

重一次宇宙線の観測と原子核・原子核衝突の研究*

佐藤 禎宏**・太田 周**・田阪 茂樹***・
杉本 久彦†・平良 邦夫†・立山 暢人††
星野 香#・不室 文人##

(1983年5月27日受理)

High Energy Primary Iron observed with Emulsion Chamber and High Energy Heavy Nucleus-Nucleus Collisions

By

Yoshihiro SATO, Itaru OHTA, Shigeki TAsAKA,
Hisahiko SUGIMOTO, Kunio TAIRA,
Nobuhito TATEYAMA, Kaoru HOSHINO and Fumito FUMURO

Abstract: Relativistic cosmic heavy nuclei were detected in a chamber composed of a pile of solid track detector (CR-39) and the nuclear emulsion plates. The chambers were exposed by balloon flights at SANRIKU BALLOON CENTER. The integral flux of cosmic Fe-nuclei at the top of atmosphere is estimated to be $I(\geq 4.1 \text{ GeV/n}) = (7.45 \pm 0.51) \times 10^{-2}$ per $\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{sec}$. The multiplicity and angular distributions of secondary charged particles in Fe-nucleus collisions are presented.

-
- * 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
 - # 名古屋大学理学部
 - ## 大阪大学基礎工学部

1. はじめに

入射エネルギーが 10 GeV/n～数 100 GeV/n 領域の重一次宇宙線(VH 核)の観測と、原子核・原子核衝突の研究を目的として、過去 3 回('80, '81, '82)にわたりプラスチック CR-39 を挿入したエマルジョン・チェンバーを用いて気球実験を行なってきた。

エマルジョン・チェンバーを用いて重一次宇宙線を観測する実験は既に行なわれているが[1], 実験上解決すべき課題があった。それを列記すると、

- 1) VH 核の電荷の決定
- 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。本実験では、1), 2)について、プラスチック CR-39 を用いることで、一応の解決を得た。また、3)の課題については、二つの方法、すなわち(i)宇宙線で得られる高エネルギー VH 核衝突現象の系統的調査、(ii)LBL (Lawrence Berkley Laboratory) 重イオン加速器の 1～2 GeV/n Fe ビームを用いた較正実験、等で解決を試みているが、まだ結論を得ていないので、今回、鉄核の入射エネルギーの決定は行なっていない。

この報告では、プラスチック CR-39 を用いて電荷を決定し effective cut-off energy 値での鉄核のフラックス強度を示す。次に、CR-39 を用いた追跡方法でみつけた鉄核衝突事例の多重度および角分布について示す。今回の結果は、これまでの実験で捕えられているデータのうち一部によるものであり、残りについても解析中であり、今後報告してゆく予定である。

2. 実験経過とチェンバーデザイン

プラスチック CR-39 を挿入したエマルジョン・チェンバーを用いた観測を、三陸気球基地で行なってきたが、各観測の詳細と特徴を表 1 にまとめを示す。

#1 ('80) と #2 ('81) のチェンバーは、ほぼ同じ構造で、これまで気球実験で用いられてきた発生層付エマルジョン・チェンバーの発生層部分に、プラスチック CR-39 を挿入した構造になっている。その例として #2 ('81) を図 1 a に示す。

#3 ('82) は、VH 核の観測に目的を絞ったために、高エネルギーガンマ線測定用の E. C. C. 部分を取り除いた。このことによって重量が軽くなった分だけ、チェンバーの個数を増

表 1 実験経過

	# 1 ('80)	# 2 ('81)	# 3 ('82)
Launching	三 陸	三 陸	三 陸
チェンバー の大きさ	40×50cm ² 1 ch. E.C.C.付き	40×50cm ² 1 ch. E.C.C.付き	40×50cm ² 6 ch. E.C.C.なし
観測時間	30時間	5.25時間	15.5時間
観測高度	13mb	8.9mb	7.6mb

