

エマルションチェンバーによる  
宇宙線鉄核スペクトルの観測\*

佐藤 禎宏\*\*・島田 悦男\*\*・太田 周\*\*  
田阪 茂樹\*\*\*・田中慎一郎\*\*\*・杉本 久彦†  
平良 邦夫†・立山 暢人††

(1985年5月31日受理)

Energy Spectrum of Cosmic-Ray Iron Nucleus Observed with  
Emulsion Chambers

By

Yoshihiro SATO, Etuo SHIMADA, Itaru OHTA  
Shigeki TASAKA, Shinichiro TANAKA, Hisahiko SUGIMOTO  
Kunio TAIRA and Nobuo TATEYAMA

**Abstract:** Energy spectrum of cosmic-ray Fe-nucleus has been measured from 4 GeV/n to beyond 100 GeV/n. The data were obtained using emulsion chambers flown on a balloon from Sanriku, Japan. The energies were estimated by the opening angle method, the calibration of which was made using accelerator beams of 1.88 GeV/n Fe. The result is in good agreement with those of other experiments.

1. はじめに

これまで観測された高エネルギー鉄核スペクトルのまとめが報告されている[1]. 直接測定されているのは、約 200 GeV/n までであるが、10~100 GeV/n 領域のスペクトルは、実験によって少なからず異なっており、その領域のスペクトルをより正確にすることは、宇宙線の伝播や銀河内での宇宙線のとじこめについての議論を進める上で必要なことである。これまでの実験は、主にチュレンコフ・カウンター、カロリメータおよびマグネット・

---

\* 宇宙研特別事業費による研究論文

\*\* 宇都宮大学 教育学部

\*\*\* 岐阜大学 教育学部

† 相模工業大学

†† 神奈川大学

スペクトロメータを使って観測がなされてきたが[1,2,3,4,5],我々は,エマルジョンチェンバーを用いて opening angle 法によるエネルギースペクトルを求めることを行なった。

エマルジョンチェンバーを用いた実験は既に行なわれているが[6],実験上解決すべき課題がいくつかあった。それを列記すると,

- 1) VH 核の電荷決定精度
- 2) スキャニング効率の向上
- 3) 入射エネルギーの決定精度

等である。特に,入射エネルギーを決定方法としての opening angle 法に対する問題点が, Kullberg[7]によって,指摘されている。

本実験では,1),2)については,プラスチック CR-39 を用いて,一応の解決を得ている[8]。また,3)については,LBL 重イオン加速器の 1.88 GeV/n Fe ビームを用いて較正実験を行なって解決した。

## 2. チェンバーデザインと実験手続

プラスチック CR-39 を挿入したエマルジョンチェンバーを過去3回('80,'81,'82)にわたり,気球高度での露出実験を行なったが[9], '80,'81年の実験はテスト的なものであったので,'82年実験を中心に述べることにする。

面積  $40 \times 50 \text{ cm}^2$ , 厚さ約 9 cm のプラスチックを挿入したエマルジョンチェンバー6個 ( $0.8 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ ) を気球に搭載し,1982年5月三陸気球基地(宇宙科学研究所)から放球し,縦側高度  $7.6 \text{ g/cm}^2$  で,飛翔時間 15.5 時間後,無事回収された。

チェンバーは,プラスチック CR-39 (約 1.6 mm 厚) と,原子核乾板 (1.0 mm 厚メタアクリル板の両面に  $50 \mu\text{m}$  厚の原子核乳剤を塗布したもの),および,ポリエチレン板 (0.97 mm 厚) を,図1の様に積み重ねた構造になっている。重イオン核種の飛跡を裸眼あるいは低倍率実体顕微鏡の下で効率よく探索するために,図に示す CR-39 の番号 1, 3, 5, 7 のものを長時間エッチング処理した。また,番号 2, 4, 6, 8, 9 のものは,コーンの大きさから電荷を決めるために短時間エッチングを行なった。

