

BETS-2 による高エネルギー電子観測

山上隆正¹・太田茂雄¹・並木道義¹・西村純²・鳥居祥二²・
笠原克昌²・立山暢人²・田村忠久²・吉田健二²・村上浩之³・
小林正⁴・古森良志子⁵・湯田利典⁶・森国城⁷・内山貞幸⁷

Observation of High-Energy Electrons with BETS-2

By

Takamasa YAMAGAMI, Shigeo OHTA, Michiyoshi NAMIKI,
Jun NISHIMURA, Shoji TORII, Katsuaki KASAHARA,
Nobuhito TATEYAMA, Tadahisa TAMURA, Kenji YOSHIDA,
Hiroyuki MURAKAMI, Tadashi KOBAYASHI,
Yoshiko KOMORI, Toshinori YUDA,
Kunihiro MORI and Sadayuki UCHIYAMA

Abstract: We present a new measurement of cosmic-ray electrons observed with the Balloon - Borne Electron Telescope with Scintillating Fiber (BETS). Using an imaging calorimeter consists of scintillating fibers and lead plates, rejection of background protons is successfully achieved in the range 10–100 GeV. Performance of the detector was investigated by simulation calculations and accelerator tests with CERN-SPS.

Preliminary result of energy spectrum obtained from the third balloon flight at Sanriku in September 1995 is presented with descriptions of the data analysis.

概 要

BETS (Balloon-Borne Electron Telescope with Scintillating Fiber) と呼ばれる気球搭載型の観測装置による新しい電子観測について紹介する。BETS は、シンチファイバーと鉛板からなるイメージング・カロリメータを用いて、10 GeV から100 GeV のエネルギー領域で陽子雑音を十分に除去する性能があることが実証されている。装置の性能は、シミュレーション計算とCERNのSuper Proton Synchrotron (SPS) の電子ビームを用いたテストによって調べられている。1995年9月に行った3回めの三陸での気球実験で得られたエネルギー・スペクトルの初期の結果を、各種の解析方法とともに報告する。

1. はじめに

高エネルギー電子は電磁放射過程のみでエネルギーを失うので、他の原子核成分に比べてエネルギー損失のプ

*¹宇宙科学研究所, *²神奈川大学工学部, *³立教大学理学部, *⁴青山学院大学理工学部,

*⁵神奈川衛生短期大学, *⁶東京大学宇宙線研究所, *⁷クリアバルス株式会社

ロセスが単純で、銀河内での伝播の様子が比較的容易に推定できる。そして、GeV領域の高エネルギー電子は陽電子に比べて桁近くも多いことから、大部分の高エネルギー電子は宇宙線と星間ガスの相互作用で二次的に作られるのではなく、電子過剰なソースで直接的に加速されていると考えられている。実際、シンクロトロン電波の観測から、多くの超新星（残骸）はGeV領域の電子のソースであることが知られている。このため、電子の観測はソースの構造や加速機構、銀河での伝播の様子を知るのに極めて適しており、これまでに多くの観測がなされてきている。しかしながら、電子のフラックスはGeV領域以上では陽子の100分の1以下で、エネルギーの増大とともにこの比率はさらに減少する。これまでの、エレクトロニクスを用いた電子観測の代表的な装置は、チェレンコフ光検出器 [Golden, 1980] や遷移放射測定器 [Tang, 1984] を用いて電子選別を行っているが、いずれも100GeV以上では電子選別の効率が悪くなり、装置が大型化するため統計をあげることが困難である。エマルジョン・チェンバー (EC) は、TeV領域の観測に唯一成功している優れた観測装置である [Nishimura et al., 1980] が、100GeV以下の観測が難しい、長時間の観測に向かない、時間分解能を持たない等の欠点がある。このため、我々は主に10GeV以上での電子の精密観測を目的にして、BETS (Balloon-borne Electron Telescope with Scintillating fibers) と呼ばれる、シンチファイバーを用いた新しい原理の観測装置を開発し観測を始めている。