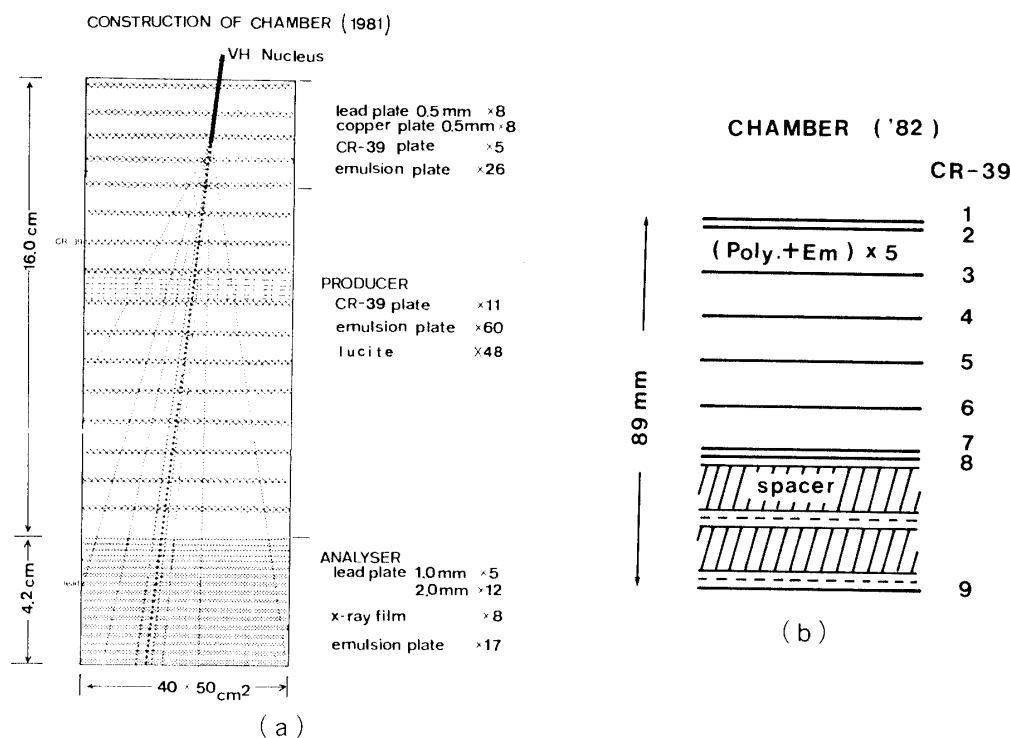


図1 a, b チェンバーデザイン(a)#2('81) (b)#3('82)

やし面積を広くしている。#3 ('82) のデザインを図1 bに示す。

3. 実験方法

3.1 プラスチック CR-39 のエッチング処理

過去3回にわたり行なったエッチング処理法と、その結果について、表2に示す。

○チェンバー#1 ('80) について

エッチング処理設備の不備から、NaOH 溶液そのものの攪拌を行なわなかったために、深さによる温度勾配ができた。これを補正するために、電荷を決めるときに、bulk etch rate の深さによる依存を考慮してデータ処理を行なうことで解決を図った。

○チェンバー#2 ('81) について

#1の結果を考慮した処理方法を採用することで良好な結果を得た。CR-39の性能は、#1のものと同様であった。また、VH核を裸眼で見つけ出せるよう、一部のCR-39について、長時間エッチングを試み、良い結果を得た。これについては、Appendixに述べる。

○チェンバー#3 ('82) について

CR-39の材質が、#1、#2のものと比較して悪く、エッチング後の表面状態が荒れており、透明度が悪い。テストを繰り返した結果、電荷決定用と位置検出用、それぞれの目的によってプラスチックを分け、表2の様に行なった。ここで、表面状態の荒れを少なくするために、エッチング中超音波を使用することは、少なからず効果があった。

表2 プラスチック CR-39 のエッチング処理法

チェンバー	エッチング条件	bulk etch rate	材 料	備 考
# 1 ('80)	6.8N NaOH溶液 70°C 32時間	約1.61 μ m/hr	ソーラーオフティカル ジャハン社 '80年3月製	◦ NaOH溶液を攪拌しなかつたため、温度勾配あり。
# 2 ('81)	7N NaOH溶液 70°C 30, 25時間	約1.7 μ m/hr	ソーラーオフティカル ジャハン社 '81年3月製	◦ NaOH溶液攪拌 ◦ 結果良好
	8N NaOH溶液 80°C 94時間	約6.5 μ m/hr		
# 3 ('82)	8N NaOH溶液 60°C 30時間	約1.3 μ m/hr	ソーラーオフティカル ジャハン社 '82年2月製	◦ NaOH溶液攪拌 ◦ エッチング中超音波使用 ◦ エッチング後、透明度悪い。
	8N NaOH溶液 80°C 80時間	約8.6 μ m/hr		

3.2 VH核のスキヤニングと電荷の決定

チェンバーの最上部にあるCR-39に対して、総合倍率約20倍で、表と裏に対応するコーンがあることを基準として探索を行なった。それぞれのコーンについて、短径 (D_b) および dip angle $\sin \delta$ を測定した。またエッチング処理から bulk etch rate (B) を求めておき、次式を用いて、excess etch rate $V_t/V_b - 1$ を求めた。

$$\frac{V_t}{V_b} - 1 = \frac{1 + (D_b/2B)^2}{[1 - (D_b/2B)^2] \sin \delta} - 1$$

○チェンバー#1 ('80) について

コーンの短径を顕微鏡の接眼マイクロメータで測定した。bulk etch rate (B) は、エッチングした時の深さによって異なるために、 $2B = a + bt$ (ここで t は深さ) と近似し、データを深さによって区分し、鉄ピークの値が $\sin \delta = 1.0$ において $V_t/V_b - 1 = 1.3$ になるようにパラメータ a, b を決めた。その結果を、図2に示す。図から判るように excess etch rate は dip angle に依存するので、 $V_t/V_b - 1 = a + b(1 - \sin \delta)$ で近似し、この直線に直交する軸 (図2の破線) に射影した分布を荷電分布とした。(図3 a) ここで、 $V_t/V_b - 1 \propto a \exp(bZ) - 1$ と与えられるとして、Fe と Si の値を使い、各 Z に対応する $V_t/V_b - 1$ の値を矢印で示した。Fe についての FWHM は約 1.5 である。

