

# 对高山乳胶室 $\gamma$ 族强度和衰减的讨论\*

朱清棋 丁林堽 王广君 和煜东 荆贵茹

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

## 摘 要

分析影响高山乳胶室  $\gamma$  族强度的种种因素, 比较强度的实验数据和模拟计算值. 结果表明超高能区 ( $\sim 10^{15}$  eV) 初级宇宙线化学成分中质子占  $\sim 30\%$  的推断是可以接受的.

## 一、引 言

近十年来, 利用大面积的高山乳胶室(MEC)实验对超高能区 ( $\sim 10^{15}$  eV) 的强相互作用特征和初级宇宙线化学成分进行了广泛的研究. 但是, 迄今为止, 各实验组各持己见, 仍然未能取得一致结论. 究其原因, 主要有两点: 一是各自使用的强子多重产生模型存在或多或少的差别, 二是实验数据的精度还不能给模型以严格的检验. 富士(Fuji)组和甘巴拉山组<sup>[1]</sup>基于对  $\gamma$  族流强等可观测量的分析, 认为直到  $10^{16}$  eV 能区, 强子碰撞的非弹性截面大概以  $E^{0.06}$  形式上升; 碎裂区 ( $x \geq 0.05$ ) 的 Feynman Scaling 近似成立; 初级宇宙线在  $10^{15}$  eV 能区以重核为主(铁核占 30—40%, 质子仅占 15—20%). 但是, 帕米尔(Pamir)组成员<sup>[2]</sup>通过对  $\gamma$  族的组团分析, 指出在  $10^{15}$ — $10^{16}$  eV 能区, 对准 Feynman Scaling 模型, 初级宇宙线化学成分中的铁核份额应该降低到 10—20% 才能解释实验数据; 进一步对再生族多重度等的分析, 指出非弹截面按  $\ln E$  形式上升, Feynman Scaling 在碎裂区明显破坏, 在  $10^{16}$  eV 能区, 铁核份额小于 20%.

我们不认为高山乳胶室的实验结果只是取决于初级成分、截面上升形式和碎裂区的 Scaling 行为. 所以本工作着重分析和讨论非弹性度、靶核效应以及其它重要物理过程对  $\gamma$  族强度的影响.

## 二、模拟模型的描述

强子多重产生和电磁级联是高能宇宙线在大气中传播的基本过程. 由于 MEC 实验阈能高于 1 TeV, 所以对电磁成分的模拟采用 A 近似已足够精确. 而强子多重产生的模型, 至少应能重现对撞机的实验数据. 本工作使用的两个强子多重产生的唯象模型分别叫 D-ND 和 SD-SH.

本文 1989 年 6 月 22 日收到.

\* 本工作部份经费得到世界实验室资助.

## (1) 衍射分解过程

D-ND 模型中的 D 表示衍射分解过程, SD-SH 模型中的 SD 表示单衍射分解过程. 由于这种过程多重度低, 次级粒子不但能量较高, 且多集中在朝前区 (图 1). 像乳胶室这样对碎裂区灵敏的探测器, 这种过程应给以足够的重视. 历史上, 对衍射分解过程有两个有争论的唯象模型<sup>[3]</sup>: 各向同性衰变的火球模型和纵向相空间 (LPS) 内均匀分布的多边缘模型. 对撞机的实验结果支持后者. 所以本工作采用 LPS 模型. 模型主要参数列于表 1.

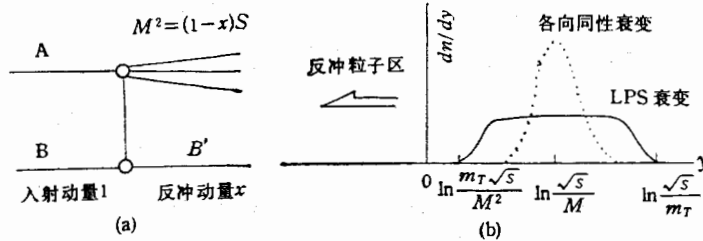


图 1 (a) 单衍射分解示意图 (b) 衍射系统可能的衰变模式  
(其中  $\sqrt{s}$  为质心系总能量,  $m_T^2 = m_p^2 + p_t^2$ ,  $m_p =$  质子静质量.)

