

平均能量为 $2 \times 10^{15} \text{eV}$ 的 宇宙线入射方向研究

孙洛瑞

(郑州大学物理系)

1984年1月20日收到

提 要

从1982年5月到1983年1月,悉尼大学的小型宇宙线观测阵列记录了多于17,000个能量为 6×10^{14} — $5 \times 10^{16} \text{eV}$ 的宇宙线广延大气簇射事例。使用谐波分析和 χ^2 检验法,对这些宇宙线的入射方向进行了研究,没有发现有意义的各向不同性。

一、引 言

1938年, Auger^[1] 和 Kolhöster^[2] 两个研究小组发现了宇宙线广延大气簇射现象。至今近半个世纪,人们一直在努力探索这些高能宇宙线的来源。由于入射方向与宇宙线的起源有着密切的关系,对这个问题的研究还可提供有关宇宙线的传播过程等重要信息,所以,许多宇宙线研究组进行过这方面的观测工作。到六十年代中期,已有五十几个实验结果发表。这些实验研究的对象,主要是能量范围为 10^{14} — 10^{17}eV 的初级宇宙线。Linsly 和 Watson^[3] 曾对这些工作做了总结性的概述。他们的结论是:在前述的能量范围内,宇宙线向地球的入射方向存在着各向不同性。但是,由于当时的技术条件所限,这些测量的精度都不高。1982年至1983年间,作者在悉尼大学应用现代电子学技术对这个问题重新进行了研究,并没有发现前述的各向不同性。

二、探 测 方 法

图1是悉尼大学小型宇宙线观测阵列的平面图。有关的探测记录系统,拟另文详述。这里只介绍实验中确定初级宇宙线入射方向的方法。

当阵列处于灵敏状态时,如果有三个或四个触发计数器同时接收到簇射的次级粒子,记录系统就被启动。各探测器测出接收到的次级粒子数,四个快速时间探测器还测出接收到簇射次级粒子数的相对时间。假设簇射的次级粒子分布在一个平面内,在 t_0 时刻此平面到坐标系原点的距离为 $t_0 c$ (c 为光速),则平面通过位于 (x_i, y_i, z_i) 的第 i 个探测器的时间为

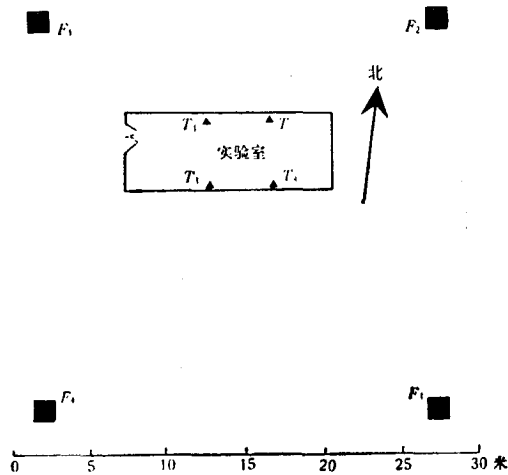


图1 悉尼大学小型宇宙线广延大气簇射观测阵列的平面图
图中 F_1 至 F_4 为快速时间探测器, T_1 至 T_4 为触发计数器

$$t_i = t_0 - (lx_i + my_i + nz_i)/c. \quad (1)$$

使用加权的最小二乘法可以由上式求出 m 和 l 的值. 权值选用探测器所在处粒子密度的平方根.

设初级宇宙线的入射方位角为 ϕ , 天顶角为 θ , 则

$$\phi = \arctan(m/c), \quad (2)$$

$$\theta = \arccos \sqrt{1 - m^2 - c^2}. \quad (3)$$

结合事例发生的时间, 可把入射方向表示在天球坐标系中, 计算公式如下:

$$\sin \delta = \sin \theta \cos \phi \cos \delta_0 + \cos \theta \sin \delta_0, \quad (4)$$

$$\alpha = \gamma - \arctan[\sin \phi / (\sin \delta_0 \cos \phi - \cos \delta_0 \tan \theta)], \quad (5)$$

式中 δ_0 为实验室所在处的纬度, γ 为当地的恒星时, δ 和 α 分别代表赤纬和赤经.

