

# 河外TeV能段 $\gamma$ 射线背景下限的估算\*

屈艳坤<sup>1,2,3</sup> 曾厚敦<sup>1,2†</sup>

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学院暗物质和空间天文重点实验室 南京 210023)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** Fermi卫星对GeV能段的河外伽马射线背景(Extragalactic Gamma-ray Background, EGB)进行了较为精确的测量,极大提高了对高能伽马射线背景的认识,但是在TeV能段,使用空间探测器进行观测非常困难,只能依赖地面伽马射线探测器,如成像大气切伦科夫望远镜.目前,对于TeV能段的河外伽马射线背景的认识还不完善.使用有低活跃状态能谱的61个TeV源(包含2个星暴星系、6个射电星系以及53个耀变体)的累计流量给出河外TeV伽马射线背景的下限.结果显示,低能段(0.5–4.5 TeV)流量由两个临近的耀变体Mrk 421和Mrk 501主导,贡献了大约58%的累计背景流量;而大于4.5 TeV的能段,由3个已观测到10 TeV以上能段流量的极端耀变体H 1426+428、1ES 1959+650以及1ES 0229+200主导.最后分别探究了星暴星系、射电星系以及耀变体对河外TeV伽马射线背景的贡献,不同耀变体子类对河外TeV伽马射线背景的贡献以及不同红移区间TeV源对河外伽马射线背景的贡献.

**关键词** 星系: 活动, 宇宙学: 背景辐射, 宇宙学: 弥漫辐射, 伽马射线: 弥漫背景, 方法: 统计

中图分类号: P157; 文献标识码: A

## 1 引言

银河系外伽马射线背景(Extragalactic Gamma-ray Background, EGB)的起源是一个基础的天文学课题<sup>[1–3]</sup>. EGB首先被SAS-2 (The Second Small Astronomy Satellite)卫星发现<sup>[4]</sup>. 随后,康普顿天文台(Compton Observatory, CO)上搭载的高能伽马射线探测望远镜(EGRET)证实银河系外伽马射线背景的能谱在0.2–100 GeV能段是一个谱指数为2.4的幂律函数<sup>[5–7]</sup>. 在EGRET时代,科学家观测到的100 MeV以上的银河系外伽马射线背景流量是 $(1.45 \pm 0.05) \times 10^{-5} \text{ ph} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ <sup>[6]</sup>.

Fermi卫星对于银河系外伽马射线背景的最新观测表明,在0.1–820 GeV能段的银河系外伽马射线背景能谱可以用一个在300 GeV处指数截断的幂律函数很好地描

2021-05-06收到原稿, 2021-06-09收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(U2031111, 11703094)资助

†zhd@pmo.ac.cn

述<sup>[8]</sup>. Fermi卫星测得能量大于100 MeV的银河系外伽马射线背景流量为 $(1.13 \pm 0.17) \times 10^{-5} \text{ ph} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ , 扣除已探测到的源之后, 能量大于100 MeV的各向同性的弥散河外伽马射线背景流量为 $(7.2 \pm 0.6) \times 10^{-6} \text{ ph} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ , 这个结果明显低于EGRET的测量结果. Ackermann等<sup>[9]</sup>认为硬谱Fermi源(2FHL)是大于50 GeV的银河系外伽马射线背景的主要贡献者, 而这个源表中数量最多的是蝎虎天体(BL Lacs).

一般认为, 银河系外伽马射线背景主要由暗物质衰变与湮灭、宇宙线与背景光子的相互作用、活动星系核、星暴星系、伽马射线暴等贡献. 在这些可能的来源中, 活动星系核扮演重要角色, 尤其在能量大于10 GeV的能段, 活动星系核的贡献非常明显. Fermi卫星观测到的活动星系核大多数是耀变体.

但是TeV能段伽马射线背景观测非常困难. 常见的空间探测器难以达到TeV能段, 如Fermi卫星探测的伽马射线背景能谱的能量上限是820 GeV, 目前TeV能段的主要探测手段是成像大气切伦科夫望远镜(IACT). 但是宇宙线中的重子和电子同样会产生大气簇射, 一般将宇宙线产生的簇射作为背景减除. 减除的方法是对着一个没有伽马射线源的天区进行观测, 将观测结果作为背景减除. 但这一方法将河外TeV伽马射线背景也作为背景减除掉了, 所以现有的成像大气切伦科夫望远镜技术难以观测弥散TeV伽马射线背景. 尽管探测很困难, 但水切伦科夫望远镜阵列(例如高海拔的水契伦科夫望远镜(HAWC)、高海拔宇宙线观测站-水契伦科夫探测器阵列(LHAASO-WCDA)仍可以给出TeV弥散伽马射线背景上限. HAWC在2019年的第36届国际宇宙线会议(ICRC2019)上报告了其运行815 d所获得的TeV弥散伽马射线背景的上限<sup>[10]</sup>. 相信高海拔宇宙线观测站(LHAASO)在未来能得到更好的上限.

在本文中, 通过累积已探测到的河外TeV源给出河外TeV伽马射线背景的下限. 目前共观测到TeV源232个, 其中大约100个是河外源. 在这些河外源中, 通过分析找到61个具有低活跃态能谱的TeV源. 再通过累加每个源的流量积分给出TeV伽马射线背景的下限; 并分别研究了星暴星系、射电星系和耀变体对河外TeV伽马射线背景的贡献, 同时还研究了不同耀变体子类 and 不同红移区间TeV源对河外伽马射线背景的贡献.

## 2 河外TeV源的样本

本文细致分析了所有已观测到TeV辐射的98个河外源, 其中61个源有公开的低活跃状态能谱. 在剩下的37个没有低活跃状态能谱的河外源中, 有6个源仅有耀发态(flare)的能谱且辐射流量较低, 有31个源没有获得有效能谱数据. 在选取的61个TeV源中, 银纬 $|b| > 10^\circ$ 天区的共有58个,  $|b| > 20^\circ$ 天区的共有44个. 从源的种类分析, 61个源中有星暴星系(Starburst Galaxy) 2个, 射电星系(Radio Galaxy) 6个, 耀变体53个. 在53个具有低活跃状态能谱的耀变体中, 平谱射电类星体(FSRQ)共有4个, 低同步峰蝎虎天体(LSP) 2个, 中同步峰蝎虎天体(ISP) 4个, 高同步峰蝎虎天体(HSP) 41个(其中3个源位于 $|b| < 10^\circ$ 天区), 未知类型的耀变体(unknown) 2个. 这61个河外源中, 有51个有确定的红移, 红移完备率为83.6%. 表1列出了所有具有低活跃状态能谱河外源的信息<sup>1</sup>: 第1列是源的名字, 第2和第3列分别是银经、银纬, 第4列是红移(红移未知为-1), 第5列是将源分为耀变体、星暴星系和射电星系3类, 第6列将耀变体按能谱分类为HSP、ISP、LSP、

<sup>1</sup>来源于TeVcat: <http://tevcats2.uchicago.edu/>.