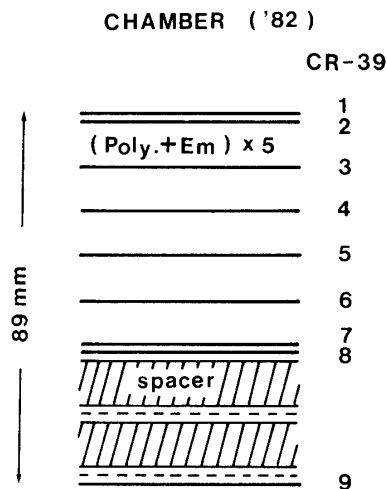


図1 エマルジョン・チェンバーの構造

解析手順として、チェンバーの最上流部の長時間エッチングCR-39 (No. 1) について、実体顕微鏡を用いて重イオン粒子の探索を行ない、対応する短時間エッチングCR-39 (No. 2) 上のコーンを測定することによって、電荷分布を求めた。その内から、電荷が  $Z=26\pm 1$  の粒子を選択し、長時間エッチングCR-39 (No. 3, 5, 7) につなぎ、途中でコーンが消滅したもの、あるいは、コーンが小さくなったものについて原子核乾板に対応づけし、衝突をみつけ出した。衝突で発生したフラグメントや二次粒子を原子核乾板中で測定することによって発生角度を求めた。

### 3. 鉄核の積分フラックス

'82年チェンバーのうちの1/6の面積 ( $40\times 50\text{ cm}^2$ ) の部分で、CR-39による電荷決定を行ない、電荷の分解能は  $\Delta Z=\pm 1$  であった。また  $25\leq Z\leq 27$  の積分フラックスとして

$$I(\geq 4.0\text{ GeV/n})=(1.32\pm 0.12)\times 10^{-1}[\text{m}^2\cdot\text{str}\cdot\text{sec}]^{-1}$$

を得た[10]。ただし、4.0 GeV/nは、三陸上空の鉄核に対する vertical cut-off energy である。

同様に、他の部分 ( $40\times 50\text{ cm}^2$ ) において測定した電荷分布を図2に示す。鉄核付近での電荷の分解能は、 $\Delta Z=1.5$  である。これより鉄核の積分フラックスとして、