表 1 处理衍射 (SD 或 D) 过程的主要参数

参数 \ 模型	SD	D
截面	单衍: 7mb	单衍: 7mb; 双衍: 4mb
不变质量分布	$1 < M^2 < 2\text{GeV}^2$ : 均匀 $M^2 > 2\text{GeV}^2$ : $1/M^2$	$1 < M^2 < 2\text{GeV}^2$ : 均匀 $M^2 > 2\text{GeV}^2$ : $1/M^2$
碎裂分布	纵向相空间均匀分布	纵向相空间均匀分布
多重数	$0.88 + 0.44 \ln M^2 + 0.118 \ln^2(M^2)$	$0.88 + 0.44 \ln M^2 + 0.118 \ln^2(M^2)$
$\langle p_t \rangle$	0.5 GeV/c	0.5 GeV/c

## (2) SD-SH 模型

这是个二组分模型, 其中 SD 表示单衍成分, 上节已做过介绍; SH 是全快度空间内服从 Feynman Scaling 且平均横动量  $\langle p_t \rangle = 330 \text{ MeV}/c$  的软成分和来自 QCD mini-jet 的硬成分的迭加. 鉴于在高于 ISR 能区出现碰撞截面的上升和大  $p_t$  的 QCD jet 现象, 人们假设高能强子碰撞截面的上升来源于强子内部部分子硬散射, 而且正是由于 QCD mini-jet 的出现才破坏了中心区的 Feynman Scaling. 该模型能满意地重现加速器能区强子多重产生非单衍实验的主要数据<sup>[4]</sup>, 例如次级粒子的赝快度分布和横动量分布 (图

2-4). 由于 QCD mini-jet 主要在中心区, 所以它是中心区 Scaling 破坏和  $\langle p_t \rangle$  增长的原因, 但对碎裂区次级粒子并无重大贡献, 加上随质心系能量的增长, QCD mini-jet 的平均能量份额越来越小, 所以碎裂区仍保持 Scaling 行为.

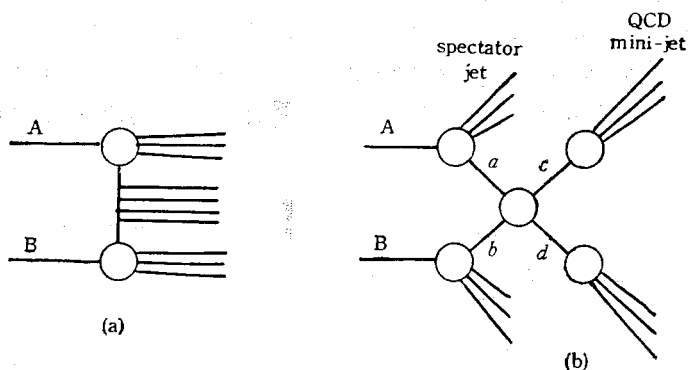


图 2 模型 SH 中的软成分 ((a) 过程和 (b) 过程中的 Spectator jet) 和硬成分 ((b) 过程中的 mini-jet)

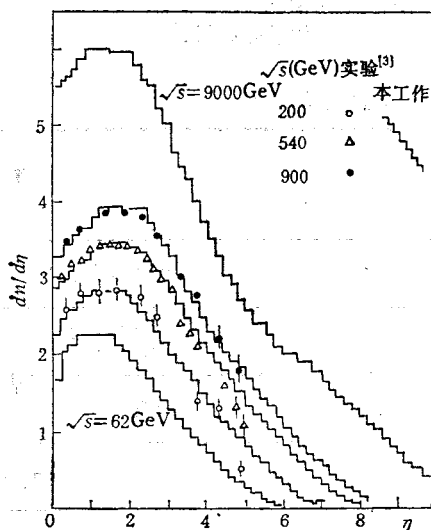


图 3 模型 SH 给出的赝快度分布

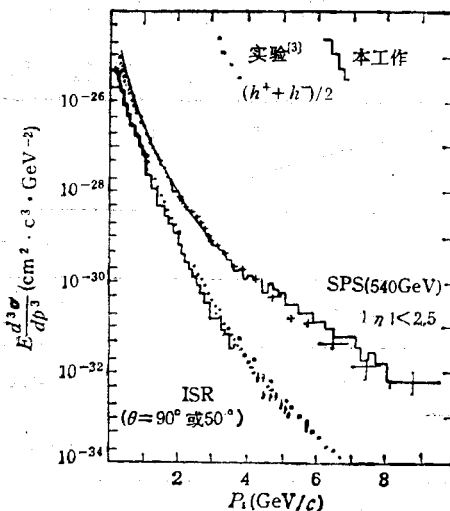


图 4 模型 SH 给出的横动量分布

### (3) D-ND 模型

其中 D 表示衍射分解过程; ND 表示非衍射分解过程, 是邹-杨的几何模型<sup>[5]</sup>. 从工作<sup>[6]</sup>中看到, 只要精心选择模型参数和考虑纵横动量的关联, 能很好地重现对撞机能区次级粒子的赝快度分布等实验数据. 由于高山乳胶室实验主要观测碎裂区产物, 为节约机时, 本工作忽略了次级粒子纵横动量的关联和多重度分布的 KNO Scaling 破坏. 超高能区的模型参数来自对撞机能区的外推. 所以严格说 ND 只是近似邹-杨模型产生器. 它是碎裂区 Scaling 破坏的模型.