○チェンバー#2 ('81) について

コーンの短径を#1 ('80) とは異なり、TVカメラを使ったエッジトラッカーシステムを使って測定した。その後のデータ処理を#1 ('80) の場合と同様に行ない、 $\sin \delta$ 依存性も考慮して求めた結果を図3 bに示す。ここで、鉄核の $\sin \delta = 1$ での値は $V_t/V_b - 1 = 1.3$ であった。電荷決定精度が接眼マイクロメータによる測定より良くなっており、Fe の

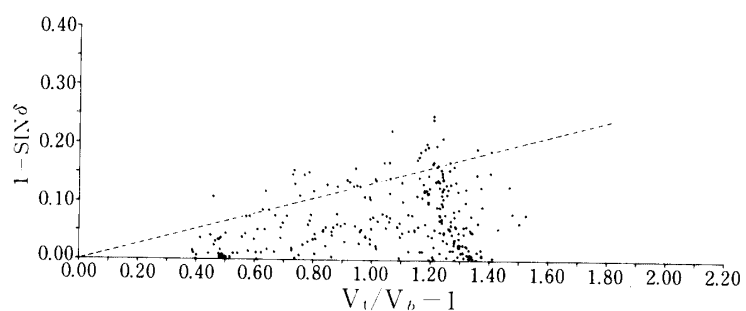
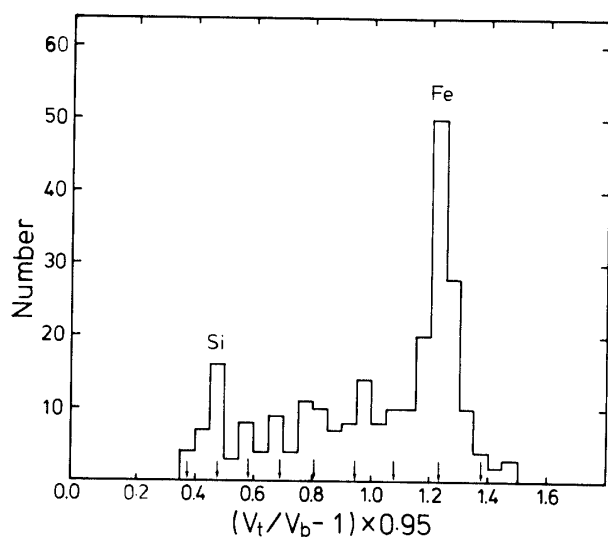
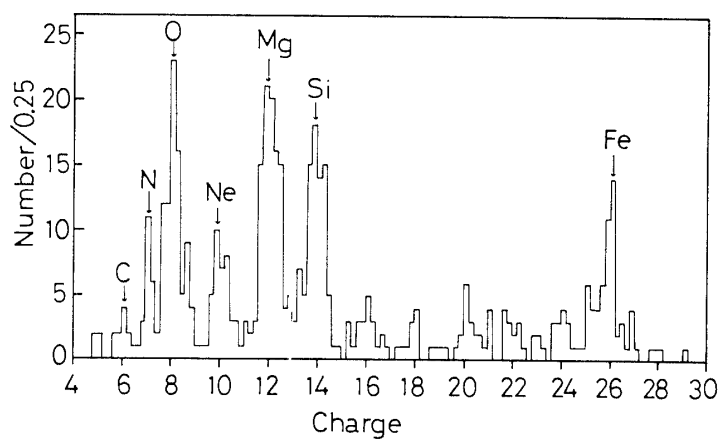


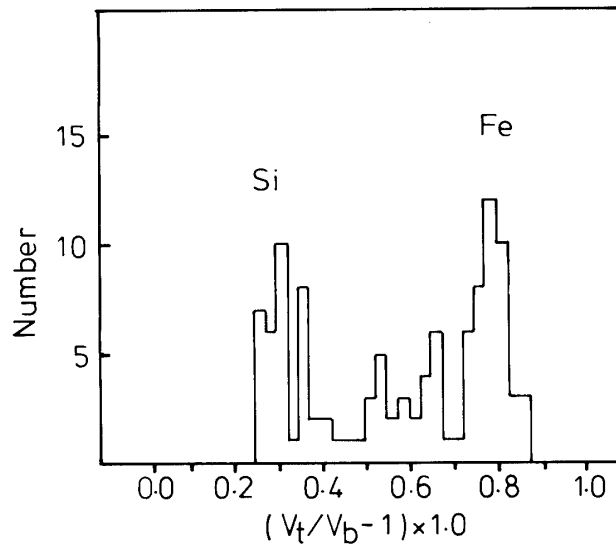
図2 Excess etch rate と dip angle の相関図 [# 1('80)の結果]



(a) # 1('80)の結果



(b) # 2('81)の結果



(c) #3('82)の結果

図3 a, b, c CR-39による電荷分布

FWHMは約0.6である。

○チェンバー#3('82)について

プラスチックCR-39の素材は、チェンバー#1, #2のものとは異なる性質を有していたので、この素材を用いてLBLの1 GeV/n Feビームによる較正実験を行なった。その結果次のことが明らかになった。a) $V_t/V_b - 1$ の $\sin \delta$ 依存性が非常に少ない。b) 鉄核に対して $V_t/V_b - 1 \approx 0.8$ である。これらを考慮した解析結果を図3cに示す。鉄核のFWHMは、約2.0である。

