

利用宇宙线直接测量结果对初级宇宙线能谱参数的调整*

王永刚¹⁾ 薛良 冯存峰 傅宇 李婕 张学尧
李金玉 张乃健 何瑁 王承瑞

(山东大学物理系 济南 250100)

任敬儒 陆穗苓

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 由 JACEE, RUNJOB 和 SOKOL 等宇宙线直接测量结果和刚度截断模型, 对于 10^{14} — 10^{16} eV 能区的初级宇宙线微分能谱参数进行调整. 利用调整后的能谱与选取 QGSJET 模型的 CORSIKA 程序进行 EAS 模拟, 同 HD, PD 谱进行对比研究. 采用相同的标准对模拟数据与实验数据进行分析. 结果表明, 调整后的谱和 HD 谱的模拟结果与甘巴拉山乳胶室实验结果符合较好, 而 PD 谱的模拟结果与实验结果偏离较大.

关键词 宇宙线能谱 广延大气簇射 乳胶室 Monte Carlo 模拟

1 引言

高山乳胶室是由吸收体和感光材料交替叠合组成的夹层型探测器. 通过观测宇宙线粒子在乳胶室中形成的簇射, 可对 10^{15} — 10^{16} eV 能区宇宙线超高能核作用规律和原初宇宙线的能谱与组成进行研究, 这方面已取得许多重要成果^[1]. 初级宇宙线与空气原子核的相互作用是一个复杂的随机过程, 统计涨落和实验偏爱会使高能核作用事例的统计分布出现畸变. 所以必须假设一定的原初能谱和组成, 再选择一定的相互作用模型进行模拟计算, 并通过与实验相比较, 才能从实验结果中得出明确结论. 在模拟计算中, 所采用的原初能谱与组成通常是利用 10^{14} eV 以下初级宇宙线直接测量的实验结果, 外推到更高能区, 这一方面已经有许多工作可以参考^[2,3]. 长期以来, 在乳胶室实验中一直存在着“二

2001-03-19 收稿

* 国家自然科学基金(19875031)和教育部博士点基金资助

1) E-mail: wangyg@hepg.sdu.edu.cn

义性”问题——不同原初组成、不同相互作用模型得出相同的模拟结果——令人们倍感困惑。因而,人们一直希望在更高能区对初级宇宙线进行直接测量并给出可靠的能谱与化学组成数据,这对澄清超高能强相互作用机制会是很有帮助的。

在直接测量实验中由于受到探空载荷与照射时间的限制,目前对质子的观测虽然达到了 $\sim 800\text{TeV}$,但对其他的原子核的探测能区均 $\leq 100\text{TeV}$,而且各实验组所给出的微分能谱及各成分的相对组成均存在较大差异,这就给试图根据直接测量而推出一个惟一的原初组成带来困难。在 10^{15}eV 以上,宇宙线流强迅速下降,直接测量已不可能。通常是在地面或高山测量宇宙线进入大气层后与空气原子核发生相互作用产生的广延大气簇射(EAS)来间接测量初级宇宙线的流强和组成。由于目前 EAS 研究尚不能准确给出各种成分的流强,所以在 $10^{14}\text{—}10^{16}\text{eV}$ 能区究竟轻核为主还是重核为主,仍不能得出明确结论。

近期在初级宇宙线直接测量方面美日联合 JACEE 实验^[4-6],日本轻型乳胶室实验^[7],俄罗斯 SOKOL 实验^[8]和俄日联合 RUNJOB 实验^[9]等取得了不少进展,有必要对以往在高山乳胶室实验的模拟计算中所采用的由直接测量而推论出的 $10^{14}\text{—}10^{16}\text{eV}$ 初级宇宙线能谱与化学组成加以适当调整。

