

利用单根簇射事例对初级宇宙线成份的分析

和煜东 周文德 和仁道 木 钧

(云南大学物理研究室)

丁林愷 朱清棋 经才骝 荆贵茹

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

通过对高山乳胶室单根簇射事例的分析,研究了高山上高能宇宙线中电磁成份和强子成份的实验特性;并通过 Monte-Carlo 模拟计算,探讨了 10^{14} eV 附近能区的初级宇宙线成份。模拟计算给出的能谱指数和衰减长度与实验结果相符;对垂向流强的分析表明, 10^{14} eV 附近能区的初级宇宙线中质子和原子核的含量大致符合低能区的简单外推,质子含量不低于 30%, $A \geq 2$ 的原子核含量不超过 70%。

一、引 言

对初级宇宙线的研究已进行了几十年,然而 10^{14} eV 以上能区各种核成份的能谱和比例仍不清楚,只是质子和轻核有少量的直接测量数据^[1]。自开展甘巴拉山乳胶室实验以来,已对高能 γ 线和强子的形态学进行了一些研究^[2-6],积累了一定的数据。同期, CERN $\bar{p}p$ 对撞机实验对质心系能量 $\sqrt{s} = 200 - 900$ GeV 的 $\bar{p}p$ 作用进行了一系列研究,提供了这一能区中反映强子作用特征的许多数据^[9]。工作 [10] 指出,乳胶室实验记录到的非伴随 γ 线和强子以及 $\sum E_{\gamma} = 10 \sim 50$ TeV 的小簇事例主要是 $5 \times 10^{12} \sim 10^{15}$ eV 能区的初级宇宙线粒子经大气中多次核作用的后代产物,其初始能区正与从 ISR 到 $\bar{p}p$ 对撞机实验的能区相对应。这自然地提供了一个途径,使得我们可以利用来自加速器实验的可靠的强子作用知识去分析这一能区初级宇宙线的成份。

基于这一想法,本工作首先对中日合作甘巴拉山实验得到的 $8.3\text{m}^2 \cdot \text{year}$ 乳胶室的 x 光片进行了测量分析,给出了观测能量为 $3 \sim 20$ TeV 的 γ 线和强子簇射的能谱指数、大气中的衰减长度和垂向流强,并总结从 ISR 到 SPS 能区的加速器实验结果,构造了两分量强子作用模型,去模拟初能为 $5 \times 10^{12} \sim 10^{15}$ eV 的初级宇宙线粒子在大气中的传播。由

模拟结果与实验结果比较分析,对 10^{14} eV 附近能区的初级宇宙线的核成份作了初步判断。这对于进一步了解初级宇宙线谱的“膝”附近能区是否存在成份反常的问题具有一定的参考意义。

二、单根簇射事例的实验结果

甘巴拉山乳胶室实验情况见 [4, 11], 本工作分析了 $8.3\text{m}^2 \cdot \text{year}$ 乳胶室的 x 光片, 取自 1981 年和 1982 年所安装建造的铅乳胶室。其中 1981 年片 $3.1\text{m}^2 \cdot \text{year}$, 室厚 28 辐射长度(c.u.); 1982 年片 $5.2\text{m}^2 \cdot \text{year}$, 室厚 14c. u.。数据的测量分析方法与 [11] 相同, 电磁成份(γ 和 e) 与强子簇射的区分也采用通行的起始点深度判别法^[4]。共得到簇射能量 E , (或 $E_h^{(\gamma)}$) $\geq 3\text{TeV}$ 的非伴随簇射候选者 1414 个, 其中 γ 簇射 1086 个, 强子簇射 328 个。