三、入射方向的分析

1. 入射方向的方位角、天顶角分布

从 1982 年 5 月 27 日到 1983 年 1 月 12 日, 本实验共记录到 23,705 个宇宙线广延大气簇射. 其中有 17,302 个是由能量大于 $6 \times 10^{14} \text{eV}$ 的初级宇宙线产生的. 图 2 是这些事例按入射方位角的分布图. 用 $N_{\text{东}}$, $N_{\text{西}}$ 分别代表方位角 ϕ 落在东、西两半平面内的事例数, 则有 $N_{\text{东}}:N_{\text{西}} = 0.952$. 同样对南北两半平面考察, 结果是 $N_{\text{北}}:N_{\text{南}} = 1.06$. 用 χ^2 法对入射事例的方位角分布进行检验, 也没有发现有意义的不对称性.

在方位角各向均匀分布的情况下, 习惯上将入射方向的天顶角微分分布写成如下形式:

$$dN = k \cdot \cos^n \theta \sin \theta d\theta,$$

式中 dN 为微分事例数. 图 3 所示为本实验结果的这种分布图.

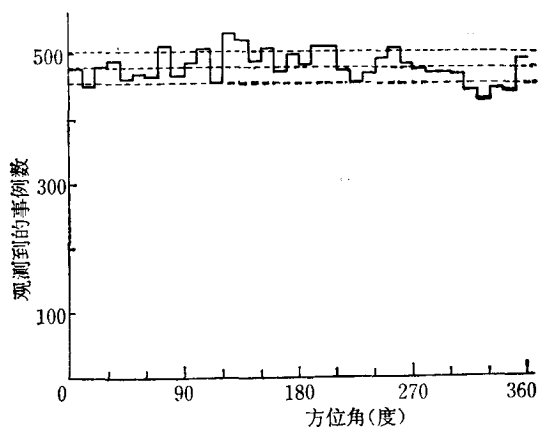


图2 簇射事例数按方位角的分布图 中间虚线代表平均值，
上、下两条虚线分别代表平均值加上和减去标准误差

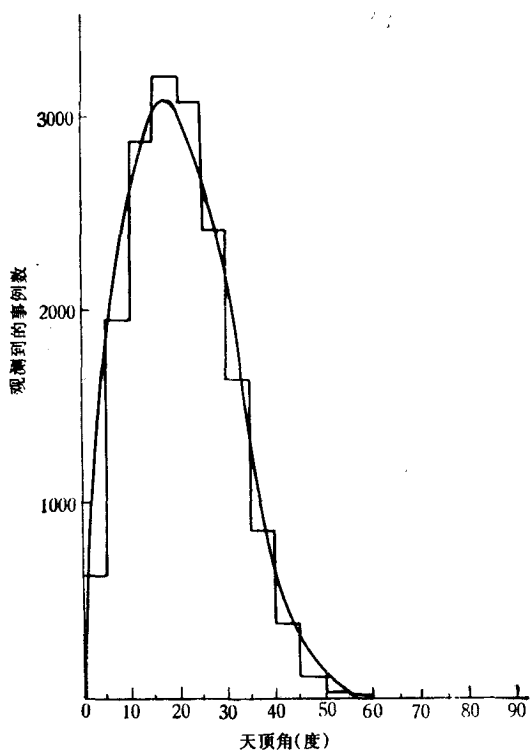


图3 簇射事例数按天顶角的分布图 图中还画出了与实验
结果最佳符合的 $\cos^2\theta \sin\theta d\theta$ 曲线, $n \approx 10.0$

2. 探测系统的角分辨率

探测系统的角分辨率用下述方法确定。在多数事例中，四个快速时间探测器都接收到次级粒子，测出四个相对时间值，由此可得出—组表示入射方向的量 θ , ϕ , α 及 δ 。如果只用其中三个时间值，也可以算出一组量 θ' , ϕ' , α' 及 δ' ，并求出第四个相对时间的期

