

# 利用羊八井 RPC ‘地毯’ 测量哈勃常数和 红外背景辐射的可能性

贾焕玉<sup>1,2</sup> 王顺金<sup>1</sup> 谭有恒<sup>2,3</sup>

1(西南交通大学应用物理系、现代物理研究所 成都 610031)

2(宇宙线和高能天体物理开放实验室 北京 100039)

3(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 利用宇宙背景光子对河外高能 $\gamma$ 射线的吸收,讨论了西藏羊八井 RPC ‘地毯’实验测量哈勃常数和宇宙红外背景辐射的可能性.指出羊八井 RPC ‘地毯’实验可以在1—3年内较精确地测量哈勃常数和红外背景辐射.

**关键词** 宇宙背景辐射  $\gamma$ 射线 哈勃常数 阻性板计数器(RPC)

## 1 引言

宇宙红外背景辐射是指存在于宇宙空间的  $1\mu\text{m}$ 到  $1000\mu\text{m}$ 波长的背景光子发射.其主要来源有:黄道光发射,行星际尘埃发射,银河红外背景,星系红外背景,宇宙微波背景辐射等.它的研究对于宇宙演化理论以及宇宙论基本常数的确定都是至关重要的.但作为弥漫发射的各种红外背景,观测很困难,特别是星系红外背景,主要靠理论计算,目前只有一些很局部的观测上限值.1992年 Stecker 等人<sup>[1]</sup>提出,利用高能 $\gamma$ 射线源发射的 $\gamma$ 射线与星系际红外辐射场的相互作用来测量红外背景辐射的可能性,并利用 Whipple 组和搭载在卫星上的高能 $\gamma$ 射线望远镜(EGRET)对 Mrk421 的 $\gamma$ 射线观测数据估算了红外背景辐射上限值<sup>[2]</sup>.在此基础上,1994年 Salomon 等人<sup>[3]</sup>提出可以利用背景光子对 $\gamma$ 射线的吸收来测量哈勃常数  $H_0$ .通常  $H_0$ 是由视星等和绝对星等的差测出距离而决定的.这一方法有很大的误差.然而  $H_0$ 对宇宙理论又是一个非常重要的常数,对此准确测量是非常必要和重要的.已有一些实验组,开始利用背景辐射对 $\gamma$ 射线的吸收来测量背景辐射密度,并由此对测定远方天体距离和哈勃常数  $H_0$ 方面进行了尝试,但也只是对各自能区敏感的次红外波段的宇宙背景光子进行测量.

西藏羊八井宇宙线观测站从1990年运行以来,取得了许多引人注目的结果<sup>[4-6]</sup>,显示了其特有的地理优势.然而宇宙红外背景辐射的存在却使其视野无法扩展到银河系以

外. 要想观测到比 Mrk421 更远的  $\gamma$  射线天体, 必须进一步降低阈能, 提高记录触发率. 在羊八井利用大面积“地毯”式地面全覆盖阻性板计数器 (RPC), 可使阈能降至 100GeV, 事例触发率提高到每秒上千次, 大大提高信噪比. 我们首先研究红外辐射对  $\gamma$  射线的吸收, 再讨论羊八井 RPC‘地毯’测量宇宙红外背景辐射密度和哈勃常数  $H_0$  的可能性.

## 2 高能 $\gamma$ 射线与红外辐射光子的相互作用

宇宙空间充满着背景辐射. 这种辐射包括微波背景辐射、红外光、可见光和紫外光等背景光子. 来自于宇宙天空中的某一高能  $\gamma$  源的  $\gamma$  流, 在穿过背景辐射到达观测处的过程中, 将与背景光子发生相互作用, 产生电子对而被吸收. 能量为  $E$  的光子与能量为  $\varepsilon$  的背景光子相互作用产生电子对 ( $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ ) 的反应截面为<sup>[7]</sup>

$$\sigma(E, \varepsilon) = \frac{\pi r_0^2}{2} (1 - \beta^2) \left[ 2\beta(\beta^2 - 2) + (3 - \beta^4) \ln \left( \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \right) \right], \quad (1)$$