本文根据直接测量结果,按照刚度截断模型,对初级宇宙线能谱指数和化学组成作了调整。采用这一调整后的能谱进行空气簇射模拟。对于乳胶室记录的族事例作与实验相同的处理,分别同以重核为主的 HD (Heavy Dominant)和以质子为主的 PD (Proton Dominant)能谱^[10]的模拟结果及甘巴拉山乳胶室 K0—K7 铅室实验的结果作了比较。

2 由直接测量结果对初级宇宙线能谱参数的调整

2.1 利用直接测量结果调整能谱指数

初级宇宙线主要由多种原子核组成,实验发现 10^{11}eV 以上的宇宙线全粒子能谱符合负幂律,理论上认为可能是由超新星激波加速造成的。按照粒子被银河系磁场约束和最终逃逸的传播模型,当每种核成分在银河系磁场中的 Larmor 半径大于银河系半径时,宇宙线粒子摆脱银河系磁场的束缚,从银河系泄漏出去,使能谱在 $\sim 3 \times 10^{15}\text{eV}$ 附近出现拐折,通常称为能谱的“膝”,而把能谱变陡的区域($10^{15}\text{—}10^{16}\text{eV}$)称为“膝”区。

初级宇宙线的化学成分可以粗略地分为 6 种原子核:质子(p)、氦核(He)、碳氮氧核(CNO)、重核(H)、甚重核(VH)和铁核(Fe),其平均原子序数 Z_i 分别为 1, 2, 7, 12, 17, 26。第 i 种宇宙线成分的微分能谱为

$$J_i = \frac{dN}{dE} = \begin{cases} K_{1i} E^{-\gamma_{1i}} & \text{当 } E \leq E_{bi} \\ K_{2i} E^{-\gamma_{2i}} & \text{当 } E > E_{bi} \end{cases} \quad (1)$$

其中 E_{bi} 为各种成分的拐折能量, γ_{1i} 和 γ_{2i} 分别为拐折前后的微分能谱幂指数, K_{1i} 和 K_{2i} 分别为拐折前后的微分能谱系数。微分流强的单位通常取为 $(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{GeV}/\text{粒子})^{-1}$ 。

拐折前各种成分的微分能谱幂指数 γ_{1i} , 可以由 $\sim 100\text{GeV}/\text{粒子}$ 到 $100\text{TeV}/\text{粒子}$ 能区对初级宇宙线进行直接测量的结果(见表 1)进行拟合与外推得到。表 1 列出部分实验

组^[4-6,8]所发表的 5 种核组的微分能谱幂指数及本工作拟采取的能谱幂指数. 这里需要说明的是, 拟选取的质子能谱指数是对 100GeV—600TeV 的宽阔能区内由诸多实验组所给出的直接测量数据进行拟合而得到的结果^[11], 这也与 JACEE 的直接结果相一致^[6]; He 能谱指数的确定是基于统计量的考虑——选取 JACEE 的大统计量的实验结果⁵.

表 1 直接测量的初级宇宙线各种成分微分能谱指数

实验组		JACEE 1-12 ^[4-6]	SOKOL ^[8]	本工作
能谱指数	p	2.76 ± 0.06 ^[4]	2.85 ± 0.04 ^[8]	2.72
		2.80 ± 0.04 ^[5]		
		2.72 ± 0.10 ^[6]		
	He	2.66 ± 0.06 ^[4]	2.64 ± 0.12 ^[8]	2.68
		2.68 ^{+0.04} _{-0.06} ^[5]		
		2.56 ± 0.06 ^[6]		
	C-N-O	2.38 ± 0.11 ^[4]	2.58 ± 0.07 ^[8]	2.55
	Ne-S	2.64 ± 0.16 ^[4]	2.49 ± 0.07 ^[8]	2.55
	Z ≥ 17 (Fe)	2.36 ± 0.15 ^[4]	2.62 ± 0.08 ^[8]	2.55 (Z = 17)
				2.50 (Z = 26)

