

在乳胶室中观测大天顶角簇射*

任敬儒 陆穗苓 解 卫

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

王承瑞 何 瑁 张乃健

(山东大学物理系, 济南 250100)

摘要 在甘巴拉山乳胶室中观测大天顶角簇射, 给出高能 μ -子的强度, 并找到了大天顶角的多核心簇射. 这预示着宇宙线高能核作用中可能存在着新现象.

关键词 乳胶室 大天顶角簇射 多核心簇射

用乳胶室观测高能现象记录的簇射有两类, 一类由高能 γ -线或电子在铅中发生电磁级联簇射, 当簇射能量超过 TeV 时, 即可在 X-光片上形成肉眼可见的簇射黑斑, 这类簇射的形态是中心电子密度大外围电子密度逐渐变小, 形成中心黑度大外围渐渐变淡的单核心黑斑. 另一类是由于高能强子与乳胶室的铅(或铁)原子核作用, 产生很多次级粒子, 其中的 π^0 介子迅速衰变成 γ -线. 一次高能核作用产生许多 γ -线, 在乳胶室中发生电磁级联簇射, X-光片中就记录许多黑斑, 这些黑斑沿着粒子前进的方向分布着. 前一类簇射斑由于 γ -线的辐射长度短, 多记录在乳胶室的顶部浅层底片中, 而后一类由于核作用长度长, 簇射斑可出现在深层乳胶室中. 按照这一规律可以区分 γ -线和强子. 认为簇射的起始点深度 $\Delta t \geq 6$ c.u. 为强子形成的簇射; $\Delta t < 6$ c.u. 是 γ -线簇射.

随着天顶角的增大簇射黑斑的形状从圆变成椭圆, 甚至变成一段黑线形状. 在 X-光片上下胶面中的黑斑, 也随着天顶角的增大相对错开, 到完全分开.

大天顶角簇射基本是由于 μ -子在乳胶室中韧致辐射出的 γ -线形成的. 仔细扫描出大天顶角簇射就可给出设置乳胶室地方的高能 μ -子强度. 作者对甘巴拉山乳胶室^[1] K9 铅室的 106 个单元作了仔细的扫描, 找到 60 个天顶角 $\theta \geq 76^\circ$ 的簇射. 并给出了 5 TeV 以上的 μ -子强度, 与地下乳胶室^[2]给出的结果是一致的.

对大天顶角簇射斑的形态在显微镜下仔细观测, 从大量的单心线状黑斑中, 找到 3 例多心的簇射黑斑. 这些多核心簇射不可能是由于强子的核作用或 μ -子的光核反应等原因形成的. 这预示着在宇宙线高能核作用中可能存在着新现象.

1 实验结果

1.1 μ -子束流强度

这里用的 K9 铅乳胶室在甘巴拉山(海拔 5 500 m)上放置了 430 d; 室的厚度为 30 c.u.;

1996-12-30 收稿, 1997-03-31 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目

仔细扫描了 106 个单元(每个单元大小:40 cm×50 cm);共扫出 $\theta \geq 76^\circ$ 的簇射 60 个,其中能量 $E_\gamma > 3$ TeV 的大天顶角簇射 56 个. 根据找出的大天顶角簇射数目和有关实验条件,可以得到 μ -子的束流强度. 在铅中 μ -子辐射出 3 TeV 以上的 γ -线基本上是 $E_\mu \geq 5$ TeV μ -子的贡献,所以观测到的 3 TeV 以上的大天顶角簇射基本上是反映了 5 TeV 以上 μ -子的强度,按上述的实验条件得到:

$$I_\mu(E_\gamma \geq 3 \text{ TeV}) = (7.1 \pm 1.1) \times 10^{-10} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}.$$

用探测效率较高的水谷地下 μ -乳胶室的结果^[2],

$$I_\mu(E_\mu > 1 \text{ TeV}) = 4.7 \times 10^{-8} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$$

和通常 μ -子的积分能谱幂 $\beta = -2.6$, 可以估计出:

$$I_\mu(E_\mu \geq 5 \text{ TeV}) = 7.2 \times 10^{-10} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$$

两者是一致的. 这表明本实验的扫描效率高,虽然只一层 X-光片确定能量也能得到相近的结果. 不仅如此,经细致地观测从 60 个大天顶角簇射中还找到了 3 例多核心事例.