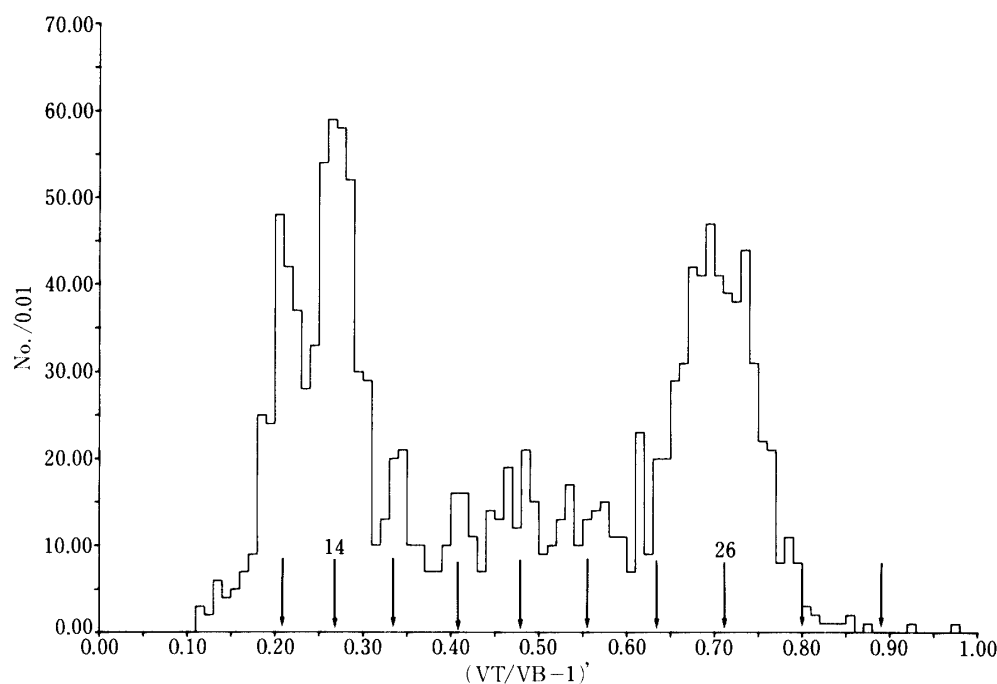


図2 電荷のヒストグラム。

横軸は、コーンの入射角依存性を補正した normalized track etch rate である。ただし、縦軸について立体角の補正は行っていない。

$$I(\geq 4.0 \text{ GeV/n}) = (1.2 \pm 0.1) \times 10^{-1} [\text{m}^2 \cdot \text{str} \cdot \text{sec}]^{-1} \quad (2)$$

を得た。

以上の結果を、図3に示す。我々の結果は、これまで得られている結果と矛盾しない。以後の解析において、フラックスを規格化するために、(2)式の結果を使用することにした。

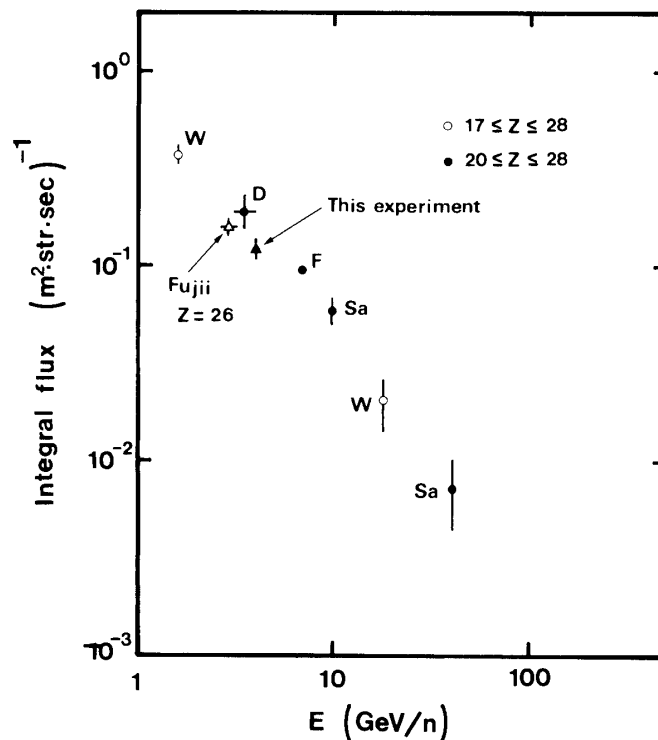


図3 鉄核とVH核の積分フラックス。  
 D: Doke et al. (1982)<sup>11)</sup>  
 F: Freier et al. (1968)<sup>12)</sup>  
 Sa: Saito (1971)<sup>13)</sup>  
 W: Webber et al. (1973)<sup>14)</sup>  
 Fujii (1984)<sup>15)</sup>

#### 4. エネルギー決定と補正

我々は、LBLの1.88 GeV/n鉄核ビームを用いてエネルギー較正実験を行なった。宇宙線のイベントに適用することを考慮に入れて、鉄核衝突のうち、フラグメントの個数( $N_h$ )と $\alpha$ 粒子の個数( $N_\alpha$ )の和が、 $N_h + N_\alpha \geq 3$ のイベントについて再解析を行なった。フラグメントと $\alpha$ 粒子の幾何学的重心を入射軸とみなし、角度の平均値 $\langle \theta \rangle$ 、二乗平均値 $\langle \theta^2 \rangle$ を求めて、次式で定義されるパラメータ $\langle P_i \rangle$ 、 $\langle E_i^* \rangle$ を求めた。

$$\langle P_t \rangle = P_0 \langle \theta \rangle, \quad \langle E_k^* \rangle = \frac{3P_0^2}{M} \langle \theta^2 \rangle$$