この装置は、ECの利点を最大限に採り入れ、シンチファイバーを用いてシャワー発達の三次元的観測を行う方法を用いている。この結果、シャワーの検出効率、電子選別能力についてはほぼECと同じ性能をもつことが可能である。つまり、従来のエレクトロニクスを用いた装置では困難な100 GeV以上での電子選別が可能で、これらに比べて大きな有効立体角を持つ。さらに、電子の到来方向の測定が可能で、数GeV以上の電子を検出でき、衛星実験のような年単位の観測にも使用できる。次に述べるような、加速源の直接的検証につながる数百GeV以上の電子の到来方向の異方性が観測できる、今のところ唯一の装置である [Torii et al., 1996]。BETSによる観測はすでに3回行われているが、平成7年度は先の2回の観測をもとに改良されたBETS-2による観測を行った。以下に、電子観測の意義、BETS-2の内容とこれを用いた気球観測の結果について報告する。

2. 高エネルギー電子観測

高エネルギーの電子では、逆コンプトン散乱とシンクロトロン放射のみの影響を考慮すればよいので、そのエネルギー損失の割合は、

$$dE/dt = -bE^2, \quad b = (1.6 \times 10^5 \text{ yr TeV})^{-1}$$

で与えられる。ここで、 b は銀河磁場を $6.7\mu\text{G}$ 、background photon のエネルギー密度を 0.82 eV/cc と仮定した値である。この磁場は通常考えられている $3\mu\text{G}$ より大きい。電波の観測から期待される電子のスペクトルが直接観測のスペクトルと GeV 領域でスムーズにつながるために必要な値である [古森, 1993]。この b の値は、1 TeV の電子がエネルギー損失を受ける特徴的時間が 1.6×10^5 年であることを意味する。もし磁場を弱くするとこの時間は長くなる。このエネルギー損失を考慮して、各種の伝播モデルを用いた計算が行われ、実験データとの比較によりモデルの検証が行われている。その代表的なものとして、図 2-1 に Nested Leaky Box Model による計算結果と実験データの比較を示す [Taira et al., 1993]。この結果から、100 GeV を越す領域ではソースからの洩れのエネルギー依存性 ($E^{-\delta_s}$) がスペクトルの中に大きな影響を及ぼし、銀河からの洩れを $E^{-\delta_s}$ 、 $\delta_s = 0.6$ とすると、 δ_s は 0.3 程度になることがわかる。この値を用いて、ソースの磁場や滞在時間が導かれている [古森, 1993]。

先のエネルギー損失の式から、電子の寿命はエネルギーに比例して短くなり、 $1/bE$ 以下となることがわかる。この結果、例えば 2 TeV の電子は 10^5 年以下の寿命で、太陽系から 600 pc 以内の距離で作られていなければな

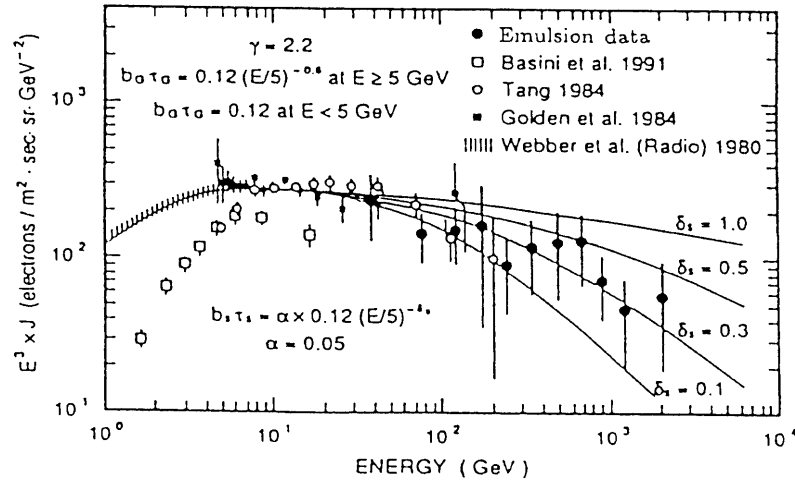


図2-1 Nested Leaky Box Model の計算と実験データの比較。ソースでの微分エネルギー・スペクトルの巾は、 $\gamma=2.2$ を仮定している。モデルの違いについては本文参照。

