第19卷 第6期 高能物理与核物理 Vol. 19, No. 6
1995年6月 HIGH ENERGY PHYSICS AND NUCLEAR PHYSICS June, 1995

从高山乳胶室族事例研究强相互作用在碎裂区的特征*

陈江川 陆穗苓 朱清棋 霍安祥
(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1994-05-12 收稿

摘 要

利用高山乳胶室小族事例，分析了族内簇射能谱指数与族的流强的关系．蒙特卡洛模型很好地再现了实验现象的主要特征，说明在 10^{14}—10^{15}eV 能区强相互作用在碎裂区的行为没有剧烈变化．

关键词 高山乳胶室，族事例，强相互作用．

1 引 言

近年来加速器实验已经覆盖了 10^{14}eV—10^{15}eV 能区[1]，能量最高的加速器是对撞机，由于在束流管道中测量的困难，它仅侧重于中心区的探测，到目前为止，只有少数碎裂区中的物理量被 CERN 的 UA4 和 UA7 测量过[2]．对于高山乳胶室（MEC）实验来说，它研究的是超高能宇宙线粒子与静止靶核的作用，主要观测的是碎裂区中强相互作用的特征．高于加速器能量的一些强作用特征已经被许多合作组用 MEC 的族现象分析过[3]，但由于未知因素太多，至今未能得到统一结论．因此很有必要在能量与对撞机相接近的能区系统分析一下 MEC 的族现象，这个能区的强相互作用特征在中心区是清楚的，初级宇宙线成份在这个能区也已经有比较可靠的直接观测数据，这有利于蒙特卡洛模型的检验和强相互作用在碎裂区中行为的讨论，这些工作是对更高能区强相互作用特征研究的基础．本文利用甘巴拉山(中国西藏，海拔 5500m，大气深度 520g/cm^2) MEC 实验中的小族事例讨论了与加速器最高能量相重叠能区中的一些强作用特征．

MEC 中所观测到的一个族是由一些平行入射的次级粒子组成的，这些粒子起源于同一个原初宇宙线高能粒子．族的流强及族内粒子能谱指数与初级宇宙线成分及核作用特征密切相关，反映一个合理物理模型的蒙特卡洛产生器应能够再现族的这些基本特征．Pamir-Chacaltaya 组报道的包括现有知识的模型无法解释能量大于 100TeV 族的流强与族内能谱指数的关系[4]，产生这些族的原初宇宙线粒子能量一般大于 10^{15}eV，他们认为模型与实验结果的矛盾表明强作用特征在高于加速器能量的能区发生了急剧变化．本工作主要是在与加速器最高能量相重叠的能区讨论这个问题，显然这是对更高能区进行讨论

* 国家自然科学基金资助．

的基础.

本文首先描述了甘巴拉山 MEC 实验安排，然后给出了蒙特卡洛产生器和 MEC 探测效率模拟模型的描述. 第 4 部分给出了族现象一些主要特征的分析，随后还讨论了实验族数据中流强与族内能谱指数的关系，最后是结论与有关的讨论.

2 乳胶室实验

甘巴拉山乳胶室由X光片及金属板交叠组成，其中有部分单元包含有核乳胶片用来作能量定标. 金属板是用来吸收和转换能量的，本工作用的族全部是铅乳胶室数据. 每个单元的面积是 $0.4 \times 0.5 m^2$，K9 乳胶室铅板总厚度是 30rl，K7 室为 24rl，一盒乳胶室有 6 到 8 个单元. K7 和 K9 乳胶室都曝光约一年时间，本工作实验数据的总曝光量为 $1.8(m^2 \cdot yr)$.

一个入射粒子在乳胶室中产生电磁级联或核级联，其电磁簇射能被X光片记录为一系列黑斑，测量这些簇射斑的黑度就能确定簇射的电磁能量以及电磁级联的起始点[5-7]. 光子簇射与强子簇射可以根据它们簇射起始点深度的不同而统计地加以区分，对强子来说，它开始电磁级联的路程是核相互作用的路程加上电子对产生的路程，所以强子开始电磁级联的深度大于光子的电磁级联起始点深度. 在本工作中取 6rl 作为区分光子与强子的电磁级联起始点标准，起始点小于 6rl 并且没有连续作用的簇射作为光子，否则作为强子. 根据统计计算，约 99% 的光子簇射起始点深度小于 6rl，在 K7 和 K9 铅室中约 85% 的强子簇射起始点深度大于 6rl.

