

『軽量型エマルションチェンバーによる重一次宇宙線観測』

川村 泰弘¹⁾・松谷 秀哉¹⁾・南條 宏肇¹⁾・斎藤 真¹⁾
渡辺善二郎¹⁾・市村 雅一²⁾・上岡 英史²⁾・桐井 敬祐²⁾
小林 正²⁾・柴田 徹²⁾・渋谷 一夫²⁾
杉本 久彦³⁾・仲沢 和馬⁴⁾

Observation of heavy cosmic-ray primaries by means of
light-weight-type emulsion chamber

By

Yasuhiro KAWAMURA, Hideya MATSUTANI, Hirotada NANJYO, Zenjiro WATANABE, Masakatsu ICHIMURA, Eiji KAMIOKA, Keisuke KIRII, Tadashi KOBAYASHI, Toru SHIBATA, Kazuo SHIBUTA, Hisahiko SUGIMOTO, and Kazuma NAKAZAWA

Abstract: We have exposed an emulsion chamber with full use of screen-type X-ray film at a level of 11.7 g/cm^2 for $\sim 20\text{h}$. Our chamber consists of a sandwich of stainless target ($500 \mu\text{m}$ thickness each) and sensitive materials such as Fuji #200-type X-ray film (non screen type), nuclear emulsion plate and screen-type X-ray film (Fuji Grenex HR-8 + Fuji RXO-H film). Since electromagnetic calorimeter layer is removed, it makes possible to construct large size emulsion chamber with light weight.

We discuss the possibility of a screen-type X-ray film for the observation of heavy cosmic ray primaries, and report preliminary results obtained by this observation, particularly on an interesting event showing an extremely penetrative nature in the atmosphere with high effective charge, $Z=36\sim 40$.

¹⁾ 弘前大学理学部

²⁾ 青学大理工

³⁾ 相模工大

⁴⁾ 岐阜大教育

概 要

スクリーン型X線フィルムを多層的に挿入した新しいタイプのエマルジョンチェンバーを気球に搭載して高度 11.7 g/cm², 露出時間~20h で重一次宇宙線の観測を行った. このチェンバーは, 従来の電磁シャワー検出層であるカロリメータ部をとりはずし, ステンレス板 (一枚の厚さは 500 μm), 原子核乾板, 富士 200 型 X-ray film (ノンスクリーン型), スクリーン型 X-ray film (富士 Grenex HR-8+富士 RXO-H) のサンドイッチからなるターゲット層のみで構成されている. 従って, 鉛等の重い吸収層を使用しないため, 大面積, 大立体角の軽量型エマルジョンチェンバーの製作が可能となった.

スクリーン型X線フィルムを重一次線観測用に使用した場合の効率, 性能について議論すると同時に, 観測結果の予備解析結果, 特に高荷電で極めて貫通力の大きな一次線を報告する.

1. はじめに

高エネルギー重一次宇宙線 (含陽子, α) の観測は, 宇宙線の起源, 加速機構を探る上で貴重な情報を与えてくれる. 勿論これらの問題は, 一次電子, γ線, X線等の観測からいろいろ議論され, 宇宙線の寿命, 伝播機構に関して重要な結果が得られてきた. 従って, これらをすべて“粒子線”天文学という観点から見れば, 各粒子成分間の internal consistency をチェックすることは必要なことであり, 又エネルギー領域も違っていているわけであるから, それぞれの成分の相互関連をつけることは, エネルギー依存性を知る上で極めて興味あることである.

