

寻找来自原始黑洞蒸发的 TeV γ 射线暴*

徐春娴 何会林 陈永忠 何会海
李辉东 张 勇 姜印琳

(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)

摘要 用兴隆站的两台大气切伦科夫望远镜 ACT2 和 ACT3 在 1995—1997 年间的观测数据,寻找来自原始黑洞(PBH)蒸发终态的 0.1s TeV γ 射线暴. 分析这些资料没发现有这样的 γ 射线暴. 据此估算出在太阳系附近、在 99% 的置信水平下原始黑洞的蒸发率-密度的上限为 $3 \times 10^8 / \text{年} \cdot \text{pc}^3$.

关键词 TeV γ 射线 γ 射线暴 原始黑洞

1 引言

在宇宙早期,几乎任意小质量的黑洞都可能形成. 最简单的机制是在一个局部区域的密度涨落所形成的超高密度区的质量塌缩^[1,2]. 这样形成的原始黑洞(PBH)的质量约等于包含在宇宙视界内(光速乘以宇宙年龄)的质量,其质量可以低至普朗克质量 $\frac{\sqrt{hc}}{G} = 5 \times 10^{-11} \text{g}$. 除此之外,还有其它黑洞形成机制被提出,例如宇宙相变^[3]和宇宙弦的崩溃等^[4,5]. 现今,人们可以通过探查 Hawking 辐射^[6]感知原始黑洞的存在. 该辐射机制的要点是:量子引力和量子隧道效应能造成一个负热容系统,任何质量的黑洞将不断地辐射粒子——蒸发. 这种蒸发类似黑体,其温度 $T \propto 10^{-6} \left(\frac{M_{\odot}}{m} \right) \text{K}$, m 是黑洞的质量, M_{\odot} 是太阳质量;其寿命 $\tau \propto 10^{71} \left(\frac{m}{M_{\odot}} \right)^3 \text{s}$. 所以黑洞的辐射逐渐加快,最终在极短的时间内以强粒子暴的形式结束生命. Halzen^[7]等人把粒子物理的标准模型用到极高温度条件下,计算了在夸克和轻子标准模型下,原始黑洞爆炸的实验上的特征,也论述了非标准模型粒子自由度的影响. 用此模型估算出在 0.1s 时间内完全蒸发掉的黑洞的质量约为 $6 \times 10^8 \text{g}$, 相当于 $5 \times 10^{22} \text{J}$ 的能量. 此时发射能量大于 1TeV 光子的总数 $N_{\gamma} (>1\text{TeV}) \sim 1.8 \times 10^{28}$. 可见这是

1998-02-19收稿

* 中科院院长基金特别资助和国家自然科学基金资助(19135032)

个很强的 TeV γ 射线暴发。考虑到终态质量为 $\sim 10^9$ g 的黑洞相应的温度 $T \approx 10^{18}$ K, 其事件视野半径(史瓦西半径)约 10^{-19} cm, 这些条件是当今粒子物理理论模型成立条件的极端外推; 且不同的黑洞形成机制和辐射机制所预期的终态辐射也有较大差别, 因此这一切均有待于实验证实。

自 70 年代以来, 人们用各种可能的手段在射电、可见光、X 和 γ 射线等波段寻找黑洞存在的证据。特别是 GRO 卫星上的 EGRET(\sim GeV)探测到 BATSE(20keV—2MeV)的部分 γ 暴^[8]后, 使人们感到探测 TeV γ 射线暴甚至更高能量的 γ 射线暴是有可能的。当然 TeV γ 射线暴的探测不仅与原始黑洞的存在有关, 它也具有更广泛的科学意义。若人们能发现与 γ 暴对应的天体, 它将对源的辐射机制及传播提供重要线索。地面大气切伦科夫望远镜和 EAS 阵列均可用于寻找原始黑洞或给出黑洞的蒸发率-密度上限。

2 实验观测

用位于兴隆站(44°23'.6N; 117°34'.6E; 海拔 960m) 的两台大气切伦科夫望远镜 ACT2 和 ACT3, 在 1995 年冬至 1997 年春期间观测来自天顶的 TeV γ 射线, 获得了 195.43h 的有用资料。该两台望远镜的结构和性能已在另外文章中做了详细介绍^[9]。望远镜垂直对天时, 对 γ 射线的探测阈能为 1TeV, 探测效率为 70%。望远镜的死时间为 250 μ s, 时间分辨为 1 μ s, 绝对时间精度为 $\pm 20\mu$ s。因此它们能很好地记录下持续时间为 0.1s 或更短持续时间的 γ 射线暴。望远镜的物理视场 $\omega = 6.9 \times 10^{-4}$ Sr, 垂直对天时的收集面积为 7×10^8 cm²。

因为大气切伦科夫望远镜在垂直对天时有最大的探测灵敏度, 用这种观测方式来测试望远镜的性能、指标, 并兼做 γ 射线暴的观测。另外望远镜对 3TeV 的宇宙线质子和 1TeV 的 γ 射线有相同的探测效率, 所以记录到的事例绝大多数是宇宙线粒子, 这成为探测 γ 射线暴的强大背景。

3 分析和结果

在一时间间隔 ΔT 内到达的宇宙线粒子的数目服从泊松分布, 若探测器的效率为 η , 则探测器在 ΔT 时间内记录到的粒子数仍服从泊松分布, 其均值为 $m\eta$, 这里 m 是到达的宇宙线粒子的平均数。对于全部数据按时间顺序统计在 0.1s 间隔内的计数 n , 并计算出 n 为各种取值的预期事件数, 统计结果见表 1:

表1 每0.1s间隔计数统计

n	N_s	N_e
0	6600391	6599237
1	420168	422388.8
2	14497	13517.7
3	374	288.4
4	6	4.6
5	0	5.9×10^{-2}

这里 N_s 为直接统计值, N_e 为泊松分布的预期值. 可以计算出在本实验的条件下, 宇宙线背景涨落成 $n \geq 5$ 的概率是 8.5×10^{-9} , 考虑到采样次数, 预期这类事件的数目应为 0.06 个. 由此可知, 若真有 $n \geq 5$ 的事件存在, 它有很大的概率是由真正的 γ 射线暴造成的, 故选定 $n \geq 5$ 作为 γ 射线暴的判据, 记作 $n_B = 5$.

根据文献 [7], 用阈能 $E_T = 1 \text{ TeV}$, $\Delta T = 0.1 \text{ s}$, 估算出黑洞终态暴发辐射出能量大于 1 TeV 的光子数是 $N_\gamma (\geq 1 \text{ TeV}) = 1.8 \times 10^{28}$. 用收集面积 $S = 7 \times 10^8 \text{ cm}^2$ 和 $n_B = 5$, 可以

$$\begin{aligned} \text{算出望远镜所能探查的天空深度为 } R &= \sqrt{\frac{SN_\gamma}{4\pi n_B}} = 0.145 \text{ pc}, \text{ 相应的天区体积为 } V = \frac{R^3 \omega}{3} \\ &= 7 \times 10^{-7} \text{ pc}^3. \end{aligned}$$

假设所探查的黑洞在天空中均匀分布, 则在 0.1s 时间内到达探测器的黑洞 γ 暴光子的平均数目 \bar{n}_B 为:

$$\begin{aligned} \bar{n}_B &= \int_0^R n_B(r) P(r) dr \\ &= \int_0^R \frac{SN_\gamma}{4\pi r^2} \cdot 4\pi r^2 dr \Big/ \frac{4}{3} \pi R^3 \\ &= 3n_B(R) \\ &= 15 \end{aligned}$$

再考虑到望远镜的探测效率 $\eta = 0.7$, 则望远镜探测到 $n_B \geq 5$ 的黑洞 γ 暴事件的概率 (即望远镜对此类 γ 暴的探测效率) 为 98%.

在全部观察数据中, 没发现有 $n > 5$ 的事件. 若事件数目服从泊松分布, 则在 99% 的置信水平下, 给出在太阳系附近、质量约为 $6 \times 10^8 \text{ g}$ 的原始黑洞的蒸发率-密度的上限是 $3 \times 10^8 / \text{年} \cdot \text{pc}^3$.

4 讨论

由于实验不是专门安排寻找 γ 射线暴, 所以总观测时间较短, 给出的流强上限偏高. 以后将有专门的实验以改善其流强上限值.

另外在 1994 年至 1997 年间, 对 Geminga, Crab, Hercules 和 Cygx-3 等天体进行了跟踪观测, 也对银道面附近进行了观测. 若忽略跟踪观测时收集面积和探测阈能随天顶角的变化 (最大天顶角为 45°), 则可以把这些观测也做为 PBH 寻天观测的一部分加以分析.

这样总的观测时间是 889.32h, 总事例数为 1775583, 按泊松统计预期的 $n \geq 5$ 的事件数为 0.13 个. 由此得到在 99% 的置信水平下, 这类原始黑洞在太阳系附近的蒸发率-密度上限为 $6.6 \times 10^7 / \text{年} \cdot \text{pc}^3$.

参 考 文 献

- 1 Carr B J, *Observational and Theoretical Aspects of Relativistic Astrophysics and Cosmology*. Singapore: World Scientific Press, 1985. 1—78
- 2 Hawking S W. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 1971, **152**:75—78
- 3 Hawking S W. et al. *Phys. Rev.*, 1982, **D26**:2681—2693
- 4 Hawking S W. *Phys. Lstt.*, 1989, **B231**:237—239
- 5 Polnarev A, Zembowicz R. CAMK preprint, 1988, 194
- 6 Hawking S W. *Nature*, 1974, **248**:30—31
- 7 Halzen F et al. *Nature*, 1991, **353**:807—815
- 8 Fichtel C E et al. *Ap. J.*, 1994, **434**:557
- 9 Jiang Yinlin et al. *High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese)*, 1997, **21(7)**:583—590
(姜印琳等. 高能物理与核物理, 1997, **21**: 583)

Search for TeV Gamma Ray Bursts From Evaporating Primordial Black Holes^{*}

Xu Chunxian He Huilin Chen Yongzhong
He Huihai Li Huidong Zhang Yong Jiang Yinlin

(Laboratory of Cosmic Ray and High Energy Astrophysics, Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract Data taken with ACT2 and ACT3 between 1995 and 1997 are used to search for 0.1 second bursts of TeV gamma Rays from evaporating Primordial Black Holes (PBHs). There is no evidence for such bursts in the dataset. Using the result, the upper limit of $3 \times 10^8 \text{pc}^{-3} \text{yr}^{-1}$ on the rate-density of evaporating PBHs is set in the vicinity of the solar system at a 99% confidence level.

Key words TeV gamma rays, gamma ray bursts, primordial black holes

Received 19 February 1998

^{*} Supported Especially by the President Foundation of the Chinese Academy of Sciences, and Supported by the National Nature Science Foundation of China (19135032)