式中

$$\beta = \left[ 1 - \frac{2(mc^2)^2}{E\varepsilon x} \right]^{1/2},$$

$\beta c$  是出射电子在质心系中的速度, 其中  $m$  为电子静质量,  $x = 1 - \cos\alpha$ ,  $\alpha$  为两光子间夹角, 经典电子半径  $r_0 = e^2/(mc^2)$ . 由 (1) 式可以得到当  $\beta \approx 0.7$  时,  $\sigma(E, \varepsilon)$  取最大值. 即

$$\varepsilon \approx \left( \frac{1 \text{ TeV}}{E} \right) \text{eV}, \quad (2)$$

由 (2) 式可知, 能量大于 1PeV 的  $\gamma$  光子受微波光子 ( $\varepsilon < 0.001\text{eV}$ ) 的吸收最强; 能量小于 1TeV 的  $\gamma$  射线与可见光和紫外光子 ( $\varepsilon > 1\text{eV}$ ) 的作用截面最大; 而对能量在 1TeV - 1PeV 的  $\gamma$  光子吸收最强的则是红外光子 ( $0.001\text{eV} < \varepsilon < 1\text{eV}$ ). 对于河外高能  $\gamma$  源发射的高能  $\gamma$  光子 (能量大于 TeV) 主要受以星系累计发射为来源的中远红外辐射. 这种辐射的极大波长为  $5\mu\text{m}$ , 则最强吸收能量为 5TeV. 这用来解释对于 Mrk421 天体的  $\gamma$  发射, 至少到能量 3TeV 有一个大致为  $E^{-2}$  的幂律谱的实验结果.

能量为  $E$  的  $\gamma$  流在能量为  $\varepsilon$  的背景光子场中被吸收, 其衰减长度<sup>[8]</sup>

$$\tau(E) = \frac{c}{H_0} \int_0^z dz (1+z)^{1/2} \int_0^2 dx \frac{x}{2} \int_{\varepsilon_0}^{\infty} d\varepsilon n(\varepsilon) \sigma[2x\varepsilon E(1+z)^2], \quad (3)$$

其中  $\varepsilon_0 = \frac{2(mc^2)^2}{Ex(1+z)^2}$ ,  $z$  为  $\gamma$  源的红移值,  $\sigma$  为  $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$  作用截面 (1) 式,  $n(\varepsilon) = a\varepsilon^{-b}$  为星系际红外背景光子能谱. 将上式积分得

$$\tau = C(b) \frac{a2^b}{b} \left[ \frac{2(mc^2)^2}{E} \right]^{1-b} \frac{1}{2b-1.5} [(2z)^{2b-0.5} - 1] \frac{c}{H_0}, \quad (4)$$

其中  $C(b) = \int u^{-b} \sigma \left( \beta = \sqrt{1 - \frac{1}{u}} \right) du$ . 由式(4)可知, 对于某个已知红移值的源:

$$\tau = \tau(E, a, b, H_0). \quad (5)$$

假如 $\gamma$ 源发出的 $\gamma$ 射线能谱在源区有  $E^{-\gamma}$  的形式, 则由于背景红外辐射的吸收, 在传播到达探测处时, 其能谱变为  $E^{-\gamma} e^{-\tau}$ . EGRET 已对某些河外活动星系核 (AGN) 的 $\gamma$ 能谱 (30MeV – 30GeV) 作了测量. 可以测量几个 AGN 在 TeV—PeV 能区的 $\gamma$ 能谱, 并与相应的 EGRET 谱外推谱相比较, 定出 $\tau$ 值. 从式(5)可以看出, 对于某一测量能量,  $\tau$ 只是  $a, b$  和  $H_0$  的函数. 因此, 只要对 3 个源进行这种测量, 就可通过(4)式, 解出红外背景谱参数  $a, b$  和哈勃常数  $H_0$ .