我々はこのような観点から, 1987年より気球を使って一次宇宙線の観測を始め, 陽子から鉄核にいたる巾広い成分についてデータが得られた. 勿論, 重粒子成分についてはまだ十分な統計量に達していないので, 伝播問題に対する説得力ある speculation は今少し先になるであろう. 表1にこれまでの観測状況をまとめる. 1987年度のチェンバー (CH.1) は orthodox な重量型カロリメータエマルジョンチェンバーであり, 1988年度は軽量型チェンバーへの移行のためのテストチェンバー (CH.2) である. これらの成果をふまえて, 我々は1989年度に本格的な軽量型大面積エマルジョンチェンバー (CH.3) を気球に搭載し, 重一次線の観測を行った. 2では軽量型チェンバーの構造, 性能について概観し, 3では

表1 これまでの我々の気球観測状況

CH.No.	放 球 日	露出時間(sec)	チェンバー面積(cm ²)	チェンバー重量(kg)	観測高度(g/cm ²)
1	1987年 5月25日	11.18×10 ⁴	4.00×10 ³	200	32.8
2	1988年 5月28日	7.09×10 ⁴	3.05×10 ³	150	19.4
3	1989年 5月25日	6.96×10 ⁴	15.50×10 ³	250	11.7

CH.3の予備解析結果を報告する。特に、このチェンバーで検出された、高荷電で貫通力のある一次線の例を報告する（CH.1, CH.2の結果は、文献[1], [2]を参照）。4では今後の課題についてまとめる。

2. 軽量型エマルジョンチェンバーの構造と性能

従来のエマルジョンチェンバーは、核衝突によって放出された γ 線 ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) が引起こす電磁カスケードシャワーをトリガーすることによって入射粒子を検出してきた。従って、吸収層（カロリメーター層）として重量のかさむ鉛板を大量に使用するためチェンバーの大型化は極めて困難であった。これに対して、もしも核衝突によって生ずる荷電二次粒子（大部分 π^\pm 中間子）を直接検出することができれば（ジェットトリガー方式）、重量のかさむ吸

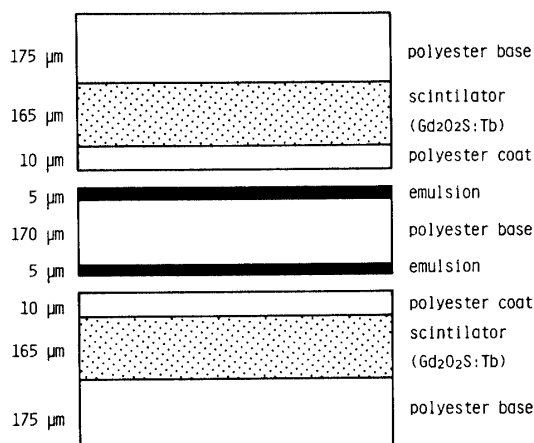


図1 我々が使用しているスクリータイプX線フィルムの構造。

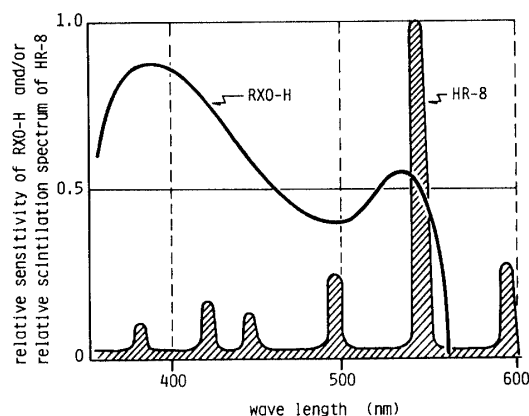


図2 Scintillator ($Gd_2O_2S:Tb$)の光の発光スペクトル(斜線部分)とRXO-Hフィルムの分光感度特性。

収層が不要となりチェンバーの大型化が可能となる。しかも電磁シャワーから衝突点まで追いつける作業、いわゆる tracing 作業が不要となり、重粒子の衝突点検出の作業効率は飛躍的に増大するであろう。従来の tracing 作業による重粒子核衝突の検出割合は、たかだか～数10例/flight であるが、ジェットトリガー方式では、～数1000例/flight のオーダーに達する。このような目的のために最も可能性のある検出器がスクリーン型X線フィルム（以後 SXF と略す）である。SXF は、最近 Nishimura らによって一次電子のシャワー検出限界を下げるために使用されたが、同時に重粒子飛跡、そしてジェットシャワーの検出にも有効であることが指摘されていた。（文献[3]）