上述两个模型的非衍射分解成分列于表 2。

表 2 非衍射过程的主要参数

模型 参数	SH	ND
非弹截面上升 (mb)	$21 + 1.27 \ln s + 0.067 \ln^2 s$ ( $\sqrt{s}$ : 质心系总能量, 单位 GeV)	$35 E^{0.06}$ ( $E$ : 入射粒子实验室能量, 单位 TeV)
次级粒子纵动量 ( $P_{  }$ ) 分布 ( $x = 2P_{  }/\sqrt{s}$ )	软成份: $(1-x)^6/x$ 硬成份: 夸克碎裂函数 $D^h(Z, W)$ 是来自 $e^+e^- \rightarrow h + X$ 的参数化 函数, 并外推到更高能, $W$ 为散射 系统的不变质量, $Z$ 为强子动量 份额。	近似的邹-杨模型 $dn/dP_{  } \sim (1/P_{  }) \exp(-P_{  }/T_p)$ $T_p$ 随碰撞系统的质心系能量 和多重度而变化。
次级粒子的横动量分布 $g(P_t)$	软成份: $P_t \exp(-6P_t)$ 硬成份: $P_t \exp(-\beta P_t)$ 其中 $\beta$ 随 $Z$ 变化(海鸥效应)	$P_t \exp(-\alpha P_t)$ $\alpha = 2/(0.28 + 0.0166 \ln s)$
非弹性度	P-P 碰撞 0.55 P-空气核碰撞 0.60	0.3 0.4
$x > 0.06$ 的荷电粒子数	$\sim 2$	$\sim 2$ 在 $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$ , 随 $\sqrt{s}$ 增加而减少

#### (4) 强子和原子核碰撞

从表 2 看到, 核子和空气核碰撞的非弹性度比核子-核子碰撞高约 10%, 在 SH 模型中, 这个结果是模型自洽给出的。

对于核子 (N) 和原子核 (A) 的碰撞, 当忽略靶核内核子间的关联时, 人们常用下列关系式

$$\sigma_{\text{总非弹}}^{N-A} \approx A^{2/3} \sigma_{\text{总非弹}}^{N-N};$$

$$\sigma_{\text{单举}}^{\text{jet}}(N-A) \approx A \sigma_{\text{单举}}^{\text{jet}}(N-N),$$

其中  $\sigma_{\text{总非弹}}$  表示碰撞总非弹性截面, 符号 N-A 和 N-N 分别表示核子-原子核碰撞和核子-核子碰撞,  $\sigma_{\text{单举}}^{\text{jet}}$  表示产生一个 QCD mini-jet 的单举截面。

利用总截面、单举截面和多重度的关系式  $\sigma_{\text{总}} = \sigma_{\text{单举}} / \langle n \rangle$ , 可以得到

$$\langle n_{\text{jet}}^{N-A} \rangle = A^{1/3} \langle n_{\text{jet}}^{N-N} \rangle,$$

即在核子-原子核碰撞时, QCD mini-jet 的平均多重度为核子-核子碰撞时的  $A^{1/3}$  倍, 对空气核,  $A^{1/3} \approx 2.5$ 。这样处理的结果, 不但导致非弹性度有 10% 的增长, 而且使 N-A 碰撞的平均次级粒子多重度为 N-N 碰撞时的  $A^{0.13} - A^{0.17}$  倍, 这个结果和 GeV 能区的加速器实验相一致<sup>[7]</sup>。

### 三、结果和讨论

MEC 实验把一束平行入射的  $\gamma$  射线称为一个  $\gamma$  族。定义一个  $\gamma$  族至少还有另外两个条件:  $\gamma$  射线的最小能量和最少  $\gamma$  射线数目。本工作按照实验组的处理方法, 取族内每个  $\gamma$  射线能量大于 4TeV; 族内  $\gamma$  射线数目 ( $n_r$ )  $\geq 4$ ; 族总观测能量 ( $\Sigma E_r$ )  $\geq 100$

TeV.

由于原子核在大气中传播的平均自由程远远小于初级质子的平均自由程以及乳胶室很高的探测阈能,所以可以预计 MEC 观察到的  $\gamma$  族大部份来自初级质子; 另外高能区的核-核碰撞还可能存在新的过程. 因而本文着重讨论初级质子引起的  $\gamma$  族的流强.

