

高山 5500 米超高能宇宙线强子特性的研究

张春生 任敬儒 况浩怀 陆穗苓 李明祥 苏 实

王允信 王殿臣 范海昆 薛永贵 霍安祥

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

利用乳胶室对高山(5500米)宇宙线强子特性进行了研究。实验给出 $E_{\pi}^{\pm} = 2 \sim 20\text{TeV}$ 能区中强子簇射的微分能量谱指数 $\beta = (2.98 \pm 0.49)$, 簇射的垂直流强 $J(E_{\pi}^{\pm} \geq 3\text{TeV}) = (400 \pm 50)/\text{m}^2 \cdot \text{year} \cdot \text{sr}$, 强子在大气中的衰减长度 $\Lambda = (104 \pm 16)\text{g}/\text{cm}^2$, 强子和铅的平均核作用长度 $\lambda_h = (15.3 \pm 3.0)\text{cm}$, 介子和铅的平均核作用长度 $\lambda_m = (18.6 \pm 4.7)\text{cm}$, 以及 5500 米高度的介子流强、核子流强的比例 $\epsilon = (1.0 \pm 0.4)$ 。

引 言

宇宙线中的强子成分是在高能核碰撞过程中直接产生的, 因此研究高山上宇宙线强子的流强、能谱和不同成分(如核子、介子)占的份额对于了解原初宇宙线粒子的信息、高能核作用的规律都是很有意义的。已有一些研究者用实验和模拟计算来讨论过强子中各种成分占的比例^[1], 但涉及的能区较低(小于 1 TeV); [文献[2]对 5500 米高度的强子特性进行了初步的研究, 数据统计性尚少。本工作是利用铅乳胶室, 在 $E_{\pi}^{\pm} \geq 2\text{TeV}$ 能区对 5500 米高度的宇宙线强子特性进行较详细的研究, 给出强子的流强和强子中介子数、核子数的比例。

实验情况和数据选取

甘巴拉山乳胶室是由吸收物质铅板(或铁板)和感光材料交替迭合而构成。感光材料主要是高灵敏和普通的两种 X 光片, 其中少数单元加有核乳胶片, 用来标定粒子的能量。详细结构及其各参数见文献[1]。

高能光子、电子或超高能强子与铅(或铁)作用产生的 π^0 衰变的 γ 光子均可在乳胶室

中形成电磁簇射,当其能量超过某一阈值时, X光片显影后可以形成肉眼可见的黑斑. 通过测量入射粒子簇射在室的不同深度的发展情况, 定出它的簇射能量和簇射起始点深度 Δt (具体的方法和能量的标定见文献 [1, 3, 4]). 为了区分是 γ 簇射还是强子簇射, 按乳胶室工作的通用办法, 把 $\Delta t \geq 6$ c. u. (c. u. 是电磁辐射单位) 的事例划为强子引起的 Pb-jet, 而 $\Delta t < 6$ c. u. 的事例看成主要是 γ 或电子引起的簇射. 估计强子事例的 16% 混入 $\Delta t < 6$ c. u. 的区域中, 而在 $\Delta t \geq 6$ c. u. 中 γ 或电子发生簇射的几率小于 1%.

本工作所用的是 80 年和 81 年在西藏甘巴拉山上设置的铅乳胶室, 室的总厚度为 28 c. u. (~ 14 cm). 实验数据是从三十五个结构相同、面积为 40×50 cm² 的单元中得到的. 为了估计介子在铅的平均衰减长度, 选择了 $\Sigma E_{\gamma} \geq 50$ TeV、 $\langle ER \rangle \leq 10$ TeV \cdot cm 的族 11 个, 其中共有 $E_h^* \geq 3$ TeV 的强子簇射 39 个. 在这些族中, 把 $E_h^*/\Sigma E_{\gamma} < 0.1$ 的强子簇射看成是介子引起的, 这样得到介子簇射事例 32 个.

