y, et al. [ApJS](#), 2022, 262: 18
- [28] Mingaliev M G, Sotnikova Y V, Mufakharov T V, et al. [AstBu](#), 2015, 70: 264
- [29] Gupta A C, Kushwaha P, Carrasco L, et al. [ApJS](#), 2022, 260: 39
- [30] Guise E, Hönig S F, Almeyda T, et al. [MNRAS](#), 2022, 510: 3145
- [31] Safna P Z, Stalin C S, Rakshit S, et al. [MNRAS](#), 2020, 498: 3578
- [32] Sarkar A, Chitnis V R, Gupta A C, et al. [ApJ](#), 2019, 887: 185
- [33] Abdollahi S, Acero F, Ackermann M, et al. [ApJS](#), 2020, 247: 33
- [34] Pian E, Romano P, Treves A, et al. [ApJ](#), 2007, 664: 106
- [35] Ammando F D, Antolini E, Tosti G, et al. [MNRAS](#), 2013, 431: 2481
- [36] Sokolov A, Marscher A P, McHardy I M. [ApJ](#), 2004, 613: 725
- [37] Arsioli B, Chang Y L. [A&A](#), 2018, 616: 63
- [38] Ghisellini G, Celotti A, Fossati G, et al. [MNRAS](#), 1998, 301: 451
- [39] Fan J H, Yang J H, Yuan Y H, et al. [ApJ](#), 2012, 761: 125
- [40] Tavecchio F. [Galax](#), 2021, 9: 37
- [41] Rybicki G B, Lightman A P. *Radiative Processes in Astrophysics*. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1979: 197

Multiband Radiation Correlations of Fermi Blazars

LIU Xin-tao ZHANG Hao-jing

(School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500)

ABSTRACT The multi-band radiation flux data of 4FGL-DR3 (Fermi Large Area Telescope FourthSource Catalog Data Release 3) blazar sample are collected, which cover 6 wave-bands, e.g., radio 1.4 GHz and 143 GHz, near-infrared (J, H, K), optical (u, g, r, i, z), ultraviolet (FUV, NUV), X-ray, and γ -ray which cover energy bands (0.1–0.3 GeV, 0.3–1 GeV, 1–3 GeV, 3–10 GeV, 10–30 GeV, 30–100 GeV) in the 0.1–100 GeV range. These data were fitted by linear regression to analyse the correlation among different high-energy γ -ray energy bands, and between the γ -ray and the multiband radiation from radio to ultraviolet, of blazars. In the results of correlation analysis: among γ -ray bands, the proportion of the result with correlation coefficient greater than 0.7 is 70%, and the proportion of the results with confidence level above 95% is 95%; among γ -ray bands and synchrotron radiation, the proportion mentioned above is 42% with correlation coefficient greater than 0.4 and 94.4% respectively; the correlation between γ -ray and synchrotron radiation in the unclassified blazars (Blazar of Unknown Types, BCU) is very weak, the correlation coefficients are all lower than 0.4, the slopes in fitting among γ -ray bands are between BL Lac object (BLL) and Flat Spectrum Radio Quasar (FSRQ) sample. The reason may be that the BCU sample is mixture of BLL and FSRQ. The results show that Synchronous Self-Compton (SSC) scattering mechanism domains high-energy γ -ray in BLL, and X-ray may be the mixture of synchrotron radiation and Inverse Compton (IC) radiation.

Key words galaxies: nuclei, gamma rays: galaxies, methods: data analysis, radiation mechanisms: non-thermal

附录

附录A

表 1 1.4 GHz流量密度与 γ 射线各能段流量密度的相关性
Table 1 Correlation between 1.4 GHz flux density and the flux density of different γ -ray energy bands

Blazar Sample	γ -ray Band	Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
Total	2	482	0.560	0.395	0.027	<0.001
	3	1350	0.513	0.351	0.016	<0.001
	4	1828	0.460	0.311	0.014	<0.001
	5	1838	0.361	0.234	0.014	<0.001
	6	1318	0.303	0.179	0.016	<0.001
	7	682	0.244	0.138	0.021	<0.001
BLL	2	134	0.583	0.351	0.043	<0.001
	3	520	0.548	0.377	0.025	<0.001
	4	800	0.508	0.378	0.023	<0.001
	5	911	0.414	0.306	0.022	<0.001
	6	813	0.326	0.231	0.024	<0.001
	7	514	0.342	0.225	0.027	<0.001