2.2 对初级宇宙线能谱系数的调整

初级宇宙线各种成分的拐折能量 E_{bi} , 可根据“刚度截断模型”按下式算出:

$$E_{bi} = Z_i \cdot E_{b,proton}, \tag{2}$$

其中 $E_{b,proton}$ 为质子微分能谱的拐折能量. 拐折后各种成分的微分能谱幂指数 γ_{2i} , 目前尚无直接测量数据, 但是根据地面 EAS 实验对于全粒子谱的已有测量结果^[12,13], 可以假定各种成分有相同的拐折后能谱幂指数, 即全粒子谱的“膝”后能谱指数 $\gamma_{2i} = 3.0$. 拐折后的微分能谱系数 K_{2i} 可以由下式算出:

$$K_{2i} = K_{1i} \cdot E_{bi}^{\gamma_{2i} - \gamma_{1i}}. \tag{3}$$

如果取 $E_{b,proton} = 200\text{TeV}^{10}$, $\gamma_{2i} = 3.0$, 则对低能区对初级宇宙线直接测量的数据进行拟合与外推, 可以给出 10^{14} — 10^{16} eV 能区拐折前后初级宇宙线各种成分的微分能谱参数, 如表 2 所示. 但由于各实验组所给出的数据相差较大, 因此在对各种成分的微分能谱参数进行调整与计算时, 首先把初能为 10^{14} eV 的总流强归一到 JACEE 的直接测量结果^[14]

表 2 由直接测量数据调整得到的初级宇宙线各种成分微分能谱的参数

核成分	p	He	CNO	H	VH	Fe
Z	1	2	7	12	17	26
E_b/GeV	2×10^5	4×10^5	1.4×10^6	2.4×10^6	3.4×10^6	5.2×10^6
γ_1	2.72	2.68	2.55	2.55	2.55	2.5
K_1	1.282	0.664	0.123	0.084	0.032	0.044
γ_2	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
K_2	39.1	41.2	71.6	62.5	28.1	99.5

根据表 2 所给出的初级宇宙线的能谱参数,可以由(1)式计算出不同能量下各种成分的流强 J_i ,由各组分的流强与总流强 ΣJ_i 之比值可以求得在该能量下各种成分的相对组成(%),结果如表 3 所示(All 表示全粒子). 平均质量数随初能的变化如表 4 所示.

表 3 初级宇宙线各种成分的流强与相对组成

核成分		p	He	CNO	H	VH	Fe	All
核电荷 Z_i		1	2	7	12	17	26	
原子质量 A_i		1	4	14	25	35	56	
10^{14} eV	$J_i (\times 10^{-14})$	3.21	2.64	2.18	1.49	0.57	1.38	11.5
	%	28.0	23.0	19.0	13.0	5.0	12.0	100
10^{15} eV	$J_i (\times 10^{-17})$	3.91	4.12	6.16	4.21	1.62	4.36	24.4
	%	16.0	16.9	25.3	17.3	6.6	17.9	100
10^{16} eV	$J_i (\times 10^{-20})$	3.91	4.12	7.16	6.25	2.81	9.95	34.2
	%	11.4	12.0	20.9	18.3	8.2	29.1	100

注: J_i 单位为 $(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{GeV}/\text{粒子})^{-1}$

表 4 平均质量数随初能的变化

初能	10^{13} eV	10^{14} eV	10^{15} eV	10^{16} eV
$\langle A \rangle$	12.7	15.6	21.0	27.3
$\langle \ln A \rangle$	1.63	1.90	2.41	2.77

2.3 与直接测量及 EAS 实验结果的比较

图 1 给出了由直接测量得到的 $10^{11} - 10^{16}$ eV 能区初级宇宙线全粒子能谱;图 2 给出的是由直接测量和在更高能区由 EAS 实验测量所得 $10^{13} - 10^{17}$ eV 能区初级宇宙线能谱;本工作的计算结果也同时绘在图中. 由图 1 和图 2 可见,调整后的能谱所给出的流强与直接测量实验和 EAS 测量实验结果接近.

