

10 TeV γ 射线的星系际红外背景光子 吸收现象的研究*

许贤武¹ 丁林恺¹ 曹培圆² 戴本忠³ 冯振勇⁴ 傅宇²
郭宏伟⁵ 何瑁² 黄庆⁴ 霍安祥¹ 贾焕玉⁴ 李金玉²
刘绍敏¹ 卢红¹ 陆穗苓¹ 罗光宣¹ 梅东明⁵ 孟宪茹⁵
木钧³ 彭朝然¹ 任敬儒¹ 史策¹ 施志政¹ 谭有恒¹
王承瑞² 王辉¹ 余光策⁴ 袁爱芳⁵ 张春生¹ 张慧敏¹
张吉龙¹ 张乃健² 张学尧² 扎西桑珠⁵ 扎西次仁⁵ 周文德³

1 (中国科学院高能物理研究所宇宙线和高能天体物理开放实验室 北京 100039)

2 (山东大学物理系 济南 250100)

3 (云南大学物理系 昆明 650091)

4 (西南交通大学物理系 成都 610031)

5 (西藏大学数理系 拉萨 850000)

摘要 TeV γ 射线在星系际空间传播过程中将与红外背景光子作用而被衰减或吸收. 大气 \checkmark 成像望远镜实验观测到了 Mrk421 和 Mrk501 处于活动高态时的 TeV γ 射线发射并测出它们的能谱. 报道了利用 Tibet II/HD 阵列在 1995 年 10 月至 1997 年至 8 月收集的数据, 通过 Mrk421 和 Mrk501 的能谱研究星系际红外背景光子吸收现象的初步结果. 结果显示: 直到 30 TeV 能区尚未观测到 Mrk421 和 Mrk501 能谱中存在统计上具有显著意义的红外背景光子吸收 10 TeV γ 射线的现象.

关键词 宇宙射线 大气簇射 活动星系核 红外背景辐射

1 引言

在宇宙的形成和演化过程中, 位于紫外和可见光能区的辐射都会经过宇宙空间尘埃的吸收和再发射, 以及哈勃膨胀而部分成为今天宇宙中的红外背景光子. 至今, 由于天文观测的限制, 我们对 $Z > 5$ 的宇宙空间了解甚少, 而红外背景辐射光子与这一宇宙空间的

1999-08-12 收稿

* 国家自然科学基金(19635030)和中国科学院资助

形成和演化息息相关. 因此, 星系际红外背景辐射的研究将为我们提供宇宙演化和星系形成过程的信息, 具有十分重要的宇宙学意义. 为此, 人们对它的产生机制进行了大量的研究, 提出了许多模型. 红外背景辐射的产生过程主要包括: 普通星系的形成、大质量天体的形成、黑洞的吸积、星系团的形成和大爆炸产生的弱相互作用粒子的衰变等, 其中, 普通星系形成过程产生的辐射被认为是最容易理解和普遍接受的产生机制. 然而, 由于实验上不能有效地消除银河系背景辐射、黄道光以及仪器本身热辐射等的影响, 加上红外背景辐射探测器的灵敏度和稳定性都比光学波段探测器的灵敏度和稳定性低, 直接测量红外背景辐射的能量密度遇到了很大的困难, 使得这一领域的研究进展缓慢, 而且这种情况在近几年内不会有大的改变.

Nikishov^[1] 在 1962 年和 Stecker^[2] 在 1971 年分别指出, 河外起源的 TeV 能区的 γ 射线在星系际空间传播过程中将与背景辐射光子作用而遭遇到严重的衰减或吸收. 在 EGRET 探测到类星体 3C279 后, Stecker 等人马上提出了一个十分聪明的办法来间接研究星系际红外背景辐射. 他们指出, 如果 3C279 的能谱能够延伸至 TeV 能区, 则地面探测器就应该能观测到 3C279 能谱在 TeV 能区的变陡或吸收现象, 通过对这一变陡或吸收现象的研究, 可以间接地估计红外背景辐射场的能量密度. 按照这一建议, 由 EGRET, Whipple 和 HEGRA 组观测到的活动星系核 (AGN) Mrk421 和 Mrk501 的能谱估计出了 $1\mu\text{m}$ — $20\mu\text{m}$ 波段的红外背景辐射场能量密度的上限^[3-7].