选择族的标准取为：(1) 每个簇射的能量大于 4TeV，这里是指观测能量，对强子来说只是电磁成分能量. (2) 一个族的粒子数 $N_\gamma \geqslant 4$. (3) 族的总观测能量 $\sum E_\gamma \geqslant 20TeV$. 为减少测量过程中对远离族中心的簇射以及在室的深部出现的强子簇射的遗漏，对每个单元的全部簇射都进行了全面扫描并作了靶图. 在单元靶图中来自同一个族的簇射的径迹表现为一组平行线，并且它们的天顶角都相同，所以较容易从单元靶图中辨认出来. 表 1 是本工作测量的甘巴拉山乳胶室数据的总结.

表 1　本工作测量的甘巴拉山乳胶室

乳胶室	单元数	面积 (m^2)	曝光时间 (d)	曝光量 ($m^2 \cdot yr$)	族数
K9	72	14.4	429	16.9	92
K7	25	5.0	358	4.9	43
总计	97	19.4		21.8	135

3 蒙特卡洛模拟

为了与实验数据比较，对超高能宇宙线在大气中的传播行为进行了蒙特卡洛模拟，对超高能簇射在乳胶室内的探测效率也作了简化的模拟. 初级宇宙线能谱和强子与核碰撞

的多重产生模型是宇宙线在大气中传播行为模拟的关键．我们的多重产生模型由单衍射离解成分(SD)，非单衍射离解成分(SOFT)和来自 QCD MINI-JET 的硬过程(HARD)组成，被称作 SD-SH 模型．这个模型是基于加速器的结果，将 CERN 的 ISR 和 $S\bar{p}pS$ 的单举相互作用结果外推到超高能区得到的[10]．它在碎裂区有近似的费曼标度行为．对初级质子谱假设在 1000TeV 处拐折，拐前能谱指数取为 -2.74，拐后取为 -3.00，还假定其它初级宇宙线成分能谱的拐点由银河系磁场的刚度切割模型决定．初级质子在大于 70TeV 能区的流强是 $3.6\times10^{-5}(m^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot s^{-1})$．初级质子与氦及其它成分的比例在大于每核 70TeV 处为 0.31:0.25:0.44，这与最近的直接观测结果基本符合[8]．SD-SH 模型已经成功地解释过观测能量大于 100TeV 的 MEC 族现象[9]，本工作研究的能区低于文献[9]．

对 MEC 中簇射的探测效率用下面的简化模型来描述：(a) 对纯电磁级联簇射，如果它在室内通过的路程大于 10rl 就认为对它的探测效率接近 1 (在室内路程至少 10rl 的条件是实验中扫描簇射和测量它的能量所需要的)，因此对光子簇射在乳胶室内的发展不再模拟．然而 20% 的能量测量误差已经考虑，它会影响观测能谱．(b) 对进入室内的强子簇射，乳胶室内核相互作用长度对核子取为 30rl，对 π 取 36rl，非弹性度 k 遵从平均值 0.6 的(0,1)区间均匀分布 $P(k)=0.4+1.2k$，次级 π^0 的能量份额取为非弹性度的 1/3．如果强子在室内产生电磁级联起始点的深度小于 6rl 时，它将被作为光子对待，如果簇射开始电磁级联后在室内通过的路程小于 10rl，它就作为不可测簇射去掉，对模拟数据的处理条件与实验一致．

4 族现象的一些主要特征分析

初级宇宙线的能谱、成分以及核作用模型对族的流强都比较敏感，图 1 给出了模拟族与实验族的流强，由图可看出模拟结果与本工作测量的数据及文献[3]中的实验结果基本符合．图中 200TeV 处小族数据的跳跃是由于在该处数据已很少，统计误差太大造成的．族事例的流强在大气中按 $\exp(-x/\lambda)$ 衰减，其中 x 是观测点的大气深度(对甘巴拉山 $x=520g/cm^2$)，λ 是衰减长度．在大气中族的衰减长度是一个重要参量，可以从族的天顶角分布推断出来，用本工作的实验数据得到 $\lambda=106\pm22g/cm^2$，而模拟结果是 $112\pm10g/cm^2$．图 2 是族中心附近的簇射多重数分布，它与碎裂区的 scaling 行为特征密切相关，在 SD-SH 模型中碎裂区 scaling 只有轻微破坏，否则族中心附近的簇射多重度会下降很多．表 2 是对 20TeV 到 200TeV γ 族的模拟结果和实验数据的一些主要特征的比较．根据模拟计算，产生这些族的原初宇宙线粒子能量 90% 以上在 $3\times10^{13}eV$ 到 $10^{15}eV$ 能区，其中 $10^{14}eV$ 以下能区的初级宇宙线成分已经有直接观测数据．从图 1、图 2 和表 2 可以看出我们的模拟结果与实验相符合，这说明所用的强作用模型参数是合适的．