表 1

被 测 量	测 量 范 围	误 差
天顶角 θ (度)	0—30	2.2
	30—45	2.6
	45—60	2.7
方位角 ϕ (度)	0—360	5.0
赤 纬 δ (度)	0 — -10	4.6
	-10 — -20	3.2
	-20 — -30	3.1
	-30 — -40	2.8
	-40 — -50	2.5
	-50 — -60	2.5
	-60 — -70	2.5
赤 经 α (度)	0—360	2.2
相对时间 t (秒)		5.0

望值 t' 。比较这两组量,以对应量的差值作为偏差,再由偏差的分布求出标准误差,结果列于表 1。

对应的立体角的测量误差由下式决定:

$$\Delta\omega = d(\cos\theta)d\phi \approx \sin\theta\Delta\theta\Delta\phi.$$

在一级近似下,假定 θ 与 ϕ 不相关,得

$$\Delta\omega = \sin\bar{\theta}\Delta\theta\Delta\phi.$$

取 $\bar{\theta} = 20^\circ$, $\Delta\theta = \Delta\phi = 3^\circ$, 则 $\Delta\omega \approx 0.9 \times 10^{-3}$ 立体弧度。

与早期实验的测量误差 0.5 立体弧度^[4]相比较,本实验的测量精度提高了近三个数量级。

根据表 1 中时间的误差值,可以估计簇射次级粒子分布面的厚度,即 $h \approx 2 \cdot \Delta t \cdot c \approx 3$ 米。

3. 各向不同性分析

(1) 工作时间的计算

在进行分析前,需对观测到的数据进行处理,使各相等恒星时的间隔中工作日数相等。为此,以最小工作日数的间隔为标准,将其它各间隔的“过度曝光”时间扣除掉。为了尽量减少人为因素的影响,采用等间隔剔除的方法。经过这样的处理后,有效事例数由 17,302 减至 17,164。

(2) 天球坐标系中的计数率分布

1) 用 χ^2 法检验赤纬分布的对称性 为了检查所得事例数对于赤纬的分布是否存在有意义的不对称性(这种不对称性往往是由于阵列的缺陷所造成的),我们计算出一个理想均匀分布,然后将实测结果与之相比较。理想分布中每个事例的方位角在 0° — 360° 之间随机地选定,其余参数仍用实测值,求出入射方向的赤纬坐标。图 4 所示为理想均匀分布与实测分布的比较。用 χ^2 法对两种分布的差别进行检查,实测分布与理想分布符合

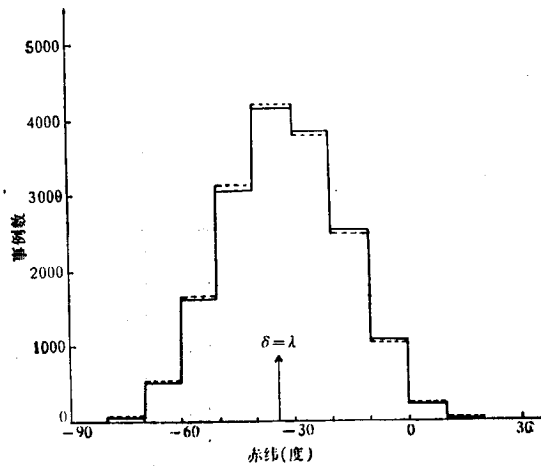


图4 实测结果与按对称假设计算得出的事例数对于赤纬的分布图 虚线所示为理想对称分布, 实线所示为实测结果

得相当好。这就说明初级宇宙线的人射方向对于赤纬的分布不存在有意义的不对称性。

2) 对赤纬分布的谐波分析 在研究初级宇宙线的人射方向时, 目前普遍采用所谓“随机步进”的谐波分析法。Linsley^[5]曾经对此方法做了系统的综述, 并定义一些术语如下:

对于赤经或时间为 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ 的 n 个测量结果, 定义其部分振幅值

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}, \text{ 其中}$$

$$a = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \cos m\phi_i,$$

$$b = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \sin m\phi_i,$$

式中 $0 \leq \phi_i \leq 2\pi$, $m = 1$ 或 2 分别对应于一次和二次谐波分析。

振幅极大值的相位角 θ 用如下方法确定:

$$\theta = \begin{cases} \theta_1 & a, b > 0; \\ \theta_1 + \pi & a < 0; \\ \theta_1 + 2\pi & a > 0, b < 0; \end{cases}$$

