

位于河外背景光吸收的伽马射线视界的 Fermi-LAT耀变体的探测^{*}

马晓璐 廖能惠[†] 刘琼

(贵州大学物理学院 贵阳 550025)

摘要 河外背景光(Extragalactic Background Light, EBL)是弥散在整个宇宙中的远红外至紫外的电磁波辐射,携带了宇宙演化的重要信息.因为伽马射线光子在宇宙穿行的过程中能够与河外背景光产生双光子湮灭,因此探寻宇宙的伽马射线光深对理解河外背景光至关重要,而探测遥远伽马射线源的河外背景光吸收显著($\tau_{\gamma} > 1$, τ_{γ} : 高能伽马射线光子与低能背景光子的吸收光学深度)的视界光子是一种直接有效的方法.针对 Fermi-LAT最新的伽马射线源样本,经过细致的筛选和认真的红移甄别,对448个源进行了系统性的伽马射线数据分析.通过与主流的河外背景光模型对比,结果揭示了46个视界光子来源于36个耀变体,其中最远的源红移达到2.944.进一步的伽马射线时域分析表明,部分的耀变体的最强烈的耀发与视界光子的探测时间成协.来自于平谱射电类星体的批量视界光子对喷流的辐射区域位置有所限制.与此同时,辐射视界光子的耀变体可作为下一代空间与地面伽马射线望远镜观测的重要对象.

关键词 星系: 活动星系, 星系: 喷流, 宇宙学: 宇宙背景辐射

中图分类号: P158; **文献标识码**: A

1 引言

河外背景光(Extragalactic Background Light, EBL)是弥漫在整个宇宙空间的、覆盖从远红外波段至紫外波段的(例如: 波长范围0.1–1000 μm)电磁波辐射^[1].作为宇宙背景辐射之一,EBL是除宇宙微波背景辐射以外的能量输出最强的宇宙背景辐射.整个EBL在能谱形状上呈现一个双峰结构,分别在1 μm (宇宙光学背景, cosmic optical background)以及100 μm (宇宙红外背景, cosmic infrared background)处达到极大值,与此同时,在10 μm 处为极小值.河外背景光的光学-紫外部分被认为来自于宇宙星系的星光,星系中央

的超大质量黑洞的活动乃至暗物质粒子的湮灭等贡献.其红外部分则来源于上述光学-紫外辐射被尘埃遮蔽吸收后尘埃产生的再辐射.作为宇宙的基本组成之一,河外背景光是自宇宙大爆炸以来红外至紫外波段辐射的累积,蕴含了宇宙演化的关键信息,有着重要的研究意义^[2–3].

实际上,精确测量河外背景光非常困难.因为地球不仅浸没于河外背景光中,也处于其它辐射流量密度更大的前景弥散辐射中.其中影响的主体包括黄道光,以及来自于银河系暗星本体星光及高银纬尘埃的散射光.考虑到黄道光自10 μm 处的辐射强度随着波长变长而衰减,100 μm 处为EBL的有效探测窗口^[4].在近红外波段,1–5 μm 的

2025-03-24收到原稿, 2025-05-06收到修改稿

^{*}国家自然科学基金项目(U2031120)资助

[†]nhliao@gzu.edu.cn

河外背景光有着特殊的研究意义. 因为宇宙早期(红移约为8-10)星族三恒星的星光在宇宙学红移的影响下会落入此波段^[5]. 近期, 距离太阳40 AU的新视野号探测器提供了关于近红外河外背景光的探测^[6]. 除了直接探测之外, 还可以基于目前红外光学天文设备的观测构建星系光度函数并计算它们的辐射累积来限制河外背景光的强度. 由于光度函数暗端的较大不确定性, 通常星系计数方法只能提供河外背景光的下限^[7-9].

在伽马射线天文学建立伊始, 天文学家就认识到通过遥远的伽马射线辐射源可以间接限制河外背景光的强度^[10-11]. 伽马射线光子在宇宙中穿行的过程中, 伴随着与河外背景光相互作用的双光子湮灭过程, 即 $(\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-)$ ^[12]. 换言之, 宇宙的伽马射线光厚程度与河外背景光的强弱息息相关. 对于甚高能伽马射线光子, 对应吸收的河外背景光的波段约在近红外附近 $\epsilon \sim 0.8(E/\text{TeV})^{-1}$ eV, 其中 ϵ 为河外背景光子的能量, E 是伽马射线光子的能量. 在伽马射线天空中, 伽马射线暴和耀变体是主要的银河系外伽马射线辐射源^[13]. 耀变体是一类特殊的活动星系核, 其强烈的相对论性喷流朝向地球, 喷流的辐射得益于聚束效应而被显著地放大. 耀变体的典型观测特征包括从射电至甚高能伽马射线的全波段电磁辐射以及快速大幅度的光变等^[14]. 基于不同的光学光谱特征, 耀变体分为平谱射电类星体(Flat Spectral Radio Quasar, FSRQ)以及蝎虎座天体(BL Lacertae objects, BL Lac). 前者具有有效吸积带来显著的光学发射线, 后者的黑洞吸收效率较低从而光学光谱为平滑的幂律分布. 耀变体的宽波段能谱呈现一个双峰结构, 低频峰通常被认为来自于相对论性电子的同步辐射, 高频峰延伸至伽马射线能段, 其辐射起源仍有较大争议. 根据低频峰的位置, 耀变体又被分为低同步峰频源(Low-Synchrotron-Peaked blazar, LSP, $< 10^{14}$ Hz), 中同步峰频源(Intermediate-Synchrotron-Peaked blazar, ISP, $10^{14} - 10^{15}$ Hz)以及高同步峰频源(High-Synchrotron-Peaked blazar, HSP, $> 10^{15}$ Hz).

早期地面切伦科夫伽马射线望远镜对耀变体的甚高能伽马射线的观测在限制河外背景光的研

究中扮演了重要角色. H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System)望远镜观测到近邻蝎虎座天体(例如: H 2356-309及1ES 1101-232)的硬伽马射线谱, 严格限制了河外背景光的流量水平^[15]. 有意思的是, MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov)望远镜于FSRQ 3C 379(红移达到0.536)也探测到甚高能伽马射线辐射^[16]. 这意味着对于伽马射线光子来说, 宇宙比我们想象的更透明. 费米伽马射线空间望远镜(Fermi Gamma-ray Space Telescope)十余年良好的运行极大地推动了伽马射线天文领域的发展. 它搭载了两台核心科学仪器: 大面积望远镜(Large Area Telescope, LAT^[17])和伽马射线暴监测器(GLAST Burst Monitor, GBM), 费米大面积望远镜(Fermi-LAT)具有宽探测能段范围(0.1 GeV到大于500 GeV), 大的接收面积和视场等优势, 目前已经发现了数千个河外伽马射线源^[18], 其中最遥远的红移可达4.3^[19]. 这些源系统性地刻画了宇宙不同红移处的伽马射线不透明度^[20], 对恒星形成历史的限制起到了重要作用^[21].