図1に我々が使用している SXF の構造を示そう。図をみてわかるように、Scintillator ($Gd_2O_2S:Tb$) 部で発光した光が、挿入されているX線フィルム (RXO-H) を感光させるわけである。光の発光スペクトルとフィルムの感度を図2に示すが、シンチレータ (HR-8) と RXO-H が良い組み合わせであることがわかる。

SXF による電荷の決定にはシンチレータ内での光拡散について考察しておく必要がある。そのため我々はまずシンチレータの厚さ d を変えて、透過率の測定を行った。この場合の使用波長は図2を考慮して540 nm にとった。図3にその結果を示そう。

透過率は、結晶内での吸収の m.f.p. λ_a と反射の m. f. p. λ_r を導入すると、以下のように書き表すことができる。

$$T(d) = \frac{\sinh(\delta)}{\sinh(\sqrt{3}d/\Lambda + \delta)} \quad (1)$$

$$\text{ただし, } \frac{1}{\Lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_r^2}, \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_r} + \frac{1}{\lambda_a}$$

$$\delta = \ln \sqrt{\frac{\delta+1}{\delta-1}} \quad \text{and} \quad \delta = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\Lambda}{\lambda}$$

式(1)より、 $\lambda_r \rightarrow \infty$ (no reflection) では

$$T(d) \approx \exp[-\sqrt{3}d/\lambda_a] \quad (2)$$

一方 $\lambda_a \rightarrow \infty$ (no absorption) では

$$T(d) \approx 1/(1+2d/\lambda_r) \quad (3)$$

図3をみると、後者の場合が測定結果を再現しているようであり、 $\lambda_r = 40 \sim 50 \mu\text{m}$ と推定される。

我々はこの λ_r を使用して重粒子がシンチレータ内で放出する光の量をシミュレーション法によってもとめた。さらに光量とフィルムの黒化度との関係からいろいろな重粒子に対する黒化度を求めることができる。（文献[4]）ここでは紙面の都合で結果のみを図4に示す。尚電荷の絶対値は CR39 より決定している。現時点では、分解能は CR39 に及ばないが重粒子スポットの形状も考慮するとさらに向上するであろう。（文献[5]）

我々はこのような性質を持った SXF を多層的に挿入したチェンバーを製作し、1989年5月に三陸大気球基地より放球した。図5にチェンバーの構造を示す。この中で Fuji 200

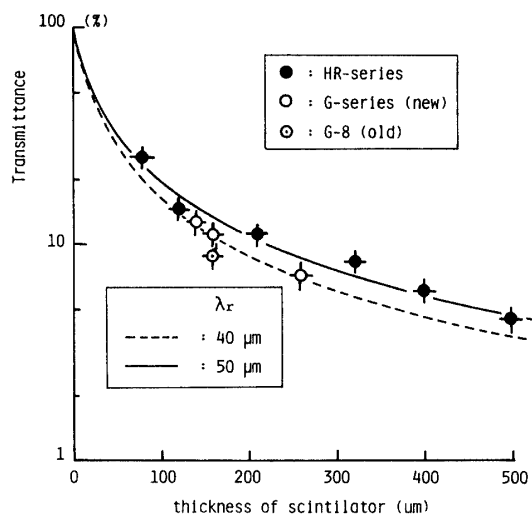


図3 Scintillatorの透過率の厚さによる変化.