FSRQs和unknown, 星暴星系和射电星系没有能谱分类, 第7列是与Inoue等<sup>[11]</sup>样本的比较, 标记yes为Inoue和Tanaka样本包含的源, 标记no为Inoue和Tanaka样本未包含的源, 第8列是TeV数据的参考文献.

本文数据来源于HESS (High Energy Stereoscopic System)、MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes)、VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System)等地面切伦科夫阵列. 由于地面切伦科夫阵列的技术特性导致无法对源进行连续长时间观测, 因此定义源的低活跃状态较为困难. 对于有多次测量结果的源, 选取流量最低的一次观测作为低能态, 并要求在此观测期间, 没有明显的光变行为. 考虑到每个源能谱划分的能量区间各不相同, 为了方便比较, 将对每个源的能谱数据点进行线性插值并重新划分了能量区间.

此外, 本文也给出了每个源对应的GeV能谱, 来自Fermi卫星4期源表(4FGL). Fermi卫星4期源表基于Fermi卫星运行8 yr的巡天数据. 我们在本文中研究的所有源在4FGL中都有对应体.

图1展示了TeV源中 $|b| > 10^\circ$ 的样本在能量处于0.3、1.0、3.0以及10.0 TeV处流量的累计数目分布. 可以明显看出, 源数目累计分布与欧几里德空间下对于源数目的累计分布的预期不完全一致, 这主要是由于不同地面切伦科夫望远镜观测的天区不一致及灵敏度不同造成的. 在未来, 随着更多地面切伦科夫阵列投入使用, 这种影响将有效改善.

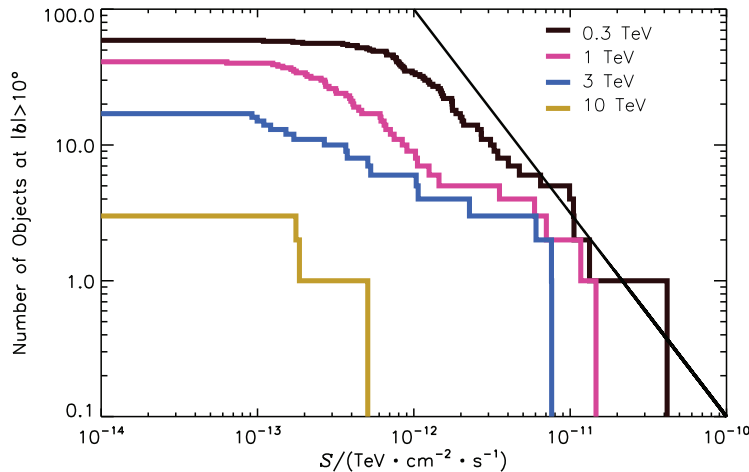


图1 在 $|b| > 10^\circ$ 的天区, 河外TeV源在不同能量处流量 $S$ 的累计数量分布. 样本中包含了耀变体、射电星系和星暴星系. 从上到下, 4条线分别对应能量为0.3、1.0、3.0和10.0 TeV的分布. 黑色的直线的斜率为 $-1.5$ .

Fig. 1 At  $|b| > 10^\circ$ , the cumulative source count distribution of extragalactic TeV sources as a function of energy flux  $S$  at different energy. Blazars, radio galaxies, and starburst galaxies are included in the sample. From top to bottom, each line corresponds to the distribution at 0.3, 1.0, 3.0, and 10.0 TeV. The slope of the black solid line is  $-1.5$ .

表 1 具有低活跃态能谱的河外TeV源  
**Table 1 Extragalactic TeV gamma-ray objects with low-state spectrum**

Source	Gal. Long./°	Gal. Lat./°	Redshift	Class	Type	Inoue?	Reference
H 1426+428	77.4872	64.8990	0.129000	blazar	HSP	yes	[12]
1ES 1959+650	98.0034	17.6699	0.048000	blazar	HSP	yes	[13]
1ES 0414+009	191.817	-33.1580	0.287000	blazar	HSP	yes	[14]
1ES 0806+524	166.246	32.9355	0.138000	blazar	HSP	yes	[15]
1ES 1312-423	307.540	20.0641	0.105000	blazar	HSP	yes	[16]
RGB J0710+591	157.391	25.4209	0.125000	blazar	HSP	yes	[17]
1RXS J101015.9-311909	266.896	20.0626	0.142639	blazar	HSP	yes	[18]
SHBL J001355.9-185406	74.6125	-78.0683	0.095000	blazar	HSP	yes	[19]
1ES1218+304	186.205	82.7434	0.182000	blazar	HSP	yes	[20]
1ES 0347-121	201.909	-45.7037	0.188000	blazar	HSP	yes	[21]
1ES 1011+496	165.534	52.7121	0.212000	blazar	HSP	yes	[22]
1ES 1101-232	273.188	33.0739	0.186000	blazar	HSP	yes	[23]
B3 2247+381	98.2680	-18.5597	0.118700	blazar	HSP	yes	[24]
1ES 0229+200	152.970	-36.6126	0.139600	blazar	HSP	yes	[25]
1ES 1215+303	189.010	82.0459	0.131000	blazar	HSP	yes	[26]
RGB J0152+017	152.343	-57.5613	0.080000	blazar	HSP	yes	[27]
PKS 0301-243	214.630	-60.1900	0.265700	blazar	HSP	yes	[28]
RBS 0413	165.088	-31.7076	0.190000	blazar	HSP	yes	[29]
PKS 0548-322	237.562	-26.1519	0.069000	blazar	HSP	yes	[30]
PKS 1424+240	29.4718	68.2077	-1	blazar	HSP	yes	[31]
PG 1553+113	21.9189	43.9602	0.500000	blazar	HSP	yes	[32]
PKS 2005-489	350.374	-32.6051	0.071000	blazar	HSP	yes	[33]
PKS 2155-304	17.7373	-52.2477	0.116000	blazar	HSP	yes	[34]
H 2356-309	12.8563	-78.0419	0.165000	blazar	HSP	yes	[35]
Mrk 421	179.884	65.0101	0.031000	blazar	HSP	yes	[36]
Mrk 501	63.6002	38.8592	0.034000	blazar	HSP	yes	[37]
1ES 2322-409	350.227	-67.6040	-1	blazar	HSP	no	[38]
PGC 2402248	166.001	27.3173	0.065000	blazar	HSP	no	[39]
HESS J1943+213	57.7576	-1.29280	-1	blazar	HSP	no	[40]