然而, 上述方法通常需要假设一个内禀吸收前的辐射谱与观测谱比较, 通过相应的差异来衡量河外背景光吸收的强弱. 一种内禀谱假设基于相对论性宇宙线的加速理论, 即粒子谱不能够太硬($\Gamma > 1.5$, $f(\nu) \propto \nu^{-\Gamma}$, Γ : 伽马射线幂律谱指数, $f(\nu)$: 流量, ν : 频率)^[15]; 另外一种相对不依赖模型的方法是通过在MeV-GeV能谱上叠加一个GeV-TeV谱来作为内禀谱^[20]. 事实上, 我们目前对粒子加速过程的理解仍然非常有限, 并且观测到的耀变体伽马射线能谱也呈现出多样且复杂的特征. 例如, 耀变体的能谱, 特别是FSRQ通常存在系统性的弯曲^[22]. 这些局限性使得内禀谱的选取不可避免地存在系统性的不确定性. Fermi-LAT望远镜对单个伽马射线光子事例的分辨能力, 为限制河外背景光模型提供了一种独立于本征谱假设的研究途径: 即搜寻光学深度 $\tau_{\gamma} \gtrsim 1$ 的视界伽马射线光子. 一个典型的例子是2013年Fermi-LAT探测到来自PKS 0426—380(红移为1.1)的两个甚高能光子, 能量分别为122和134 GeV^[23]. 尽管相关的搜寻研究工作一直在持续开展, 但现有工作大多局限于

对少数源的个体分析^[24-25].

本文旨在利用16 yr Fermi-LAT数据, 系统性搜寻来自于耀变体的河外背景光的视界伽马射线光子. 目前Fermi活动星系核样本(The Fourth Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope: Data Release 3, 4LAC-DR3^[26])已经采用前12 yr数据列出了每个源的最高能光子的能量, 我们额外多包含了最新的4 yr数据, 更重要的是, 我们详尽收集了耀变体的红移探测信息, 并完成了仔细的甄别, 这对确定到达光子是否为视界光子至关重要. 搜寻更多的视界光子能够加深我们对河外背景光的理解. 除此之外, 我们还系统性开展了目标源的时域分析, 探讨了视界光子的起源, 对耀变体的能量耗散机制作出限制. 本文采取标准的 Λ -冷暗物质宇宙学模型($\Omega_M = 0.32$, $\Omega_\Lambda = 0.68$, 哈勃常数 $H_0 = 67 \text{ km}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, Ω_M : 物质密度参数, Ω_Λ : 暗能量密度参数)^[27].

2 样本构建与Fermi-LAT数据分析

2.1 候选体选择

基于目前最新的Fermi-LAT伽马射线源表(Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog Data Release 4, 4FGL-DR4^[18]), 我们开展了河外背景光视界伽马射线光子的搜寻工作. 首先排除了低银纬($|b| < 10^\circ$)的伽马射线源, 因为该区域的弥散伽马射线背景远高于高银纬区, 居主导地位; 另外银盘处受到银河系内源影响, 伽马射线源密度更大, 从而使得数据处理更为复杂. 其次, 哪怕是在高银纬处, 也存在为数不少的伽马射线脉冲星, 且有诸多伽马射线源的低能对应体尚不清楚(例如: 没有对应体或多个对应体), 因此我们只考虑低能对应体关系明确为活动星系核的伽马射线源. 考虑到视界光子探测的困难, 探测置信度低($TS < 200$, test statistic)的源本文不予考虑, 其中 $TS = -2\Delta \lg(\zeta_0/\zeta)$ (ζ_0 : 零假设(无源)的极大似然值, ζ : 备择假设(有源)的极大似然值), 定义为对应于伽马射线数据分析中不同模型(是否包含目标源)的对数似然比^[28]. 与此同时, 我们只考虑数据分析中没有提示警告的源(data flag = 0). 最后,

因为Fermi-LAT的有效面积在高于500 GeV后迅速下降, 我们只选择红移大于0.5的已知源.

2.2 Fermi-LAT数据处理

我们收集了候选体方向上Fermi-LAT运行的前16 yr (2008年8月4日至2024年8月4日)的PASS 8数据, 利用最新版本的软件(Fermitools 2.2.0)进行了整体的数据分析来搜寻视界光子. 分析对应的数据能量范围为1 GeV至1 TeV. 采用ULTRACLEANVETO类型数据(光子事件分类evclass = 1024, 光子事件特征evtype = 3). 首先, 进行数据的筛选, 一方面考虑了地球大气伽马射线辐射的污染(最大天顶角设为 $z_{\max} = 105^\circ$), 另一方面也剔除了质量较差的数据(数据质量DATA_QUAL > 0, 望远镜运行状态LAT_CONFIG = 1). 在计算伽马射线光子的曝光度之后, 运用gtlike工具中的Unbinned似然分析方法, 对数据进行拟合来抽取目标源的伽马射线观测信息. 在似然分析中, 考虑以每个目标源位置为中心的半径为 5° 的范围为兴趣区域(region of interest, ROI). 在此区域中的所有伽马射线源的参数^[18], 以及银河系(gll_iem_v07.fits)与系外弥散伽马射线背景(iso_P8R3_ULTRACLEANVETO_V3_v1.txt)的归一化参数都放开参与拟合. 区域外的背景伽马射线源的参数保持固定为默认值.

针对确定具有视界光子的耀变体, 我们进一步开展了伽马射线的时域数据分析. 为了保证足够的统计量, 采用SOURCE类型数据(evclass = 128, evtype = 3), 对应的系外伽马射线模版为iso_P8R3_SOURCE_V3_v1.txt. 与此同时, 数据的能量范围为0.1 GeV至1 TeV. 因为Fermi-LAT的亚GeV光子的空间分辨相比于GeV光子较差, $z_{\max} = 90^\circ$, 且在似然分析中ROI的半径设为 10° . 在时域分析中, 把探测置信度较弱的背景源从模型文件中删除以保持拟合的收敛, 且当目标源的探测置信度较低时, 给出95%置信水平的流量上限估计.

2.3 红移检验

确定耀变体的红移信息对搜寻视界伽马射线光子非常重要. 虽然具有显著发射线FSRQ的红移

容易探测, 然而其伽马射线谱相较于蝎虎座天体偏软, 更难产生甚高能伽马射线光子^[26]. 事实上, 探测蝎虎座天体的红移是目前公开的难题, 尤其是高同步峰频源^[29]. 对于红移较小的源(例如: < 0.5), 从光学-近红外波段光谱及图像中搜寻其寄主星系的辐射特征, 是一种有效限制红移的方法. 更直接的办法需要大口径的光学望远镜(5-8 m级)开展高信噪比的较高色散的分光观测, 利用潜在的微弱本征发射线直接给出红移测量, 搜寻到可能的前景吸收线也能提供红移的可靠下限. 诚然宽波段的测光观测能够对大批量的天体进行红移限制, 但是针对于单个源而言, 测光红移的准确性通常是不够的.