### 3 西藏羊八井 RPC ‘地毯’实验

中意合作 RPC ‘地毯’实验位于中国西藏羊八井, 海拔 4300m, 如图 1 所示, 已于 1997 年 10 月正式启动安装, 1998 年初将开始运行. 探测器面积将从  $50\text{m}^2$  经  $3600\text{m}^2$  一直到  $15000\text{m}^2$  分期逐步完成. 实验采用近年来在加速器实验中广泛应用的阻性板计数探测器来记录广延空气簇射事例中的带电粒子, 其结构和安装如图 2 和图 3 所示. 该项实验的主要物理目标是: 寻找能量大于 100GeV 的 $\gamma$ 点源和弥漫的宇宙 $\gamma$ 射线发射; 测量覆盖 10GeV 到 10TeV 能区的宇宙 $\gamma$ 暴 (GRB); 测量宇宙反质子与质子之比, 填补 300GeV 到 5TeV 能区的实验空白; 太阳和日地空间物理研究; 在地面测量 100TeV 到 10000TeV 能区原初宇宙线能谱和质子谱, 研究“膝区物理”.

由于采用大面积探测器对宇宙线空气簇射粒子到达地面全覆盖, 使空气簇射粒子探测的粒子取样比大于 90%. 阵列的工作能区为  $10^{10}$ — $10^{16}$  eV. 对于 20 个以上的探测器

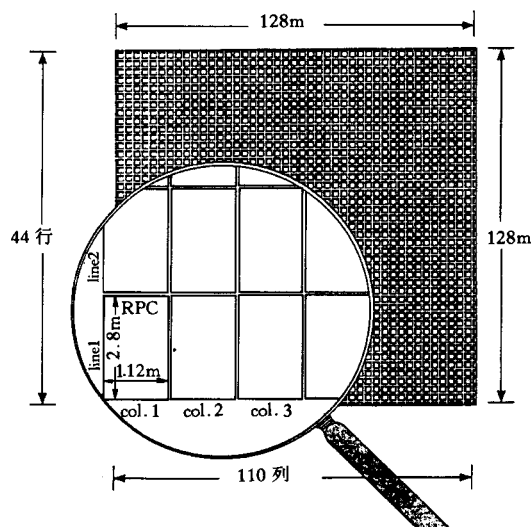


图1 羊八井RPC‘地毯’

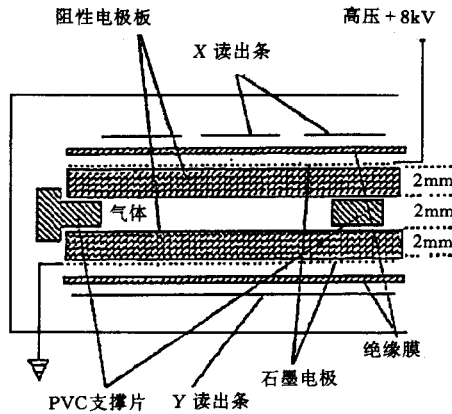


图2 RPC的结构

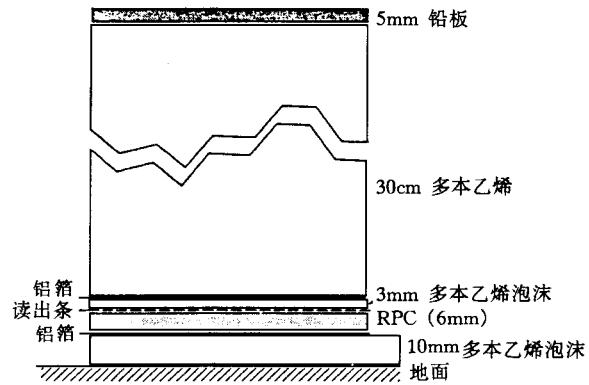


图3 一个RPC单元

‘点火’的触发条件探测阈能  $E_{th} = 100\text{GeV}$ , 对 3600 平方米实验触发记录率可达 1000Hz, 观测原初宇宙线的方向分辨率为  $0.5^\circ$ , 视界可深入到红移值  $z \approx 1$  的河外  $\gamma$  射线发射天体。