3.3 VH核の追跡と発生二次粒子の測定

チェンバー最上部のCR-39でみつけれられたコーンのうち、 $V_t/V_b - 1 \geq 1.15$ でかつ $\sin \delta \geq 0.9$ の値を持つ事象について、下流に追跡を行なった。この条件のコーンは、総合倍率40倍で、次のCR-39に容易に対応付けることができる。 $V_t/V_b - 1 \geq 1.15$ は、ほぼFe核以上であることを意味する。また、 $\sin \delta \geq 0.9$ の条件は強い制限ではあるが、これは原子核乾板中で発生二次粒子とバックグラウンドのトラックとの区別が容易にできることと、比較的大きな角度に発生した二次粒子の見落としを避けるという理由による。

CR-39上でコーンを下流方向に対応付け、かつ短径を測り、その大きさが約 $5 \mu\text{m}$ 以上減少した場合、または対応するコーンがない場合には、CR-39間に挿入してある原子核乾板に総合倍率100~200倍で対応付けることにより、VH核によって引き起こされた衝突現象を見つけ出した。そのまとめを表3に示す。

衝突で発生した二次粒子の測定においては、衝突点に最も近い乾板から数層にわたってトラックの位置を総合倍率約500倍の顕微鏡視野内で測定した。衝突点はエマルジョン内で衝突が起っている場合以外は見えないので、発生二次粒子の収斂から推定した。衝突後

フラグメントがある場合には、それを入射軸とみなし発生角度を求め、それがない場合には、最前方部の特定のトラックを軸として角度を求めた。

表3 追跡結果 [$V_t/V_b \geq 1.15$ and $\sin \delta \geq 0.9$ について]

Target	Path length (mm)	No. of collision
Pb	133.	3
Cu	124.	3
Em	333.	6
CR-39	564.	3
lucite	3011.	27
paper	413.	0
total	4577.	43

4. 実験結果と検討

4.1 鉄核のフラックス強度

鉄核が大気頂上から気球高度の深さまで通過する間に、一部はより小さな VH 核に壊れることを考慮すると一次宇宙線情報のデータを求めるためには、VH 核のフラックス強度を求めるよりは、鉄核のものを求めた方が誤差が小さいと考えられる。プラスチック CR-39 を用いて鉄核を選び出し、その空気中での平均自由行程を $\lambda(\text{Fe}-\text{Air})=15.4 \text{ gr/cm}^2$ として大気頂上での強度を求めた。まとめを表4に示す。重みつき平均のフラックス値は、

$$I(\geq 4.1 \text{ GeV/n}) = (7.45 \pm 0.51) \times 10^{-2} \quad (\text{m}^2 \text{ str sec})^{-1}$$

である。ここで、4.1 GeV/n は、三陸基地上空での鉄核の effective cut-off energy である。VH 核のフラックスを、比較のために他の実験結果を含め図4に示す。

表4 鉄核のフラックス強度のまとめ

	Time (hour)	Depth (g/cm ²)	Area (cm ²)	FWHM of Fe	No. of Fe ($\sin \delta \geq 0.85$)	SQT (m ² ·sec·str)	Flux (m ² ·sec·str) ⁻¹
# 1 ('80)	30.0	13.3+1.3	414	1.5	107	4242	$(7.1 \pm 0.7) \times 10^{-2}$
# 2 ('81)	5.25	9.0	346.5	0.6	23	617	$(7.0 \pm 1.5) \times 10^{-2}$
# 3 ('82)	15.5	7.7	460.	1.5	38	819	$(8.7 \pm 1.4) \times 10^{-2}$
				2.0	48	1051	$(7.8 \pm 1.1) \times 10^{-2}$
						Average	$(7.45 \pm 0.51) \times 10^{-2}$

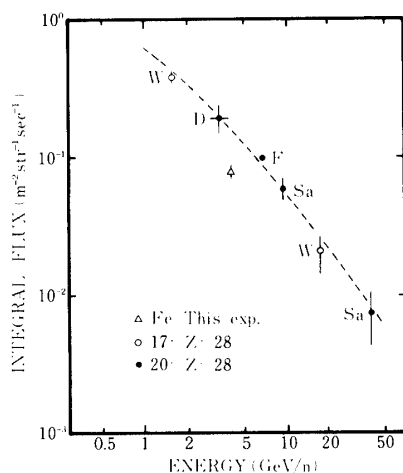


図4 VH核および鉄核のフラックス強度

D : Doke et al.(1981) [2] F : Freier at al.(1968) [3]

Sa : Saito(1971) [4] W : Webber et al.(1973) [5]

4.2 鉄核衝突イベントの多重度と $\log \tan \theta$ 分布

鉄核衝突イベントのうち、CR-39 にコーンを残しているフラグメントを持つもの、持たないもの、および、多重度が40以上のイベントに分けて、リストとして表5に示してある。ここでCR-39にコーンがあるものの電荷は、約 $Z \geq 6$ である。