伴随着Fermi-LAT的伽马射线巡天观测, 后随的光学光谱观测一直在开展^[30-32], 主要是针对没有红移以及光谱分类信息的伽马射线源, 又称为未知类型耀变体(blazar candidates of uncertain type). 更重要的是, 由于切伦科夫阵列望远镜(Cherenkov Telescope Array, CTA)即将投入运行, 对于高同步峰频蝎虎座天体的光学光谱观测在持续进行^[33-34]. 借助于归档的数据, 我们对候选体的红移进行了仔细的甄别. 本文考虑具有光谱红移的源, 剔除了仅有测光红移的源. 其中大部分的红移测量来自于有双吸收/发射线的证认. 少数源仅有单吸收/发射线, 我们也包含在样本中, 但是给予特殊的标识. 对于只探测到单纯光滑幂律谱的蝎虎座天体, 我们也不予考虑.

3 结果

3.1 辐射视界光子的探测

基于4LAC-DR3^[26]中的红移信息以及上文中的选择标准, 我们筛选出400个伽马射线耀变体作为候选体. 此外, 利用NED¹ (NASA/IPAC Extragalactic Database, IPAC: Infrared Processing and Analysis Center)提供的红移信息额外增加了48个源作为数据分析的对象. 对于少量4LAC-DR3红移信息与NED红移信息不一致的源, 我们仔细做了鉴别, 确定了其真实的红移值. 接下来, 我们对这

448个源的ULTRACLEANVETO类型Fermi-LAT数据开展了系统性分析. 此类数据在PASS 8各数据子类中具有最低的宇宙线背景, 从而有效地规避了探测到的伽马射线来自于背景本底的干扰. 数据分析提供了能够描述数据的源模型文件, 基于此文件且利用gtsrcprob工具, 我们得以计算出每个光子事例与目标天体的关联概率. 在挑选视界光子过程中, 我们仅选择概率值超过90%的光子. 额外的选择判据为光子的探测能量, 相应能量应高于河外背景光模型在目标源红移处对应的吸收光深为1的光子能量. 本文中, 主流的河外背景光的模型: Finke等^[8]、Domínguez等^[9]、Gilmore等^[35]均被考虑. 因为Domínguez等^[9]模型相对最为光薄, 满足其模型的河外背景光吸收光深大于1的光子显然满足视界光子的定义. 保守起见, 我们把满足Finke等^[8]中等光薄模型条件的光子也列在文中. 在最终确定样本之前, 我们对每个源开展了单独的二次红移甄别. 在检查过程中, 我们发现若干源的SDSS红移测量值来自于脚本程序批量分析且不可靠, 因此这些源于本文结果中被剔除.

本文展示了46个光子, 它们的来源、能量、到达时间, 以及与相应耀变体的对应概率被列于表1中. 视界光子与主流的河外背景光的比较见图1, 有20个光子满足最严格的条件, 即在最光薄的河外背景光模型^[9]中也满足 $\tau_{\gamma} \gtrsim 1$. 其中光子的能量范围从约40 GeV至364 GeV. 该40 GeV光子来自于红移高达2.944的FSRQ. 实际上, 高红移耀变体非常暗弱, 在数千个河外伽马射线耀变体中目前红移大于3的源的数目不超过20个. 有意思的是, 我们在红移2.86的一个耀变体中也发现了两个视界光子, 能量分别为76 GeV和43 GeV. 本研究分析的视界光子探测数据涵盖从Fermi-LAT运行初期(mission elapsed time, MET: 239991691, 或2008-08-09)至近期(MET: 722539649, 或2023-11-24)的时段. 共有6个视界光子是于4LAC-DR3^[26]发表之后发现的. 由于Fermi-LAT的角分辨率在高于10 GeV的能量下达到最佳, 因此所探测光子的(认证)概率普遍较高. 在46个光子中, 仅有2个的关联概率低于95%.

¹NED: <https://ned.ipac.caltech.edu/>

表 1 视界光子列表
Table 1 Event horizon photon list

Gamma-ray Source	Arrival Time (MET)	Photon Energy/GeV	gtsrcprob Probability	EBL Model
	280283975	67.0	0.991	Finke et al. ^[8]
4FGL J0008.0+4711	403857710	68.2	0.989	Finke et al. ^[8]
	676603603	72.3	0.956	Finke et al. ^[8]
4FGL J0022.5+0608	607855704	76.1	0.971	Domínguez et al. ^[9]
	638590022	43.4	0.973	Finke et al. ^[8]
4FGL J0033.5-1921	247811539	235.3	0.944	Domínguez et al. ^[9]
	504370604	364.5	0.986	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J0043.8+3425	239991691	110.0	0.978	Finke et al. ^[8]
4FGL J0050.7-0929	586680467	204.4	0.989	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J0108.6+0134	703275547	52.1	0.991	Finke et al. ^[8]
4FGL J0120.4-2701	643559231	177.2	0.982	Finke et al. ^[8]
4FGL J0237.8+2848	704829110	89.3	0.964	Finke et al. ^[8]
4FGL J0238.6+1637	498027168	145.1	0.998	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J0334.2-4008	413444477	85.6	0.997	Finke et al. ^[8]
4FGL J0349.8-2103	573697121	39.6	0.968	Finke et al. ^[8]
4FGL J0428.6-3756	380539944	115.8	0.999	Domínguez et al. ^[9]
	532686700	116.5	0.998	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J0433.6+2905	714276267	110.1	0.998	Finke et al. ^[8]
	280301340	102.8	0.991	Finke et al. ^[8]
4FGL J0457.0-2324	286202841	111.0	0.998	Finke et al. ^[8]
4FGL J0538.8-4405	517142134	145.7	0.994	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J0630.9-2406	312059487	83.1	0.999	Finke et al. ^[8]
4FGL J0808.2-0751	278764142	130.4	0.990	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J0811.4+0146	310683540	113.8	0.963	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J0909.7-0230	566478831	338.6	0.959	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J0957.6+5523	276968880	145.9	0.999	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J1107.6+0222	704727478	105.5	0.915	Finke et al. ^[8]
4FGL J1159.5+2914	662136577	139.8	0.996	Finke et al. ^[8]
4FGL J1253.8+6242	500982534	170.8	0.996	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J1303.0+2434	523639540	134.8	0.98	Domínguez et al. ^[9]

表1 续
Table 1 Continued

Gamma-ray Source	Arrival Time (MET)	Photon Energy/GeV	gtsrcprob Probability	EBL Model
4FGL J1310.5+3221	722539649	102.8	0.99	Finke et al. ^[8]
4FGL J1316.1-3338	269606112	96.7	0.982	Finke et al. ^[8]
	613809147	90.3	0.993	Finke et al. ^[8]
4FGL J1345.5+4453	343372554	50.3	0.985	Finke et al. ^[8]
	367484672	49.0	0.995	Finke et al. ^[8]
4FGL J1419.5+3821	302322900	72.2	0.99	Finke et al. ^[8]
	400849409	180.3	0.995	Finke et al. ^[8]
4FGL J1427.0+2348	402630820	253.7	0.999	Domínguez et al. ^[9]
	564349647	217.9	0.999	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J1427.9-4206	541052252	72.4	0.997	Finke et al. ^[8]
4FGL J1722.7+1014	264581404	171.7	0.995	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J1748.6+7005	656251050	150.0	0.995	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J1918.2-4111	413682658	106.3	0.984	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J2147.3-7536	328538277	137.0	0.982	Domínguez et al. ^[9]
4FGL J2232.6+1143	506592898	97.9	0.998	Finke et al. ^[8]
4FGL J2253.9+1609	706976168	143.4	0.991	Domínguez et al. ^[9]