表1 续
Table 1 Continued

Blazar Sample	γ -ray Band	Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
FSRQ	2	305	0.530	0.439	0.040	<0.001
	3	506	0.442	0.437	0.039	<0.001
	4	520	0.416	0.420	0.040	<0.001
	5	436	0.376	0.376	0.045	<0.001
	6	226	0.383	0.318	0.051	<0.001
	7	74	0.328	0.215	0.073	0.004
BCU	2	43	0.270	0.121	0.068	0.080
	3	324	0.239	0.120	0.027	<0.001
	4	508	0.244	0.122	0.022	<0.001
	5	491	0.216	0.105	0.021	<0.001
	6	279	0.196	0.085	0.026	0.001
	7	94	0.184	0.073	0.041	0.077

Note: γ -ray Band represents the γ -ray band set as Y in fitting.

表 2 143 GHz流量密度与 γ 射线各能段流量密度的相关性
Table 2 Correlation between 143 GHz flux density and the flux density of different γ -ray energy bands

Blazar Sample	γ -ray Band	Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
Total	2	256	0.539	0.623	0.061	<0.001
	3	350	0.546	0.769	0.063	<0.001
	4	349	0.492	0.744	0.071	<0.001
	5	328	0.441	0.705	0.080	<0.001
	6	249	0.385	0.555	0.085	<0.001
	7	110	0.297	0.379	0.117	0.002
BLL	2	56	0.718	0.749	0.099	<0.001
	3	86	0.665	0.882	0.108	<0.001
	4	85	0.596	0.797	0.118	<0.001
	5	87	0.512	0.807	0.147	<0.001
	6	81	0.451	0.714	0.159	<0.001
	7	51	0.346	0.496	0.192	0.013
FSRQ	2	196	0.505	0.595	0.073	<0.001
	3	257	0.525	0.752	0.076	<0.001
	4	256	0.490	0.761	0.085	<0.001
	5	234	0.460	0.724	0.092	<0.001
	6	161	0.429	0.569	0.095	<0.001
	7	55	0.442	0.462	0.129	<0.001

表 3 NIR流量密度与 γ 射线各能段流量密度的相关性Table 3 Correlation between NIR flux density and the flux density of different γ -ray energy bands

Blazar Sample	γ -ray Band	Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
Total	2	130	0.124	0.086	0.061	0.160
	3	113	0.258	0.202	0.072	0.006
	4	191	0.332	0.296	0.061	<0.001
	5	220	0.333	0.316	0.061	<0.001
	6	198	0.339	0.320	0.063	<0.001
	7	125	0.338	0.330	0.083	<0.001
BLL	2	103	0.246	0.171	0.067	0.012
	3	89	0.376	0.305	0.081	<0.001
	4	150	0.410	0.385	0.070	<0.001
	5	177	0.404	0.406	0.069	<0.001
	6	160	0.391	0.387	0.073	<0.001
	7	113	0.414	0.426	0.089	<0.001
FSRQ	2	14	-0.644	-0.718	0.246	0.013
	3	14	-0.615	-0.603	0.223	0.019
	4	15	-0.467	-0.495	0.260	0.080
	5	12	-0.519	-0.380	0.198	0.084
	6	—	—	—	—	—
	7	—	—	—	—	—
BCU	2	13	-0.243	-0.089	0.107	0.424
	3	10	0.195	0.077	0.137	0.590
	4	26	0.089	0.043	0.098	0.664
	5	31	0.113	0.061	0.099	0.544
	6	29	0.063	0.034	0.104	0.747
	7	10	-0.075	-0.033	0.155	0.837

表 4 光学流量密度与 γ 射线各能段流量密度的相关性Table 4 Correlation between optical flux density and the flux density of different γ -ray energy bands

Blazar Sample	γ -ray Band	Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
Total	2	163	0.250	0.130	0.040	<0.001
	3	394	0.283	0.190	0.033	<0.001
	4	517	0.389	0.302	0.031	<0.001
	5	538	0.497	0.406	0.031	<0.001
	6	374	0.540	0.441	0.036	<0.001
	7	190	0.640	0.520	0.046	<0.001