如果实验上能准确地测量出红外背景光子的能量密度, TeV γ 射线的观测也准确地知道了红外背景光子吸收 TeV γ 射线的光学深度, 则可以用一种新的方式估计哈勃常数. 如果能观测到 TeV γ 射线与红外背景光子作用诱发的电磁级联在源周围形成的弥散晕, 则可以对发射源的内禀能谱给予限制, 同时根据观测到的时变性和时间延迟, 也可以限制发射区域的大小和发射区域的磁场强度, 这些都十分有利于 TeV γ 射线产生模型的建立和完善. 因此, 虽然目前观测到的 AGN 数量还比较少, 红外背景光子能量密度的研究还面临许多困难, 但它们的观测和研究对 VHE γ 射线天文学、宇宙学和天体粒子物理学都具有重要的意义.

2 数据分析

本文有关的实验装置、阵列的性能、分析中使用的数据样本、以及估计信号的显著性和流强上限的方法都与文献[8]相同.

2.1 光学深度

当双光子质心系能量大于电子静止能量 2 倍时, 它们将可能发生相互作用, 产生 e^+e^- 对: $\gamma + \gamma_{\text{bg}} \rightarrow e^+ + e^-$. 设红移 Z 处、能量为 ϵ 的星系际红外背景光子的数密度为 $n(\epsilon, Z)d\epsilon$, 则考虑了宇宙空间的哈勃膨胀, 可以计算 TeV γ 射线在星系际空间传播的光学深度^[9]:

$$\tau(E_\gamma) = \frac{c}{H_0} \int_0^Z dZ (1+Z)(1+\Omega Z)^{-\frac{1}{2}} \int_0^2 dx \frac{x}{2} \int_{\epsilon_{\text{th}}}^{+\infty} d\epsilon n(\epsilon, Z) \sigma(u),$$

其中 $H_0 \approx 75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 是哈勃常数, Ω 是宇宙的质量密度 ($0.1 \leq \Omega \leq 2.0$), $x = 1 - \cos(\theta)$, θ 是双光子间的夹角, σ 是作用截面, ϵ_{th} 是反应阈能, $u = \epsilon/\epsilon_{\text{th}}$, ϵ 是背景光子的能量.

严格计算 $\tau(E_\gamma)$ 很困难, 除了必须考虑截面对能量的依赖和宇宙的膨胀外, 更重要的是必须考虑红外背景光子密度的演化. 对于 $Z \ll 1$ 的河外源, $\tau(E_\gamma)$ 的计算可以得到简化. 以 Mrk421 为例, 取 $n(\epsilon, Z) = K\epsilon^{-\alpha}$, $Z = 0.031$, $\Omega = 1$, 则有

$$\tau(E_\gamma) = \frac{2^\alpha c Z}{(\alpha + 1) H_0} \left(\frac{2(m_e c^2)^2}{E_\gamma} \right) n \left(\frac{2(m_e c^2)^2}{E_\gamma} \right) \int_1^\infty u^{-\alpha} du \sigma(u).$$

Stecker 等^[10] 假设普通星系形成过程中发生的一系列元素核合成产生的辐射, 或者直接发射于红外区, 或者被宇宙空间尘埃吸收后再发射于红外区, 或者由于宇宙红移效应而被红移到红外区这样一个演化过程, 取红外背景光子的数密度为 $n(\epsilon) = K\epsilon^{-2.55} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$, 计算出的光学深度为

$$\tau(E_\gamma) = 143 K E_\gamma^{1.55}$$

K 是待定常数.

2.2 Mrk421 和 Mrk501 的能谱

Mrk421 是 EGRET 在 1991 年观测到的 BL Lac 天体, Whipple 天文台在 1992 年也观测到了它的 TeV γ 射线发射, 积分能谱如图 1 中上图所示. Mrk501 也是一个 BL Lac 天体, 它首先被 Whipple 天文台在 1995 年观测到, 并在 1996 年得到了 HEGRA 的证实, 在 1997 年的剧烈活动期间, 几个大气 C 成像望远镜实验组都观测到了它发射的 TeV γ 射线, 其能谱如图 1 中下图所示. 两个能谱中的 3 TeV 流强上限是 Tibet HD 的分析结果, 10 TeV 和 30 TeV 的流强上限是 Tibet II 的分析结果.