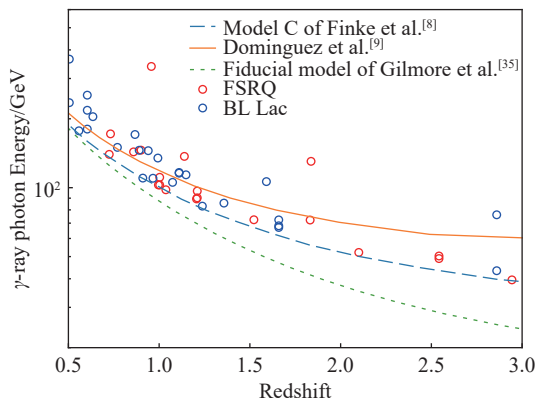


图 1 探测到的视界光子及与主流河外背景光模型比较

Fig. 1 Detected horizon photon and their comparison with EBL models

这46个光子源自于36个耀变体, 通常情况下, 每个源仅贡献一个光子. 但是, 有8个耀变体能够单独贡献多个视界光子, 见表1. 值得注意的是,

4FGL J0008.0+4711与4FGL J1427.0+2348是唯一的能够贡献3个视界光子的源, 其余的6个源都是两个视界光子. 考虑到显著的河外背景光吸收的影响, 视界光子的低探测率基本符合我们的理论预期. 来自同一个源的不同视界光子, 其到达时间分布呈现出巨大差异, 时间间隔可以短至数月, 也可以长达十年. 这或许暗示着视界光子的产生可能与耀变体在不同时期的伽马射线耀发存在关联.

3.2 辐射视界光子耀变体的特征

利用4LAC-DR3^[26]提供的伽马射线源及其低能对应体的信息, 我们开展了对辐射视界光子耀变体特征的探究. 根据是否观测到显著发射线, 耀变体被分类为FSRQ和BL Lac. 物理上通常认为, 这一分类源于两类天体中心黑洞吸积效率的差异. 但也有研究表明, 选择效应可能是主要原因, 即主导的喷流辐射稀释了宽发射线辐射, 从而导致

FSRQ也存在无法探测到其发射线的现象^[36]. 有效吸收会引发明亮的吸积系统辐射, 相应的辐射波段也覆盖红外至紫外的范围. 这意味着耀变体的伽马射线光子不仅仅要逃脱河外背景光的吸收, 还需要摆脱活动星系核内禀辐射的吸收. 因此原则上探测来自FSRQ的视界光子或许更为困难. 然而, 在我们最终的辐射视界光子耀变体样本中, BL Lac与FSRQ的数目相同, 均为18个. 这与母样本4LAC-DR3^[26]中两类源的比例一致. 除BL Lac与FSRQ外, 射电噪窄线赛弗特星系(radio-loud narrow line Seyfert I, RLNLS1)也拥有朝向地球的强烈相对论性喷流和显著伽马射线辐射, 但我们的样本中并未包含此类源. 可能是因为这类源目前仍较为稀少. 事实上, 目前RLNLS1的甚高能辐射尚未被探测到, 且鉴于红外谱线证认存在困难, 大部分此类源的红移小于1. 此外值得注意的是, 样本中的4C+55.17因其较为紧凑的大尺度射电结构以及稳定的伽马射线辐射, 被认为是一个可能的年轻射电源, 但耀变体起源模型也未被完全排除^[37].

除了光谱分类, 耀变体还可以根据其同步辐射峰频的位置划分. 耀变体能谱的两个峰的峰频似乎存在正向的关联, 因此, 同步辐射峰频率越高, 逆康普顿峰(高能峰)的频率也越高, 这导致了观测上的结果: HSP耀变体高能峰的峰频通常比LSP的峰频更高, 伽马射线谱也比LSP的更硬^[26]. 大部分的FSRQ为LSP, 而BL Lac天体的同步峰频则分布比较宽泛, 涵盖了LSP、ISP和HSP等多种类型. 同步峰频的位置被认为与源的辐射功率反相关, 这一现象被称为“耀变体序列”^[38], 其主要特征表现为HSP BL Lac的光度显著低于LSP FSRQ. 然而, “耀变体序列”究竟是反映物理本质亦或是因选择效应导致仍存在较大争议^[37]. 从能谱分类角度分析这些具有视界光子辐射的耀变体, 我们发现样本中大部分的源为LSP. 36个源中, 只有3个HSP、4个ISP. 这一分布并不令人意外, 正如上文所言, 样本中有一半的源都为FSRQ. 然而, 如果我们单纯考虑样本中的BL Lac, LSP的数目为11个, 比例也超过了一半. 诚然目前源的数目仍非常有限, 统计学涨落可能会显著影响我们对真实分布的推断, 另一种可能的解释是BL Lac的宇宙学演

化效应, 因为HSP BL Lac具有明显的负演化行为, 在红移大于0.5后数密度迅速下降^[39], 而本研究样本仅包含红移大于0.5的源. 不过, 样本中发现一个HSP BL Lac, 即4FGL J0630.9-2406, 其红移下限高达1.238, 这一发现颇具意义.

样本中耀变体的伽马射线幂律谱指数 Γ 与能量流量的关系如图2所示, 其中能流的积分范围为0.1–100 GeV. 辐射视界光子的耀变体明显集中于整个4LAC-DR3^[26]耀变体的高流量端, 多数源亮度高于 $10^{-11} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 这符合物理预期, 因为只有基于足够的探测光子统计量, 视界光子才能被探测到. 事实上, 我们在最亮的几个FSRQ(例如: CTA 102和3C 454.3)中成功探测到了视界光子. 样本中耀变体的伽马射线谱谱指数大致分布在1.8至2.5之间. 值得注意的是, 4LAC-DR3^[26]中存在相当一部分谱指数大于2.5的FSRQ, 但我们并未在这些源中探测到视界光子. 一种可能的解释是, 这些软谱FSRQ或许存在较强的伽马射线内禀吸收, 其软光子可能来源于宽发射线区或吸积盘内区的冕辐射. 另一方面, 我们样本中也未包含具有极硬伽马射线能谱($\Gamma \approx 1.5$)的BL Lac天体. 这类源通常属于HSP BL Lac, 如前述讨论, 此类源多为近邻源(红移小于0.5), 因此未纳入本研究的红移筛选范围.

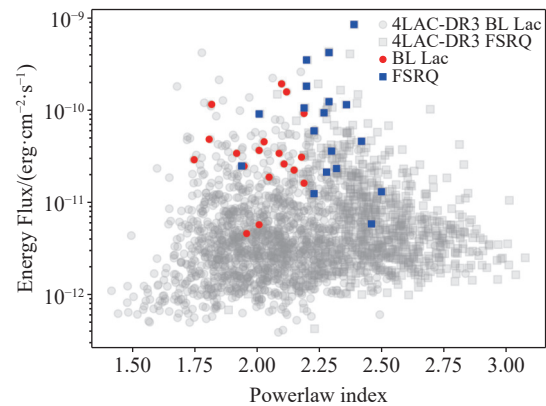


图2 辐射视界光子的耀变体的能流与伽马射线谱指数分布, 以及与整体4LAC-DR3^[26]耀变体的比较.

