

文章编号: 1007-4627(2010)01-0029-03

高能宇宙射线数值模拟中能谱指数的标定*

兰小刚¹, 丁林恺²

(1 西华师范大学物理与电子信息学院, 四川 南充 637002;

2 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 在利用 TeV 能区宇宙射线数值模拟数据研究朝前区强子相互作用时, 需要足够多的低空簇射事例样本。提出了可以通过降低 FIXCHI(宇宙射线第一次相互作用高度)来提高高能宇宙射线数值模拟效率, 但对相应的能谱指数进行标定是必要的。以 1 TeV 处直达概率为标准, 得到各能区的能谱强度, 并采用将能谱强度与能量进行线性拟合, 以标定能谱指数的方法, 使宇宙射线数值模拟的效率及准确率都大大提高。

关键词: 数值模拟; 能谱指数; 线性拟合

中图分类号: O571.19

文献标识码: A

1 引言

目前膝区宇宙射线研究都依赖于地面上对大气簇射的测量, 即所谓间接测量。分析间接测量的数据并导出物理结果, 必须依靠 Monte Carlo 模拟。因此数值模拟在宇宙射线研究中占有重要地位。但是在利用 Monte Carlo 模拟 TeV 以上能区的高能宇宙射线簇射发展时^[1], 一方面, 由于原初粒子所携带能量相当高, 产生大量的次级粒子, 其运算的数据量是相当巨大的; 另一方面, 在得到的模拟数据中, 绝大部分是毫无价值的低能次级粒子数据, 这样大大影响模拟计算效率。只有低空事例贯穿很深的大气深度, 在离观测面很近的地方才发生第一相互作用, 高能强子经历的作用次数少, 比较直观地反映 leading 粒子的动量分布、强子相互作用的非弹性度、大 X 粒子的 x_F 分布等。因此有必要对常规的模拟方法进行改进, 以提高低空事例的模拟效率。

2 宇宙射线能谱指数

宇宙射线初级谱可以用幂函数来表示, 即能量在 E 到 $E + dE$ 间隔内的初级宇宙射线粒子数正比于 $E^{-\alpha} dE$, α 称为能谱指数。能谱指数 α 在不同的能量范围有不同的值。可以从能谱上更清楚地看到能谱指数的变化。

如图 1 所示: 在 10^{11} — 10^{15} eV 能谱段, 能谱指数为 -2.7 ; 在 10^{16} — 10^{18} eV 能段, 能谱指数为 -3 。在 10^{15} — 10^{16} eV 能段能谱发生拐折, 这通常被称为宇宙射线的“膝”; 在 10^{17} — 10^{18} eV 能段能谱发生第二次拐折, 该能段通常被称为宇宙射线的“第二膝”; 在大约 10^{19} eV 处, 能谱又变平, 能谱指数为 -2.7 , 这称为宇宙射线能谱的“踝”^[2]。

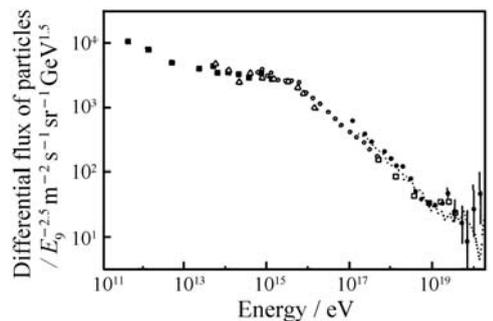


图 1 宇宙射线总粒子能谱

目前已探测到的宇宙射线能量从 10^6 到 10^{20} eV 跨越了 14 个数量级, 粒子流强跨越了 30 个数量级的范围。总体说来, 宇宙射线能谱很陡, 随着能量升高宇宙射线的流强迅速减少。因此探测超高能宇宙射线必须采用大面积探测器。以西藏羊八井 ARGO 实验^[3]为例, 通过对宇宙射线簇射事例率

* 收稿日期: 2009-04-23; 修改日期: 2009-06-23

* 基金项目: 西华师范大学科研启动基金资助项目(07B067)

作者简介: 兰小刚(1982-), 男(汉族), 四川内江人, 讲师, 硕士, 从事宇宙线与高能天体物理研究; E-mail: lan0817@qq.com

的估算可以得到：在一年的有效探测时间里，在 1—200 TeV 能区有 8.7 亿左右的质子事例数到达该实验探测器阵列。通过模拟 10000 个 1—200 TeV 能区宇宙射线广延大气簇射 (EAS) 事例样本，发现运行时间 (包括 Monte Carlo 模拟以及向探测器投点时间和探测器响应时间) 为 50.3 min，数据占存储空间为 600 M。按该运行速率粗略估算，欲模拟 1—200 TeV 能区一年的事例样本，即使 10 台电脑 24 h 不停计算，也约需要 6.5 a，且需要占据 100 T 的存储空间，其运算量相当巨大。因此需要在不影响实验精确度的前提下，改进实验方案，提高运算效率。