实验结果

1. 强子在大气中的衰减长度 Λ

实验给出的 $E_h^* \geq 3$ TeV 的强子簇射微分天顶角分布如图 1 所示, 当用

$$dN/d\Omega \propto \exp\left(-\frac{x}{\Lambda} \frac{1}{\cos\theta}\right)$$

($x = 520$ g/cm² 是甘巴拉山上的大气深度, Λ 是强子在大气中的衰减长度) 来拟合实验点时, 得到强子在大气中的衰减长度 Λ 为:

$$\Lambda = (104 \pm 16) \text{g/cm}^2$$

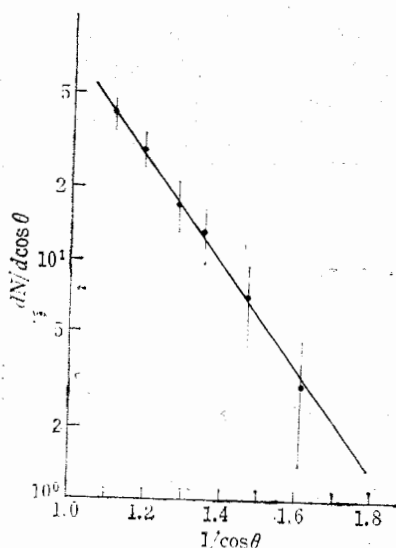


图 1 强子簇射的微分天顶角分布.

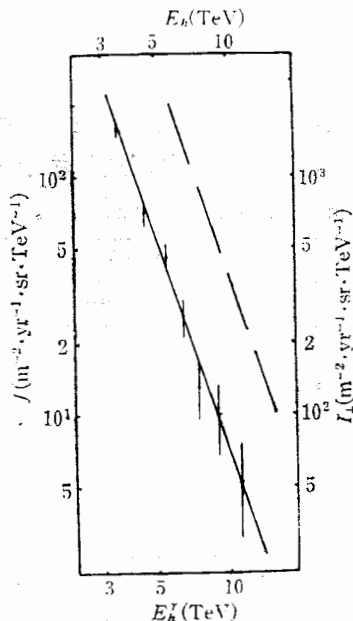


图 2 强子簇射和强子的微分能谱. 实线是对强子簇射实验点的最佳拟合, 虚线是倒推回去的簇射前强子的微分能谱, E_h^* 是 (簇射前) 强子的能量.

2. 强子簇射微分能谱和垂直流强

强子簇射的微分能谱取为下式:

$$J(E_h^Y) dE_h^Y \propto (E_h^Y)^{-\beta} dE_h^Y$$

式中 β 是微分能谱指数, E_h^Y 是强子的簇射能量. 图 2 中的实线是 $E_h^Y \geq 3\text{TeV}$ 强子簇射的实验拟合微分能谱, 其能谱指数为:

$$\beta = 2.92 \pm 0.12$$

当考虑了 E_h^Y 的测量相对误差为 20% 时, 拟合得到的能谱指数为:

$$\beta = 2.98 \pm 0.49$$

求强子簇射的垂直流强要知道室的有效立体角, 其定义为^[7]:

$$\bar{Q} = \frac{1}{S} \int \exp \left[-\frac{x}{\Lambda} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \right] \cos \theta d\Omega dS$$

对于甘巴拉山乳胶室, 厚 $L = 14\text{cm}$ ($\sim 28\text{c.u.}$), 面积 $S = 40 \times 50\text{cm}^2$, 计算的结果为:

$$\bar{Q} = 0.64$$

利用 \bar{Q} 的值, 取乳胶室对各方向入射强子的平均记录效率为 36%, 并且考虑其他实验因素的修正, 得到 $E_h^Y \geq 3\text{TeV}$ 的小面积非伴随宇宙线强子簇射的垂直流强为:

$$J(E_h^Y \geq 3\text{TeV}) = (400 \pm 50)/\text{m}^2 \cdot \text{year} \cdot \text{sr}$$

为了推出形成簇射的强子流强和能谱, 我们取强子在铅的平均衰减长度为 18.5 cm, 作用的平均非弹性系数 \bar{K} 为 0.6, K 取为 (0.2, 1) 之间的均匀分布, 次级 π^0 的能量平均为次级粒子能量的三分之一. 用随机抽样的方法, 得到 5500 米高度宇宙线强子的微分能量谱(图 2 虚线)和垂直流强:

$$I_{\perp}(E_h \geq 3\text{TeV}) = (5.8 \pm 0.6) \times 10^3/\text{m}^2 \cdot \text{year} \cdot \text{sr}$$