Fig. 2 Distributions between the energy flux and the γ -ray spectral index of the blazars that emit horizon photons, as well as the entire 4LAC-DR3^[26] blazars plotted as backgrounds.

3.3 耀变体伽马射线流量变化与到达视界光子的时域关联

光变是耀变体的典型观测特征之一, 耀变体伽马射线流量通常也随时间呈现出显著变化. Fermi伽马射线源表中公布了每个源的年平均光变曲线^[18]. 借助于光变指数方法(variability index, VI^[40])可判断每个源是否具有统计意义(99%置信水平, 或VI > 28). 我们将各源对数光变指数值列

于表2. 36个源中, 仅有2个源未探测到显著光变, 其中NVSS J110735+022225相对较暗, 有限的统计量可能影响到了其光变的探测. 考虑到绝大部分源均呈现显著的长时标伽马射线光变, 我们进一步针对于这34个源开展细致的伽马射线时域分析, 尝试探究耀变体伽马射线流量水平与视界光子探测的可能关联.

表 2 辐射视界光子耀变体的基本特征
Table 2 The basic properties of event horizon photons in blazars

4FGL name	Low-energy counterpart	Energy Flux	PL index	lg (VI)	Spectral type	SED type	z
4FGL J0008.0+4711	MG4 J000800+4712	1.87×10^{-11}	2.05	0.8	BL Lac	LSP	> 1.659 ^[41]
4FGL J0022.5+0608	PKS 0019+058	2.23×10^{-11}	2.15	2.3	BL Lac	LSP	2.86 ^[42]
4FGL J0033.5-1921	KUV 00311-1938	2.89×10^{-11}	1.75	2.0	BL Lac	HSP	> 0.505 ^[43]
4FGL J0043.8+3425	GB6 J0043+3426	2.47×10^{-11}	1.94	2.4	FSRQ	LSP	0.966 ^[31]
4FGL J0050.7-0929	PKS 0048-09	3.65×10^{-11}	2.01	2.2	BL Lac	ISP	0.635 ^[44]
4FGL J0108.6+0134	4C +01.02	1.14×10^{-10}	2.36	3.9	FSRQ	LSP	2.1 ^[45]
4FGL J0120.4-2701	PKS 0118-272	3.39×10^{-11}	1.92	1.6	BL Lac	ISP	> 0.558 ^[46]
4FGL J0237.8+2848	4C +28.07	1.23×10^{-10}	2.29	3.9	FSRQ	LSP	1.206 ^[31]
4FGL J0238.6+1637	PKS 0235+164	9.17×10^{-11}	2.19	3.8	BL Lac	LSP	0.94 ^[47]
4FGL J0334.2-4008	PKS 0332-403	3.08×10^{-11}	2.18	2.7	BL Lac	LSP	1.357 ^[32]
4FGL J0349.8-2103	PKS 0347-211	1.30×10^{-11}	2.5	2.6	FSRQ	LSP	2.944 ^[48]
4FGL J0428.6-3756	PKS 0426-380	1.92×10^{-10}	2.1	3.7	BL Lac	LSP	1.11 ^[49]
4FGL J0433.6+2905	MG2 J043337+2905	2.60×10^{-11}	2.11	2.3	BL Lac	LSP	0.91 ^[50]
4FGL J0457.0-2324	PKS 0454-234	1.81×10^{-10}	2.2	3.6	FSRQ	LSP	1.003 ^[51]
4FGL J0538.8-4405	PKS 0537-441	1.57×10^{-10}	2.12	4.0	BL Lac	LSP	0.894 ^[52]
4FGL J0630.9-2406	TXS 0628-240	4.81×10^{-11}	1.81	2.1	BL Lac	HSP	> 1.238 ^[53]
4FGL J0808.2-0751	PKS 0805-07	5.93×10^{-11}	2.23	3.2	FSRQ	LSP	1.837 ^[54]
4FGL J0811.4+0146	OJ 014	3.39×10^{-11}	2.09	2.6	BL Lac	LSP	1.148 ^[55]
4FGL J0909.7-0230	PKS 0907-023	2.12×10^{-11}	2.28	2.2	FSRQ	LSP	0.957 ^[56]
4FGL J0957.6+5523	4C +55.17	9.05×10^{-11}	2.01	1.7	FSRQ	LSP	0.9 ^[45]
4FGL J1107.6+0222	NVSS J110735+022225	5.71×10^{-12}	2.01	0.8	BL Lac	ISP	>1.074 ^[34]
4FGL J1159.5+2914	Ton 599	1.05×10^{-10}	2.19	3.9	FSRQ	LSP	0.725 ^[45]
4FGL J1253.8+6242	NVSS J125359+624257	4.58×10^{-12}	1.96	1.7	BL Lac	LSP	>0.867 ^[32]
4FGL J1303.0+2434	MG2 J130304+2434	1.61×10^{-11}	2.19	2.4	BL Lac	LSP	0.993* ^[57]

表2 续
Table 2 Continued

4FGL name	Low-energy counterpart	Energy Flux	PL index	lg (VI)	Spectral type	SED type	z
4FGL J1310.5+3221	OP 313	3.58×10^{-11}	2.3	3.0	FSRQ	LSP	0.996 ^[45]
4FGL J1316.1-3338	PKS 1313-333	2.32×10^{-11}	2.32	2.8	FSRQ	LSP	1.21 ^[58]
4FGL J1345.5+4453	B3 1343+451	9.32×10^{-11}	2.27	3.7	FSRQ	LSP	2.542 ^[31]
4FGL J1419.5+3821	B3 1417+385	5.83×10^{-12}	2.46	1.7	FSRQ	LSP	1.832 ^[45]
4FGL J1427.0+2348	PKS 1424+240	1.15×10^{-10}	1.82	2.6	BL Lac	HSP	0.604 ^[59]
4FGL J1427.9-4206	PKS 1424-41	3.48×10^{-10}	2.2	4.2	FSRQ	LSP	1.522 ^[54]
4FGL J1722.7+1014	TXS 1720+102	1.24×10^{-11}	2.23	2.1	FSRQ	LSP	0.732 ^[60]
4FGL J1748.6+7005	S4 1749+70	4.52×10^{-11}	2.03	2.7	BL Lac	ISP	0.77 ^[61]
4FGL J1918.2-4111	PMN J1918-4111	2.46×10^{-11}	1.95	2.0	BL Lac	LSP	> 1.591 ^[32]
4FGL J2147.3-7536	PKS 2142-75	4.58×10^{-11}	2.42	3.5	FSRQ	LSP	1.139 ^[62]
4FGL J2232.6+1143	CTA 102	4.19×10^{-10}	2.29	4.9	FSRQ	LSP	1.037 ^[45]
4FGL J2253.9+1609	3C 454.3	8.44×10^{-10}	2.39	4.9	FSRQ	LSP	0.859 ^[45]

Note: when the redshift value is marked with an asterisk, it indicates that the redshift measurement is based on a single emission line/absorption line. Energy Flux is in unit of $\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, with the integration range from 0.1 to 500 GeV. $\lg(\text{VI}) > 1.4$ indicates significant variability, where VI stands for variability index.