图 1 给出 $E_\gamma \geq 3\text{TeV}$ 的 γ 簇射和 $E_h^{(\gamma)} \geq 3\text{TeV}$ 的强子簇射的微分天顶角分布。用形如:

$$dN/d\Omega \propto \exp(-x \cdot \sec\theta/\lambda)$$

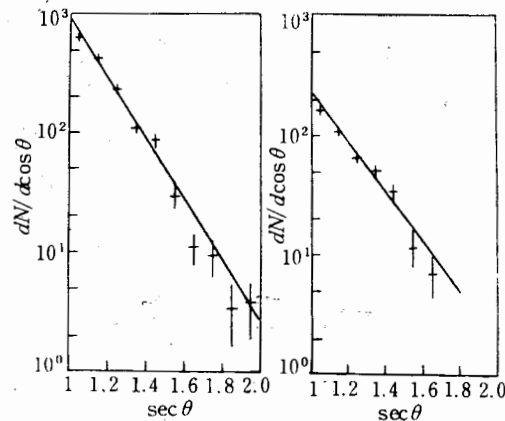


图 1 γ 和强子簇射的微分天顶角分布

(a) γ 簇射 (b) 强子簇射

(x 是甘巴拉山高度的大气深度值, 为 $520\text{g}/\text{cm}^2$) 的函数拟合实验点, 得到 γ 线和强子在大气中的衰减长度分别为:

$$\lambda_\gamma = 90 \pm 14\text{g}/\text{cm}^2, \lambda_h = 106 \pm 19\text{g}/\text{cm}^2.$$

图 2 给出观测能量 E_γ (或 $E_h^{(\gamma)}$) = $3 \sim 20\text{TeV}$ 的 γ 线和强子簇射的微分能谱。用形如

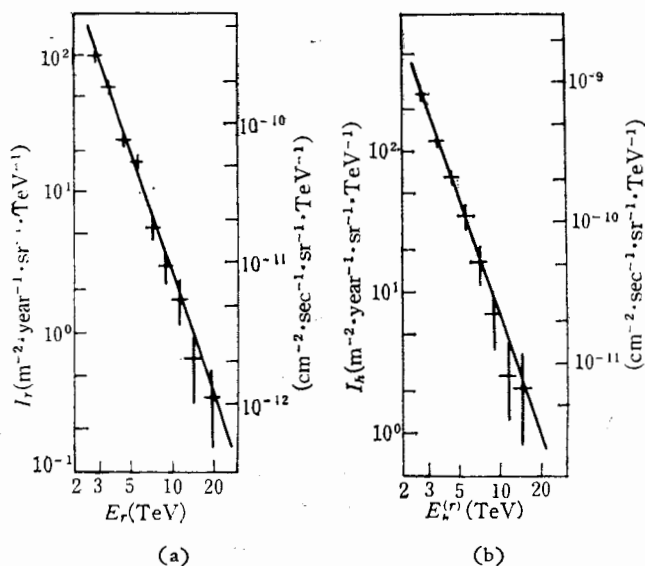
$$J(E)dE \propto E^{-\beta-1}dE$$

的幂律函数拟合, 并取簇射能量的测量误差为 10%, 给出的积分谱指数为:

$$\beta_\gamma = 2.02 \pm 0.42, \beta_h = 2.06 \pm 0.34.$$

考虑到乳胶室的有效立体角和其他修正因素, 给出 γ 线和强子簇射的垂向流强分别为:

$$I_\gamma^\pm(E_\gamma \geq 3\text{TeV}) = 187 \pm 29 \text{ m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1},$$

图 2 γ 和强子簇射的微分能谱(a) γ 簇射 (b) 强子簇射

$$I_h^{\perp}(E_h^{\perp} \geq 3\text{TeV}) = 388 \pm 69 \text{ m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}.$$

将上述结果与同类工作^[2-8]做了比较。各作者给出的 γ 线和强子簇射的能谱指数、衰减长度以及 γ 线的垂向流强彼此在误差范围内符合。但强子簇射的垂向流强彼此有所差别,这可能主要来源于对强子探测效率的处理不尽相同。另外,各作者所选择事例的标准也不完全统一。从各个组的结果看来,实验确定 γ 簇射的流强比确定强子簇射的流强要准确。