Note: column 1 is the name of objects, column 2 and column 3 are the galactic longitude and galactic latitude. Column 4 is redshift (objects with no measured redshift is labelled as -1). Column 5 and column 6 are the class of objects. Column 7 is comparison with the sample of Inoue et al.<sup>[11]</sup>. Column 8 is reference to the TeV data.

表 1 续  
Table 1 Continued

Source	Gal. Long./ $^{\circ}$	Gal. Lat./ $^{\circ}$	Redshift	Class	Type	Inoue?	Reference
1RXS J023832.6 -311658	229.458	-66.3219	0.232000	blazar	HSP	no	[41]
1ES 1440+122	8.43790	59.7453	-1	blazar	HSP	no	[42]
1ES 1741+196	43.8011	23.3115	0.084000	blazar	HSP	no	[43]
H 1722+119	34.1199	24.4751	-1	blazar	HSP	no	[44]
MAGIC J2001+439	79.0696	7.10150	-1	blazar	HSP	no	[45]
1ES 1727+502	77.0675	33.5370	0.055000	blazar	HSP	no	[46]
1RXS J081201.8 +023735	219.991	19.0945	0.172100	blazar	HSP	no	[47]
1ES 2037+521	89.6928	89.6928	0.053000	blazar	HSP	no	[48]
TXS 0210+515	135.744	-9.05080	0.049000	blazar	HSP	no	[49]
RGB J2042+244	67.7700	-10.8000	0.104000	blazar	HSP	no	[49]
RBS 0723	215.456	30.8893	0.198000	blazar	HSP	no	[49]
KUV 00311-1938	94.2397	-81.2108	-1	blazar	HSP	no	[50]
BL Lac	92.5896	-10.4412	0.069000	blazar	ISP	yes	[51]
3C 66A	140.146	-16.7576	0.340000	blazar	ISP	yes	[52]
S5 0716+714	143.981	28.0175	0.310000	blazar	ISP	yes	[53]
S2 0109+22	129.143	-39.8783	-1	blazar	ISP	no	[54]
AP Lib	340.681	27.5782	0.049000	blazar	LSP	yes	[55]
OT 081	34.9195	17.6450	-1	blazar	LSP	no	[56]
B2 1420+32	53.3486	69.5922	0.682000	blazar	FSRQ	no	[57]
PKS 1510-089	351.291	40.1297	0.361000	blazar	FSRQ	no	[58]
PKS 1440-389	325.651	18.7128	-1	blazar	FSRQ	no	[59]
PKS 0736+017	217.001	11.3698	0.189410	blazar	FSRQ	no	[60]
TXS 0506+056	195.395	-19.6344	0.336500	blazar	unknown	no	[61]
OJ 287	206.823	35.8189	0.305600	blazar	unknown	no	[62]
NGC 253	97.2910	-87.9651	0.000590	starburst	-	yes	[63]
M 82	141.409	40.5674	0.000900	starburst	-	yes	[64]
Cen A	309.513	19.4252	0.001830	radio gal	-	yes	[65]
M 87	283.738	74.4945	0.004400	radio gal	-	yes	[66]
NGC 1275	150.576	-13.2613	0.017559	radio gal	-	yes	[67]
3C 264	235.727	73.0385	0.021718	radio gal	-	no	[68]
PKS 0625-35	243.452	-19.9976	0.054860	radio gal	-	no	[69]
IC 310	150.183	-13.7342	0.018900	radio gal	-	no	[70]

### 3 河外TeV伽马射线背景的下限

本章通过累加TeV样本每个能量区间的流量获得河外TeV伽马射线背景的下限. 然后将累加流量除以TeV源对应天区的立体角以获得累加的辐射背景流量. 本文对全天区(对应立体角 $4\pi$ )的61个源,  $|b| > 10^\circ$  (对应立体角 $3.3\pi$ )的58个源以及 $|b| > 20^\circ$  (对应立体角 $2.6\pi$ )的44个源分别进行研究, 得到的每个能量间隔的辐射背景能谱一一列在表2中, 其中误差为每个TeV源的误差累加后除以对应的立体角. 图2展示了在 $|b| > 10^\circ$ 天区内的河外TeV伽马射线背景能谱的下限. 我们同时画出了Fermi卫星测得的河外伽马射线背景能谱. 从图上可以看出, 在0.5–4.5 TeV, 已解析的河外TeV伽马射线背景主要由两个临近源Mrk 421和Mrk 501主导, 它们贡献了58%的流量. 该结果与Inoue等<sup>[11]</sup>的结果一致. 在能量超过4.5 TeV能段, 主要是3个极端耀变体主导, 它们分别是H 1426+428、1ES 1959+650以及1ES 0229+200, 这3个源都在超过10 TeV能段被探测到.