我们发现部分源中存在视界光子到达与十几年以来最剧烈的伽马射线耀发时间关联的情况。例如: 在2017年初, 著名耀变体CTA 102展现了猛烈的多波段爆发^[63], 其伽马射线流量变化幅度达到3个量级左右, 在流量高态, 探测到一个能量为98 GeV的光子, 另外一个例子为耀变体OP 313, 虽然此源之前十余年都处于较为宁静的状态, 近期首次探测到光变幅度超过两个量级的显著伽马射线活动, 伽马射线流量达到峰值时伴随着一个能量为103 GeV的光子被探测到, 见图3。流量增强带来的统计量的增加能够放大探测视界光子的概率。更重要的是, 耀变体伽马射线通常表现出越亮越蓝的观测行为, 这可能源于大量新鲜高能粒子的注入, 从而使视界光子更容易被探测到。然而, 值得注意的是, 存在不少源的视界光子探测与其伽马射线流量水平并无直接的关联, 如著名的耀变体3C 454.3以及高红移耀变体PKS 0347-211, 见图4。这两个耀变体的辐射视界光子并未局限于出现在耀变体的最强耀发期, 相反它们是在耀发间

歇的宁静期被探测到。鉴于样本有限且光变成因复杂, 本文未能深入探究视界光子的产生机制。未来可通过扩大样本和开展多波段观测进一步研究该问题。

4 讨论

4.1 对FSRQ伽马射线辐射区域位置的限制

耀变体伽马射线辐射区域位置一直是活动星系核喷流领域未被解决的核心问题之一, 严重制约了我们对喷流演化、相对论性粒子加速以及辐射过程的理解。考虑到耀变体的快速伽马射线光变^[64], 其辐射区域应较为致密。结合锥形几何喷流的假设, 辐射区应较为靠近中央超大质量黑洞。假设辐射区域位于宽发射线区至尘埃环附近(距离黑洞0.01–1 pc左右)时, 辐射理论计算能够较好地解释耀变体多波段的宽能谱分布^[65]。然而, 射电观测结果却给出了不同观点。通过射电动力学监测获得喷流射电节点抛出的时间并通过射电成像观测

确定射电核光厚区大小(即同步自吸收光深为1处), 结合伽马射线与射电波段光变曲线之间的延迟时间测量, 可以推断出辐射区域位置. 此方法得到的结果倾向于辐射区距离黑洞若干秒差距. 在极端情形下, 如伽马射线光变滞后于射电光变曲线时, 距离可达几十秒差距左右^[66]. 对于FSRQ而言, 在距离黑洞如此远处缺乏致密强烈的外光子场, 因此理论上产生高光度的伽马射线辐射较为困难.

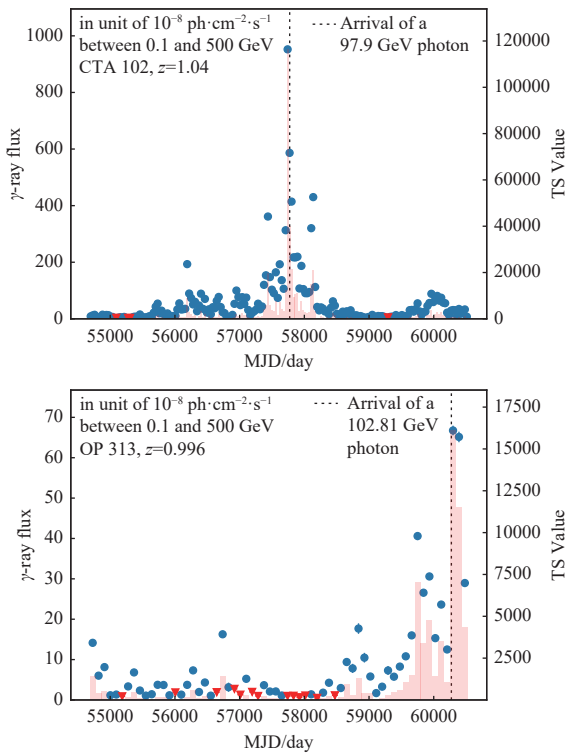


图 3 辐射视界光子的探测与部分耀变体最强伽马射线耀发时间成协, 以耀变体CTA 102 (上)和OP 313 (下)为例. 光变曲线中圆点为流量数据点, 三角为流量上限, 柱状图为TS值.

Fig. 3 Detections of horizon photons temporally coincide with the strongest γ -ray flares for some blazars, taking blazars CTA 102 (upper) and OP 313 (lower) as examples. In the γ -ray light curves, circles and triangles correspond to flux measurement and upper limits, along with TS values displayed as bars.

伽马射线光子在其传播过程中会经历双重吸收: 其一是普遍存在的河外背景光吸收; 其二是源自自身的内禀吸收. 引起内禀吸收的低能光子来源

多样, 既包括喷流自身的同步辐射, 也包括外部结构如吸积盘冕、宽线区及尘埃环的辐射. 大致上来说, 外部吸积系统光子场的频率和密度随着距离黑洞越远越低. 搜寻相应吸收过程在耀变体伽马射线谱中产生的印迹可以提供直接的观测支持. 值得注意的是, 在GeV能段观测到的耀变体能谱拐折, 与宽线区光子的吸收特征高度吻合^[67]. 与此同时, 有研究认为耀变体3C 454.3的GeV能谱截断, 可能源自其冕区软X射线光子的吸收^[68]. 对于耀变体视界光子的探测能够有效限制其辐射区域的位置. 考虑到伽马射线光子已经历显著的河外背景光吸收, 若其内禀吸收亦很显著, 则经吸收校正后的本征光度将被高估, 从而偏离理论预期. 我们发现了十余个来自FSRQ的视界光子, 这表明至少在一部分FSRQ的部分时期中, 其辐射区域应处于宽线区之外, 且内禀吸收效应较弱. 与此同时, 我们也发现部分耀变体的视界光子到达时间与剧烈的伽马射线耀发成协. 有研究工作表明, 辐射区域位置的变动, 例如从宽线区内移到宽线区之外, 可以解释耀变体多波段的耀发现象^[69]. 靠外的辐射区域对应于更弱的软光子吸收, 从而有益于视界光子的探测, 这与我们的研究结果是一致的.

4.2 下一代空间及地面伽马射线望远镜的观测展望

伽马射线是电磁波辐射的最高能段, 它与基本的非热物理过程(例如: 极高能宇宙线的加速传播以及辐射)有着先天的密切关联. Fermi-LAT望远镜已经顺利开展观测近17 yr, 下一代空间伽马射线望远镜的研发正在如火如荼的进行. 其中一种策略为关注中低能伽马射线能段, 即0.1–100 MeV, 相应代表之一为美国宇航局的AMEGO-X项目(All-sky Medium-Energy Gamma-ray Observatory eXplorer^[70]). 中低能段伽马射线观测可提供丰富的天体物理信息, 但由于该能段辐射机制多样、起源复杂, 对其探测与解析仍面临较大挑战. 为此, 以中国科学院紫金山天文台为核心的研究团队提出了甚大面积伽马射线空间望远镜(Very Large Area gamma-ray Space Telescope, VLAST^[71])计划. 由于VLAST在GeV–TeV能段具

有优异的接收度, 其综合探测能力预计比Fermi-LAT提升一个量级. 为验证关键技术并开展太阳伽马射线科学观测, VLAST探路者任务计划于2026年发射. 基于Fermi-LAT已经在红移为3左右的耀变体中探测到了视界光子, 例如本样本中的PKS 0019+058 (红移为2.86)以及PKS 0347-211 (红移为2.944), 预计VLAST凭借其更优异的探测性能, 将进一步扩展高红移耀变体的样本规模并推动红移极限的突破. 未来有望在红移为4甚至更高红移处探测到GeV能段的伽马射线视界光子, 从而为研究宇宙早期恒星形成与演化历史提供关键观测依据.