ただし、 $P_0$ は、入射粒子の運動量である。この量は、フラグメントの電荷 ( $Z_f$ ) に依存することが判ったので、 $Z_f$  別に、表1に示す。

表1 1.88 GeV/n 鉄核反応から求めた、フラグメントの電荷  $Z_f$  別の  $\langle P_t \rangle$  と  $\langle E_k^* \rangle$  の値。

$Z_f$	No.	$\langle P_t \rangle$ (MeV/c)	$\langle E_k^* \rangle$ (MeV)
2	25	$86.7 \pm 6.5$	$33.5 \pm 5.1$
3-8	7	$64.5 \pm 11.4$	$18.7 \pm 7.5$
9-12	42	$61.4 \pm 4.4$	$17.4 \pm 2.8$
13-15	27	$54.0 \pm 5.5$	$14.2 \pm 3.1$
16-21	13	$54.0 \pm 4.1$	$5.9 \pm 1.2$

逆に、この  $\langle P_t \rangle$  と  $\langle E_k^* \rangle$  のパラメータを使えば、実験値の  $\langle \theta \rangle, \langle \theta^2 \rangle$  から入射エネルギーを推定でき、誤差分布を求めることができる。真の運動エネルギーを  $E_0$ 、推定したエネルギーを  $E$  としたとき、変数  $x = E/E_0$  で表わした誤差分布を図4に示す。

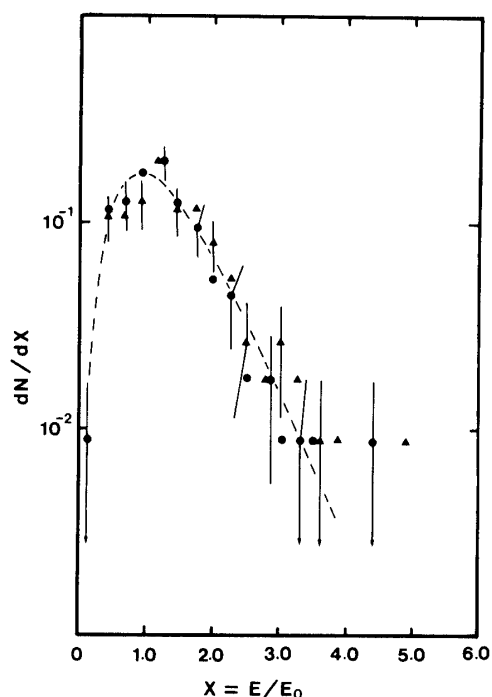


図4 1.88 GeV/n 鉄核反応から求めたエネルギー決定誤差分布。  
 $E_0$  と  $E$  は、各々、入射運動エネルギーと、opening angle 法で求めたエネルギーである。●印は、角度の平均  $\langle \theta \rangle$  から求めたデータで、▲印は、二乗平均  $\langle \theta^2 \rangle$  から求めたものである。

次に、このエネルギー誤差によるスペクトルへの影響を調べるために、次の仮定によるシュミレーションを行なった。

- ① 積分スペクトルを、 $I(>E) \propto E^{-1.5}$  とする。
- ② cut-off rigidity を考慮する[16]。担し、入射角度分布は、 $0.9 \leq \sin \delta \leq 1.0$  で一様分布とする。
- ③ エネルギー推定誤差として、1.88 GeV/n 鉄核衝突データから得られた分布を使用する。分布関数として、ガンマ関数

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad \alpha=3.10, \beta=0.42$$