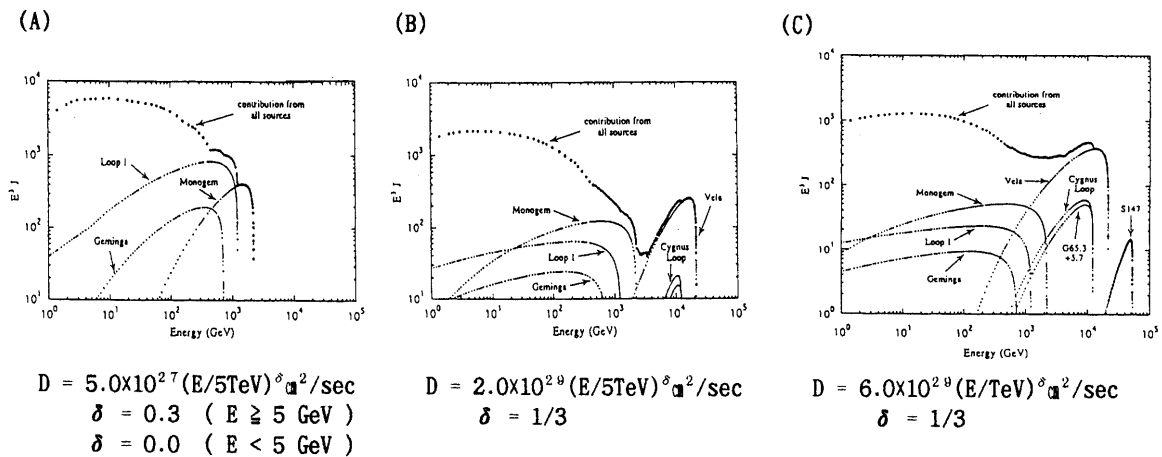


図2-2 Diffusion Model で求めた電子のエネルギー・スペクトルの拡散係数の違いによる変化。数百 GeV 以上の領域では、主に寄与するソースが (A) の場合には数個に限られ 2TeV 付近にカットオフ見られるが、拡散係数が大きくなると寄与するソースが増え、(C) の場合には Vela が主に寄与し、カットオフは 20 TeV 近くに現れる。

らない。このため、TeV 領域ではソースとなりうる超新星の数が極めて限定され、個々のソースの影響が直接エネルギー・スペクトルに現れることが予測される。この影響を調べるために、いくつかの拡散係数に対して拡散モデルによって計算されたエネルギー・スペクトルを図2-2に示す [Nishimura et al., 1995]。数百 GeV 以上では、1kpc 以内の距離で約 10^5 年以内に爆発した Loop1, Geminga, Monogem, Vela 等の個々のソースの寄与が現れ、エネルギー・スペクトルは単純な巾型とはかなり異なってくる。そして、図2-2 (A)-(C) に示されているように、その様子は拡散係数の値に大きく依存する。例えば、拡散係数が大きくなると Vela からの寄与が大きくなり 20 TeV 付近まで影響が現れる (C) が、拡散係数が小さいときは Vela はほとんど寄与しない (A)。この影響はまた、ソースからの拡散過程 [Shen & Mao., 1971] やシンクロトン放射におけるエネルギー損失のピッチ・アングル依存性 [Earland & Lenchek, 1969] により、到来方向の異方性をもたらすことが以前より指摘されてる。特に、最近の計算では、図2-2 (B) のような拡散係数の値の場合には、Vela から強い異方性 (～

20%)が生じることが指摘されている [Ptuskin & Ormes, 1995]. TeV 領域のエネルギー・スペクトルや異方性の観測を行うことにより, 近傍のソースの同定が可能で, 電子加速の直接的証拠が得られるだけでなく, その原子核成分の加速との関連および拡散係数の値も明らかになると考えられている. 以上のいずれの比較からもわかる通り, モデルの確定には実験データの統計をあげ, さらに精度の高いエネルギー・スペクトルを求めることが不可欠である.