族的横向分布与电磁级联中的发射角及强相互作用中次级粒子平均横动量密切相关，所以 MEC 族中簇射的横向分布能提供一些强相互作用模型的信息．图 3(a) 和图 3(b)分别给出了每个族的$\langle ER\rangle$及$\langle R\rangle$的微分分布，这里 E 是每个簇射的能量，R 是簇射在垂直入射轴的平面内到族的能量中心的距离，$\langle ER\rangle$是每个族的 $E\times R$ 的平均值．

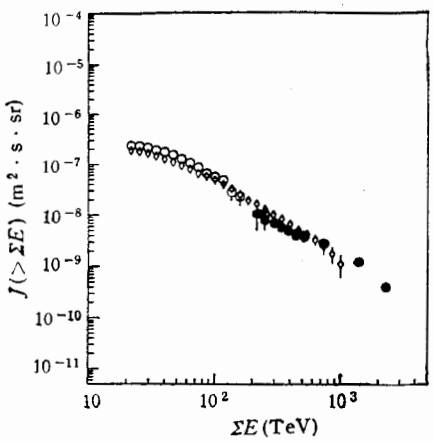


图 1　甘巴拉山高度族的流强

○ 本工作结果，● 引自文献[3]，◇ 蒙特卡洛模拟结果.

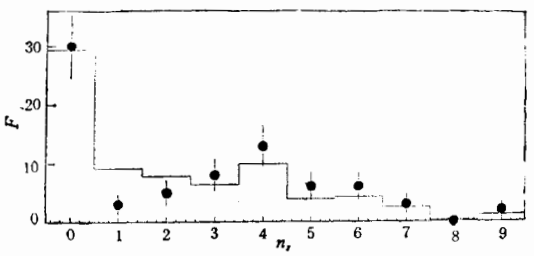
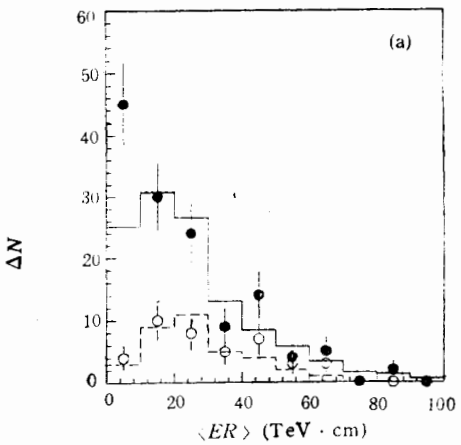


图 2　族中心附近（$R<1.25$cm）簇射多重度分布

n_γ 是每个族的簇射数，纵坐标 F 是 n_γ 族的出现频数，●是实验数据，——是以强子为原初粒子的模拟族结果.

表 2　族的平均特征

	族　数	衰减长度 (g/cm²)	族内簇射平均多重度	族中心簇射数份额
实验数据	77	106±22	6.1±0.8	0.36±0.06
强子产生的模拟族	475	112±10	6.1±0.3	0.30±0.02
光子产生的模拟族	88	79±16	7.4±0.8	0.98±0.02



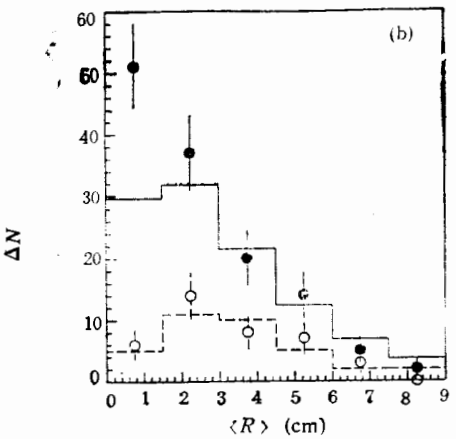


图 3　(a) 族的平均 ER 微分分布　　图 3　(b) 族的平均 R 微分分布图例同(a)

●、○分别是实验的 γ 族和强子族，——、-----分别是以强子为原初的模拟 γ 族和强子族（γ 族指含强子及不含强子的所有族，强子族指含强子的族）.