1.2 大天顶角多心簇射

大天顶角多核心簇射都是由三四个小簇射组成的,确认这一点要在显微镜下测量,看看在 X-光片的上表面的分布图象与下表面是否一致? 排除由于 X-光片的银粒分布的涨落等原因形成的簇射核心分散现象. 构成多核心簇射的几个分散的较小簇射,其总黑度相当于几个 TeV 能量的单核心簇射黑度. 簇射径迹围绕着几个核心分布着,所以较单心簇射黑斑簇射径迹分散,虽然整个簇射斑的黑度相同,但中心处不够黑,整个斑有些模模糊糊,扫描很容易漏掉. 大天顶角多核心事例在显微镜下的图象如图 1 所示,事例的有关参量列在表 1 中. 表中的 θ 为天顶角. Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{cd} 为核心 a, b, c, d 间的距离. E_γ 是整个多核心簇射的观测能量. 大天顶角簇射的核心是一个个黑线段,便于准确测量其间的距离.

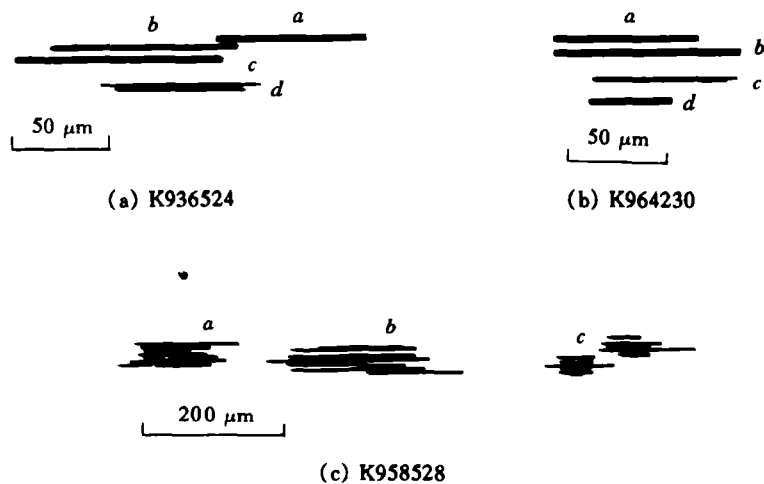


图 1 大天顶角多核心簇射事例的示意图

表 1 多核心簇射事例的参量

事例名	天顶角 $\lg\theta$	各核心间距离/ μm			观测能量 E_γ/TeV	起始点深度 $\Delta t/\text{c. u.}$
		Z_{ab}	Z_{bc}	Z_{cd}		
K936524	4.9	4	6	13	4.9	85
K964230	6.2	8	12	12	6.7	120
K958528	6.2	68	179		4.9	25.5

K9 铅乳胶室是严格按照实验方案放置每个单元的, 每个铁盒中放置 8 个单元, 按顺序建立各单元. 每个大天顶角簇射在进入这个单元前穿过那几个单元是可以知道的. 根据簇射的坐标、方位角、天顶角就可以知道产生簇射的粒子所穿过的铅层厚度, 得到簇射的起始点位置 Δt . 这里的大天顶角簇射的 $\Delta t > 10 \text{ c. u.}$, 而这 3 个多核心簇射的 $\Delta t > 25 \text{ c. u.}$. 这也就表明它们决不可能是大气中的 γ -线形成的簇射.