3. 電子観測装置 (BETS-2)

3-1. 検出器

検出器は, 図3-1に示されているように, シンチファイバーおよび原子核乾板を鉛板と交互に重ねた構造をしており, 鉛は全体で約8 r.l. (radiation length)の厚さである. 電子シャワーのトリガーを行うため, 0, 2及び8 r.l.の深さのところには各厚さ1 cmのプラスチックシンチレータが入っている. この3層のシンチレータからのシグナルの同期によりトリガーが発生し, シンチファイバーで観測されたシャワーのイメージを記録する. 原子核乾板は, このシャワーの中心から数 mm 以内の範囲内でのスキャンニングを行い, 100 GeV 以上のシャワーのエネルギーキャリアレーションと電子の最終的確認を行うために用いている.

シンチファイバーベルトの1層は直径1 mmのシンチファイバー280本を横一列に並べたものである. Converter部 (0, 1, 2 r.l.) では, シャワー発達の初期段階における飛跡検出能力をほぼ100%にするため, シンチファイバーベルトの厚さは4層になっている. この結果, 核相互作用で生じる二次ハドロンや後方散乱粒子の検出が確実にでき, 陽子雑音の除去能力が大いに向上している. Calorimeter部では, 多数の粒子が一本のシンチファイバーに入るのでベルトの厚さは1層である. 二次元的な観測を行うため, 各深さには同じタイプのベルト二枚が互いに直角に配置されている. 両方向のベルトが重なる $28 \times 28 \text{ cm}^2$ の正方形の部分がこの検出器の有効領域である. シグナルの増幅を行うイメージインテンシファイアー (I.I.) との接続側は, 図3-2のように280本を

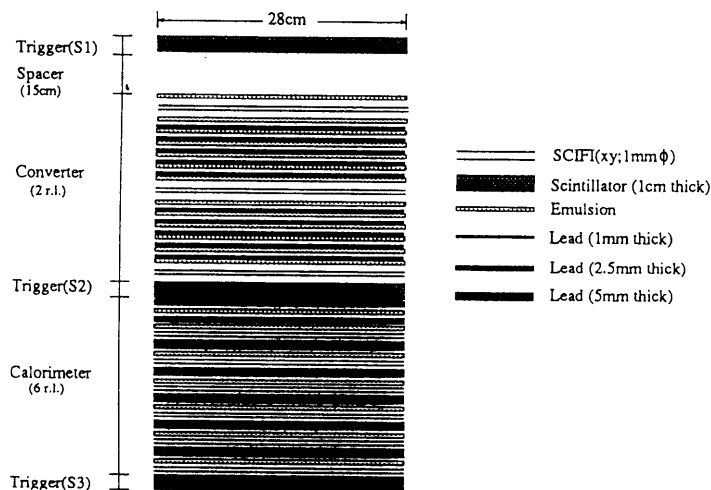


図3-1 観測装置を側面から見た概念図.

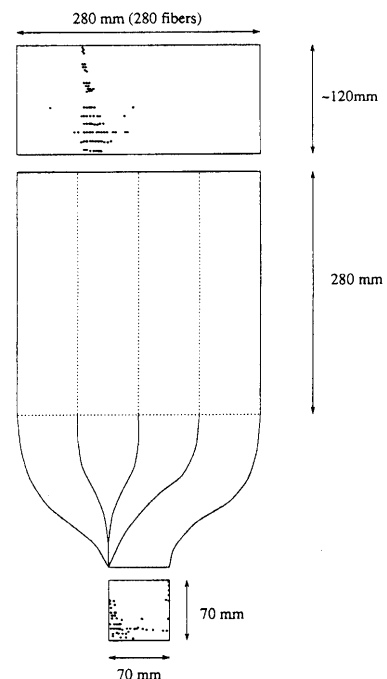


図3-2 イメージインテンシファイアー側でのシンチファイバーベルトの束ね方.