3 数值模拟计算的改进

在数值模拟过程中，设定原初粒子入射天顶角 (θ) 范围为 0° — 60° 。在输入卡中有一个 FIXCHI (宇宙射线第一次相互作用高度) 选项^[4]，即发生第一次相互作用高度。严格说每一个簇射过程都应该从原初粒子进入大气外层开始跟踪，即取 FIXCHI 的值为 0 g/cm^2 。但在研究高能宇宙射线事例时，如果仅仅需要得到低空事例和甚至直达质子事例时，可以降低 FIXCHI 选项，如取 FIXCHI 的值为 450 g/cm^2 。即使很大部分在 450 g/cm^2 大气深度以上就发生相互作用的簇射事例被忽略了，但这部分事例本身就不是数值模拟的研究对象，因此这部分事例对实验结果无本质影响。

通过计算到达 450 g/cm^2 大气深度而未发生相互作用的概率，证明降低第一次相互作用高度可以大大提高运算效率。质子在大气层里与空气中的一些原子核发生非弹性作用，是在空间中随机分布的物理事件。如果在 $X(\theta)$ 内平均作用次数为 m ，而且作用概率与空间位置无关，则在 $X(\theta)$ 内的实际作用次数 n 服从泊松分布，即

$$p(n) = \frac{m^n}{n!} e^{-m}, \quad (1)$$

则在 $X(\theta)$ 内不发生作用 (即 $n=0$) 的概率是

$$p(0) = e^{-m} = e^{-\frac{X(\theta)}{\lambda(E)}}, \quad (2)$$

当取 FIXCHI 为 450 g/cm^2 时，有

$$X(\theta) = \frac{450}{\cos\theta},$$

$$\lambda(E) = \frac{A}{N_A \sigma(E)} = \frac{14.5}{6.02 \times 10^{23} \sigma(E)}, \quad (3)$$

其中 A 为空气平均原子质量， N_A 为 Avogadro 常数， $\sigma(E)$ 为作用截面，直达质子的概率与天顶角和能量有关。粗略估计：当 $E_0 = 20 \text{ TeV}$ ， $\theta = 0^\circ$ ， $\sigma(E) = 325 \text{ mb} = 325 \times 10^{27} \text{ cm}^2$ 时， $p(0) = 0.455\%$ 。

质子到达 450 g/cm^2 大气深度而未发生相互作用的概率约为 $1/220$ ，说明取 FIXCHI 为 450 g/cm^2 时，通过模拟 390 万左右 EAS 事例就相当于 8.7 亿从 0 g/cm^2 入射的 EAS 事例，对计算机硬件以及运算时间的要求都大大降低了。

4 能谱指数的确定

取 FIXCHI 为 450 g/cm^2 并不是固定入射高度为 450 g/cm^2 ，而是指原初粒子进入大气层后经历大气厚度为 450 g/cm^2 。事实上，当原初粒子不是垂直入射时，从 450 g/cm^2 入射 EAS 的天顶角分布不应该是各向同性的。当垂直入射时，到达 450 g/cm^2 大气深度的原初粒子更多；沿一定天顶角入射时，由于穿透大气深度更深，到达 450 g/cm^2 大气深度的原初粒子更少。

由于带电粒子在大气中传播存在电离能损^[5]，约为 $2 \text{ MeV}/(\text{g/cm}^2)$ ，穿过大气深度越厚，损失能量就越大；同时质子和空气中的一些原子核作用截面与能量有关，随着能量降低，截面应降低，粒子谱应该变陡，显然必须对能谱指数作相应的修正，以确保实验的准确性。