实验对某个  $\gamma$  射线源观测的灵敏度:

$$S(\Delta n) = \frac{N_\gamma(\Delta n)}{\sqrt{N_B(\Delta n)}} = \frac{\int_{E_1} A_{\text{eff}}^\gamma(E) J_\gamma(E) dE \cdot f_\gamma(\Delta\Omega) \cdot T(d) \cdot f(\delta)}{\sqrt{\int_{E_1'} A_{\text{eff}}^p(E) J_B(E) dE \cdot \Delta\Omega(\Delta n) \cdot T(d) \cdot f(\delta)}} \cdot Q, \quad (6)$$

其中,  $\Delta n$  是作为触发条件而‘点火’的 RPC 数目;  $A_{\text{eff}}^\gamma(E)$ ,  $A_{\text{eff}}^p(E)$  是相应于某一触发条件整个实验阵列的有效面积;  $J_\gamma(E)$ ,  $J_B(E)$  是来自某一被观测源的光子和背景能谱;  $f_\gamma(\Delta\Omega) = 0.7$  是落在以观测源为中心的立体角  $\Delta\Omega$  内的  $\gamma$  簇射分数;  $\Delta\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta)$ ,  $\theta$  是以观测源为中心的角半径; 其选择依赖于触发条件的 RPC 数目和观测源的扩展角;  $T(d)$  是有效观测天数;  $f(\delta)$  是对观测源每天的观测时间;  $Q$  是利用  $\gamma$  簇射和强子簇射中的带电粒子的不同横向分布而计算出的  $\gamma$  簇射和强子簇射的区分因数, 这里取为 1.05。

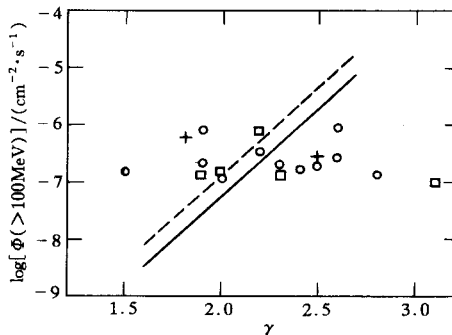


图4 RPC地毯以  $5\sigma$  水平一年所观测的最小流强随微分谱指数的变化

○ 红移  $z < 0.5$  的源, □ 代表  $0.5 < z < 1$ , + 字代表  $z > 1$ ; -----, — 分别代表 3600 和 15000 平方米实验。

3600m<sup>2</sup>和 15000m<sup>2</sup>的 RPC‘地毯’实验在 1 年内以  $5\sigma$  水平所能观测到的  $\gamma$  源的最小流强, 如图 4 所示。

由式 (6) 可以计算得到: 利用羊八井 3600m<sup>2</sup> 和 15000m<sup>2</sup> 的 RPC‘地毯’实验, 选择  $\Delta n > 20$ , 对应观测阈能  $E_{th} = 100\text{GeV}$ , 分别在 30 天和 7 天时间内可观测到来自于标准高能  $\gamma$  射线源 Crab 的  $5\sigma$  信号。同样利用式 (6) 可以计算羊八井