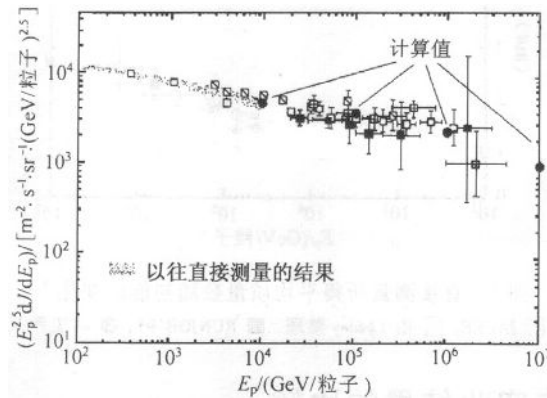
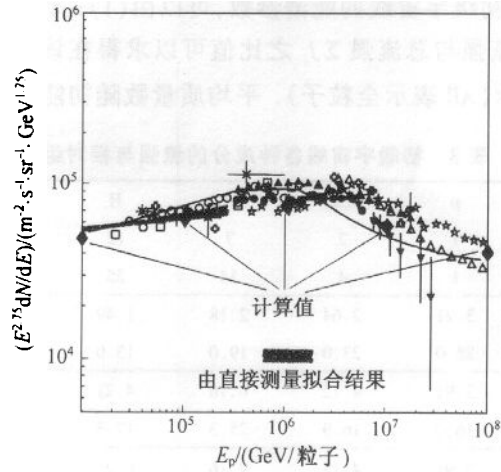


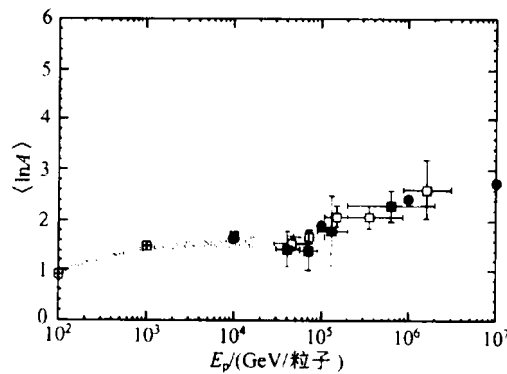
图 1 直接测量全粒子能谱^[9]

□ SOKOL, □ Grigorov, ⊕ JACEE, ■ RUNJOB'95, ● 本工作.

图 2 初级宇宙线全粒子能谱^[15]

○BASJE, ☆Akeno, *JACEE, △MSU, □Grigorov, †Danilova, ●BASJE (OG6.1.13, 24th ICRC),
▼Tunka(OG6.2.1, 24th ICRC), ▲Tibet AS γ(OG6.2.4, 24th ICRC), —MACRO fit(OG6.1.8,
24th ICRC), ◆本工作.

文献[14]中对于初能为 10^{14} eV 时 JACEE 与 RUNJOB 的测量结果进行综合分析得出 $\langle \ln A \rangle$ 的量值为 1.8 ± 0.4 . 图 3 为 JACEE 组、RUNJOB 组和本工作给出的初级宇宙线平均质量数 $\langle \ln A \rangle$ 随初级宇宙线能量的变化. 由图 3 可以估计出, 在初能为 10^{15} eV 时, JACEE 与 RUNJOB 给出的 $\langle \ln A \rangle$ 为 ~ 2.4 . 由本工作的谱可计算出 10^{14} eV 和 10^{15} eV 的 $\langle \ln A \rangle$ 分别为 1.90 和 2.41 (见表 4 和图 3). 调整后的能谱在低能端 (10^{13} — 10^{15} eV) 所给出的平均质量数 $\langle \ln A \rangle$ 与直接测量实验值一致; 在 10^{14} — 10^{16} eV 能区内随着初能的上升, 初级宇宙线中的重核所占比例增大. 本工作给出的经调整后的能谱是一种属于以重核为主的原初组成.