三、Monte-Carlo 模拟计算

高能宇宙线粒子在大气中的传播过程是复杂的,模拟中处理了有观测效应的所有物理过程,例如:强子与空气核的碰撞,各种核与空气核的碰撞,次级强子的作用、衰变以及 γ 引起的电磁级联等。主要模型假设及参数如下:

1. 强子-强子作用机制采用总结从 ISR 到 SPS 能区的加速器实验数据所构造的两分量模型^[12]。这一模型在大赳快度 (η) 区(高山乳胶室的灵敏区域)能给出与加速器实验结果基本一致的荷电粒子赳快度分布,如图 3 所示;它给出的平均荷电粒子多重数 $\langle n_{ch} \rangle$ 随能量的上升符合加速器实验结果的 $a + b \ln s + c \ln^2 s$ 形式^[9]。

2. 强子-空气核作用的平均作用长度随能量的变化关系取为 $\lambda_{h-air} = \lambda_0 E^{-0.06}$ 。其中的 λ_0 是 $E = 1\text{TeV}$ 时的 λ_{h-air} 值。对核子,取为 80g/cm^2 ;对 π 介子,取为 100g/cm^2 。

核子与空气核作用的非弹性分布取为平均值 0.65 的近均匀分布^[13]。由于在大 η 区,强子-核作用的次级粒子角分布与强子-强子作用时并无明显差别^[14,15],而乳胶室实验主要记录大 η 区粒子^[10],故取与强子-强子作用时相同的角分布及多重数。平均横动量及其分布也取与强子-强子作用时相同。

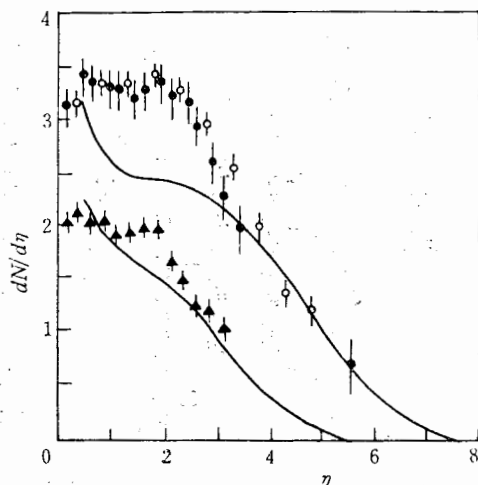


图 3 次级带电粒子的慢速度分布

▲ R703 ● UA1 ○ UA5 — 本工作

3. 核-空气核作用的平均作用长度取为: $\lambda_{\text{Ai-air}} = 80\text{Ai}^{-0.44}\text{g/cm}^2$. 其碰撞采用相继碎裂模型^[6]处理.

4. 对模拟的进入乳胶室的电磁成份,被认为引起电磁级联而 100% 地被记录. 强子引起 Pb-jet 而形成簇射,其起始点按 $\exp(-\Delta t/\lambda_{\text{Pb}})$ 抽样得到. 其中的 λ_{Pb} 是强子在 Pb 中的平均作用长度,对核子,取为 30c.u., 对 π 介子,取为 36c.u.. 与实验所用的条件相同,判定 $\Delta t \leq L - 4$ (L 为以 c. u. 量度的室厚)的簇射为被记录的强子簇射,其中 $\Delta t \leq 6\text{c. u.}$ 的则判为 γ 簇射. 由强子能量 E_h 到强子簇射能量 $E_h^{(\gamma)}$ 的转换系数 K_γ 由强子-铅作用中的非弹性度 K 和中性粒子份额 P_γ 按 $K_\gamma = KP_\gamma$ 决定. 被乳胶室记录的粒子,还要按照实验上相同的判据决定它是否为非伴随粒子.