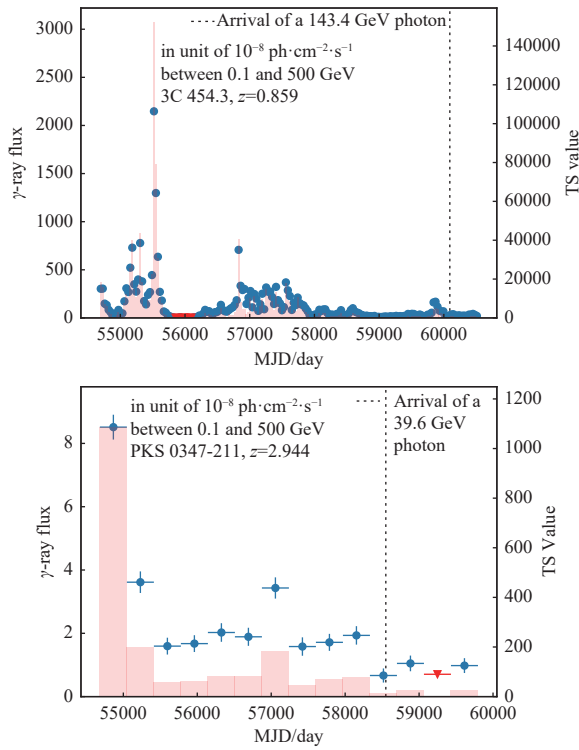


图 4 辐射视界光子的探测与部分耀变体最强伽马射线耀发无观测关联, 以耀变体3C 454.3 (上)和PKS 0347-211 (下)为例.

Fig. 4 Detections of horizon photons show no direct observational connections with the major γ -ray flares for other blazars in our sample, taking blazars 3C 454.3 (upper) and PKS 0347-211 (lower) as examples.

高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)作为地面伽马射线及宇宙线探测器, 极大地推动了极高能伽

马射线天文领域的发展^[72]. CTA^[73]是下一代切伦科夫光伽马射线望远镜, 目前正在建设中. 基于Fermi-LAT的观测触发, CTA先期建设的Large-Sized Telescope探测到来自类星体OP 313 (红移为0.996)的甚高能伽马射线辐射, 成为目前最遥远甚高能伽马射线源之一^[74]. 其中100–250 GeV能段的探测置信度为 8.7σ , Fermi-LAT在伽马射线流量高态探测到一个能量为103 GeV的光子, 见图3. 凭借下一代地面伽马射线望远镜巨大的有效探测面积, 结合空间伽马射线望远镜巡天观测与多波段的后随跟踪观测, 我们将能够在耀变体爆发时精确刻画其多波段光变行为, 有效捕捉视界光子, 深化对喷流能量耗散区位置及相关物理过程的理解, 并对河外背景光模型提出新的观测约束.

5 总结

我们系统搜寻了耀变体河外背景光吸收的视界伽马射线光子的工作. 首先, 通过对4FGL-DR4样本中源的银纬、探测置信度和数据分析可靠性等标准的筛选, 共挑选出448个伽马射线源进行系统性的Fermi-LAT数据分析, 同时我们详细甄别了各伽马射线源的红移. 与主流的河外背景光模型进行对比后(例如Finke等^[8])我们探测到46个河外背景光吸收光深大于1的光子事件. 若考虑最为光薄的河外背景光模型^[9], 相应的光子事件为20个. 这46个光子来源于36个耀变体, 其中BL Lac与FSRQ各占一半, 并未发现来自射电星系以及射电噪窄线赛弗特星系的视界光子. 值得注意的是, 视界光子的探测似乎与活动星系核中央超大质量黑洞的吸积效率并无明显关联. 尽管FSRQ可能具有内禀伽马射线吸收, 但批量来自FSRQ的视界光子的探测暗示至少在这些源的部分时期, 其伽马射线辐射区域应位于宽发射线区之外, 从而规避了显著的内禀吸收. 我们进一步开展了样本中耀变体的伽马射线时域分析, 发现部分源的最强耀发与视界光子的到达成协, 然而流量水平与视界光子探测并无观测关联的情况也并不少见. 本研究所提供的样本, 特别是有多个视界光子的源和高红移源, 可为后续下一代空间和地面伽马射线望远镜提供重要观测目标, 对该样本

的后续观测有望能有效限制河外背景光模型,并探究高红移宇宙中恒星的形成与演化历史.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议,使得文章的质量有了显著的提高. 本文使用了来自于美国宇航局(NASA)支持的高能天体物理科学归档研究中心(HEASARC)的数据.