图 3 直接测量所得平均质量数随初能的变化^[9]

□ JACEE, ▣ 由 Linsley 整理, ■ RUNJOB'95, ● 本工作.

3 EAS 模拟及与实验结果的比较

将调整后的 10^{14} — 10^{16} eV 能区的初级宇宙线能谱与化学组成用于高山乳胶室记录的

宇宙线高能族事例的 Monte Carlo 模拟,并与相应的实验结果进行了比较. 分析的实验数据来自甘巴拉山 K0—K7 铅乳胶室(室厚 28c.u.)^[1],采用的事例判选标准为:粒子最小能量 $E_{\min} = 4\text{TeV}$,族中的 γ 射线与强子数 $n_\gamma + n_h \geq 4$,族的总观测能 $100\text{TeV} \leq \Sigma E_{\nu_h} \leq 500\text{TeV}$. γ 射线与强子的判选标准为:起始点深度 $\Delta t < 6\text{c.u.}$ 的事例为 γ 射线; $\Delta t \geq 6\text{c.u.}$ 的事例为强子. 共挑选得到 120 个满足上述判选标准的族事例,对其中包含有强子($n_h \geq 1$)的 67 个 γ -强子族事例进行了分析.

利用高能宇宙线空气簇射实验中广泛采用的 CORSIKA 程序进行了 EAS 模拟, CORSIKA(5.62 版)有 5 种高能强相互作用模型可供选择: QGSJET, DPMJET, SIBYLL, VENUS 和 HJPM,有两种低能强相互作用可选择: GHEISHA 和 ISOBAR, μ 子韧致辐射和对产生分别由探测器模拟程序 GEANT3 的两个程序模拟,电磁相互作用由 EGS4 模拟.

本工作选取 QGSJET + GHEISHA 模拟强相互作用. QGSJET(Quark Gluon String with JETs)模型基于 QCD 和弦模型^[16-18],可以描述微扰 QCD 不能描述的远程强相互作用过程. 强子通过交换超临界玻密子(Pomeron)发生相互作用. 玻密子按照 AGK 规则断裂成两条弦,弦再以近似 Lund 模型的方式碎裂. QGSJET 在处理核-核碰撞时首先由 Glauber 理论计算核中核子的几何分布——轻核(原子质量数 $A \leq 10$)满足 Gauss 分布,重核满足 Woods-Saxon 分布. 相互作用中的旁观者部分按照过滤——蒸发方法碎裂. 这样,周缘反应中,发生核碎裂,而在中心碰撞过程中,则为完全碎裂,产生许多小质量产物. QGSJET 模型也考虑了 minijet 在高能时的贡献.

在 EAS 模拟中,采用的初级宇宙线能谱分别为调整后的新谱、HD 谱和 PD 谱^[10](转折后能谱指数都为 -3.0). 强子、 μ 子、电子、光子的能量截断都取为 4TeV. 3 种谱分别模拟产生 3.363, 3.024, 3.313 百万事例.

根据甘巴拉山铅乳胶室实验条件^[1],对 EAS 模拟产生的族事例作了与实验相同的数据处理,考虑了乳胶室的有效面积、粒子的探测效率、 γ 射线与强子的区分、实验的空间分辨能力以及倾斜入射的影响等因素;强子在乳胶室中的非弹性度的抽样为(0.1,0.9)区间的均匀分布,并假设次级粒子全部为 π 介子,其中 π^0 占有份额在(0.3,0.5)区间抽样;强子根据天顶角和粒子类型,其起始点深度按照与能量无关的不同相互作用长度抽样得到. γ 射线与强子的判选标准和族事例的判选标准与实验完全相同. 最后由新谱、HD 与 PD 谱分别得到 2215, 1209, 2936 个 γ -强子族事例.

为了对“膝”区原初组成进行探讨,选取对原初组成敏感的量——族中次级粒子横向扩展、再生族事例的平均次级粒子多重数与族的平均次级粒子横向扩展的关联——分别对模拟族事例和实验族事例进行了对比分析.