3. 强子、介子在铅的平均核作用长度

强子发生簇射的数目随路程 t 的变化满足下式:

$$dN/dt \propto \exp(-t/\Lambda_h^{\text{Pb}})$$

式中 Λ_h^{Pb} 是强子在铅中的衰减长度, 它和平均核作用长度 λ_h 的关系是: $\lambda_h = \Lambda_h^{\text{Pb}} [1 - (1 - \bar{K})^{\beta-1}]$, β 是微分能谱指数, \bar{K} 是平均非弹性系数. 对于宇宙线介子, 有类似强子的分布和关系式, 只是 Λ_h^{Pb} 换成 Λ_m^{Pb} , λ_h 换成 λ_m . 分别选用 $E_h^Y \geq 2\text{TeV}$ 的强子簇射数据和 $\Sigma E_{\gamma} \geq 50\text{TeV}$ 的 11 个 γ 族中的 32 个被认为是介子形成的簇射事例, 实验给出:

$$\lambda_h = (15.3 \pm 3.0)\text{cm} \quad \lambda_m = (18.6 \pm 4.7)\text{cm}$$

λ_h 和 λ_m 对应的作用截面分别为 1980 mb 和 1630 mb, 基本上和现行加速器数据的外推结果相符合.

4. 5500 米高度的介子流强、核子流强之比

由加速器 (SPS) 的结果 $\sigma_{p-p}/\sigma_{\pi-p} \cong 1.4$, 利用介子、核子在乳胶室铅物质中的衰减程度不同和上面给出的 λ_h 、 λ_m 的数值, 得到 5500 米高度、 $E_h^Y \geq 2\text{TeV}$ 能区的宇宙线强子中的介子、核子流强的比例 ε 为:

$$\varepsilon = 1.0 \pm 0.4$$

比值 ε 的大小显然和原初宇宙线粒子成分、能谱以及粒子相互作用规律有直接关系。由于强子簇射事例(特别是介子簇射)数较少,这里得到的 ε 值误差很大,有待实验上积累更多的统计数据。

作者感谢甘巴拉山乳胶室合作组其他同志的热情帮助。文章中部分实验数据是中日甘巴拉山乳胶室合作中由日方测量的,特此向日方合作者致谢。

参 考 文 献

- [1] 任敬儒等,高能物理与核物理, 5(1981),205.
- [2] 霍安祥等,高能物理与核物理, 6(1982),778.
- [3] 任敬儒,山东大学学报,3(1982),76.
- [4] 任敬儒等,高能物理与核物理, 2(1976),318.
- [5] China-Japan Emulsion Chamber Collaboration, 18th ICRC V5 (1983), 285.
- [6] Ding Lin-kai, et al., 16th ICRC, V7 (1979), 95.
- [7] 汤田利典,用乳胶室研究超高能核作用, (1983),第八页.

A STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF COSMIC RAY HADRONS AT MT. KAMBALA

ZHANG CHUN-SHENG REN JING-RU KUANG HAO-HUAI LU SUI-LING LI MING-XIANG
SU SHI WANG YUN-XIN WANG DIAN-CHEN FAN HAI-KUN XUE YONG-GUI HUO AN-XIANG
(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The characteristics of cosmic ray hadrons are studied by use of mountain emulsion chambers installed on Mt. Kambala 5500 m above sea level. The power index of the differential energy spectrum is (2.98 ± 0.49) in the energy region from 2TeV to 20TeV. The vertical flux of hadrons with $E_{n^+} > 3\text{TeV}$ is $(400 \pm 50)/\text{year} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}$, their attenuation length in air is $(104 \pm 16) \text{g}/\text{cm}^2$, the mean interaction lengths of hadrons and mesons in Pb are $(15.3 \pm 3.0) \text{cm}$ and $(18.6 \pm 4.7) \text{cm}$ respectively, and the ratio of meson-to-nucleon in cosmic ray hadrons on Mt. Kambala is (1.0 ± 0.4) .

注
中
称
的
在

SU
重