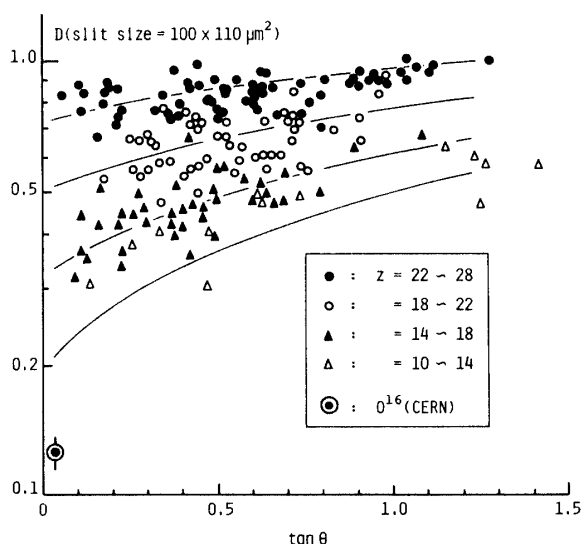


図4 天頂角とRXOフィルム上の重粒子スポットの黒化度の相関.

TYPE X-RAY FILMも使用しているが、これはノンスクリーンタイプのフィルムであり、大多重度の核衝突を容易に検出するために挿入した。チェンバーの厚さは斜め効果を考慮すると、鉄核で ~ 1 collision m.f.p.である。1ユニット(14インチ \times 17インチ)の重量は ~ 25 kgであり、我々はこのようなチェンバーを10ユニット製作した。

航跡図を図6に示そう。日没効果のため若干の高度のふれがあるので、有効高度(effective height)を計算し、それを表2にまとめる。有効高度は、一次線の吸収のm.f.p.が関係するので粒子別に示してある。観測は成功しチェンバーは無事三陸沖で回収された。

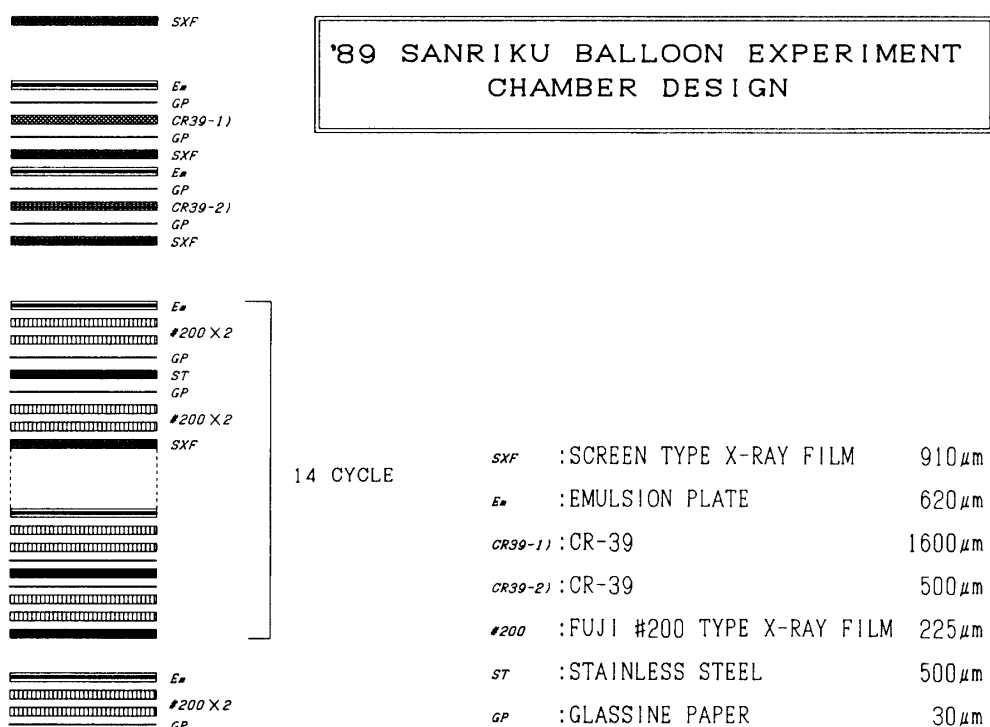


図5 軽量型エマルジョンチェンバーの構造.