表 2 河外TeV伽马射线能谱的流量下限

Table 2 The lower bound on the cosmic TeV gamma-ray background spectrum

Energy /GeV	Lower bound spectrum		
	/(GeV · cm <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> · sr <sup>-1</sup> )	/(GeV · cm <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> · sr <sup>-1</sup> )	/(GeV · cm <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> · sr <sup>-1</sup> )
	$ b  > 0^\circ$	$ b  > 10^\circ$	$ b  > 20^\circ$
6.71994	$2.42_{-0.38}^{+0.22} \times 10^{-8}$	$2.81_{-0.45}^{+0.26} \times 10^{-8}$	$2.78_{-0.45}^{+0.41} \times 10^{-8}$
31.0974	$2.91_{-0.66}^{+0.60} \times 10^{-8}$	$3.40_{-0.79}^{+0.71} \times 10^{-8}$	$3.09_{-0.62}^{+0.60} \times 10^{-8}$
111.481	$2.90_{-0.70}^{+0.70} \times 10^{-8}$	$3.32_{-0.78}^{+0.79} \times 10^{-8}$	$3.39_{-0.76}^{+0.75} \times 10^{-8}$
221.673	$2.15_{-0.59}^{+0.68} \times 10^{-8}$	$2.47_{-0.67}^{+0.77} \times 10^{-8}$	$2.52_{-0.66}^{+0.78} \times 10^{-8}$
341.086	$1.30_{-0.33}^{+0.35} \times 10^{-8}$	$1.49_{-0.36}^{+0.39} \times 10^{-8}$	$1.53_{-0.35}^{+0.39} \times 10^{-8}$
518.441	$8.16_{-1.99}^{+2.05} \times 10^{-9}$	$9.72_{-2.36}^{+2.42} \times 10^{-9}$	$10.15_{-2.41}^{+2.43} \times 10^{-9}$
787.389	$5.88_{-1.89}^{+1.90} \times 10^{-9}$	$6.99_{-2.24}^{+2.25} \times 10^{-9}$	$7.24_{-2.33}^{+2.29} \times 10^{-9}$
1217.39	$3.56_{-1.16}^{+1.39} \times 10^{-9}$	$4.23_{-1.38}^{+1.64} \times 10^{-9}$	$4.37_{-1.45}^{+1.76} \times 10^{-9}$
1892.16	$2.76_{-1.02}^{+1.17} \times 10^{-9}$	$3.27_{-1.20}^{+1.38} \times 10^{-9}$	$3.44_{-1.34}^{+1.54} \times 10^{-9}$
2939.78	$1.88_{-1.01}^{+1.02} \times 10^{-9}$	$2.24_{-1.21}^{+1.22} \times 10^{-9}$	$2.39_{-1.41}^{+1.42} \times 10^{-9}$
4574.05	$0.96_{-0.45}^{+0.39} \times 10^{-9}$	$1.16_{-0.54}^{+0.47} \times 10^{-9}$	$1.19_{-0.60}^{+0.50} \times 10^{-9}$
7120.48	$0.88_{-0.42}^{+0.76} \times 10^{-10}$	$1.06_{-0.51}^{+0.92} \times 10^{-10}$	$0.55_{-0.40}^{+0.82} \times 10^{-10}$
11079.2	$6.11_{-3.16}^{+5.95} \times 10^{-11}$	$7.40_{-3.83}^{+7.20} \times 10^{-11}$	$3.41_{-2.62}^{+5.82} \times 10^{-11}$

为了探究低银纬源对结果的影响, 我们分别分析 $|b| > 0^\circ$ 、 $|b| > 10^\circ$ 、 $|b| > 20^\circ$ 的TeV源对河外TeV伽马射线背景的贡献, 见图3. 图中可以看出 $|b| > 0^\circ$  (全天区)的结果略低于 $|b| > 10^\circ$ 和 $|b| > 20^\circ$ 的结果, 这主要是河内源对低银纬河外源造成干扰, 使得观测到的低银纬TeV源的数密度低于高银纬TeV源, 但其数据点在 $1\sigma$ 误差范围

之内, 没有显著差异.  $|b| > 10^\circ$ 和 $|b| > 20^\circ$ 的结果十分接近, 这表明在减除银河系的影响后, 所研究天区银纬的细微差别对结果几乎没有影响. 因此, 在后续的研究中, 我们使用 $|b| > 10^\circ$ 区域.

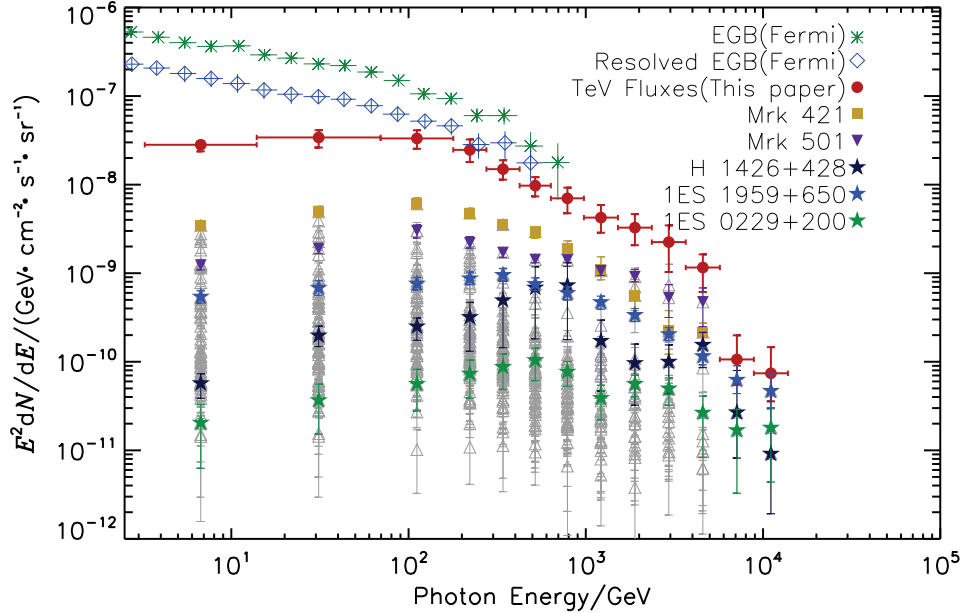


图2 GeV到TeV的河外伽马射线背景能谱. 红色圆点是本工作通过累加 $|b| > 10^\circ$ 天区58个源的低活跃能谱获得的河外伽马射线背景下限. 绿色星号是Fermi卫星测量的河外伽马射线背景. 蓝色菱形是已探测到的河外源对伽马射线背景的贡献. 用灰色三角号标注每个源的贡献, 即它们的能谱除以本研究的的天区范围 $|b| > 10^\circ$ 对应的立体角 $3.3\pi$ . 此外, 河外TeV伽马射线背景的主要贡献者分别标注如下: Mrk 421黄色方块、Mrk 501紫色三角、H 1426+428黑色五角星、1ES 1959+650蓝色五角星、1ES 0229+200绿色五角星.