图 5 是假设初级宇宙线为纯质子时模拟  $\gamma$  族流强和甘巴拉山、富士山实验结果的比较,图中模拟数据的误差还没有包括初级宇宙线总强度的不确定性. 可以看到,不管那个模型,模拟流强是实验值的 3 倍左右. 衰减也合理.

另外,对  $\gamma$  族的组团分析表明,凡是小于 6 团的  $\gamma$  族,几乎全部来自初级质子<sup>[1]</sup>,按照富士组的处理方法,图 6 给出  $N_c \leq 5$  的  $\gamma$  族模拟流强和实验数据的比较,其中  $N_c$  是族内集团数目,可以看到,纯质子初级谱的模拟结果仍为实验值的 3 倍左右.

由模拟结果看到,  $\Sigma E_\gamma \geq 100 \text{TeV}$  的  $\gamma$  族主要来自能量大于  $10^{15} \text{eV}$  的初级质子,所以图 5、图 6 表明,在  $10^{15} \text{eV}$  能区,初级宇宙线化学成份中质子含量约为 30%,这和工作 [9] 的结论相一致.

但是,这个结论和甘巴拉山组有所矛盾,引言中已提过,他们认为碎裂区 Scaling 成立的模型只能和一个质子贫乏的初级宇宙线相配合才能解释实验结果. 本工作的 SD-SH 模型,虽然碎裂区保持 Scaling 行为,但因引入多 mini-jet 的靶核效应,大大加快了质子的衰减. 如果取消 SD 过程和部分子硬散射过程,把 Scaling 函数  $f(x) = (1-x)^6/x$  改为  $(1-x)^4/x$ ,并把非弹性度降到 0.5,则  $\gamma$  族流强能增加一倍左右,这样就只允许质子含量为 15% 左右. 所以本工作的 SD-SH 模型和一个中等质子含量的初级宇宙线相配合能解释实验数据是可以理解的.

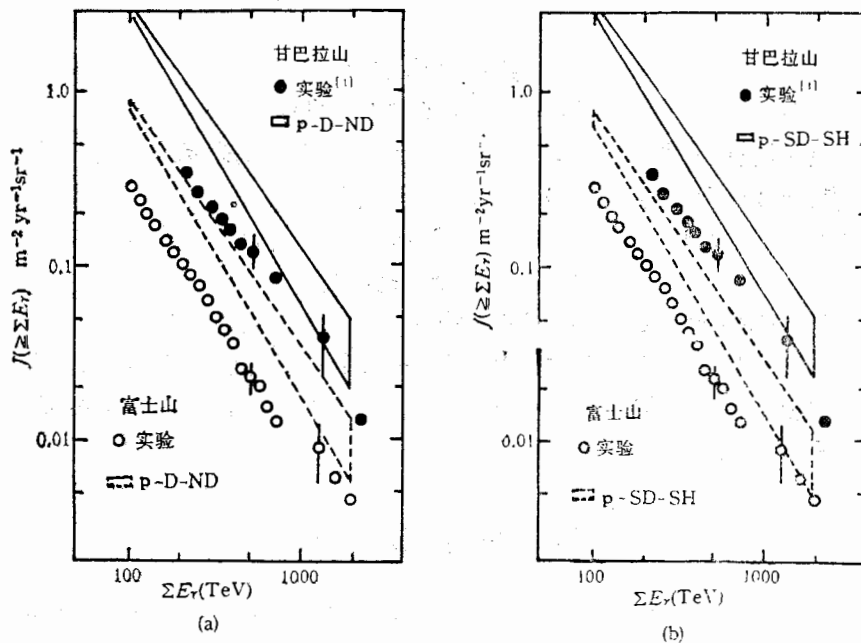


图 5 模拟  $\gamma$  族垂直流强和实验数据比较  
(实验数据引自[1])

其次,这个结论和甘巴拉山组的另一观点有明显分歧,他们认为,要是 Scaling 破坏,初级宇宙线中必须以质子为主。这也是由于模拟用的强子级联模型的差异造成的。本工作的两个模型与其它模拟模型的一个重大差别在于强调了衍射分解过程的作用。在 Scaling 破坏的 D-ND 模型中,如果忽视 D 过程,则  $\gamma$  族流强降到原来的 60%。这是由于衍射过程的次级粒子多重度低,又处于碎裂区,故有很高的传播效应。若再把非弹性度从 0.3 升到 0.5,则  $\gamma$  族流强只是图 5 中 P-D-ND 的五分之一。这就是为什么本工作中 Scaling 破坏的 D-ND 模型不需要质子为主的初级宇宙线的原因。从本工作看到,衍射分解过程对 MEC 的  $\gamma$  族流强有不可忽视的影响。我们的另一工作<sup>[10]</sup>表明这种过程还是  $\gamma$  族方位角分布不对称的主要原因。所以不包括或是低估衍射过程的模拟模型所引出的结论是不完善的。