参 考 文 献

- [1] Hauser M G, Dwek E. *ARA&A*, 2001, 39: 249
- [2] Cooray A. *RSOS*, 2016, 3: 150555
- [3] Franceschini A. *Universe*, 2021, 7: 146
- [4] Puget J L, Abergel A, Bernard J P, et al. *A&A*, 1996, 308: L5
- [5] Kashlinsky A, Arendt R G, Mather J, et al. *Nature*, 2005, 438: 45
- [6] Zemcov M, Immel P, Nguyen C, et al. *NatCo*, 2017, 8: 15003
- [7] Franceschini A, Rodighiero G, Vaccari M. *A&A*, 2008, 487: 837
- [8] Finke J D, Razzaque S, Dermer C D. *ApJ*, 2010, 712: 238
- [9] Domínguez A, Primack J R, Rosario D J, et al. *MNRAS*, 2011, 410: 2556
- [10] Gould R J, Schröder G. *PhRvL*, 1966, 16: 252
- [11] Greisen K. *PhRvL*, 1966, 16: 748
- [12] Stecker F W, de Jager O C, Salamon M H. *ApJ*, 1992, 390: L49
- [13] Funk S. *ARNPS*, 2015, 65: 245
- [14] Blandford R, Meier D, Readhead A. *ARA&A*, 2019, 57: 467
- [15] Aharonian F, Akhperjanian A G, Bazer-Bachi A R, et al. *Nature*, 2006, 440: 1018
- [16] MAGIC Collaboration, Albert J, Aliu E, et al. *Science*, 2008, 320: 1752
- [17] Atwood W B, Abdo A A, Ackermann M, et al. *ApJ*, 2009, 697: 1071
- [18] Abdollahi S, Acero F, Baldini L, et al. *ApJS*, 2022, 260: 53
- [19] Liao N H, Li S, Sheng Z F, et al. *ApJ*, 2020, 898: L56
- [20] Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. *Science*, 2012, 338: 1190
- [21] Fermi-LAT Collaboration, Abdollahi S, Ackermann M, et al. *Science*, 2018, 362: 1031
- [22] Chen L. *ApJ*, 2014, 788: 179
- [23] Tanaka Y T, Cheung C C, Inoue Y, et al. *ApJ*, 2013, 777: L18
- [24] Aleksić J, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. *MNRAS*, 2014, 440: 530
- [25] Neronov A, Semikoz D, Taylor A M, et al. *A&A*, 2015, 575: A21
- [26] Ajello M, Baldini L, Ballet J, et al. *ApJS*, 2022, 263: 24
- [27] Planck Collaboration, Ade P A R, Aghanim N, et al. *A&A*, 2014, 571: A16
- [28] Mattox J R, Bertsch D L, Chiang J, et al. *ApJ*, 1996, 461: 396
- [29] Falomo R, Pian E, Treves A. *A&ARv*, 2014, 22: 73
- [30] Shaw M S, Romani R W, Healey S E, et al. *ApJ*, 2009, 704: 477
- [31] Shaw M S, Romani R W, Cotter G, et al. *ApJ*, 2012, 748: 49
- [32] Shaw M S, Romani R W, Cotter G, et al. *ApJ*, 2013, 764: 135
- [33] Landoni M, Falomo R, Paiano S, et al. *ApJS*, 2020, 250: 37
- [34] Goldoni P, Pita S, Boisson C, et al. *A&A*, 2021, 650: A106
- [35] Gilmore R C, Somerville R S, Primack J R, et al. *MNRAS*, 2012, 422: 3189
- [36] Giommi P, Padovani P, Polenta G, et al. *MNRAS*, 2012, 420: 2899
- [37] McConville W, Ostorero L, Moderski R, et al. *ApJ*, 2011, 738: 148
- [38] Ghisellini G, Righi C, Costamante L, et al. *MNRAS*, 2017, 469: 255
- [39] Ajello M, Romani R W, Gasparrini D, et al. *ApJ*, 2014, 780: 73
- [40] Nolan P L, Abdo A A, Ackermann M, et al. *ApJS*, 2012, 199: 31
- [41] Paiano S, Landoni M, Falomo R, et al. *ApJ*, 2017, 844: 120
- [42] Truebenbach A E, Darling J. *ApJS*, 2017, 233: 3
- [43] Pita S, Goldoni P, Boisson C, et al. *A&A*, 2014, 565: A12
- [44] Landoni M, Falomo R, Treves A, et al. *A&A*, 2012, 543: A116
- [45] Lyke B W, Higley A N, McLane J N, et al. *ApJS*, 2020, 250: 8
- [46] Falomo R, Scarpa R, Bersanelli M. *ApJS*, 1994, 93: 125
- [47] Raiteri C M, Villata M, Capetti A, et al. *A&A*, 2007, 464: 871
- [48] Hook I M, Shaver P A, Jackson C A, et al. *A&A*, 2003, 399: 469
- [49] Heidt J, Tröller M, Nilsson K, et al. *A&A*, 2004, 418: 813
- [50] Paiano S, Falomo R, Treves A, et al. *MNRAS*, 2020, 497: 94
- [51] Healey S E, Romani R W, Cotter G, et al. *ApJS*, 2008, 175: 97

- [52] Makarov V V, Bergeha C T, Frouard J, et al. *ApJ*, 2019, 873: 132
- [53] Landt H. *MNRAS*, 2012, 423: L84
- [54] White G L, Jauncey D L, Savage A, et al. *ApJ*, 1988, 327: 561
- [55] Falomo R, Treves A. *Messenger*, 2007, 129: 42
- [56] Baldwin J A, Wampler E J, Gaskell C M. *ApJ*, 1989, 338: 630
- [57] O'Meara J M, Lehner N, Howk J C, et al. *AJ*, 2021, 161: 45
- [58] Jauncey D L, Batty M J, Gulkis S, et al. *AJ*, 1982, 87: 763
- [59] Paiano S, Landoni M, Falomo R, et al. *ApJ*, 2017, 837: 144
- [60] Afanasiev V L, Dodonov S N, Moiseev A V, et al. *AZh*, 2005, 82: 420
- [61] Lawrence C R, Zucker J R, Readhead A C S, et al. *ApJS*, 1996, 107: 541
- [62] Jauncey D L, Wright A E, Peterson B A, et al. *ApJ*, 1978, 219: L1
- [63] Raiteri C M, Villata M, Acosta-Pulido J A, et al. *Nature*, 2017, 552: 374
- [64] Liao N H. *Galaxies*, 2018, 6: 68
- [65] Ghisellini G, Tavecchio F, Foschini L, et al. *MNRAS*, 2010, 402: 497
- [66] Kramarenko I G, Pushkarev A B, Kovalev Y Y, et al. *MNRAS*, 2022, 510: 469
- [67] Poutanen J, Stern B. *ApJL*, 2010, 717: 118
- [68] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. *ApJ*, 2009, 699: 817
- [69] Ghisellini G, Tavecchio F, Foschini L, et al. *MNRAS*, 2013, 432: L66
- [70] McEnery J, van der Horst A, Dominguez A, et al. *BAAS*, 2019, 51: 245
- [71] 范一中, 常进, 郭建华, 等. *天文学报*, 2022, 63: 13
- [72] Cao Z, Chen S, Liu R, et al. *ARNPS*, 2023, 73: 341
- [73] Acharya B S, Actis M, Aghajani T, et al. *Aph*, 2013, 43: 3
- [74] Cortina J, CTAO LST Collaboration. *ATel*, 2023: 16381

Detections of Fermi-LAT Blazars at the γ -ray Horizon by the EBL Absorption

MA Xiao-lu LIAO Neng-hui LIU Qiong

(School of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025)

ABSTRACT Extragalactic Background Light (EBL) is the cosmic diffuse electromagnetic radiation that ranges from the far-infrared to the ultraviolet bands, and contains important information on the evolution of the universe. Since during their traveling through the cosmos, the γ -ray photons are suffered by the $\gamma\gamma$ absorption by the EBL, investigations of the γ -ray opacity of the universe are helpful to understand the EBL. Detections of γ rays with significant EBL absorptions (i.e., $\tau_{\gamma\gamma} \gtrsim 1$) from distant γ -ray sources, is an effective and direct approach to constrain the EBL models. In this study, after careful selections and thorough redshift scrutinization on the sources listed in the latest Fermi-LAT γ -ray catalog, we perform systematic Fermi-LAT data analyses on 448 γ -ray sources. By comparison with the widely adopted EBL model, 46 horizon γ -ray photons from 36 blazars are detected, of which the most distant one is at redshift of 2.944. Among the blazars, the numbers of flat spectral radio quasars (FSRQs) and the BL Lacertae objects are equal. Further temporal γ -ray analyses reveal that occasionally arrival of the horizon photons coincide with the unprecedentedly intense γ -ray flares. Detections of handful of horizon γ -ray photons from the FSRQs put a tight constraint on the location of the energy dissipation region of the jet. Meanwhile, the blazars that emit horizon photons are crucial targets for the observations of the next generation of the space and ground γ -ray telescopes.

Key words galaxies: active, galaxies: jets, cosmology: cosmic background radiation