Fig. 2 The EGB spectrum at GeV to TeV band. The lower bound on the extragalactic TeV gamma-ray background obtained from the cumulative flux of 58 known extragalactic TeV objects at  $|b| > 10^\circ$  is shown by red dots. The green asterisks represent the total EGB spectrum measured by Fermi. The blue diamonds represent the resolved EGB spectrum by Fermi. Grey triangle is the contribution of each source, namely their spectrum divided by corresponding solid angle of  $|b| > 10^\circ$ ,  $3.3\pi$ . In addition, the major contributors to TeV EGB are indicated as follows: Mrk 421 in yellow square, Mrk 501 in purple triangle, H 1426+428 in black pentacle, 1ES 1959+650 in blue pentacle, and 1ES 0229+200 in green pentacle.

为了探究不同种类的TeV源对于河外TeV伽马射线背景的影响, 我们将所有TeV源分成耀变体、星暴星系和射电星系3类. 分类依据基于TeVcat数据库. 全部61个具有低能态TeV谱的源中, 共有星暴星系2个, 射电星系6个, 其余53个(含3个 $|b| < 10^\circ$ 的源)为耀变体. 图4是在 $|b| > 10^\circ$ 对应天区中, 3类TeV源对河外TeV伽马射线背景的贡献, 可以看出耀变体对于河外TeV伽马射线背景的贡献远高于其它两个类别. 此外, 图4给出了Qu等<sup>[71]</sup>所预测的河外TeV伽马射线背景能谱. 本文的结果与文献[71]的理论预测相符. 图4也给出了LHAASO-WCDA运行1 yr的灵敏度曲线<sup>[72]</sup>, 结合图2, 发现LHAASO-WCDA运行1 yr可能仅能观测到TeV流量最大的4个河外源: Mrk 421、Mrk 501、H 1426+428和1ES 1959+650.

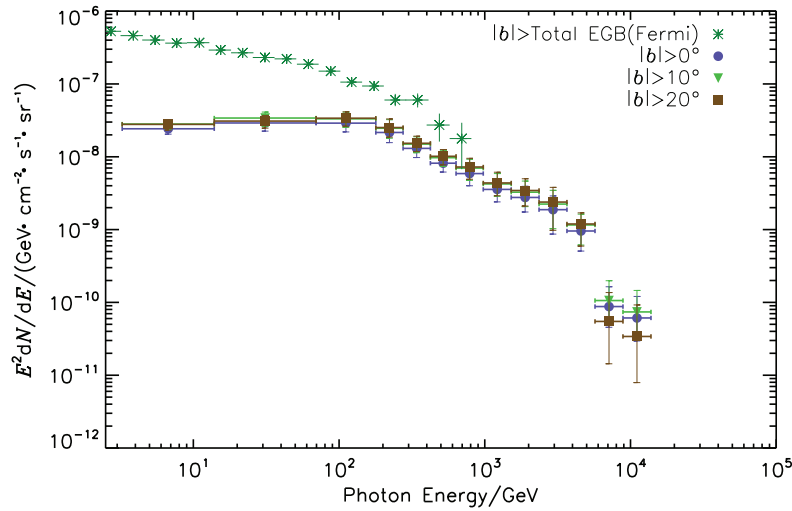


图3 本图分别给出了 $|b| > 0^\circ$  ( $4\pi$ )、 $|b| > 10^\circ$  ( $3.3\pi$ )、 $|b| > 20^\circ$  ( $2.6\pi$ )对应天区的TeV源对河外伽马射线背景的贡献. 图中可以看出,  $|b| > 10^\circ$ 和 $|b| > 20^\circ$ 的结果相似,  $|b| > 0^\circ$ 的结果略低于其他两个, 这主要是河内源的干扰造成的.

Fig. 3 The contribution of objects at  $|b| > 0^\circ$  ( $4\pi$ ),  $|b| > 10^\circ$  ( $3.3\pi$ ),  $|b| > 20^\circ$  ( $2.6\pi$ ) to TeV EGB. The contribution of objects at  $|b| > 10^\circ$  and  $|b| > 20^\circ$  to TeV EGB is very similar, but the contribution of objects at  $|b| > 0^\circ$  to TeV EGB is a little lower than the others, this is mainly due to the effect of the Milk Way.

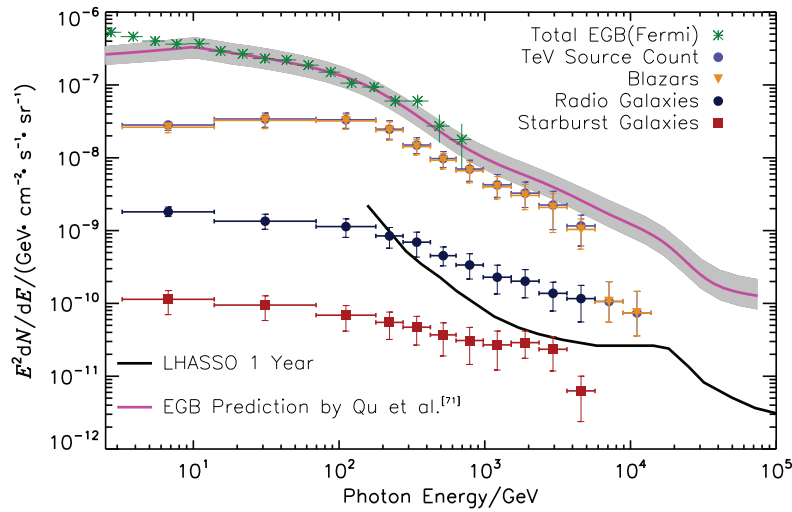


图4 在 $|b| > 10^\circ$ 天区, 不同种类天体对应的伽马射线背景谱. 橙色三角是耀变体, 深蓝色圆形是射电星系, 红色方块是星暴星系. 作为比较, 标注出了3类天体贡献的和(紫色圆点). 绿色星号是Fermi卫星给出的河外伽马射线背景. 粉色实线是Qu等<sup>[71]</sup>所预测的河外伽马射线背景能谱, 灰色阴影是 $1\sigma$ 对应的误差. 黑色实线是LHAASO运行1 yr的灵敏度曲线<sup>[72]</sup>. 由图可以看出, 已知来源的河外TeV背景能谱主要由耀变体贡献.

Fig. 4 At  $|b| > 10^\circ$ , the contributions of different objects to TeV EGB: blazars are represented in orange triangles, radio galaxies are represented in dark blue circles, starburst galaxies are represented in red squares. The purple circle represent the total contribution of three classes. The green asterisk represents the total EGB spectrum measured by Fermi. Pink solid line is the predicted EGB by Qu et al.<sup>[71]</sup> and the grey shadow is  $1\sigma$  errors. The black solid line is the sensitivity curve of LHAASO for one-year<sup>[72]</sup>. It is clear that blazars are the main contributor to TeV EGB.



