

能量为 $6 \times 10^{14} \sim 5 \times 10^{16} \text{eV}$ 的宇宙 线能谱研究

孙洛瑞

(郑州大学)

摘 要

1982年,作者在悉尼大学对能量为 $6 \times 10^{14} \sim 5 \times 10^{16} \text{eV}$ 的高能宇宙线的能谱进行了实验研究. 实验采用了快速、高效率的电子仪器,并用电子计算机进行控制,实现了高度自动化. 研究结果表明,初级宇宙线的积分能谱可表示为 $I = K \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma}$, 式中 γ 的数值在能量 E 为 $3 \times 10^{15} \text{eV}$ 附近由 1.15 ± 0.04 改变为 1.91 ± 0.08 .

一、引 言

能量很高的初级宇宙线 ($E \geq 10^{14} \text{eV}$) 进入地球外围的大气层后,与空气分子的原子核相碰撞,会产生能量很高的次级粒子. 这些次级粒子可与空气分子再次作用或自行蜕变,又产生新的次级粒子. 这种过程可重复多次,直至次级粒子的能量小得不足以产生新的次级粒子. 所有这些作用的产物都分布在一个圆盘内,以接近于光速的速度向地面运动. 圆盘的直径可达几十米甚至几公里,而厚度一般来说只有几米^[1]. 这种现象称为宇宙线广延大气簇射. 能量高于 10^{14}eV 的初级宇宙线的强度很低,约为 10^{-5} /平方米·秒·立体弧度. 这就使得直接探测这些宇宙线变得非常困难. 因而,对于它们的研究主要是通过由它们产生的广延大气簇射来进行的.

初级宇宙线的强度对于其能量的分布称为宇宙线的能谱. 能量范围在 $10^{14} \sim 10^{17} \text{eV}$ 的宇宙线能谱中,在能量为 10^{15}eV 附近有一个拐点. 拐点位置及拐点两侧能谱参数的精确测量对于宇宙线的产生、演变及化学成分的解释有重要的意义. 本文所述为作者于1982年5月至11月在澳大利亚的悉尼大学(接近海平面高度)所做的有关工作.

二、探测系统简介

悉尼大学的小型宇宙线广延大气簇射观测阵列由八个闪烁计数器组成,记录系统采用电子计算机自动检测与控制系统(CAMAC). 关于此探测系统拟另文详述,这里只做一

个简单介绍. 八个闪烁计数器安装在同一水平面内. 四个快速时间探测器安装在一个 $25\text{m} \times 25\text{m}$ 的正方形顶点上, 各用四块 $40 \times 40 \times 10\text{cm}^3$ 的塑料闪烁体. 四个触发计数器各用一块相同的塑料闪烁体, 安装在一个 $4\text{m} \times 4\text{m}$ 的小正方形顶点上. 两个正方形的中心接近而不重合. 所有八个闪烁计数器都兼做粒子密度探测器(图 1).

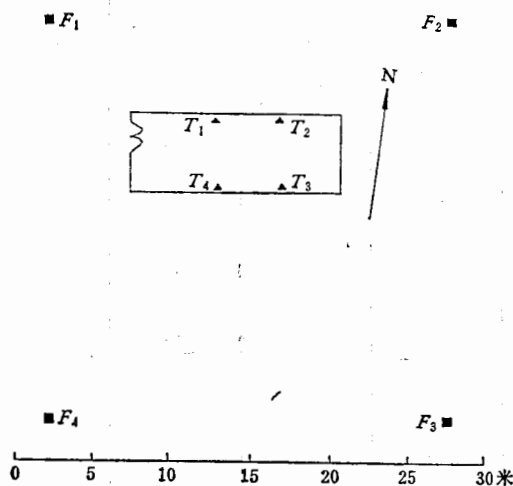


图 1 悉尼大学小型宇宙线广延大气簇射观测阵列的平面图.

图中 F_1 至 F_4 为快速时间探测器, T_1 至 T_4 为触发计数器

当宇宙线的次级粒子通过时, 探测器输出一个电脉冲. 脉冲高度对应于通过闪烁体的粒子数, 它被电量~数字转换器(ADC)转换成数字量. 四个快速时间探测器还分别测出簇射阵面到达的时间, 并由时间~数字转换器(TDC)转换成数字量. 计算机经过约半分钟的在线运算, 给出下列结果: 簇射发生的时间, 每个探测器接收到的粒子数及相对时间, 初级宇宙线入射的方向, 次级总粒子数等. 这些结果被记录在内存贮器中并被打印出来. 数据满一组后, 又被成批地输出并记录在磁带上, 以供离线处理时使用.