で近似した。これは、図4に破線で記入してある。ただし、この誤差分布は、入射エネルギーに依存しないと仮定する。

シュミレーションの結果を図5に示す。スペクトルの傾きをわかり易くするために、縦軸として、 $(dN/dE) * E^{2.5}$  を使用した。エネルギー誤差のために、スペクトルは、エネルギーの高い方へせり出している。したがって、opening angle 法で求めたスペクトル(破線)から、仮定したのスペクトル(実線)を求めるためには、補正する必要がある。スペクトル( $dN/dE \propto E^{-\gamma}$ )の中を、 $\gamma=2.3, 2.5, 2.7$  としたとき、opening angle 法で求められるスペクトルを、図6の(a), (b), (c)に示す。

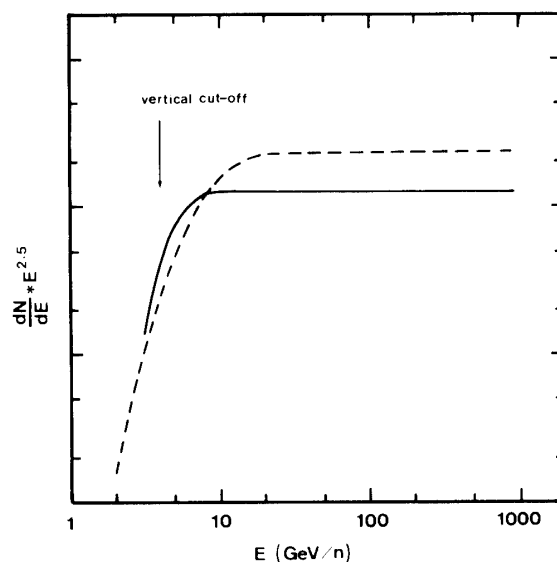


図5 エネルギー誤差を考慮したシュミレーションの結果。スペクトルの違いを強調するために、 $E^{2.5}$  を掛けている。実線は、仮定したスペクトル( $\gamma=2.5$ )である。破線は、opening angle 法で求められるスペクトルである。

### 5. 実験結果と検討

全体のチェンバーのうち、約1/2を解析した結果、入射角度が $0.9 \leq \sin \delta \leq 1.0$ を満たし、電荷が $Z=26 \pm 1$ の粒子がチェンバー内で衝突を起こし、更に発生した二次粒子が、 $N_h + N_a \geq 3$ を活かすイベントを計294例得た。これらのイベントについて、表1に示すフラグメント電荷別のパラメータ値を使って、角度の平均値 $\langle \theta \rangle$ から求めたエネルギースペクトルと、 $\langle \theta^2 \rangle$ から求めたものを図6に示す。二通りの仕方で求めたスペクトルの間には、大きな差異はみとめられない。図中の破線は、エネルギー誤差を考慮に入れたシュミレーション結果であり、これからスペクトルの巾は約2.5が妥当であることが分かる。この巾の値が決まれば、補正係数を求めることができ、これで補正した結果を表2に示す。

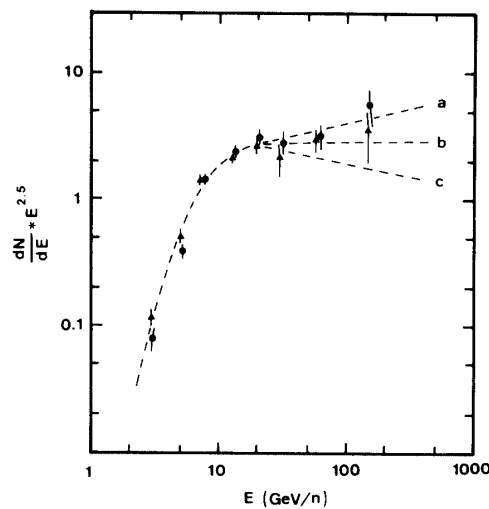


図6 opening angle法で求めた鉄核のエネルギースペクトル。ただし、補正は行なっていない。縦軸は、個数/( $\text{m}^2 \cdot \text{str} \cdot \text{sec} \cdot \text{GeV/n}$ )に $E^{2.5}$ を掛けたものである。  
●印は、二乗平均 $\langle \theta^2 \rangle$ から求めたデータで、▲印は、平均 $\langle \theta \rangle$ から求めたものである。破線は、エネルギー演定誤差を考慮したシュミレーション結果で、a, b, cは、微分スペクトルの巾2.3, 2.5, 2.7に対応している。