○発生二次粒子の多重度

電荷1の粒子の個数 (n_s) とそれ以外の α 粒子およびそれより大きな電荷を持つ粒子の個数 ($n_a + n_f$) の相関図を図5に示す。これより次の特徴を上げることができる。

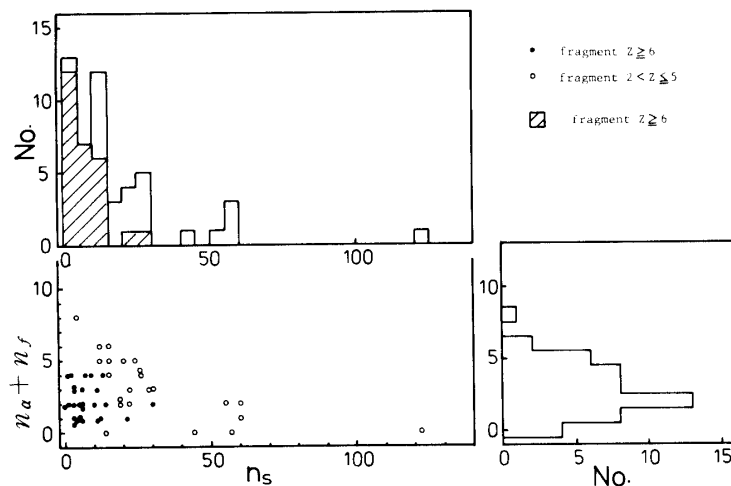


図5 鉄核衝突イベントの多重度相関

n_s : 電荷1の粒子の多重度

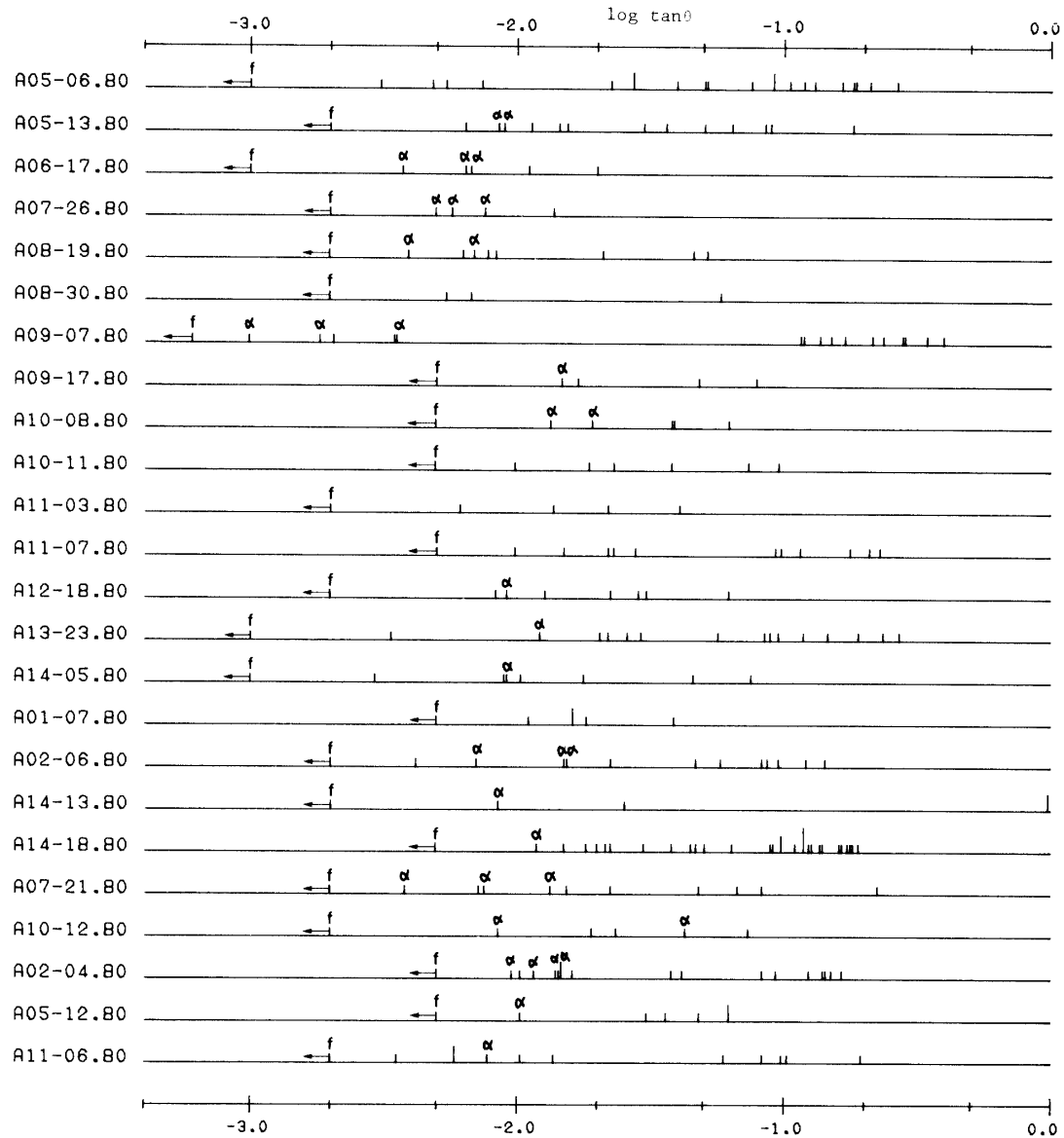
$n_a + n_f$: 電荷2以上の粒子の多重度

- (i) $Z \geq 6$ のフラグメントを伴うイベントについては、多重度 n_s は小である。
- (ii) $N(n_a + n_f > 3) / \text{total} = 0.5$ である。
- (iii) 例数は少ないが、 n_s の非常に大きなイベントがある。鉄核がすべて $Z=1$ の粒子に崩壊しても多重度 26 である事実を考えるならば、きわめて効率的な粒子発生機構が働いているものと予測される。

○発生二次粒子の $\log \tan \theta$ 分布