图 4 给出了用 ROOT 软件包绘出的模拟族事例与实验族事例中 R (族中 γ 射线和强子离开族的能量重心的距离)的分布. 由图 4 可以看出,调整后的能谱、HD 谱的模拟结果同实验结果符合较好,而 PD 谱给出的 R 分布的峰值向 R 值小的方向偏移.

图 5 给出的是再生族事例的平均族中次级粒子多重数 $\langle n' \rangle$ 与族中次级粒子的平均横向扩展 $\langle \bar{R} \rangle$ 的关联. n' 的定义为^[11]:对族中粒子按能量排序,族中每一粒子有 $f' = E_i / \Sigma' E_j$,其中 $\Sigma' E_j$ 是对大于 E_i 的粒子能量求和. n' 是满足条件 $f' > f'_m$ 的粒子数,在本工作中,取 $f'_m = 0.04$. 族事例中的高能次级粒子在大气中经历的核作用次数较少,比

低能次级粒子带有更多的初级宇宙线粒子及核作用的信息. n' 即为这样一个描述族事例中高能粒子特征的量. 由图 5 可以看出新谱、HD 谱的模拟结果与实验结果符合较好, 而以质子为主的 PD 谱的模拟结果与实验结果偏离较大。

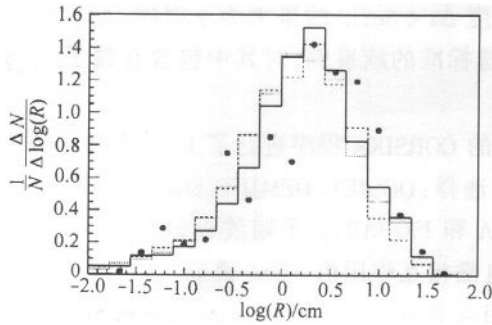


图 4 γ -强子族中次级粒子的 R 分布
——新谱, ----HD,PD, ●实验值.

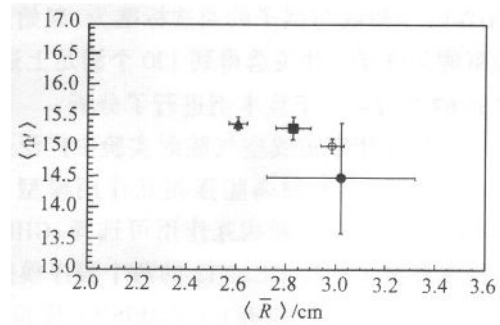


图 5 γ -强子族的 $\langle n' \rangle$ 与 $\langle \bar{R} \rangle$ 的关联
○新谱, ■HD, ▲PD, ●实验值.

4 结束语

本工作由最新的初级宇宙线直接测量结果进行综合分析, 对 10^{14} — 10^{16} eV 能区初级宇宙线的能谱指数和化学组成作了调整. 在低能端 (10^{13} — 10^{15} eV), 由调整后的能谱计算所得微分总流强和 $\langle \ln A \rangle$ 与直接测量结果一致; 在高端 (10^{15} — 10^{17} eV), 计算所得微分总流强与 EAS 测量结果接近; 在 10^{13} — 10^{16} eV 能区内随初能的上升, 初级宇宙线中的重核所占比例增大, 经调整后的这一能谱与相对组成是一种属于以重核为主的原初组成。

本工作利用高能宇宙线空气簇射实验中广泛采用的 CORSIKA 程序选取 QGSJET 模型进行 EAS 模拟, 原初能谱采用调整后的能谱, 与 HD, PD 谱进行了对比研究. 为了探讨“膝”区原初组成, 选取对原初组成敏感的量, 采用了相同的分析条件, 对模拟和实验数据进行处理. 所得结果表明该谱和 HD 谱的模拟结果与甘巴拉山乳胶室 γ -强子族的相应实验结果符合较好, 而 PD 谱的模拟结果与实验结果偏离较大. 上述结果表明在 QGSJET 模型框架内, 本工作的以重核为主的原初能谱和组成所得 Monte Carlo 模拟结果与实验结果符合较好。