虽然 Mrk421 和 Mrk501 的流强有最小变化尺度为“天”的时变性, 但 Whipple 的观测显示, 在几周的观测时间内, 平均流强的变化不超过 20%. 因此, 即使 EGRET, Whipple 和 Tibet II/HD 的观测期间不重叠, 我们仍可以合理地将它们合在一起对红外吸收现象进行初步分析. 分

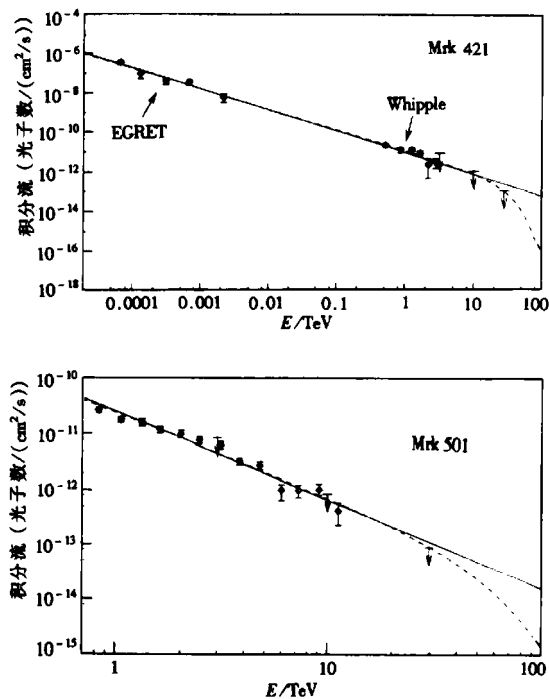


图 1 Mrk 421 和 Mrk501 的积分能谱

† Whipple 实验组数据, ‡ EGRET 实验组数据, ▽ 本工作的结果.

析中还假设 Mrk421 和 Mrk501 发射 TeV γ 射线的内禀能谱在 TeV 能区未衰减或截止,

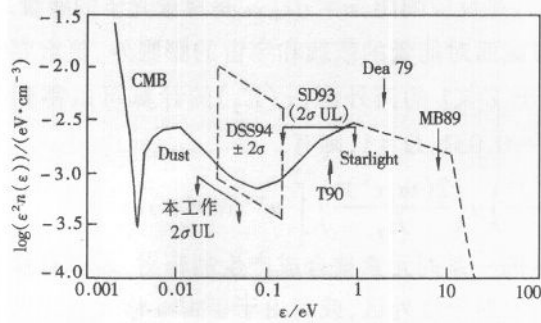


图 2 能量密度的比较

CMB 指示微波背景辐射光子能谱, Dust 和 Starlight 指示模型^[11]估计的能谱, T90^[12]是根据星系个数估计的下限值, MB89 是文献^[13]外推至 UV 区的结果, Dea79 是文献^[14]给出的上限, SD93 和 DSS94 是文献^[3, 4]根据 Mrk421 能谱估计的结果.

$n \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 量级. 我们估计的 $25\mu\text{m}—75\mu\text{m}$ 的能量密度与其它实验和理论计算结果的比较如图 2 所示.

表 1 幂律谱和吸收谱的拟合参数

源	能谱	ϕ_0	α	K
Mrk421	$\phi_0 E^{-\alpha}$	$(7.61 \pm 1.16) \times 10^{-12}$	1.10 ± 0.03	0
	$\phi_0 E^{-\alpha} e^{-\tau(E,K)}$	$(8.86 \pm 1.28) \times 10^{-12}$	1.08 ± 0.04	$(4.25 \pm 1.02) \times 10^{-5}$
Mrk501	$\phi_0 E^{-\alpha}$	$(2.58 \pm 1.18) \times 10^{-11}$	1.61 ± 0.09	0
	$\phi_0 E^{-\alpha} e^{-\tau(E,K)}$	$(2.45 \pm 1.31) \times 10^{-11}$	1.53 ± 0.22	$(1.59^{+1.02}_{-0.02}) \times 10^{-5}$

3 结果和讨论

从上述分析中可以看出, 线谱中加入红外背景光子的吸收项后, 拟合结果有一定改善. 我们对这两种拟合结果进行了显著性检验和模拟计算. 存在红外吸收的假设比不存在红外吸收的假设具有稍高的显著性, 但因显著性仍不够高, 所以目前只能引出如下结论: 直到 30TeV 能区尚未观测到 Mrk421 Mrk501 能谱中存在统计上具有显著意义的红外背景光子吸收现象. 在建设中的羊八井第三期阵列将以大约 800Hz 的事例率于 1999 年底投入运行, 这将使每年的数据量增加 3 到 4 倍, 预期将能进一步澄清这一问题.