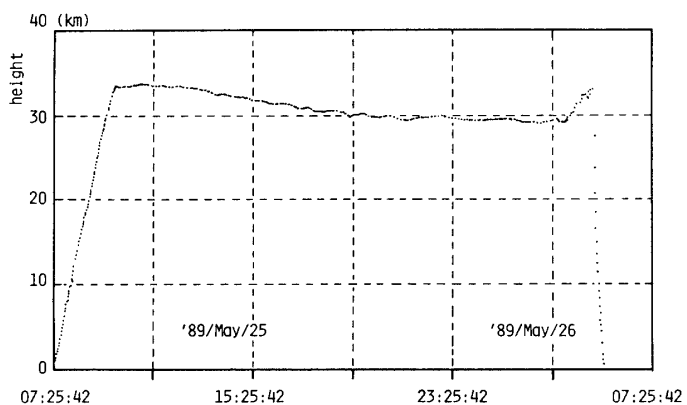


図6 1989年度の気球観測の航跡図.

表2 1989年度気球観測の粒子別有効高度

一次線	吸収の m.f.p. (g/cm^2)	有効高度 (g/cm^2)
陽子	110.0	17.0
α	51.5	15.1
CNO	25.0	13.3
NeMgSi	20.2	12.9
鉄核	14.1	12.3

3. 予備解析結果

我々はまず、重一次線のチェンバー内での核衝突点を検出する作業から始めた。2でも述べたように、RXO フィルム上では重一次線の飛跡（の黒化スポット）が裸眼で検出できるので、上下2枚のRXO フィルムを重ね、上層のフィルムのみスポットが記録され、下層フィルムでは対応したスポットが見出されない飛跡を探した。つまりこの2層の間のどこかで核衝突を起こしているわけである。もちろん、二次荷電粒子の多重度が大きければ、黒化度の変化が見出され、さらに下層のフィルムを見ると急激に黒化度が減衰する。これは人間の手作業で行い、Si核以上の重い一次線は、non-biasに拾っていると考えられるが、それ以下の軽い核は scanning bias があると思われる。そのため、現在大型ステージによる自動検出システムを製作中であり、作業効率の大幅な向上とともに、CNO核も non-bias に検出する予定である。

このようにして検出された核衝突 event の総数は全 block で約8000例に達した。次に我々は、2枚のフィルムの間には挿入されている原子核乾板を使って、衝突点（と思われる）近傍を顕微鏡で探索した。重一次線のエネルギーが小さい場合には、二次粒子の放出角度が広がってしまうので、原子核乳剤中で衝突を起こさない限り検出はむずかしい。しかし、低エネルギー領域では、地球磁場による rigidity cutoff を利用すれば flux point がおさえられるので問題ない。

表3に二次粒子多重度（fragment proton, α , ..., も含む）別に、検出された event 数（preliminary results at beginning of November '89）を示そう。ただし、scanning は重核に重みがかかっているのので、表に示された数があるまま軽核、中重核、重核の一次線頻度にはなっていない、カバーしているエネルギー領域は、数10GeV/n～数TeV/nである。エネルギー決定は放出角分布から決めるが、その決定方法、精度は、現在シミュレーションを行っており別の機会に報告する。電荷はここでは、原子核乾板中の δ -ray から、“大体”判断したものであるの、あくまで目安のつもりで書いてある。最終的な電荷決定は、CR-39, SXF, δ -ray の測定から行う。（文献[6]）

さて、1でも述べたように、このチェンバーを解析している段階で、我々は異常な高電荷の飛跡を見出した。我々は、当初それを超重核だと解釈したが、驚くべきことにこの粒子は入射角が87.4°、つまり殆ど水平に入射しているのである。図7aに原子核乾板中の δ -ray 写真を示そう。図7b, 7cには鉄核、Si核の例（ δ -ray count 法により決定）を示す。コントラストにやや欠けるが、図7aの effective charge がいかに大きいかわかるであろう。