三、实验结果和讨论

前述阵列于 1982 年 5 月 27 日开始记录宇宙线广延大气簇射, 到同年 11 月 3 日, 共记录到 17,490 个事例. 为了保证分析结果的可靠性, 对所记录的事例按下列两个条件进行了挑选:

- (1) 探测系统对研究对象的探测效率要接近于 100%.
- (2) 簇射中心需通过阵列的大正方形内.

阵列对事例的探测效率主要决定于簇射中心的位置及次级总粒子数. 簇射中心的位置已由条件(2)所限定. 对于次级总粒子数为 N 的簇射, 以阵列的中心为圆心, 在簇射阵面中可以找出一个“触发圆”来. 簇射中心在圆内的事例都满足触发条件, 而中心在圆外的都不能触发阵列. 触发圆在阵列内投影所占的面积与阵列总面积之比即为阵列对次级总粒子数为 N 的簇射的探测效率. 首先从理论上算出 N 的下限值, 再用 Monte Carlo 方法

进行模拟验证,最后把它定下来.

表1 簇射的积分事例数分类表

logN > =	天 顶 角 θ (度)						
	0-18	18-25	25-30	30-34	34-37	37-40	40-42
4.8	4684	2622	1547	834	434	261	140
4.9	3780	2147	1221	661	343	219	115
5.0	2983	1660	953	517	275	165	87
5.1	2241	1238	892	380	200	116	62
5.2	1591	869	473	261	143	83	41
5.3	1100	593	324	166	98	57	25
5.4	767	391	220	119	70	39	15
5.5	550	271	157	77	49	26	13
5.6	372	175	108	45	36	18	8
5.7	232	125	73	33	22	9	7
5.8	150	85	51	26	13	3	7
5.9	119	60	34	17	10	2	6
6.0	73	42	20	9	5	1	5
6.1	51	29	12	8	4	1	3
6.2	36	17	10	4	3	1	2
6.3	26	13	7	2	2	0	1
6.4	19	8	6	0	2	0	1
6.5	15	3	3	0	2	0	0

在记录到的全部事例中,有 10,522 个满足前述的两项要求. 这些事例又按照入射角和簇射总粒子数进行编组. 入射角大于 42° 的事例太少,舍弃不用. 表 1 所列为观测到的积分事例数,即在给定的入射角范围内所有大于给定的簇射总粒子数的事例总数. 然后,用类似于 G. Clark 的方法^[2]对这些数据进行处理. 不同的入射角对应于不同的大气层厚度. 能量足够高的初级宇宙线产生的广延大气簇射,在不同的海拔高度处于不同的发展阶段,因而次级总粒子数不相等. 但能量相等的初级宇宙线产生的广延大气簇射,在不同的海拔高度探测时强度是相等的. 图 2 画出了本实验和另外两个在不同海拔高度的实验所测的点,并与纯电磁级联理论所计算的广延大气簇射发展曲线进行比较. 由图可见,实验结果与理论大体一致.

由于微分总粒子数谱能较好地显示出能谱的特征,我们先对接近于垂直入射的事例(入射天顶角 $\theta \leq 18^\circ$)进行处理,得出微分总粒子数谱,然后推算积分总粒子数谱和积分能谱. 表 2 所列是由表 1 算出的微分事例数. 表中每一个数字 $D_{i,l}$ 代表入射天顶角 θ 介于 θ_l 与 θ_{l+1} 之间,总粒子数介于 N_i 与 N_{i+1} 之间的事例数. 对应于 $D_{i,l}$ 的广延大气簇射的强度为:

$$d_{i,l}(\bar{N}_i, x)_{x=c} = \frac{D_{i,l}}{\pi \cdot T \cdot A \cdot (N_i + N_{i+1}) (\cos \theta_l - \cos \theta_{l+1}) (\cos \theta_l + \cos \theta_{l+1})}$$

式中

$$\bar{N}_i = \frac{1}{2} (N_i + N_{i+1}),$$

表 2 簇射的微分事例数分类表

logN	天 顶 角 θ (度)						
	0-18	18-25	25-30	30-34	34-37	37-40	40-42
4.8-4.9	904	475	326	173	91	42	25
4.9-5.0	797	487	268	144	68	54	28
5.0-5.1	742	422	261	137	75	49	25
5.1-5.2	650	369	219	119	57	33	21
5.2-5.3	491	276	149	95	45	26	16
5.3-5.4	333	202	104	47	28	18	10
5.4-5.5	217	120	63	42	21	13	2
5.5-5.6	178	96	49	32	13	8	5
5.6-5.7	140	50	35	12	14	9	1
5.7-5.8	82	40	22	7	9	6	0
5.8-5.9	31	25	17	9	3	1	1
5.9-6.0	46	18	14	8	5	1	1
6.0-6.1	22	13	8	1	1	0	2
6.1-6.2	15	12	2	4	1	0	1
6.2-6.3	10	4	3	2	1	1	1
6.3-6.4	7	5	1	2	0	0	0
6.4-6.5	4	5	3	0	0	0	1
6.5-7.0	15	3	3	0	2	0	0