将 1—200 TeV 取自然对数，将其指数均分为 8 个能量单元，并从质子和空气中的一些原子核作用截面谱上读出^[6] 每个能量单元所对应的截面 $\sigma(i)$ ，根据 (2) 和 (3) 式计算出不同能量对应平均自由程 $\lambda(i)$ 和直达 450 g/cm^2 的概率，并以 1 TeV 处直达概率为标准，将概率归一化，得到每个能量 bin 的归一化概率为 $prob(i)$ ，由此得到每个能量 bin 对应的相对能谱强度为

$$flux(i) = \log_{10}(prob(i) \cdot E(i)^{-2.7}), \quad (4)$$

将该能谱强度与能量进行线性拟合 (如图 2 所示)，得到 FIXCHI 的值为 450 g/cm^2 时拟合系数 (即能谱指数) 为 -2.9401 。图中还作出了 300, 500 与 0 g/cm^2 的能谱指数 (Energy slop) 比较。显然，随

着 FIXCHI 的变大, 能谱变陡, 能谱指数增大。因此在进行宇宙射线数值模拟过程中, 当 FIXCHI 变化时, 对应的能谱指数也应该作相应的修正。

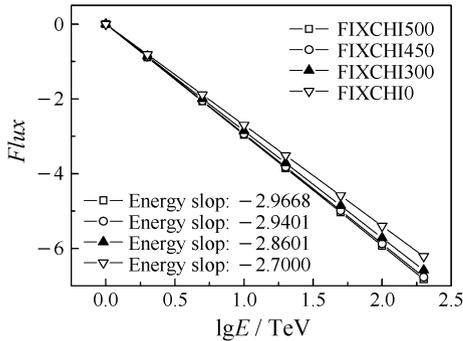


图 2 能谱指数的线性拟合

5 结论

在研究高能宇宙射线簇射事例时, 通过降低 FIXCHI (如取 FIXCHI 的值为 450 g/cm^2), 可以大大提高宇宙射线数值模拟的效率。但必须对相应的宇宙射线能谱指数进行标定。本文通过将宇宙射线能谱强度与能量进行线性拟合, 得到 FIXCHI 的值为 450 g/cm^2 时拟合系数为 -2.9401 。

虽然采用降低 FIXCHI 后, 到达 450 g/cm^2 大气深度的粒子数减少, 但在利用宇宙射线间接测量数据研究高能粒子相互作用时, 仅需要得到低空事

例甚至直达质子事例。尽管实验数据中, 事例的 FIXCHI 是无法准确测量, 但由于低空事例贯穿很深的大气深度, 在离观测面很近的地方才发生第一相互作用, 高能强子经历的作用次数少, 其实验特征为: 探测器记录到了少量高能强子及伴随少量次级粒子, 且次级粒子横向分布比较窄, 横向分布梯度较陡。因此合理利用实验条件, 可以选择出低空事例。

参考文献 (References):

- [1] Lan Xiaogang, Hou Yan, Zhou Xunxiu, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2007, **31**(6): 513(in Chinese). (兰小刚, 侯艳, 周勋秀等. 高能物理与核物理, 2007, **31**(6): 513.)
- [2] Gaisser T K, Protheroe R J, Stanev T, *et al.* Review of Particle Physics, 2000, **D66**: 182.
- [3] Hou Yan, Lan Xiaogang, Jia Huanyu, *et al.* Nuclear Physics Review, 2007, **24**(1): 34(in Chinese). (侯艳, 兰小刚, 贾焕玉等. 原子核物理评论, 2007, **24**(1): 34.)
- [4] Capdevielle J N, Le Gall C, Sanosyan K N. Astroparticle Physics, 2000, **13**: 259.
- [5] Ahn H S, Seo E S, Adams J H, *et al.* Advances in Space Research, 2006, **37**: 1950.
- [6] Aglietta M, Alessandro B, Antonioli P, *et al.* Nuclear Physics, 1999, **75**: 222.

Calibration for Energy Slope in Numerical Simulation of Cosmic Ray with High Energy*

LAN Xiao-gang^{1, 1)}, DING Lin-kai²

(1 College of Physics and Electronic Information, China West Normal University, Nanchong 637002, Sichuan, China;

2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the study of hadronic interaction in the forward region by the simulation of cosmic ray, it is necessary to simulate large numbers of cosmic ray events with low first interaction height. We confirmed that by reducing the FIXCHI the efficiency of cosmic ray simulation can be improved. But the calibration for energy slope is needed. We got the energy slope based on the probability of direct arrived events with energy of 1 TeV, and fitted the intensity of spectrum with energy to make certain the energy slope of high energy cosmic ray. By this way, the efficiency and precision of cosmic ray simulation is greatly improved.

Key words: numerical simulation; energy slope; linear fitting

* Received date: 23 Apr. 2009; Revised date: 23 Jun. 2009

* Foundation item: Scientific Research Foundation of China West Normal University(07B067)

1) E-mail: lan0817@qq.com