表3 これまでに検出された核衝突 event の例数

一次線	$N_{ch} \leq 30$	$30 \leq N_{ch} \leq 50$	$50 \leq N_{ch} \leq 100$	$N_{ch} \geq 100$	合計
軽核（～CNO）	258	7	5	2	272
中重核（NeMgSi）	1223	59	29	7	1318
重核（ \geq Ca）	837	59	39	11	946
合計	2318	125	73	20	2536

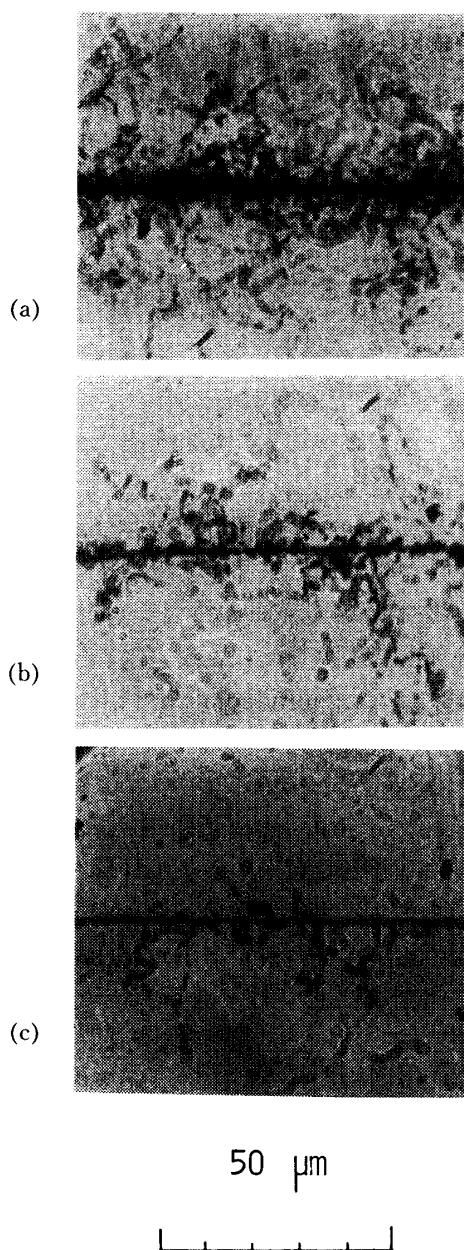


図7 (a) 高電荷, 大天頂角の δ -ray の顕微鏡写真.
(b), (c)は, それぞれ鉄核, Si 核の例.

この入射角は, 空気層を $\sim 200 \text{ g/cm}^2$ 貫通していることに対応する. 従って, たとえこの粒子が鉄核だとしてもたかだか $\sim 15 \text{ g/cm}^2$ 程度しか貫通力がないことを考えると, 超重核がチェンバーに到達したと考えるのは100万分の一以下の確率である. 他の可能性として, i) チェンバー本体が傾いていた, ii) アルベド粒子で, 低エネルギー (軽核?) のため ionization が大きいようにみえる, ことが考えられる. 前者は, 入射粒子の角分布を調べればわかるので, それと期待される角分布を比較した. ただしこの場合には, 大きな入射角も

扱うので地球の curvature も考慮して計算しなくてはならない. 具体的に示すと, 入射角が θ のとき空気層の厚み $t(\theta)$ は,

$$t(\theta)/t_0 = \int_0^\infty \frac{1 + \eta y}{\sqrt{\eta^2 y^2 + 2\eta y + \cos^2 \theta}} e^{-y} dy \quad (4)$$

$$\text{with } \eta = \frac{h_0}{R + H_0} \approx 10^{-3}$$

ただし, $h_0 = 6.38$ km (scale height at our observation level), $R = 6370$ km (earth radius), $t_0 =$ observation level in g/cm^2 , and $H_0 =$ geometrical height of observation level in km (1989年度の観測の場合には, $t \sim 12$ g/cm^2 , $H_0 \sim 30$ km).