次に、他の実験結果と比較するために、 $\langle \theta^2 \rangle$ から求めた補正後のスペクトルを図7に示す。本実験結果は、opening angle法で求めた藤井氏の最近の結果[15]と実験誤差内で一致している。また、カロリメーターやチェレンコフ・カウンターのあるいは、マグネット・スペクトロメーターを使用した実験結果[1,2,3,4,5]とも良い一致がみられる。我々の結果は、10 GeV/nから100 GeV/nの領域でスペクトルの巾は、約2.5を示している。

最近のL/M比やsubFe/Feの実験結果は、高エネルギーの宇宙線ほど銀河から漏れ出す確率が大きくなることを示しており、100 GeV/n以上の領域になれば、スペクトルの傾きが、急になると予想されている。しかしながら、現在得られている実験結果(図7)からは、いまだ、その兆候をみることはできない。より高いエネルギーのデータが期待される。

表 2 鉄核エネルギースペクトルのデータ表

(a)は、角度の平均値 $\langle\theta\rangle$ から求めたスペクトル。  
 (b)は、 $\langle\theta^2\rangle$ から求めたものである。

data summary for primary charge of $25 < Z = < 27$ total = 294												
energy estimation from mean angle ; event selection : $N_h + N_a > = 3$												
log(E/1.0 GeV/n)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.4	
mean energy	1.24	1.96	3.10	4.92	7.80	12.4	19.6	31.1	58.9	147.8		
No. of event	3	3	25	45	78	58	36	14	17	5		
correction factor	***	***	(12.8)	2.98	1.08	0.682	0.571	0.551	0.546	0.557		
dI/dE(m <sup>2</sup> .str.sec.GeV/n) <sup>-1</sup>	***	***	(8.88E-2)	2.87E-2	9.30E-2	2.76E-3	9.04E-4	2.14E-4	6.28E-5	7.52E-6		
dI/dE * (E * 2.5)	***	***	(1.50)	1.54	1.58	1.48	1.53	1.15	1.67	2.00		
data summary for primary charge of $25 < Z = < 27$ total = 294												
energy estimation from root mean square angle ; event selection : $N_h + N_a > = 3$												
log(E/1.0 GeV/n)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.4	
mean energy	1.24	1.96	3.10	4.92	7.80	12.4	19.6	31.1	58.9	147.8		
No. of event	1	4	17	42	77	65	43	19	18	8		
correction factor	***	***	(12.8)	2.98	1.08	0.682	0.571	0.551	0.546	0.557		
dI/dE(m <sup>2</sup> .str.sec.GeV/n) <sup>-1</sup>	***	***	(2.63E-2)	2.19E-2	9.21E-3	3.09E-3	1.08E-3	2.90E-4	6.66E-4	1.20E-5		
dI/dE * (E * 2.5)	***	***	(1.02)	1.18	1.57	1.66	1.84	1.56	1.77	3.18		