5. 采用多分支法跟踪,对于大气中每一次核、电磁作用或衰变的次级产物,只要其能量大于乳胶室记录阈(取为 2TeV),就进行跟踪. 所有跟踪的粒子,当其分别到达 100、520 和 650g/cm² 三个观测面时,按上述实验条件处理后记录其种类、方向、坐标、能量及其有关历史档案.

四、计算结果及讨论

1. 衰减长度及能谱指数

按 $\beta = 1.7$ 的幂律谱取初能为 $5 \times 10^{12} \sim 10^{15}\text{eV}$ 的 181105 个质子垂直入射,进行模拟计算. 得到大气深度为 100、520 和 650g/cm² 三个观测面上 $E_\gamma = 3 \sim 20\text{TeV}$ 的 γ 线和 $E_h^{(\gamma)} = 3 \sim 20\text{TeV}$ 的强子簇射的强度,由此拟合得到它们在大气中的衰减长度分别为:

$$\lambda_\gamma = 116 \pm 43\text{g/cm}^2, \lambda_h = 107 \pm 36\text{g/cm}^2.$$

取同样的 704298 个人射质子作相同计算,得到甘巴拉山高度处 $E_\gamma \geq 3\text{TeV}$ 的 γ 簇射 751 个和 $E_h^{(\gamma)} \geq 3\text{TeV}$ 的强子簇射 232 个. 与处理实验数据时相同,当考虑到能量的

测量误差为 10% 时, 给出它们的积分能谱指数分别为:

$$\beta_r = 1.95 \pm 0.38, \quad \beta_h = 1.78 \pm 0.43.$$

可见, 计算给出的衰减长度和能谱指数在误差范围内与实验数据相吻合. 这说明, 总结加速器实验结果而得到的核作用机制大致正确地描写了 $5 \times 10^{12} \sim 10^{15} \text{eV}$ 的初级宇宙线质子在大气中各个作用过程的产生谱以及能量耗损过程.

2. 垂向流强与初级宇宙线核成份

模拟计算给出纯质子初级成份时, γ 线和强子簇射的垂向流强分别为:

$$I_r^p(E_r \geq 3\text{TeV}) = 335 \pm 12 \text{ m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1},$$

$$I_h^p(E_h^{(\gamma)} \geq 3\text{TeV}) = 345 \pm 23 \text{ m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}.$$

可见, 若 10^{14}eV 附近能区的初级宇宙线全部为质子时, 计算给出的 γ 流强为实验值的 ~ 1.8 倍; 而给出的强子簇射流强与实验值相差不多.

根据对原子核入射情况的模拟计算, 当初级宇宙线分别全为质子、氦核 ($A=2$)、碳氮氧核群 ($\bar{A}=14$) 以及铁核 ($A=56$) 时, 推出它们在甘巴拉山高度处产生观测能量为 $3 \sim 20 \text{TeV}$ 的非伴随 γ 簇射强度之比约为 $1:0.3:0.2:0.08$. 由此, 用实验上测定得较为准确的 γ 线垂向流强估计出 10^{14}eV 附近能区的初级宇宙线中质子的下限含量为 $\sim 30\%$, 即 $A \geq 2$ 的原子核的总含量不超过 $\sim 70\%$. 如果根据初级宇宙线成份的直接测量数据作简单外推, $\sim 10^{14} \text{eV}$ 处的质子含量大约为 34% ^[27]. 可见, 10^{14}eV 附近能区的初级宇宙线中, 质子和原子核所占的比例大致符合 $\lesssim 10^{13} \text{eV}$ 能区的简单外推, 没有质子含量骤降、重核含量骤增的明显迹象.