四つに分け、70本×4層に束ねてある。一方向にはベルトは18層あるので、 $18 \times 4 = 72$ 層（一層当たり70本）がほぼ正方形に束ねられて、I.I.の直径10 cmの入力窓に内接する形で接続されている。各方向のベルトは、各々独立に二台のI.I.で観測している。シンチファイバーの本数は、各方向ごとに5,040本で、全体では10,080本ある。

気球観測時のシャワーのトリガー条件はシミュレーション計算を用いて求められている。この結果によれば、1層目のシンチレータで0.7～5粒子、2層目で10～40粒子、3層目は40粒子以上のシグナルが同時に発生した場合にトリガーを掛けることにより、10 GeV以上の電子は85%以上がトリガーされるのに対して、バックグラウンドの陽子は約98%が除去される。このように、陽子が効率よく除去されるのは、2 r.l.以内で陽子が相互作用してシャワーを作る確率が電子に比べて低いためである。実際の観測ではほぼこの条件でトリガーを行い、バックグラウンドの陽子を機上で効率的に除去することにより、全体のトリガーレートを観測可能な2Hz以下に抑えている。

3-2. エレクトロニクスシステム

BETS-2のエレクトロニクスシステムは図3-3に示すように、トリガーシステム、シャワー画像撮影システム、画像取得システム、MT用画像処理システム、EXB 8 mm MT 機上データ記録システム、PCM テレメータシステム、コマンドシステム及びハウスキーピング (HK) システムで構成されている。

BETS-2のエレクトロニクスシステムはシンチファイバーで検出するシグナルをゲート付き I.I. で増幅し CCD カメラで撮像した後、画像処理を行い、機上 EXB 8 mm MT に記録すると共に PCM テレメータで地上に伝送する機能を持っている。シャワー画像のデジタル処理部分は処理機能毎にモジュール化がなされている。各モジュールは CPU を使用した独立したシステムで各モジュール間のデータの受け渡しは双方向の共有メモリーを介して行われる。この方式の特徴は受け渡しを行うデータ構造を決めるだけで各モジュールは独立したプログラムとタイミングで動作できる事である。

トリガーシステム、シャワー画像撮影システム及び画像取得システムのように前処理を必要とする機能や処理速度が問題になる所はハードウェア処理を行い、それ以外は双方向メモリーを共有メモリーとして使用する祖結合の分散型のマルチ CPU システムでデータ処理を行っている。

トリガーが発生すると X 方向、Y 方向の 2 組のシンチファイバーの検出したシャワーの画像をそれぞれゲート付きの I.I. で増幅して CCD カメラ (SONY : XC-77RRCE) で撮影する。CCD カメラはノン・インターレースで Donpisha シャッターと呼ばれているモードで、トリガー信号に同期して $1 \mu\text{s}$ 以内にシャッターを切り 1 画面を撮影する。このモードでの CCD カメラの有効画素数は 756 (H) × 290 (V) であるが、画像取得システムで処理する画素数は 512 (H) × 256 (V) ある。画像取得システムでは画像の輝度信号を順次 AD 変換し水平方向の隣接する 2 画素を平均して分解能 256 (H) × 256 (V) の画像に変換する。この画像データは輝度が予め設定した閾値以上の値を持つ画素のアドレス (H, V) とその画素の輝度の値を画像データバッファメモリーに記録する。この閾値はテレメータ用と EXB 8 mm MT 用の独立した 2 系統があり独立にデジタル・スイッチで設定できる。閾値以上の画像データはそれぞれ 16K バイトバッファメモリーに記録される。

記録された画像データは画像取得プロセッサにより、イベント番号、時刻 (テレメータフレーム番号) 及びトリガー用シンチレータのパルス波高値を付加し、EXB 8 mm MT 用とテレメータ用の画像転送メモリーに記録される。トリガーのゲートはこの処理が終了するまで閉じられデッドタイムとなる。画像処理システムではデータ圧縮、フォーマット編集を行い EXB 8 mm MT 記録用の 16 MB バッファメモリーと PCM テレメータの画像データバッファメモリーに送る。但し、PCM テレメータの画像データバッファに前のデータが残っている場合はテレメータに送るデータだけが破棄される。16MB バッファメモリーは 2 面あり 1 方が一杯になると EXB 8 mm MT に書き込みが開始され、後のデータは他方の 16 MB バッファに記録される。16 MB のデータ