2 关于大天顶角多核心簇射的讨论

(1) 计算大于天顶角 θ 的粒子束流 $J(>\theta)$ 与垂向束流 $J_\perp$ 之比, 可了解强子在大天顶角束流中的贡献. 在天顶角 θ 方向的束流为:

$$J(\theta) = J_0 [e^{(-x/(l \times \cos \theta))}],$$

其中 x 是垂直方向的大气厚度 (g/cm^2), l 为强子束流在空气中的衰减长度. J_0 是大气顶上的强子束流. $J_\perp = J_0 e^{(-x/l)}$. 所以, $J(>\theta)/J_\perp = \int e^{[-x/l \times (1/\cos \theta - 1)]} \cos \theta d(\cos \theta)$. 按文献 [3] 的结果, 垂向强子簇射强度为:

$$N_{h\gamma}(E_\gamma > 3 \text{ TeV}) = 2.1 \times 10^{-10} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}.$$

取积分范围在 $\theta < \pi/2$ 和 $\theta \geq 76^\circ$ 之间, 则

$$N_{h\gamma}(\theta > 76^\circ) = 9.1 \times 10^{-19} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}.$$

大天顶角的强子簇射束流与 μ -子簇射束流之比

$$N_{h\gamma}(\theta > 76^\circ) / I_\mu(\theta > 76^\circ) \approx 1.3 \times 10^{-9}.$$

所以大天顶角簇射束流中, 强子簇射的贡献完全可以忽略.

(2) 在大天顶角的簇射中, 存在着多心簇射, 其起始点深度 $\Delta t > 6 \text{ c. u.}$ 表明了它们不会是电子或 γ -线形成的. 会不会是 μ -子的虚光子与铅原子核发生光核反应造成的呢? 通过简单的计算^[4]可以得到 μ -子的光核反应数目与 μ -子的韧致辐射数之比, 远小于实验中得到的大天顶角多核心簇射数与 μ -簇射数之比 (5%). 通常在乳胶室中观测到的核作用事例, 是由 π^0 衰变成 γ -线形成的, 而观测能量只是 γ -线的能量, 约为实际核作用能量的 1/3. 因此能量为 E_μ 的 μ -子发生光核反应, 传递给原子核的能量若大于 E_c , 则观测能量只能大于 $1/3 E_c$. 也就是说, 同样黑度的簇射黑斑, 形成多心斑的 μ -子光核反应的传递能量应为 μ -子韧致辐射簇射能量的三倍, 在取韧致辐射 γ -线的能量下限时, 应低于 $1/3 E_c$. 再考虑到 μ -子束流随能量的衰减 $\propto E^{-3.8}$, 则相应能量 μ -子光核反应数与 μ -子韧致辐射数之比在 4×10^{-5} 与 1.4×10^{-3} 之间. 因此大天顶角多核心簇射也不可能来自 μ -子的光核反应.

这里讨论的大天顶角多心簇射穿过的铅板厚度均大于 25 c. u. , 所以不可能是空气中的电磁成分产生的簇射. 宇宙线中的核子束流通过这么厚的大气和铅板早已不存在了. μ -子光核

反应在大天顶角事例中的比数,比实验得到的多心簇射占大天顶角簇射的份额小50倍以上,因此大天顶角多心簇射也不可能是 μ -子的光核反应造成的。而产生大天顶角多核心簇射的粒子,核作用截面很小。否则怎么能通过那么厚的空气层和铅层呢?

实验上观测到大天顶角簇射早已不是新事,但大天顶角多核心现象却是初次看到。这是由于大天顶角的多心簇射极易漏掉。如在一开始时介绍的那样,由于多核心簇射,径迹分散没有一个清晰的黑核心;当能量增高时核心增多又互相重叠分辨不开,所以过去漏掉了这种事例。

致谢 这项工作曾多次与况浩怀、袁余奎先生讨论过,他们提出过很多建设性的意见,作者深致谢意。

参 考 文 献

- 1 Ren J R, Kuang H H, Huo A X, et al. Primary cosmic-ray composition in the energy range of 10^{14} eV to 10^{16} eV and high-energy atmospheric cosmic rays observed with emulsion chambers at Mt. Kanbala. *Il Nuovo Cimento*, 1987, 10C(1): 43~60
- 2 Mizutani K, Misaki A, Shirai T, et al. Measurements of the energy spectrum of cosmic-ray muons at sea-level with emulsion chambers. *Il Nuovo Cimento*, 1978, 48A(4): 429~433
- 3 Zhang N J, Wang C R, He M, et al. High Energy hadrons in atmospheric cosmic rays observed with Fe emulsion chambers. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1989, 13: 961~966
- 4 Hayakawa S. *Cosmic Ray Physics*. New York: John Wiley & Sons, 1969. 299