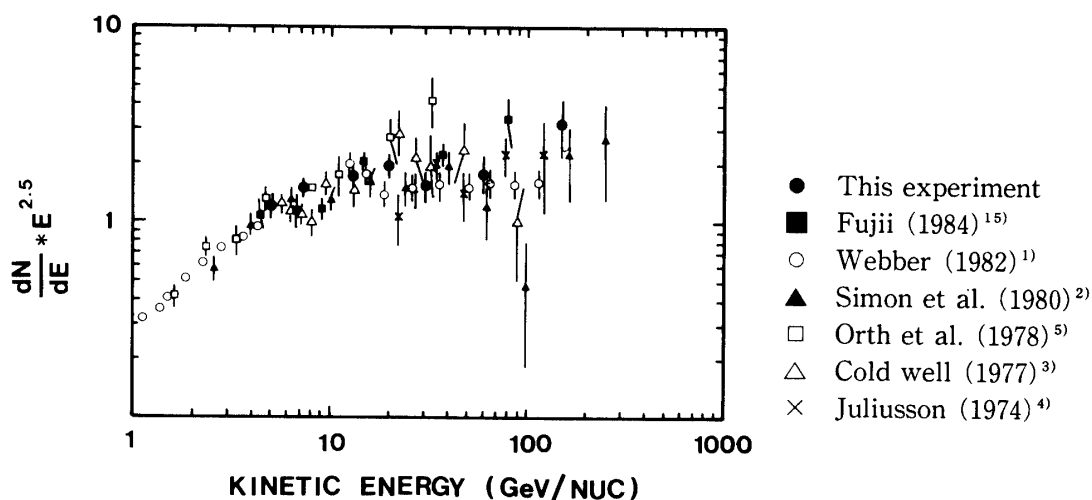


図7 鉄核のエネルギースペクトル,

## 6. まとめと今後の課題

プラスチックCR-39で電荷を決め、チェンバー内で起した鉄核の衝突から発生するフラグメントと、 $\alpha$ 粒子およびheavy粒子の角度を原子核乾板で測定し、opening angle法によって、鉄核のエネルギースペクトルを求めた。結果は、他の実験結果とよい一致を示し、エネルギー領域10 GeV/n~100 GeV/nにおいて、微分スペクトルの巾が約2.5である。

このopening angle法については、かねてより問題点が指摘されていたが、我々は、1.88 GeV/n鉄核の衝突データから、エネルギー推定誤差を求めることによって一応の解決を得ることができ、上述の結論を得た。しかしながら、その他に、その誤差分布の形が、エネルギーとともに変わらないという仮定も使っているため、その良否については、近々予定されている数10~数100 GeV/nの重イオンビームを使って実験的に調べる必要がある。

## 謝 辞

気球の放球と回収にわたって協力していただいた、宇宙科学研究所の西村研究室の皆様へ感謝します。現像とエッチングについては、東京大学宇宙線研究室のエマルジョン部門にお世話になり感謝致します。LBLのビームを用いた較正実験については、原子核研究所の橋本氏、および、名古屋大学の橋本氏にお世話になり感謝致します。

## 参 考 文 献

- [1] W. R. Webber: Composition and Origin of Cosmic Rays, edited by M. M. Shapiro (Reidel Publishing Company, 1983) p. 25
- [2] M. Simon et al.: Ap. J. 237 (1980) 712
- [3] J. H. Caldwell: Ap. J. 218 (1977) 269
- [4] C. Juliusson: Ap. J. 191 (1974) 321
- [5] C. D. Orth et al.: Ap. J. 226 (1978) 1147

- [6] T. Saito et al.: J. Phys. Soc. Jpn. 37 (1974) 1462
- [7] R. Kullberg and I. Otterlund: Z. Physik 259 (1973) 245
- [8] S. Tasaka et al.: Nucl. Instr. and Meth. 236 (1985) 400
- [9] 佐藤禎宏等：宇宙科学研究所報告，特集第8号（1983）P.119
- [10] 佐藤禎宏等：宇都宮大学教育学部紀要，第35号（1984）P.17
- [11] T. Doke et al.: 大気球シンポジウム報告（1982）158
- [12] P. S. Freier et al.: Can. J. Phys. 46 (1968) 578
- [13] T. Saito: J. Phys. Soc. Jpn. 30 (1971) 1535
- [14] W. R. Webber et al.: Astrophys. Space Sci. 15 (1973) 96
- [15] M. Fujii: 宇宙科学研究所報告第22号（1984）
- [16] 井上葵等：宇宙科学研究所報告，特集第1号（1981）P.79