在图5中, 我们分析样本中不同蝎虎天体子类(HSP、ISP、LSP、FSRQ和未知类型的耀变体)对河外伽马射线背景的贡献. 图5可以明显看出, 在 $|b| > 10^\circ$ 天区, 高同步峰蝎虎天体是河外TeV源中最主要的伽马射线背景贡献者. 考虑到高同步峰蝎虎天体的数目最多, 在 $|b| > 10^\circ$ 有38个, 且两个贡献最显著的源Mrk 421与Mrk 501均属于高同步峰蝎虎天体, 这个结果是合理的.

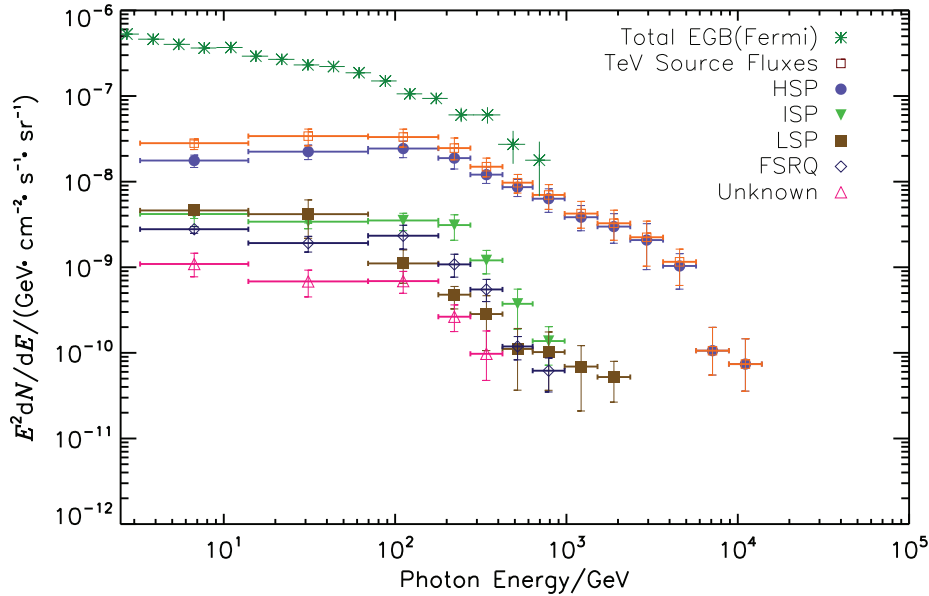


图5 在 $|b| > 10^\circ$ 的天区, 不同类别耀变体对TeV河外伽马射线背景的贡献: HSP为紫色圆点, ISP为绿色三角, LSP为棕色方形, FSRQ为空心菱形, 两个不知道具体类型的源为粉色三角. 明显看出高同步峰蝎虎天体是河外TeV伽马射线背景的主要贡献者.

Fig.5 At  $|b| > 10^\circ$ , the contributions of different subclass of blazars to TeV EGB: HSPs are represented in purple circles, ISPs are represented in green triangles, LSPs are represented in brown squares, FSRQs are represented in hollow diamonds, unknown sources are represented in pink triangles. It is clear that the HSPs are the main contributor to TeV EGB.

在 $|b| > 10^\circ$ 的天区, 我们将所有具有低活跃态能谱的TeV源按红移等数目的划分成低红移(0–0.069)、中红移(0.069–0.182)、高红移(0.182–0.682) 3类, 将未知红移的10个TeV源合为一类. 在图6中明显看出, TeV源的平均能谱从低红移到高红移变软, 这是由于红移越大高能伽马射线的EBL (Extragalactic Background Light)吸收效应越明显. 这可以解释目前研究者已观测到最高红移类星体的红移达到9, 而有低活跃态的TeV源的最大红移仅为0.682. 此外, 未知红移源的平均能谱谱指数介于中红移源的平均能谱谱指数与高红移源的平均能谱谱指数之间, 我们预言, 这10个源的红移主要分布在中高红移的区间(0.069–0.682), 这个预言可以被未来的观测验证. 对于源S2 0109+22, Ansoldi等<sup>[54]</sup>使用2种方法估算红移分别为 $0.36 \pm 0.07$ 和 $\leq 0.67$ . 源PKS 1440–389和源OT 081的估算红移分别是 $0.14 \leq z \leq 0.24$ <sup>[73]</sup>和 $0.322$ <sup>[74]</sup>. 这些结果与我们的推测一致.

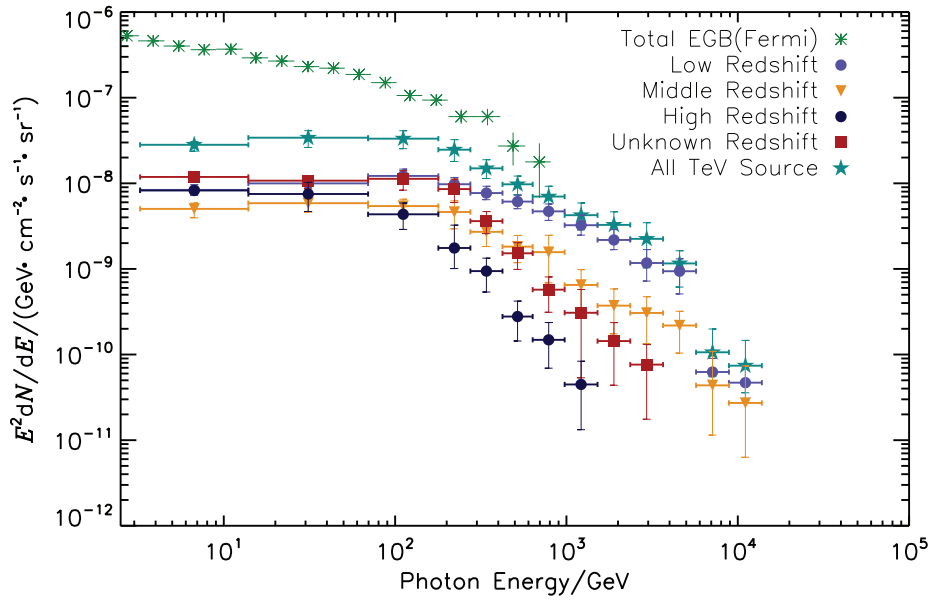


图 6 在  $|b| > 10^\circ$  的天区, 将全部具有低活跃态能谱的TeV源按红移等数目划分成低红移(0–0.069, 紫色圆形)、中红移(0.069–0.182, 橙色三角形)、高红移(0.182–0.682, 深蓝色圆形) 3类; 将未知红移的10个TeV源(红色方块)合为一类. 图中明显看出, TeV源的平均能谱从低红移到高红移明显变软, 这是因为红移越大, 高能伽马射线的EBL吸收效应越明显. 此外, 未知红移源的平均能谱谱指数介于中红移源与高红移源的平均能谱谱指数之间. 我们预言, 这10个源的红移主要分布在中高红移的区间.