入射角がそれほど大きくない場合 ($\cos \theta \gg \eta$) には予想されるように

$$t(\theta)/t_0 \approx \frac{1}{\cos \theta} [1 - O(\eta \tan^2 \theta) + \dots] \quad (5)$$

で与えられ, 一方極端に大きい場合, 例えば $\theta = \pi/2$ の場合には

$$t(\pi/2)/t_0 \approx \sqrt{\frac{\pi}{2\eta}} [1 + O(\frac{3}{8}\eta) - \dots] \quad (6)$$

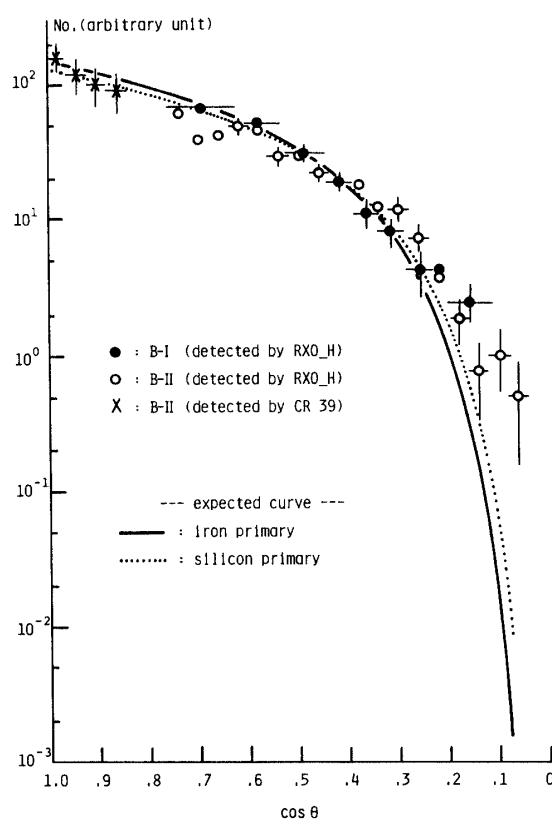


図8 重粒子成分 ($Z \geq \text{Ca}$) の天頂角分布. 曲線は, 鉄核, Si核の場合の計算値.

で与えられる。図8に測定結果と計算結果を示そう。ただし、測定対象とした飛跡は、RXO-Hフィルム上で濃度の高いスポットのみ（大体、Ca以上と考えられる）、計算は鉄核の場合と、Si核について行った。又RXO-Hフィルム上では、入射天頂角が小さいスポットは見落しやすい、あるいはbackground spotと間違いやすいので、小さい天頂角分布は、CR-39より求めた。この図からわかることは、圧倒的部分をしめる入射角 $\theta \leq 75^\circ$ は計算値と良く一致しており、チェンバー本体が傾いていたという疑問はなくなった。今一つこの図からわかることは、 $\theta \sim \pi/2$ 近傍で重核的な高荷電の粒子のenhancementが見られる。今問題にしているeventももちろんこのグループにふくまれている。

次に、荷電の大きさをみてみよう。図9aに δ -rayの横広がり分布を示す。この図は、測定面（x-y平面）上で、進行方向（x方向）と垂直な軸（y軸）にすべての δ -rayを投影し（図7を参照）、 $y = \pm$ の両側を重ね合わせて、 $r = |y|$ の分布を表示したものである。図には、図7b, 7cの鉄核、Si核の測定結果もプロットし、同時にsimulation計算の結果も示す、これらの画像解析、simulation計算の詳細は別の論文にまとめる。（文献[6]）これから推定される荷電は、relativistic particleだとすれば、 $Z = 36 \sim 40$ が得られる。（絶対値については、今少しの検討が必要）勿論、non-relativistic効果（ $\sim 1/\beta^2$ ）のためにeffective chargeが大きくなったという解釈もありうるが、よく知られているように、そのような場合にはionization loss効果のために、grain densityの増大が見られるし、さらに運動量が小さくて、止りがけの場合には、電子を捕獲して逆にgrain densityの減少傾向がみられるはずである。従って、アルベド的な粒子だと解釈するのも無理なようである。