3. 高山乳胶室记录的 γ 线和强子的特征

分析模拟数据表明, 5500 米高度处的乳胶室记录的观测能量为 $3 \sim 20 \text{TeV}$ 的 γ 线和强子具有以下几个特征:

(1) 产生 E_r (或 $E_h^{(\gamma)}$) = $3 \sim 20 \text{TeV}$ 的 γ 线和强子簇射的初级宇宙线质子的平均初能分别为 233TeV 和 155TeV , 这正是目前 CERN $\bar{p}p$ 对撞机实验所处的能区.

(2) 由于乳胶室的记录偏见, 在记录下来的 $E_h^{(\gamma)}$ = $3 \sim 20 \text{TeV}$ 的观测强子中, 将近 7% 的是未经大气作用而直接到达的初级宇宙线质子, 但这一比例随 $E_h^{(\gamma)}$ 增高而很快下降.

(3) 在室内形成簇射的强子中, 介子与核子流强之比为 1.21 ± 0.22 . 这与 [8] 的分析结果不矛盾.

(4) 强子簇射的祖先在首次与空气核作用时曾作为带头粒子的几率不到 $\sim 40\%$.

作者感谢甘巴拉山乳胶室实验合作组的同事们对本工作的支持和帮助, 也感谢高能物理研究所 VA \times 11/780 机组对计算工作给予的支持和方便. 霍安祥、任敬儒、况浩怀同志曾与作者进行过有益的讨论, 谨致深切谢意.

参 考 文 献

- [1] 例如, A. M. Hillas, Proceedings of Cosmic Ray Workshop, University of Utah, 1983, P. 1.
 [2] Wang. C. R et al., 17 th ICRC, 5 (1981), 251.
 [3] 霍安祥等,高能物理与核物理, 6 (1982), 778.
 [4] Ren. J. R et al., 18 th ICRC, 5 (1983), 285.
 [5] 曹培园等,第四届全国宇宙线会议论文(重庆建工学院学报, 1985年增刊, p.105).
 [6] 木 钧等,云南大学学报, 7 (1985), 289.
 [7] Ren. J. R et al., 19 th ICRC, 5(1985), 204.
 [8] 张春生等,高能物理与核物理, 9 (1985), 649.
 [9] 例如, A. G. Eksping, CERN-EP/84-43, (1984); J. G. Rushbrooke, CERN-EP/85-124, (1985) 及其有关引文.
 [10] 丁林愷等,科学通报,(待发表).
 [11] 任敬儒等,高能物理与核物理, 5 (1981), 205.
 [12] 和煜东等,云南大学学报,(待发表).
 [13] L. W. Jones, 18 th ICRC, 5 (1983), 17.
 [14] T. K. Gaisser et al., 18 th ICRC, 5 (1983), 174.
 [15] 例如, M. A. Faessler, CERN-EP/84-64, (1984).
 [16] 丁林愷等,高能物理与核物理, 7 (1983), 129.
 [17] 经才骧等,高能物理与核物理, 10 (1986), 636.

AN ANALYSIS OF PRIMARY COSMIC RAY COMPOSITION AT ENERGIES AROUND 10^{14} eV USING SINGLE-SHOWER EVENTS OBSERVED BY MOUNTAIN EMULSION CHAMBER

HE YU-DONG ZHOU WEN-DE HE REN-DAO MU JUN

(Institute of Physics, Yunnan University)

DING LIN-KAI ZHU QING-QI JING CAI-LIU JING GUI-RU

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The characteristics of electromagnetic and hadronic components in high energy cosmic rays at mountain altitude are studied by analysing single-shower events observed by mountain emulsion chamber. The chemical composition of primary cosmic rays in the energy region around 10^{14} eV is studied by using Monte-Carlo simulation. The simulated power indices of energy spectra and attenuation lengths in air are in agreement with the experimental data. The analysis of their vertical intensities indicates that the chemical composition of primary cosmic rays at energies around 10^{14} eV is not contradicted to the simple extrapolation from lower energies and the abundance of protons can not be less than 30% and that of the nuclei with $A \geq 2$ not larger than 70%.