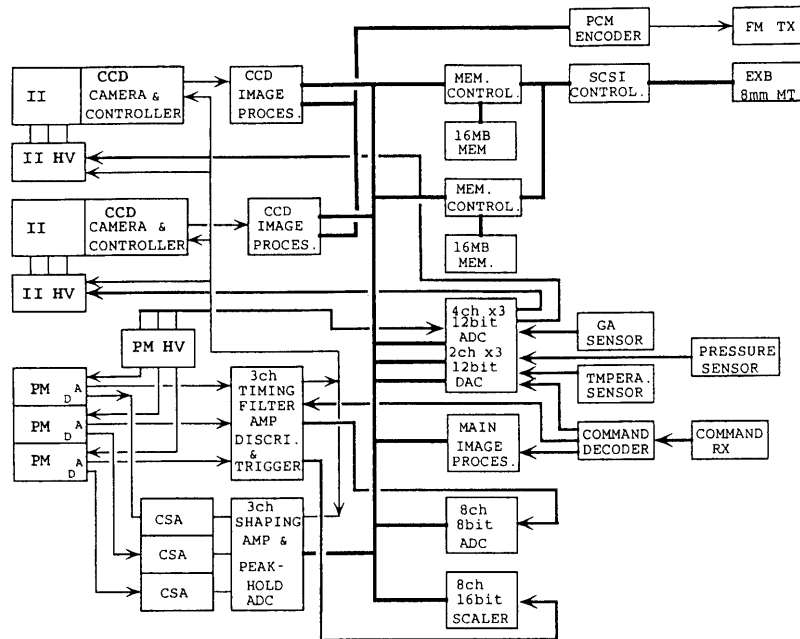


図3-3 電子観測装置のシステム構成図

をEXB8mmMTに書き込みに約7分を要する。

PCMテレメータは1フレーム64バイト構成でクロック周波数は32.768kHzでBi-Phase変調を用いている。PCMテレメータのフォーマットはHKデータモードと画像データモードの2つのモードがある。画像データがある時は画像データモードが優先されて伝送される、画像データが無いときにHKデータモードでディスクリレベル、高圧電源電圧、トリガースynchレタの計数率等のHKデータが伝送される。画像データには時刻、イベント番号、画素数、シンチレタのパルス波高値、画像データフレームのサブフレーム番号等が付加される。画像データが最大画素数(16K×2×2画素)のときは画像データ取得に約1.2秒かかる。データ圧縮した16K×2画素(X方向16K、Y方向16K)をPCMテレメータで伝送するのに約14秒かかり、同じデータを16MBバッファメモリーに書き込む時間は約0.1秒である。実際の観測では大部分のシャワーはこの1/10以下の画素数なので時間は1/10以下に短くなる。

気球システム制御及びBETS-2の制御は気球システム標準の15chコマンドを使用した。1～6chまでは気球システム制御及び観測器の電源ON/OFFで使用し、トリガースynchレタの切り換え、ディスクリレベル、I.I.の高圧電源電圧、画像アナログ信号のオフセット電圧、EXB8mmMTの強制書き込み、CPUリセット等の観測器の制御は7～15chの複数のコマンドを組み合わせで行った。

3-3. トリガースynchレタ

BETS-2はシャワーを検出するシャワーモードと、主に地上試験で μ 中間子を検出するシングルモードの2つのモードを持っている。このモードはコマンドで任意に切り換えることができる。

トリガースynchレタのプラスチックシンチレタはライトガイドで2インチ光電子増倍管(PM)に接続されている。上段のPMはH1949(HAMAMATSU)を使用し中段、下段はH1161(HAMAMATSU)を使用した。但し、電力節減のためにブリーダ抵抗は10倍に改造した。トリガースynchレタ信号はアノードから取り出しエネルギー信号は飽和しないように利得の低いダイノードから取り出した。アノードからのトリガースynchレタ信号は50 Ω で終端し電流パルスを電圧パルスに変換してピーキング時定数(T_p)10nsの波形整形増幅器で増幅した後、ピークホールド回