表4 续
Table 4 Continued

Blazar Sample	γ -ray Band	Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
BLL	2	55	0.502	0.259	0.061	<0.001
	3	188	0.534	0.395	0.046	<0.001
	4	297	0.631	0.560	0.040	<0.001
	5	347	0.665	0.629	0.038	<0.001
	6	289	0.677	0.633	0.041	<0.001
	7	164	0.696	0.633	0.051	<0.001
FSRQ	2	103	0.288	0.195	0.064	0.003
	3	172	0.216	0.175	0.061	0.005
	4	174	0.228	0.201	0.065	0.002
	5	148	0.232	0.204	0.071	0.005
	6	70	0.186	0.141	0.090	0.123
	7	19	0.450	0.295	0.142	0.053
BCU	2	—	—	—	—	—
	3	34	-0.002	0.001	0.080	0.992
	4	46	-0.080	0.041	0.077	0.597
	5	43	-0.132	0.086	0.101	0.400
	6	15	-0.012	0.007	0.173	0.966
	7	—	—	—	—	—

表 5 NUV流量密度与 γ 射线各能段流量密度的相关性
Table 5 Correlation between NUV flux density and the flux density of different γ -ray energy bands

Blazar Sample	γ -ray Band	Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
Total	2	291	0.146	0.089	0.036	0.013
	3	665	0.183	0.151	0.032	<0.001
	4	874	0.319	0.289	0.029	<0.001
	5	892	0.425	0.386	0.028	<0.001
	6	689	0.521	0.441	0.028	<0.001
	7	391	0.637	0.504	0.031	<0.001
BLL	2	89	0.314	0.157	0.051	0.003
	3	308	0.352	0.270	0.041	<0.001
	4	478	0.507	0.446	0.035	<0.001
	5	543	0.596	0.543	0.031	<0.001
	6	484	0.636	0.553	0.031	<0.001
	7	323	0.671	0.548	0.034	<0.001

表5 续
Table 5 Continued

Blazar Sample	γ -ray Band	Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
FSRQ	2	197	0.165	0.116	0.050	0.021
	3	307	0.136	0.118	0.049	0.017
	4	319	0.153	0.144	0.052	0.006
	5	266	0.150	0.139	0.056	0.014
	6	147	0.115	0.096	0.068	0.164
	7	49	0.317	0.212	0.093	0.026
BCU	2	—	—	—	—	—
	3	50	0.038	0.028	0.105	0.792
	4	77	0.123	0.080	0.074	0.285
	5	83	0.129	0.085	0.073	0.244
	6	58	0.379	0.257	0.084	0.003
	7	19	0.175	0.105	0.143	0.474

表 6 FUV流量密度与 γ 射线各能段流量密度的相关性

Table 6 Correlation between FUV flux density and the flux density of different γ -ray energy bands

Blazar Sample	γ -ray Band	Count	ρ	Slope	Slope Error	P>F
Total	2	181	0.178	0.116	0.048	0.017
	3	415	0.241	0.227	0.045	<0.001
	4	565	0.372	0.386	0.041	<0.001
	5	586	0.456	0.475	0.038	<0.001
	6	498	0.568	0.555	0.036	<0.001
	7	319	0.667	0.585	0.037	<0.001
BLL	2	69	0.401	0.213	0.059	<0.001
	3	240	0.486	0.411	0.048	<0.001
	4	368	0.591	0.584	0.042	<0.001
	5	413	0.648	0.668	0.039	<0.001
	6	381	0.679	0.668	0.037	<0.001
	7	273	0.709	0.614	0.037	<0.001
FSRQ	2	111	0.183	0.144	0.074	0.055
	3	158	0.060	0.060	0.080	0.450
	4	163	0.060	0.066	0.085	0.443
	5	137	0.004	0.005	0.093	0.959
	6	84	0.068	0.070	0.112	0.537
	7	32	0.099	0.101	0.184	0.588

表6 续
Table 6 Continued

Blazar Sample	γ -ray Band	Count	ρ	Slope	Slope Error	$P > F$
BCU	2	—	—	—	—	—
	3	17	-0.257	-0.210	0.204	0.320
	4	34	0.054	0.032	0.106	0.763
	5	36	0.136	0.089	0.111	0.428
	6	33	0.300	0.212	0.121	0.090
	7	14	0.140	0.100	0.204	0.634

附录B

因数据过多不便展示, 将附录B的数据公开在figshare网站上供读者检阅.

附录B1的链接为<https://figshare.com/s/b6a72bc7e6f21a1c0b41>.

附录B2的链接为<https://figshare.com/s/a93999a6c299acda9b72>.