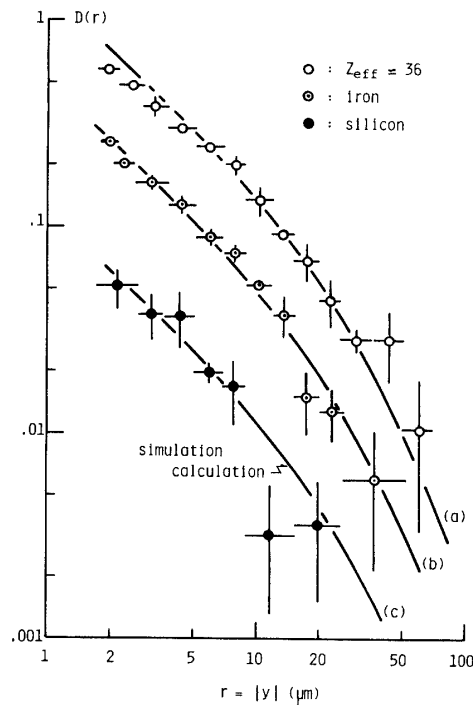


図9 δ -rayの横広がり分布例。カーブはsimulation計算による。

この粒子も一応 rigidity cutoff に従っているとすると, Inoue, Wada, Kondo (文献[7]) による三陸緯度での rigidity の計算を参考にして, $\theta=87.4^\circ$ の天頂角では, $R=7\sim 35$ GV が得られる. (巾は方位角の不確かさである) 従って, 核子あたりの kinetic energy は $E=2.5\sim 15$ GeV/n 程度以上と推定される.

この“重”粒子の解釈は, 今少しいろいろな側面からの考察が必要であり, 又, 測定の面でも荷電絶対較正, エネルギーの推定, 他の高荷電, 大入射角 event との関連, 入射粒子別の天頂角分布, 二次粒子の検出, 放出角測定等を行う予定である.

4. 今後の課題

前節の表3にこれまでの scanning 状況をまとめたが, scanning 終了後, 我々は, 以下の解析を行う予定である.

- i) 原子核Aから原子核A'への fragmentation probability $P_{AA'}$
- ii) 核衝突あたりの α 粒子の入射核別の放出割合
- iii) 50~5000 GeV/amu 領域での重一次線 (\geq CNO) の組成とエネルギースペクトル
- iv) 高荷電, 大天頂角粒子のエネルギー, 頻度の確定

又, 技術的な問題として

- v) 二次粒子放出角分布 (含 fragment proton, α) からのエネルギー決定
- vi) δ -ray からの荷電決定, 及び RXO-H フィルム上の黒化スポットの形, 濃度の大きさからの荷電決定,
- vii) 大型ステージによる重一次線飛跡の自動読み取りシステムの製作を行う予定である.

[謝辞]

この実験を遂行するにあたり, 宇宙科学研究所気球工学部門のスタッフの方々には, いろいろな面で御助力, アドバイスをさせていただきました. あらためて感謝いたします. また, キャノン光学の井上正人氏には, シンチレーターの透過率の測定に御協力いただきました事を感謝いたします.

参考文献

- [1] Y. Kawamura et al.: Phys. Rev. D, Vol. 40D, 729 (1989)
- [2] Y. Kawamura et al.: Proc. 21th Int. Cosmic Ray Conf., Adelaide (1990), OG 6. 1-5 (to be published)
- [3] J. Nishimura et al.: Proc. 19th Int. Cosmic Ray Conf., La Jolla (1985), Vol. 6, p.12
- [4] 寺岡克哉他: 昭和62年度 大気球シンポジウム報告集, p. 115
- [5] 南條宏肇他: 昭和62年度 大気球シンポジウム報告集, p. 120
- [6] 桐井敬祐他: 平成元年度 大気球シンポジウム報告集 (to be published)
- [7] 井上 葵他: 宇宙科学研究所報告 特集第1号, 大気球研究報告, 1989年11月, p. 79