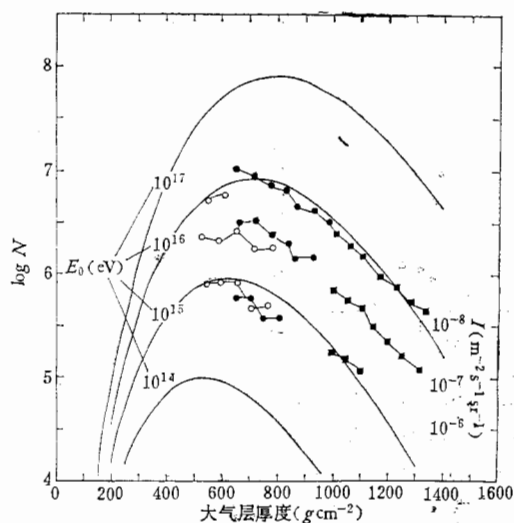


图 2 实验测定和理论计算的宇宙线广延大气簇射发展曲线。

图中 ■ 所示为本实验的结果 (海平面高度), ● 和 ○ 分别引自 El Alto (海拔 4200 米) 和 Mt Chacaltaya (海拔 5200 米) [2], 图中 logN 为簇射总粒子数的常用对数, I 表示宇宙线的强度

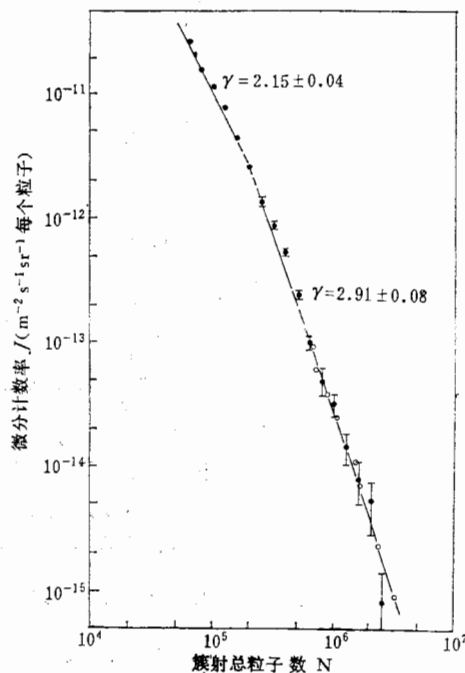


图 3 宇宙线广延大气簇射的微分总粒子数谱。图中的竖直线表示误差, 未表示误差的点的误差不大于点的本身。为了进行比较, 图中还画出了一些悉尼大学 1963 年所测的点 (圆圈所示) [3]

为平均总粒子数; x 为大气层厚度, 是常数; T 为有效探测时间. 将计算所得的广延大气簇射强度值与对应的簇射总粒子数表示在双对数纸上 (图 3), 两者的关系接近于直线, 但在 $\bar{N} \approx 3 \times 10^5$ 附近直线的斜率有较明显的改变.

用最大似然法在计算机上对所得数据进行处理, 得到簇射微分总粒子数谱公式为:

$$J(N)dN = (1.150 \pm 0.015) \times 10^{-11} \times \left(\frac{N}{10^5}\right)^{-(2.15 \pm 0.04)} dNm^{-2}s^{-1}Sr^{-1}$$

$$(6 \times 10^4 \leq N \leq 3 \times 10^5)$$

及

$$J(N)dN = (4.64 \pm 0.01) \times 10^{-14} \times \left(\frac{N}{10^6}\right)^{-(2.91 \pm 0.08)} dNm^{-2}s^{-1}Sr^{-1}$$

$$(3 \times 10^5 \leq N \leq 5 \times 10^6)$$

相应的积分总粒子数谱公式为:

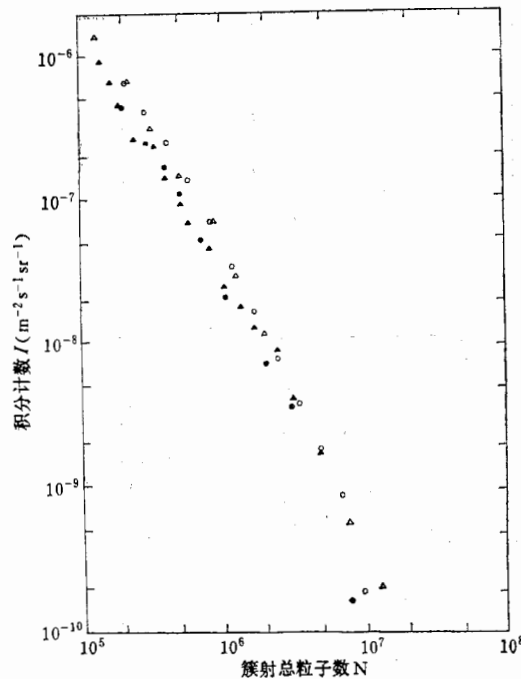


图 4 宇宙线广延大气簇射的积分总粒子数谱.

图中▲所示为本实验结果, △引自 Catz 等[5],

●引自 Ashton 等[6], ○引自 Crouch 等[7]

$$I(>N) = (1.31 \pm 0.02) \times 10^{-6} \times \left(\frac{N}{10^5}\right)^{-(1.15 \pm 0.04)} m^{-2}s^{-1}Sr^{-1}$$

$$(6 \times 10^4 \leq N \leq 3 \times 10^5)$$

及

$$I(>N) = (2.42 \pm 0.02) \times 10^{-8} \times \left(\frac{N}{10^6}\right)^{-(1.91 \pm 0.08)} m^{-2}s^{-1}Sr^{-1}$$

$$(3 \times 10^5 \leq N \leq 5 \times 10^6)$$

在本实验所研究的能量范围内, 簇射总粒子数 N 与初级宇宙线的能量之间存在着一个近似的关系[4]: $E \approx 10^{10} \cdot N$. 由此可得初级宇宙线的积分能谱公式为:

$$I(>E) = (1.31 \pm 0.02) \times 10^{-6} \times \left(\frac{E}{10^{15}}\right)^{-(1.15 \pm 0.04)} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Sr}^{-1}$$

$$(6 \times 10^{14} \text{ eV} \leq E \leq 3 \times 10^{15} \text{ eV})$$

及

$$I(>E) = (2.42 \pm 0.02) \times 10^{-8} \times \left(\frac{E}{10^{10}}\right)^{-(1.91 \pm 0.08)} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Sr}^{-1}$$

$$(3 \times 10^{15} \text{ eV} \leq E \leq 5 \times 10^{16} \text{ eV})$$

为了进行比较, 图 4 中画出了几个不同的实验所得到的积分总粒子数谱的实验点. 所有实验都是在接近于海平面处做的.

本实验是根据悉尼大学原子核物理系 C. B. A. McCusker 教授和 M. M. Winn 副教授的建议^[8], 并在 Winn 副教授的指导下进行的. 该校物理研究所所长 H. Messel 教授曾给予本工作许多方便和支持. J. Ulrich 博士曾与作者进行过多次讨论, 提出许多宝贵意见. 作者在此一并表示深切的谢意.

参 考 文 献

- [1] P. Bassi, G. Clark, and B. Rossi, *Phys. Rev.*, **92** (1953), 441.
- [2] G. Clark, H. Bradt, and M. La Pointe, *Proc. 8th Int. Cosmic Ray Conf.*, Jaipur **4** (1963), 65.
- [3] C. B. A. McCusker, *Proc. 8th Int. Cosmic ray Conf.*, Jaipur **4** (1963), 35.
- [4] S. Hayakawa, *Cosmic Ray Physics*, Wiley-Interscience (1969).
- [5] Ph. Catz et al., *Proc. 14th Int. Cosmic Ray Conf.*, Munich **12** (1975), 4329.
- [6] F. Ashton et al., *Proc. 16th Int. Cosmic Ray Conf.*, Kyoto **13** (1979), 243.
- [7] P. C. Crouch et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **179** (1981), 467.
- [8] C. B. A. McCusker and M. M. Winn, *Nucl. Phys.*, **5** (1979), 159.

A STUDY OF ENERGY SPECTRUM OF COSMIC RAYS RANGING FROM 6×10^{14} TO 5×10^{16} eV

SUN LUO-RUI

(Zhengzhou University)

ABSTRACT

Energy spectrum of cosmic rays ranging from 6×10^{14} to 5×10^{16} eV is studied. The work is done automatically by employing a computer as well as fast and efficient electronics. The results of the experiment show that: The integral spectrum of the primary cosmic rays can be represented as $I = K \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma}$. The value of γ is changed from 1.15 ± 0.04 to 1.91 ± 0.08 at energy around 3×10^{15} eV.