5　族的流强与族内簇射能谱的关系

族内簇射能谱对初级宇宙线能谱及核作用模型也较敏感，原则上蒙特卡洛产生器应

能再现它．如上节所示，SD-SH 模型重现了族的流强和其它主要特征，为与实验数据作进一步比较，对族内 10TeV 到 50TeV 的簇射用最小二乘法拟合得到能谱指数．为得到完整的比较图象，计算了族的能量阈值从 20TeV 到 150 TeV 变化时族内簇射能谱指数分布．图 4 是族的流强与族内能谱指数之间的关系．由图可看出我们的模拟样本与实验结果很接近，没有看到超出统计误差范围的差别．

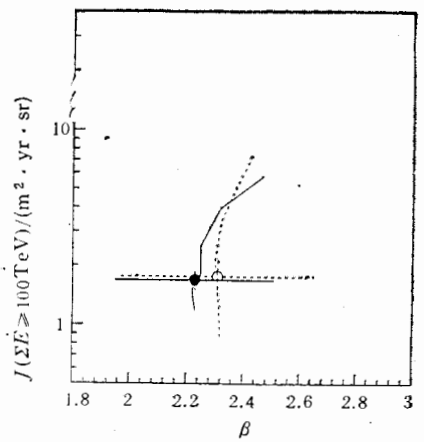


图 4 族的流强 J 与能谱指数 β 的关系

——、-----分别为模拟族与实验族当阈能 $\sum E_\gamma$ 从 20TeV 取到 150TeV 时的 J 与 β 值的变化关系，标记○和●处对应阈能取 100TeV 时族流强和能谱指数的值，横直线是该处 β 值的统计误差．

6 结论和讨论

本文分析了甘巴拉山乳胶室能量 20TeV 到 200TeV 的小族事例，讨论了族的流强与族内簇射能谱之间的关系，本文中的族中心附近簇射多重度分布(图 2) 是一个新的对模型的 scaling 行为较为敏感的物理量分布，我们用 scaling 只有轻微破坏的模型很好地再现了实验数据的结果，这说明在 10^{14}eV 到 10^{15}eV 能区强相互作用在碎裂区的一些行为没有急剧变化．

本工作无论从实验上还是物理结果分析上都得到了任敬儒研究员的真诚帮助，谨表感谢．我们还感谢山东大学、郑州大学、重庆建工学院以及其他所有参加甘巴拉山乳胶室实验合作的全体人员．

参 考 文 献

[1] UA5 collab., G. J. Alner et al., *Phys. Rep.*, **154** (1987) 247; UA5 collab., R. E. Ansorge et al., *Z. Phys.*, **C34** (1989) 357; T. Alexopouos et al., *Nucl. Phys.*, **A498** (1989)181c; N. Amos et al., *Phys. Rev. Lett.*, **63** (1989) 2784.

[2] UA4 collaboration, *Phys. Lett.*, **198b** (1987) 583; UA7 collab., et al., Proc. 20th ICRC, **5** (1987) 23.

[3] J. R. Ren et al., *Phys. Rev.*, **D38** (1988) 1404; J. R. Ren et al., *Phys. Rev.*, **D38** (1988) 1417.

[4] Chacaltaya and Pamir Collaboration, ICRR-Report-254-91-23.

[5] 任敬儒，山东大学学报，**3**(1982)76.

[6] M. Akashi et al., *Nuovo Cimento*, **A65** (1981) 355.

[7] M. Amenomori et al., in 8th International Cosmic Ray Conference, Bangalore, 1983, Vol. 2, Conference Papers (Tata, Institute of Fundamental Research, India, 1983), p. 57.

[8] K. Asakimori et al., Proc. 23rd ICRC, **2** (1993) 25.

[9] Q. Q. Zhu et al., *J. Phys.*, **G16** (1990) 295; 朱清棋等，高能物理与核物理，**14**(1990)296.

[10] J. G Rushbrook, in Proc. of Europhys. Conf. on High Energy Phys. Bari, Italy, **839**(1985); C. Geich-Gimbel, *Int. J. Mod. Phys.*, **A4** (1989) 1527, and references therein.

Features of UHE Hadronic Interaction in Fragmentation Region Inferred from the Analysis of MEC Families

Chen Jiangchuan　Lu Suiling　Zhu Qingqi　Huo Anxiang

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

Received 12 May 1994

Abstract

With mountain emulsion chamber data obtained from Mt. Kanbala, the relation between family flux and energy spectrum of showers in the family is investigated. Monte-Carlo generator can reproduce main phenomena of families, and indicates no global change appearing in the hadronic interaction in fragmentation region in the energy region from 10^{14} to 10^{15} eV.

Key words mountain emulsion chamber, family event, hadronic interaction.