Fig. 6 At  $|b| > 10^\circ$ , all the TeV sources with low-state spectrum are divided into three groups, low redshift (0–0.069, purple circle), middle redshift (0.069–0.182, orange triangle) and high redshift (0.182–0.682, dark blue circle) with the same number of objects and a group of objects with no measured redshift (red square). The average spectrum of the TeV sources becomes significantly softer from low redshift to high redshift for EBL absorption effect. In addition, the spectrum index of the group of objects with unknown redshift is between that of the middle redshift and high redshift group. We predict that the redshifts of these 10 objects are mainly distributed in the middle to high redshifts range.

## 4 总结与展望

随着成像大气切伦科夫望远镜的观测积累, 目前已有约230个TeV源被观测到, 其中河外TeV源约100个. 大气切伦科夫望远镜观测时, 常将宇宙线的大气簇射作为背景减掉, 这导致TeV伽马射线背景也被减掉. 所以目前几乎没有TeV伽马射线背景的观测. Inoue等<sup>[11]</sup>通过累积35个河外TeV源, 估算河外TeV伽马射线背景的下限. 在此基础上, 我们扩展了他们的工作, 分析了61个具有TeV低活跃态能谱的源, 通过将能谱重新划分能量区间, 分别计算每个流量区间所有源的累积流量, 给出了TeV伽马射线背景的下限. 本文的结果与Inoue等<sup>[11]</sup>具有一致性. 本文的结果显示在低能段(0.5–4.5 TeV), 两个临近的耀变体Mrk 421和Mrk 501是主要贡献者, 贡献了大约58%的累计背景流量; 而在大于4.5 TeV的能段, 3个已观测到10 TeV以上能段流量的极端耀变体H 1426+428、1ES 1959+650以及1ES 0229+200, 成为主要贡献者. 同时分别计算了星暴星系, 射电星系以及耀变体对河外TeV伽马射线背景的贡献, 不同耀变体子类对河外TeV伽马射线背景的贡献以及不同红移区间TeV源对河外TeV伽马射线背景的贡献. 我们发现河外TeV源中,

耀变体贡献了大部分河外TeV伽马射线背景流量. 而在耀变体中, 高同步峰蝎虎天体是主要贡献者. 随着新的大气切伦科夫望远镜, 如LHASSO、CTA (Cherenkov Telescope Array)投入使用, 可以预期更多河外TeV源被观测到, 更加有效的TeV伽马射线背景下限会被给出.

**致谢** 感谢TeVCat数据库的协助. 感谢中国科学院暗物质和空间天文重点实验室提供的实验条件.

### 参考文献

- [1] Chiang J, Fichtel C E, von Montigny C, et al. *ApJ*, 1995, 452: 156
- [2] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. *PhRvL*, 2010, 104: 101101
- [3] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. *ApJ*, 2010, 708: 1254
- [4] Fichtel C E, Hartman R C, Kniffen D A, et al. *ApJ*, 1975, 198: 163
- [5] Strong A W, Moskalenko I V, Reimer O. *ApJ*, 2004, 613: 956
- [6] Sreekumar P, Bertsch D L, Dingus B L, et al. *ApJ*, 1998, 494: 523
- [7] Stecker F W, Salamon M H. *ApJ*, 1996, 464: 600
- [8] Ackermann M, Ajello M, Albert A, et al. *ApJ*, 2015, 799: 86
- [9] Ackermann M, Ajello M, Albert A, et al. *PhRvL*, 2016, 116: 151105
- [10] Harding J P. 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2019). Madison: Proceedings of Science, 2019: 691
- [11] Inoue Y, Tanaka Y T. *ApJ*, 2016, 818: 187
- [12] Aharonian F, Akhperjanian A, Barrio J, et al. *A&A*, 2002, 384: L23
- [13] Krawczynski H, Hughes S B, Horan D, et al. *ApJ*, 2004, 601: 151
- [14] Abramowski A, Acero F, Aharonian F, et al. *A&A*, 2012, 538: A103
- [15] Acciari V, Aliu E, Arlen T, et al. *ApJ*, 2009, 690: L126
- [16] Abramowski A, Acero F, Aharonian F, et al. *MNRAS*, 2013, 434: 1889
- [17] Acciari V A, Aliu E, Arlen T, et al. *ApJ*, 2010, 715: L49
- [18] Abramowski A, Acero F, Aharonian F, et al. *A&A*, 2012, 542: A94
- [19] Abramowski A, Acero F, Aharonian F, et al. *A&A*, 2013, 554: A72
- [20] Acciari V A, Aliu E, Arlen T, et al. *ApJ*, 2009, 695: 1370
- [21] Aharonian F, Perjanian A G, Barres de Almeida U, et al. *A&A*, 2007, 473: L25
- [22] Albert J, Aliu E, Anderhub H, et al. *ApJ*, 2007, 667: L21
- [23] Aharonian F, Akhperjanian A G, Bazer-Bachi A R, et al. *A&A*, 2007, 470: 475
- [24] Aleksić J, Alvarez E A, Antonelli L A, et al. *A&A*, 2012, 539: A118
- [25] Aharonian F, Akhperjanian A G, Barres de Almeida U, et al. *A&A*, 2007, 475: L9
- [26] Aliu E, Archambault S, Arlen T, et al. *ApJ*, 2013, 779: 92
- [27] Lenain J P, Nedbal D, Raue M, et al. Workshop on Blazar Variability Across the Electromagnetic Spectrum. Palaiseau: Proceedings of Science, 2008: 46
- [28] Abramowski A, Acero F, Aharonian F, et al. *A&A*, 2013, 559: A136
- [29] Aliu E, Archambault S, Arlen T, et al. *ApJ*, 2012, 750: 94
- [30] Aharonian F, Akhperjanian A G, Anton G, et al. *A&A*, 2010, 521: A69
- [31] Acciari V A, Aliu E, Arlen T, et al. *ApJ*, 2010, 708: L100
- [32] Aleksić J, Alvarez E A, Antonelli L A, et al. *ApJ*, 2012, 748: 46
- [33] Acero F, Aharonian F, Akhperjanian A G, et al. *A&A*, 2010, 511: A52
- [34] Abramowski A, Aharonian F, Ait Benkhali F, et al. *A&A*, 2014, 562: A145
- [35] Aharonian F, Akhperjanian A G, Bazer-Bachi A R, et al. *A&A*, 2006, 455: 461
- [36] Albert J, Aliu E, Anderhub H, et al. *ApJ*, 2007, 663: 125