式中 $\theta_1 = \arctan(b/a)$, 且 $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ 。

振幅值大于或等于部分振幅值 r 的几率为

$$p(\geq r) = \exp(-k_0),$$

式中 $k_0 = \frac{1}{4} nr^2$ 。

在分析本实验的结果时, 还将数据按初级宇宙线的能量及观测的赤纬条带分别编组。分析结果列于表 2。由表 2 可知, 任何一组数据的 p 值都大于 12%。这表明, 初级宇宙

线的入射率对方向的分布不存在有意义的各向不同性。

(3) 用 χ^2 法检验赤经分布

由于谐波分析对块状源不够灵敏, 我们对赤经分布再用 χ^2 法检验以作为补充。在进行检验时, 先把实验数据按宇宙线的入射方向标绘在 Morcator 图表上(表 3)。表中每个

表 2

E	Dec	No	$\sigma(\%)$	一次谐波分析				二次谐波分析				χ^2
				r(%)	p(%)	$\theta(^{\circ})$	σ_{θ}	r(%)	p(%)	$\theta(^{\circ})$	σ_{θ}	
E ₁	1	5904	1.8	0.7	92.8	68.4	148.0	1.8	63.4	101.8	60.0	45.6
	2	2647	2.7	2.5	66.4	238.8	63.3	4.4	27.8	66.0	35.8	46.0
	3	3257	2.5	3.3	41.2	62.6	43.0	2.1	69.6	184.0	67.3	35.7
E ₂	1	6333	1.8	1.2	80.4	91.4	86.7	0.8	90.8	265.0	130.7	28.8
	2	2969	2.6	0.9	94.0	112.1	163.0	1.8	79.5	6.3	84.7	27.5
	3	3364	2.4	1.5	83.1	80.4	94.0	2.3	63.3	224.4	59.9	23.5
E ₃	1	2009	3.2	6.0	16.3	97.9	30.1	3.0	62.8	277.1	59.4	34.8
	2	937	4.6	5.9	43.7	97.8	44.5	2.1	89.9	337.4	124.3	32.7
	3	1072	4.3	6.1	37.2	98.0	40.8	5.0	50.5	258.4	49.0	35.5
E ₄	1	1806	3.3	6.8	12.2	35.6	27.9	2.9	68.4	153.6	65.8	44.0
	2	800	5.0	4.5	66.8	17.4	63.8	4.8	63.5	147.8	60.1	37.8
	3	1006	4.5	8.9	13.4	42.8	28.6	1.5	94.6	168.6	172.5	33.4
E ₅	1	295	8.2	3.6	91.1	176.6	132.4	4.6	85.7	204.9	103.0	33.1
	2	136	12.2	19.7	26.7	117.7	35.3	13.1	55.8	126.4	53.1	45.1
	3	159	11.2	14.6	43.0	274.8	44.1	12.6	53.0	265.2	50.9	26.9
E ₆	1	16347	1.1	1.9	21.4	74.2	32.6	0.5	91.2	173.2	133.3	28.6
	2	7489	1.6	0.9	86.6	117.2	106.7	2.1	43.5	61.8	44.4	13.4
	3	8858	1.5	3.1	12.1	64.7	27.9	2.3	32.4	220.5	38.2	40.9

注: 1. 能量范围: E₁, $6 \times 10^{14} - 10^{15}$ eV; E₂, $10^{15} - 2 \times 10^{15}$ eV; E₃, $2 \times 10^{15} - 3 \times 10^{15}$ eV; E₄, $3 \times 10^{15} - 10^{16}$ eV; E₅, $10^{16} - 5 \times 10^{16}$ eV; E₆, $6 \times 10^{14} - 5 \times 10^{16}$ eV.

2. 赤纬条带 (Dec): 1, $-63.89^{\circ} - -3.89^{\circ}$; 2, $-33.89^{\circ} - -3.89^{\circ}$; 3, $-63.89^{\circ} - -33.89^{\circ}$.