作者感谢以日本东京大学宇宙线研究所汤田利典教授为首的日方全体合作人员, 是中日双方合作者的共同努力完成了羊八井二期阵列的扩建和系统的成功运行.

参考文献 (References)

- Nikishov A I. Soviet Phys. JETP, 1962, 14: L393
- Stecker F W. Cosmic Gamma Rays. Baltimore: Mono Book CO
- Stecker F W et al. Astrophys. J., 1993, 415: L71

同时, 银河系红外背景光子对 TeV γ 射线的吸收可以忽略不计. 在以上条件下, 认为 Mrk421 和 Mrk501 能谱的衰减或吸收都是因为星系际空间红外背景光子的作用引起的.

幂律谱和吸收谱拟合 Mrk421 和 Mrk501 能谱的结果如图 1 所示, 实线和虚线分别是幂律谱和吸收谱的拟合结果, 拟合参数如表 1 所述. 用置信区间方法估计得到的 $25\mu\text{m}—75\mu\text{m}$ 波段星系际红外背景光子的能量密度的 2σ 上限分别为 $4.9 \times 10^{-4}—9.0 \times 10^{-4}$ ($\text{eV} \cdot \text{cm}^{-3}$) 和 $3.5 \times 10^{-4}—6.5 \times 10^{-4}$ ($\text{eV} \cdot \text{cm}^{-3}$), 相应能流的 2σ 上限为几个

- 4 de Jager O C et al. *Nature*, 1994, **369**:294
- 5 Biller S D et al. *Astrophys. J.*, 1995, **445**:227
- 6 Eli Dwek et al. *Astrophys. J.*, 1994, **436**:696
- 7 Stanev T et al. *Astro-ph/9708162*
- 8 XU XianWu, DING LinKai et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese)*, 2000, **24**(6):473
(许贤武, 丁林恺等. *高能物理与核物理*, 2000, **24**(6):473)
- 9 Stecker F W. *Astrophys. J.*, 1979, **228**:919
- 10 Stecker F W et al. *Astrophys. J.*, 1977, **214**:L51
- 11 Franceschini et al. *Astrophys. J.*, 1994, **427**:140
- 12 Tyson J A. *The Galactic and Extragalactic Background Radiation*. Netherlands; Bowyer S and Leinert C, 1990. 245
- 13 Martin C et al. *Astrophys. J.*, 1989, **338**:677
- 14 Dube R R et al. *Astrophys. J.*, 1979, **232**:333

Study on the Absorption of 10TeV γ -Rays Interacting with Soft Photons in Intergalactic Space *

XU XianWu ¹	DING LinKai ¹	CAO PeiYuan ²	DAI BenZhong ³
FENG ZhenYong ⁴	FU Yu ²	GUO HongWei ⁵	HE Mao ²
HUANG Qing ⁴	HUO AnXiang ¹	JIA HuanYu ⁴	LI JinYu ²
LIU ShaoMin ¹	LU Hong ¹	LU SuiLing ¹	LUO GuangXuan ¹
MEI DongMing ⁵	MENG XianRu ⁵	MU Jun ³	PENG ZhaoRan ¹
REN JingRu ¹	SHI Ce ¹	SHI ZhiZheng ¹	TAN YouHeng ¹
WANG ChengRui ²	WANG Hui ¹	YU GuangCe ⁴	YUAN AiFang ⁵
ZHANG ChunSheng ¹	ZHANG HuiMin ¹	ZHANG JiLong ¹	ZHANG NaiJian ²
ZHANG XueYao ²	Zhaxisangzhu ⁵	Zhaxiciren ⁵	ZHOU WenDe ³

1 (*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China*)

2 (*Department of Physics, Shandong University, Ji'nan 250100, China*)

3 (*Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China*)

4 (*Department of Physics, South West Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

5 (*Department of Mathematics and Physics, Tibet University, Lhasa 850000, China*)

Abstract TeV gamma rays will be attenuated or absorbed due to the interaction with soft photons in intergalactic space. The spectra of Mrk421 and Mrk501 during their flaring have been observed by ACTs. Using the data obtained with Tibet II/HD AS array from October of 1995 to August of 1997, the preliminary results of energy density of intergalactic infrared radiation field are presented in this paper. Analysis shows that no statistically significant absorption evidence of high energy gamma rays is found up to around 30 TeV.

Key words cosmic ray, air shower, active galactic nuclei, intergalactic infrared radiation field

Received 12 August 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19635030) and The Chinese Academy of Sciences