- [37] Albert J, Aliu E, Anderhub H, et al. *ApJ*, 2007, 669: 862
- [38] Abdalla H, Aharonian F, Ait-Benkhalil F, et al. *MNRAS*, 2019, 82: 3011
- [39] Acciari V A, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. *MNRAS*, 2019, 490: 2284
- [40] Archer A, Benbow W, Bird R, et al. *ApJ*, 2018, 862: 41
- [41] Gaté F, Fitoussi T. 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2017). Busan: Proceedings of Science, 2017: 645
- [42] Archambault S, Archer A, Barnacka A, et al. *MNRAS*, 2016, 461: 202
- [43] Abeysekera A U, Archambault S, Archer A, et al. *MNRAS*, 2016, 459: 2550
- [44] Ahnen M L, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. *MNRAS*, 2016, 459: 3271
- [45] Aleksić J, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. *A&A*, 2014, 572: A121
- [46] Aleksić J, Antonelli L A, Antoranz P, et al. *A&A*, 2014, 563: A90
- [47] Ventura S. 43rd Committee on Space Research Conference (COSPAR 2021). 2021: Event E1.15
- [48] Prandini E. *Mem. S. A. It.*, 2019, 90: 164
- [49] Acciari V A, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. *ApJS*, 2020, 247: 16
- [50] Abdalla H, Adam R, Aharonian F, et al. *MNRAS*, 2020, 494: 5590
- [51] Albert J, Aliu E, Anderhub H, et al. *ApJ*, 2007, 666: L17
- [52] Aleksić J, Antonelli L A, Antoranz P, et al. *ApJ*, 2011, 726: 58
- [53] Anderhub H, Antonelli L A, Antoranz P, et al. *ApJ*, 2009, 704: L129
- [54] Ansoldi S, Antonelli L A, Arcaro C, et al. *MNRAS*, 2018, 480: 879
- [55] Abramowski A, Aharonian F, Ait Benkhali F, et al. *A&A*, 2015, 573: A31
- [56] Schüssler F, Seglar-Arroyo M, Arrieta M, et al. 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2017). Busan: Proceedings of Science, 2017: 652
- [57] Acciari V A, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. *A&A*, 2021, 647: A163
- [58] Acciari V A, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. *A&A*, 2018, 619: A159
- [59] Prokoph H, Becherini Y, Böttcher M, et al. 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015). The Hague: Proceedings of Science, 2015: 862
- [60] Abdalla H, Adam R, Aharonian F, et al. *A&A*, 2020, 633: A162
- [61] Saveliev A, Batista R A. *MNRAS*, 2021, 500: 2188
- [62] O'Brien S. *arXiv:1708.02160*
- [63] Abramowski A, Acero F, Aharonian F, et al. *ApJ*, 2012, 757: 158
- [64] Karlsson N. *arXiv:0912.3807*
- [65] Abdalla H, Abramowski A, Aharonian F, et al. *A&A*, 2018, 619: A71
- [66] Acciari V A, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. *MNRAS*, 2020, 492: 5354
- [67] Ansoldi S, Antonelli L A, Arcaro C, et al. *A&A*, 2018, 617: A91
- [68] Archer A, Benbow W, Bird R, et al. *ApJ*, 2020, 896: 41
- [69] Abdalla H, Abramowski A, Aharonian F, et al. *MNRAS*, 2018, 476: 4187
- [70] Ahnen M L, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. *A&A*, 2017, 603: A25
- [71] Qu Y K, Zeng H D, Yan D H. *MNRAS*, 2019, 490: 758
- [72] He H H. 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015). The Hague: Proceedings of Science, 2015: 1010
- [73] Sahu S, Fortín C E L, Nagataki S. *ApJ*, 2019, 884: L17
- [74] Stickle M, Fried J W, Kuehr H. *A&A*, 1988, 191: L16

## An Estimation of the Lower Bound on the Extragalactic TeV $\gamma$ -ray Background

QU Yan-kun<sup>1,2,3</sup> ZENG Hou-dun<sup>1,2</sup>

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**ABSTRACT** Fermi satellite released fairly accurate measurement of extragalactic gamma-ray background (EGB) from 100 MeV to 820 GeV, which dramatically improve our understanding of the high energy gamma-ray background. But for TeV band, space detector is too small to help, and we must rely on ground based gamma-ray telescopes such as imaging atmospheric Cherenkov telescopes (IACTs). Until now, the extragalactic TeV gamma-ray background has not been well investigated. In this paper, we calculate the lower bound of extragalactic TeV gamma-ray background radiation by using the energy spectrum of low state of 61 TeV sources, including 53 blazars, 6 radio galaxies, and 2 starburst galaxies, respectively. Our results show that blazars is the main contributor of the extragalactic TeV gamma-ray background, especially for Mrk 501 and Mrk 421, whose contribution at 0.5–4.5 TeV is about 58%. And the contribution above 4.5 TeV are mainly from the sources H 1426+428, 1ES 1959+650 and 1ES 0229+200, and their energy spectrum distribution has been extended to more than 10 TeV. Finally, we calculate the contribution of blazars, radio galaxies, and starburst galaxies, respectively. Similar calculation is used to subclass of blazars and sources with different redshifts.

**Key words** galaxies: active, cosmology: background radiation, cosmology: diffuse radiation, gamma-rays: diffuse background, methods: statistical