## 4 预计的实验结果和讨论

在图 4 中, 显示出了  $3600\text{m}^2$  和  $15000\text{m}^2$  RPC ‘地毯’ 实验一年以  $5\sigma$  水平所观测的最小流强随微分谱指数的变化曲线, 同时也给出了 EGRET 观测的  $\gamma$  源中, 在羊八井可以进行观测的 18 个源. 由图可以看到,  $3600\text{m}^2$  和  $15000\text{m}^2$  的 RPC ‘地毯’ 实验在一年内可以  $5\sigma$  观测到其中 7 个和 9 个能谱指数  $\gamma < 2.2$ ,  $\theta < 30^\circ$  的源. Mrk421 (红移值  $z = 0.031$ ) 是 EGRET 中最弱的  $\gamma$  发射源, 据观测其能谱指数  $\gamma$  从  $2.06\text{GeV}$  能区一直到  $3\text{TeV}$  基本没有变化.  $3600\text{m}^2$  和  $15000\text{m}^2$  的 RPC ‘地毯’ 实验在这样的能量下分别需要 16 个月和 3 个月时间, 才能以  $5\sigma$  水平观测到 Mrk421. 因此选择图 4 中  $\text{GeV}$  能区能谱指数  $\gamma \leq 2.0$ , 红移值  $z < 0.5$  的至少 3 个稳定的  $\gamma$  发射源, 进行直到  $10\text{TeV}$  能量的连续观测. 如果能谱指数不发生变化, 则可分别在 16 个月和 3 个月以  $5\sigma$  观测到选择的 3 个发射源, 此时衰减长度  $\tau \approx 0.0$ . 据此可以估算宇宙红外背景辐射密度的上限. 实际上按照上述讨论, 到  $10\text{TeV}$  能量时, 一定存在对  $\gamma$  流强的吸收, 16 个月和 3 个月无法以  $5\sigma$  观测到选择的 3 个发射源, 继续延长观测时间, 如到 32 个月和 6 个月或者更长, 直到在  $10\text{TeV}$  附近以  $5\sigma$  观测到选择的 3 个发射源, 并测出 3 个源的流强, 与  $\text{GeV}$  能区的流强比较, 就可得到 3 个源的衰减长度  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  值. 由 (5) 式可得方程组

$$\begin{cases} \tau_1 = \tau_1(E_0, a, b, H_0); \\ \tau_2 = \tau_2(E_0, a, b, H_0); \\ \tau_3 = \tau_3(E_0, a, b, H_0), \end{cases} \quad (7)$$

$E_0$  是测量衰减长度时的观测能量 (比如  $10\text{TeV}$ ). 解方程组 (7), 得红外背景密度参数  $a$ ,  $b$  和哈勃常数  $H_0$ . 因此可以得出结论: 利用羊八井 RPC ‘地毯’ 实验在 1—3 年内可以比较精确地测出星系际红外背景辐射和哈勃常数.

作者之一贾焕玉感谢 B. D. Piazzoli, 黄庆和余光策等人的帮助和讨论.

### 参 考 文 献

- 1 Stecker F W et al. APJ, 1992, **390**:L49—L52
- 2 Stecker F W et al. APJ, 1993, **415**:L71—L73
- 3 Salomon A et al. APJ, 1994, **423**:L1—L4
- 4 Amenomori M et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**:2468—2471
- 5 Amenomori M et al. APJ, 1993, **415**:L147—L150
- 6 Amenomori M et al. APJ, 1996, **461**:408—414
- 7 Lang K R. Astrophysical Formulae. New York: Spring-Verlag Berlin Heidelberg, 1980. 450
- 8 Stecker F W. Cosmic Gamma Rays. Bolltimore: Mono Book Co, 1971

## Possibility of Hubble Constant and Background Infrared Radiation Measurements With Yangbajing RPC Carpet Experiment

Jia Huanyu<sup>1,2</sup> Wang Shunjin<sup>1</sup> Tan Youheng<sup>2,3</sup>

1(*Institute of Modern Physics and Department of Applied Physics, South West Jiaotong University, Chengdu 610031*)

2(*The Laboratory of Cosmic Ray and High-Energy Astrophysics, Beijing 100039*)

3(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

**Abstract** Considering the absorption of extragalactic high energy gamma rays by cosmic background photons, the possibility of measuring Hubble Constant and background infrared radiation with Yangbajing RPC carpet experiment is presented. The conclusion is that in one to three years experiment the Hubble Constant and background infrared radiation density can be determined with good precision.

**Key words** cosmic background infrared radiation, high-energy gamma rays, Hubble Constant, RPC