3. No——事例数.

4. σ ——标准误差.

5. r——部分振幅值.

6. p——振幅值大于 r 的几率.

7. θ ——振幅极大值的相位.

8. σ_{θ} —— θ 的误差.

方格内的数字, 为假定宇宙线作直线传播时, 由该区域射来的事例数。

由于地球的自转, 观测阵列将均匀地扫过所有的赤经。因而, 如果初级宇宙线是各向同性的, 则应得到均匀的计数率。用 χ^2 法检验同一赤纬条带内等赤经间隔的计数率与均匀直之间的差别, 结果表示在表 3 的右侧, 其中最大的 χ^2 值为 57。在 8 个独立条带中有一个或更多个 χ^2 的值等于或大于 57 的几率为 12%。这就表明, 在 Morcator 图表中, 用 χ^2 检验也没有发现有意义的各向不同性。

表 3

	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360 平均 \bar{x}
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	5	6	11	10	0	4	10	5	8	3	6	6	4
-10	33	30	36	31	38	30	35	17	30	35	17	30	31
-20	61	75	57	71	81	68	83	88	58	74	75	78	77
-30	90	98	118	94	100	122	98	104	136	113	101	105	127
-40	117	120	107	112	123	122	125	128	100	104	115	110	105
-50	84	84	90	90	95	85	89	96	98	86	86	72	89
-60	54	42	40	45	38	41	39	45	42	42	49	57	37
-70	11	6	13	14	13	14	9	17	21	20	10	14	13
-80	3	2	0	2	4	2	0	3	5	4	1	3	1
-90	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
													6
													31
													30
													35
													71
													38
													57
													106
													57
													24
													85
													25
													46
													27
													14
													38

注: 表中顶部所列数为赤经度数, 左旁为赤纬度数.

四、与其它实验结果的比较

前面已经提到,对能量介于 10^{14} — 10^{17} eV 的初级宇宙线的入射方向,已经有 50 多个实

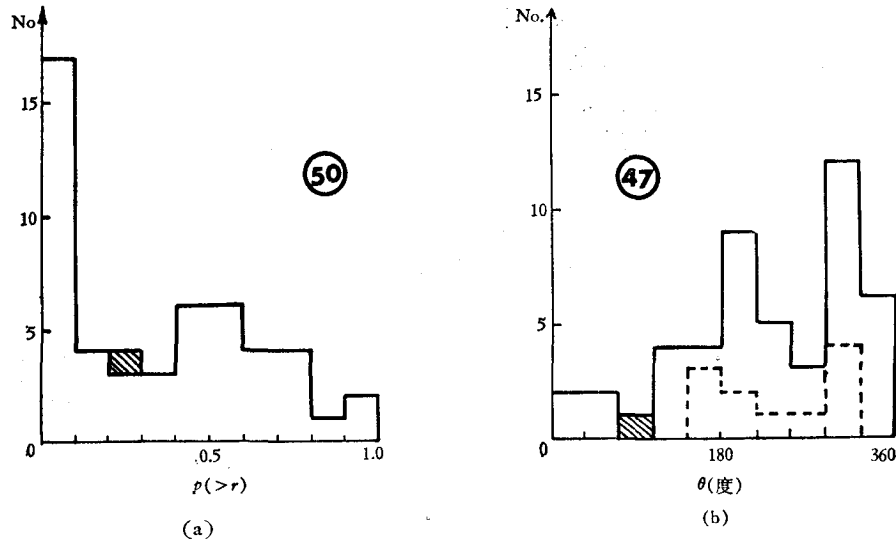


图 5 本实验与文献[3]所列实验结果的比较 图中圆圈内的数字为实验总数(不包括本实验),横坐标 $p(>r)$ 代表观测结果的部分振幅值大于 r 的几率,而 θ 为最大振幅的相位角,——为全部数据;---为南半球数据;▨为本实验数据