表5に示したイベントの $\log \tan \theta$ を図6に示す。ここで、 f と h はそれぞれ $Z \geq 6$ と $3 \leq Z \leq 5$ のフラグメントを表わし α は $Z=2$ の粒子を示す。また矢印は、この粒子を入射軸と仮定し放出角度を求めたことを意味する。

図より、 α 粒子は前方に集中しているが、電荷1の粒子は、各イベントごとに多様な様相を示している。また、多重度の大きなイベント (A01-15.80) の特徴は、 $\log \tan \theta$ の約1レンジ内に多数の粒子が発生しており、等方崩壊の様相を示している。



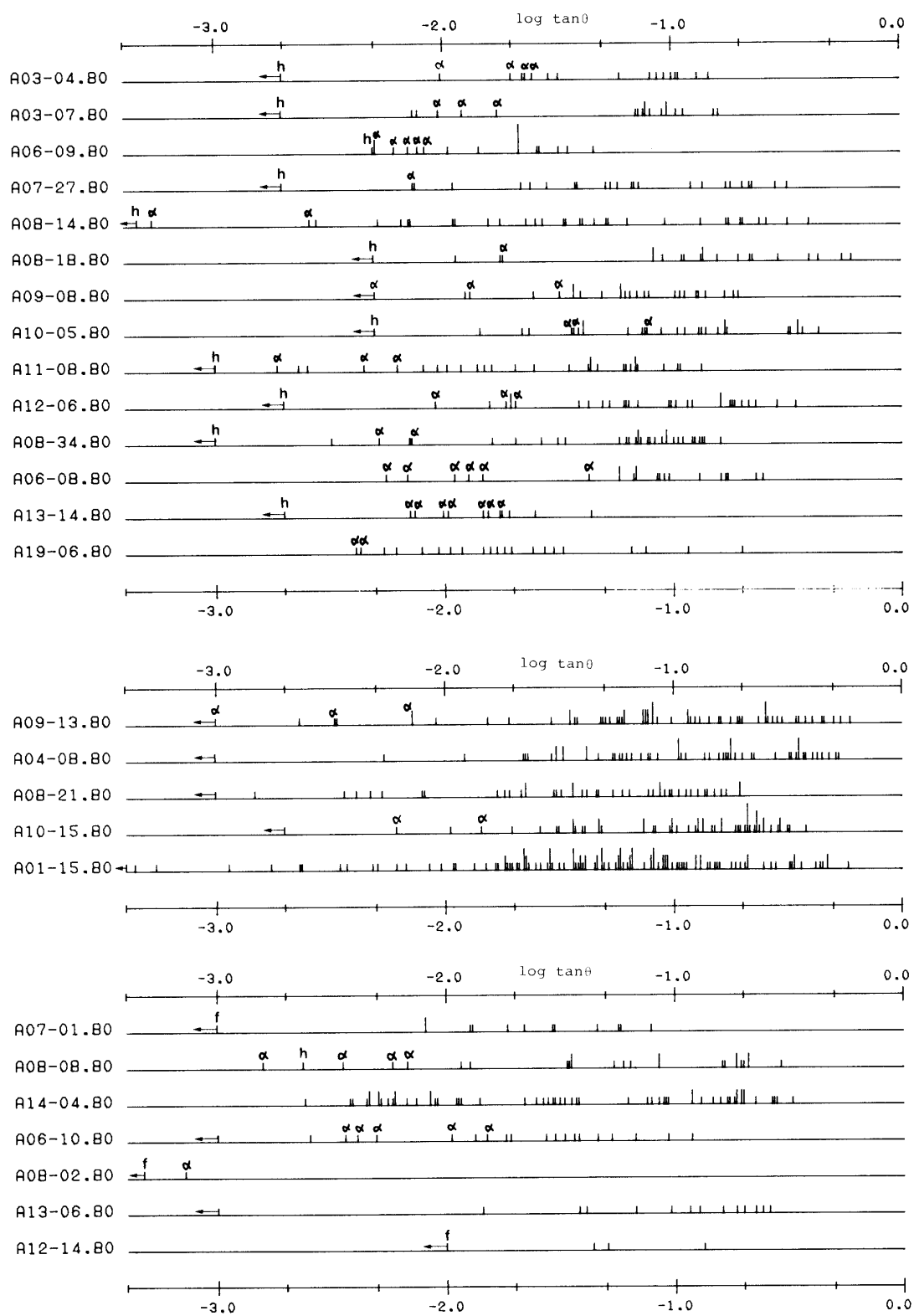


図6 鉄核衝突イベントの発生二次粒子 $\log \tan \theta$ 分布

表5 鉄核衝突の測定イベントリスト
 Sanriku Balloon Chamber in 1980 $V_t/V_b-1 \geq 1.15$, $\sin \delta > 0.9$