作者衷心感谢甘巴拉乳胶室合作组对本工作的支持。

参考文献 (References)

- 1 REN Jing-Ru, HUO An-Xiang, LU Sui-Ling et al. Phys. Rev., 1988, D38:1404, 1417, 1426
- 2 JING Cai-Liu, DING Lin-Kai, ZHU Qing-Qi et al. HEP & NP, 1986, 10:636(in Chinese)
(经才骧, 丁林凯, 朱清琪等. 高能物理与核物理, 1986, 10:636)
- 3 LUO Guang-Xuan, TAN You-Heng, ZHANG Chun-Sheng et al. HEP & NP, 1995, 19:769(in Chinese)
(罗光宣, 谭有恒, 张春生等. 高能物理与核物理, 1995, 19:769)

- 4 JACEE Collab. Proc. 24th ICRC, 1995, **2**:707; <http://marge.phys.washington.edu/jacee/Papers/icrc95/og6.1.14.html>
- 5 Cherry M L et al. Proc. 26th ICRC, 1999, **4**:187
- 6 Nilsen B S et al. Proc. Texas Symp. On Relativistic Astrophysics, Chicago, 1997
- 7 Ichimura M et al. Phys. Rev., 1993, **D48**:1949
- 8 Ivanenko I P et al. Proc. 23rd ICRC, 1993, **2**:17
- 9 RUNJOB Collab. Proc. 26th ICRC, 1999, **3**:167
- 10 ZHANG C S et al. Nucl. Instr. Meth., 1996, **A376**:263
- 11 Weibel-Sooth B et al. A & A, 1998, **330**:389
- 12 Glasmacher M A K et al. Proc. 26th ICRC, 1999, **3**:199
- 13 Hörandel J R et al. Proc. 26th ICRC, 1999, **2**:237
- 14 Watson A A. Proc. 25th ICRC, Invited, Rapporteur & Highlight Papers, 1997, 257
- 15 Petrerá S. II. Nuovo Cimento, 1996, **C19**:737
- 16 Kaidalov A B, Ter-Martirosyan K A. Sov. J. Nucl. Phys., 1984, **39**:979
- 17 Kalmykov N N, Ostapchenko S S. Sov. J. Nucl. Phys., 1989, **50**:315
- 18 Kaidalov A B et al. Sov. J. Nucl. Phys., 1986, **43**:822

Adjustment of Parameters of Primary Cosmic Ray Energy Spectrum with Recent Direct Measurements

WANG Yong-Gang¹⁾ XUE Liang FENG Cun-Feng FU Yu LI Jie ZHANG Xue-Yao
LI Jin-Yu ZHANG Nai-Jian HE Mao WANG Cheng-Rui

(Department of Physics Shandong University, Ji'nan 250100, China)

REN Jing-Ru LU Sui-Ling

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

Abstract With the data of recent measurements of the JACEE, RUNJOB and SOKOL experiments, and under the assumption of rigidity cut-off model, a new primary cosmic-ray energy spectrum and chemical composition in 10^{14} — 10^{16} eV energy region are derived. EAS simulations using CORSIKA, combining QGSJET model of high energy hadronic interaction, are performed with this spectrum and another two spectra, HD and PD spectrum, respectively. It is shown that the new spectrum and HD can give very good results, compared with the experimental results obtained with thick Pb emulsion chambers (28 c.u.) at Mt. Kanbala (5500m a.s.l., Tibet, China), while PD spectrum can not.

Key words cosmic-ray energy spectrum, extensive air shower, emulsion chamber, Monte Carlo simulation

Received 19 March 2001

* Supported by NSFS(19875031) and Doctoral Fund of National Education Committee of China

1) E-mail: wangyg@hepg.sdu.edu.cn