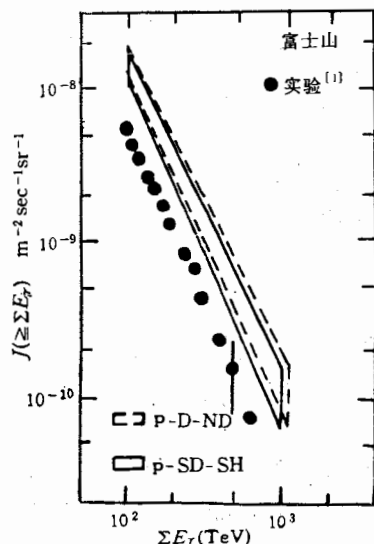


图 6 模拟流强和 Fuji 组  $N_c \leq 5$  的  $\gamma$  族比较

上述关于初级宇宙线化学成分中质子份额的估计和 Pamir 组无明显矛盾。但是 Pamir 组认为,只有碎裂区的 Scaling 破坏模型才能解释再生族的多重度  $n'$  和族平均横向扩展的关联。可是本工作的 SD-SH 模型和甘巴拉山组的准 Scaling 模型照样能满意解释这个问题<sup>[1,8]</sup>。

综上所述,各模拟组因模型差异而有不同的结论是可以理解的。目前 MEC 实验数据由于统计量尚不够多,能量测量误差又较大( $\sim 20\%$ ),所以严格的模型检验难以实现。

#### 四、结 论

(1) 高山乳胶室  $\gamma$  族强度的确依赖于初级宇宙线化学成分中质子份额和强子碰撞中碎裂区行为,但是衍射分解截面、非弹性度和靶核效应等因素的不确定性也至少能导致模拟  $\gamma$  族流强有一倍的变化。目前的实验数据尚不足以严格检验模型的正确性。

(2) 本工作的两个模型, 支持在  $10^{15}$ eV 能区初级宇宙线化学成份中质子份额约为 30% 的推论。

本工作在本所计算中心完成, 感谢机组全体同志的支持。同时感谢况浩怀同志在模拟模型中的贡献。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] M. Akashi et al., *Phys. Rev.*, D Vol. 24 (1981), 2353; J. R. Ren et al., *Phys. Rev.*, D Vol. 38 (1988), 1404.
- [ 2 ] Borisov A. S. et al., Proc. of Int. Symp. on Cosmic Rays and Particle Phys. (1984, Tokyo), p154; Chilingarian A. A. et al. Preprint No. 75, FIAN, 1988.
- [ 3 ] J. G. Rushbrooke, Preprint CERN-EP/85-178.
- [ 4 ] D. Cline et al., *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 31 (1973), 491; L. K. Ding et al., Preprint ICR Report 107-83-1; T. K. Gaisser and H. Halzen, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 54(1985), 1754; Q. Q. Zhu et al., Proc. of Int. Symp. on Cosmic Rays Superhigh Energy Interactions, (1986, Beijing) p. 7—1.
- [ 5 ] T. T. Chou et al., *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 54 (1985), 510.
- [ 6 ] 丁林埏等, 高能物理与核物理 Vol. 12(1988), 731.
- [ 7 ] Meng Ta-Chung, *Phys. Rev.*, D Vol. 15(1977), 197.
- [ 8 ] Q. Q. Zhu et al., Preprint BIHEP-CR-8904.
- [ 9 ] 经才骝等, 高能物理与核物理 Vol. 10(1986), 636.
- [ 10 ] 和煜东等, 高能物理与核物理 Vol. 13(1989), 476.

## DISCUSSIONS ON INTENSITY AND ATTENUATION OF $\gamma$ -FAMILIES OBSERVED BY MOUNTAIN EMULSION CHAMBER

ZHU QINGQI DING LINKAI WANG GUANGJUN HE YUDONG JING GUIRU

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

Through the analysis of the various factors which affect the intensity of  $\gamma$ -families observed by mountain emulsion chamber and the comparison of the experimental data with the results from Monte-Carlo simulation, the inference that the proton fraction in primary chemical composition at UHE region, say  $10^{15}$  eV, is about 30% is proved to be acceptable.