NO.	Name	$\tan \theta$	Primary	Target	singly	alpha	$3 \leq Z \leq 5$	$6 \leq Z$ (CR-39)
1	A05-06.80	0.38	Fe	lucite	21	0	0	1
2	A05-13.80	0.377	*28	lucite	11	2	0	1
3	A06-17.80	0.323	Fe	lucite	2	3	0	1
4	A07-26.80	0.128	Fe	lucite	1	3	0	1
5	A08-19.80	0.33	*28	lucite	6	2	0	1
6	A08-30.80	0.12	Fe	lucite	3	0	0	1
7	A09-07.80	0.309	Fe	lucite	13	3	0	1
8	A09-17.80	0.117	Fe	lucite	3	1	0	1
9	A10-08.80	0.389	Fe	lucite	3	2	0	1
10	A11-11.80	0.191	Fe	lucite	6	0	0	1
11	A11-03.80	0.253	Fe	lucite	4	0	0	1
12	A11-07.80	0.191	Fe	lucite	11	0	0	1
13	A12-18.80	0.448	Fe	lucite	6	1	0	1
14	A13-23.80	0.237	Fe	lucite	14	1	0	1
15	A14-05.80	0.178	Fe	lucite	6	1	0	1
16	A01-07.80	0.166	Fe	CR-39	5	0	0	1
17	A02-06.80	0.275	Fe	Em	9	3	0	1
18	A14-13.80	0.417	Fe	Em	1	1	0	1
19	A14-18.80	0.214	Fe	Em	30	1	0	1
20	A07-21.80	0.1	Fe	Cu	7	3	0	1
21	A10-12.80	0.088	Fe	Cu	3	2	0	1
22	A02-04.80	0.176	Fe	Pb	13	4	0	1
23	A05-12.80	0.375	Fe	Pb	5	1	0	1
24	A11-06.80	0.272	Fe	Pb	10	1	0	1
1	A03-04.80	0.484	Fe	lucite	12	4	1	0
2	A03-07.80	0.188	Fe	lucite	15	3	1	0
3	A06-09.80	0.352	Fe	lucite	12	5	1	0
4	A07-27.80	0.271	Fe	lucite	22	1	1	0
5	A08-14.80	0.371	Fe	lucite	30	2	1	0
6	A08-18.80	0.481	Fe	lucite	19	1	1	0
7	A09-08.80	0.314	Fe	lucite	22	3	0	0
8	A10-05.80	0.323	Fe	lucite	24	4	1	0
9	A11-08.80	0.095	*24	lucite	26	3	1	0
10	A12-06.80	0.336	Fe	lucite	26	3	1	0
11	A08-34.80	0.461	0.164 Fe	CR-39	29	2	1	0
12	A06-08.80	0.164	Fe	Em	15	6	0	0
13	A13-14.80	0.217	Fe	Em	4	2	6	0
14	A19-06.80	0.236	Fe	Pb	19	0	2	0
1	A09-13.80	0.423	*24	lucite	60	3	0	0
2	A04-08.80	0.337	Fe	CR-39	57	0	0	0
3	A08-21.80	0.102	Fe	Em	44	0	0	0
4	A10-15.80	0.313	Fe	Cu	55	2	0	0
1	A01-15.80	0.114	Fe	lucite	122	0	0	0
1	A07-01.80	*0.65	Fe	lucite	12	0	0	1
2	A08-08.80	*0.753	Fe	lucite	20	4	1	0
3	A14-04.80	*0.605	Fe	lucite	60	0	1	0
4	A06-10.80	*0.502	Fe	CR-39	15	5	0	0
5	A08-02.80	*0.589	Fe	Em	0	1	0	1
6	A13-06.80	*0.635	Fe	Cu	14	0	0	0
7	A12-14.80	*0.564	Fe	Pb	3	0	0	1

5. ま と め

プラスチック CR-39 と原子核乾板からなるエマルジョン・チェンバーの気球飛揚実験を行ない、現在までの解析の結果、次のような結果が得られた。

- (1) CR-39 による電荷決定精度は、鉄核に対して FWHM で $0.6 < \Delta Z < 2.0$ であった。この判定による鉄核のフラックスは

$$I(\geq 4.1 \text{ GeV/n}) = (7.45 \pm 0.51) \times 10^{-2} (\text{m}^2 \text{ sec str})^{-1}$$

である。

- (2) CR-39 を用いることによって衝突イベントの探索効率を向上することが可能であり、鉄核衝突の二次粒子の多重度、角度分布の特徴を調べることができた。

今後は、「はじめに」で述べたように、LBL 重イオン加速器の Fe ビームを用いた較正実験を行ない、その結果を用いて、入射エネルギーを推定し、エネルギースペクトルを求めることを課題とする。また、今回の測定データは、実験で捕えたイベントの一部であり、残りについては今後報告してゆく予定である。