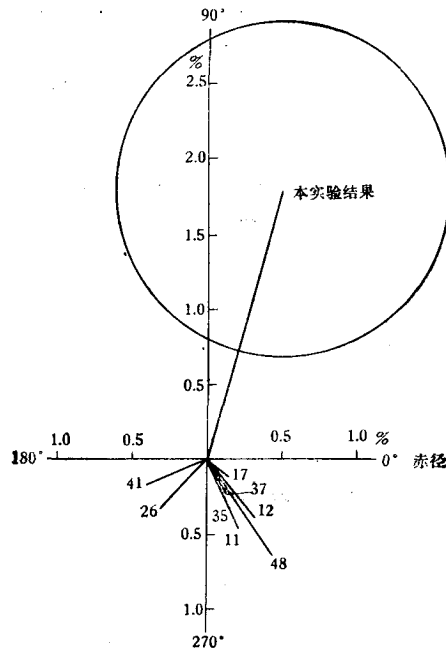


图 6 能量为 10^{15} eV 左右的宇宙线入射方向的一级谱振分析图 图中线段末端的数字代表该实验在文献[3]的表 1 中的序号

验结果发表。Kiralý 等^[6]曾对这些结果进行过分析并使用一些图表来加以说明。图 5 所示就是在 Kiralý 的图中增加了本实验的结果。由于南北两半球的情况可能有所不同,在图 5(b)中,本文作者用虚线把南半球的实验结果单独表示出来。

图 5(a) 所示为部分振幅值的分布图。部分振幅值小的实验结果的数量最多。图 5(b)所示为最大振幅处相位角的分布,其中存在着最大相位角出现于 $180^\circ-360^\circ$ 的几率较高的趋向。这些趋向似乎暗示着宇宙线入射方向的某种各向不同性。

本实验的总结果是(对应于表 2 中的 E_6 和 DEC_1): 部分振幅值 $r = (1.9 \pm 1.1)\%$, 振幅等于或大于 r 的几率为 21%, r 极大值的相位角 $\theta = 74^\circ \pm 33^\circ$ 。这个结果的部分振幅值处于图 5(a) 的中间位置,而振幅极大值的相位角 θ 恰好落在图 5(b) 的空隙中。因而,本实验的结果与前述的趋向不一致。

本实验所研究的宇宙线的平均能量为 2×10^{15} eV 在原有的实验中,研究对象的平均能量为 $1.4 \times 10^{15}-3 \times 10^{15}$ eV 的共有 11 个。为了进行比较,将这些结果表示在同一个谐振分析图上(图 6)。图 6 中对本实验结果还做了误差圆。图 6 再一次表明,这些实验结果之间的歧离很大,难以进行统一的解释,为了对这个问题得出明确的结论,尚需做进一步的研究工作。

本工作曾得到悉尼大学 H. Messel 教授, C.B.A. McCusker 教授, M.M. Winn 副教授和 J. Ulrichs 博士的热情帮助,作者深表感谢。

参 考 文 献

- [1] P. Auger, R. Maze and T. Grivet-Mayer, *C. R. Acad. Sci., Paris*, **206** (1938), 1721.
- [2] W. Klhörster, I. Matthews and E. Weber, *Naturwissenschaften*, **26**(1938), 576.
- [3] J. Linsley and A. A. Watson, Proc. 15th Int. Conf. on Cosmic Rays, Plovdiv, Vol. **12**(1977), p. 203.
- [4] T. E. Cranshaw and W. Galbraith, *Phil. Mag.*, **45**(1954), 1109.
- [5] J. Linsley, Proc. 14th Int. Conf. on Cosmic Rays, Munich, **2**(1975), p. 592.
- [6] P. Kiralý and J. Kota, *Rivista del Nuovo Cimento*, **2**(1979), 1.

A STUDY OF THE ARRIVAL DIRECTION OF COSMIC RAYS WITH AVERAGE ENERGY ABOUT 2×10^{15} eV

SUN LUO-RUI

(Department of Physics, Zhengzhou University)

ABSTRACT

From May 1982 to January 1983, more than 17,000 cosmic ray air showers were recorded by the small air shower array in Sydney University. Using χ^2 test and harmonic analysis to study the arrival direction of the showers, no significant anisotropy has been found.