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致します。現像とエッチングについては東京大学宇宙線研究所のエマルジョン部門にお世話になり感謝致します。

Appendix

裸眼による VH 核の探索を可能にするために、CR-39 に対して長時間エッチング処理 (8N NaOH 溶液, 80°C, 94 時間) を行なった。この CR-39 を 4 層重ねることにより、飛跡の追跡が可能である。この様子を写真 1, 2 に示す。

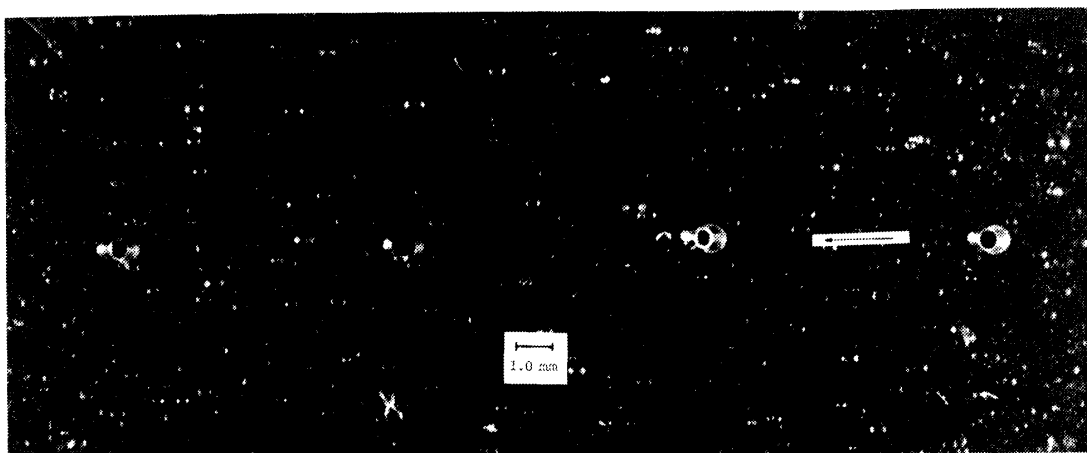


写真1 鉄核 (短径 $D_b = 771 \mu\text{m}$) が衝突を起こすことなく 4 層を通過している。

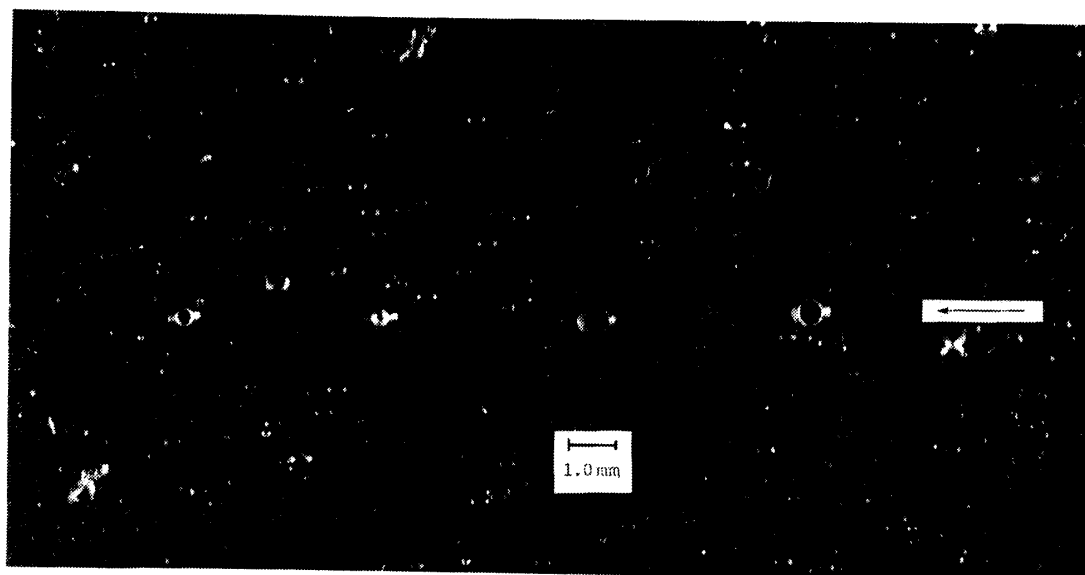


写真2 鉄核 ($D_b=738 \mu\text{m}$) が、第2層と3層の間で衝突を起している例である。

参考文献

- [1] Saito, Sato, Sugimoto, Matsubayashi and Noma, J. Phys. Soc. Japan, **37**, 1462 (1974)
- [2] 道家他, 大気球シンポジウム報告 (昭和56年度) P.131 (1981)
- [3] Freier et al., Can. J. Phys., **46** S578 (1968)
- [4] Saito, J. Phys. Soc. Japan, **30**, 1534 (1971)
- [5] Webber et al., Astrophys. Space Sci., **15**, 96 (1973)