路でパルス幅を広げてから ディスクリミネータでパルス波高弁別を行った。パルス幅を広げるのはプラスチックシンチレータの発光波形が狭すぎて低電力の Discriminator IC が正常に動作しないためである。上段は Lower Level Discriminator (LLD) と Upper Level Discriminator (ULD) のシングルチャネルパルス波高分析器で粒子数0.7~5個のイベントを選別する。中段は2系統のディスクリミネータで構成される。一方はシャワーを検出するディスクリミネータで上段と同様に LLD と ULD のシングルチャネルパルス波高分析器で粒子数10~40個のイベントを選別するシャワーモードで使用する。他方は LLD だけで粒子数1以上のイベントを選別し、地上試験で μ 中間子を検出するシングルモードで使用する。下段は LLD だけで粒子数40個以上のイベントを選別する。

シャワーモードでは上段と中段のシングルチャネルパルス波高分析器及び下段の LLD の同時計数でトリガーをかける。シングルモードでは上段のシングルチャネルパルス波高分析器と中段のシングルモード用の LLD の同時計数でトリガーをかける。トリガー出力信号で画像撮影が開始されるとトリガー回路のゲートは閉じられ、画像取得が終了して次ぎの画像撮影が可能になると開けられる。

トリガー回路の LLD のディスクリレベルの可変範囲は 0 ~ 2 V で、ULD のディスクリレベルの可変範囲は 1 ~ 3 V でありコマンドで任意に設定できる。分解能はそれぞれ 1 % である。設定値は不揮発メモリーに記憶されており、電源が遮断されても再設定する必要はない。波形整形増幅器は 2.8V で飽和するので ULD を 3 V に設定すると ULD は実質的には無効になる。この機能を利用してシングルモードで重粒子の観測を行うことが出来る。すなわち、LLD のディスクリレベルを陽子のほとんど入らないレベルに設定し ULD のレベルを 3 V に設定して外すと主に He 以上の重粒子でトリガーされるようになる。LLD 及び ULD のディスクリレベルの可変範囲が最適な粒子数となるように各 PM の印加電圧を決定した。粒子数の較正は μ 中間子によるエネルギー損失のスペクトルを測定して行った。下段は μ 中間子のスペクトルを直接見ることができないので、予め測定してある PM の利得と印加電圧の関係から計算で印加電圧を決定し、粒子数の較正を行った。

トリガー検出器のエネルギー情報(粒子数に相当する)はダイノードから取り出し、その電荷信号は電荷有感前置増幅器で電圧パルスに変換した後、波形整形増幅器 ($T_p = 1 \mu s$) で増幅しパルスの波高値を12ビット ADC で数値化する。このデータは画像処理システムのプロセッサで読み取り画像取得システムの画像データ転送メモリーに書き込む事で画像データに付加した。電荷有感前置増幅器の電荷-電圧の変換利得及び波形整形増幅器の利得は期待するエネルギー(粒子数)範囲が ADC のダイナミックレンジに収まるように決定した。

3-4. シャワー画像撮影システム

X 方向及び Y 方向独立に、映ったシャワー像を口径100mm のゲート付き I. I. で増幅し、出力画像をテーパーレンズで縮小して 2/3 インチ CCD カメラで撮影した。ゲート付き I. I. は3段構成で2段目と3段目の蛍光体をアナログ記憶装置として利用してシャワー像を撮影する。トリガーシステムからのゲート信号は幅 $7 \mu s$ で 100 ns 以下の遅れで3段目に印加される。2段目 I. I. の蛍光体の発光減衰時定数は約 $12 \mu s$ なので I. I. の高圧電源のゲート電圧発生回路の遅れを考慮しても2段目の蛍光の90%以上の光が3段目に入り増幅される。I. I. の高圧電源はコマンドにより設定することで、HK データ計測システムの DAC の出力電圧を確認しながら2段目と3段目の印加電圧を制御でき、I. I. の増幅率をそれぞれ32段階に設定する事ができる。1段目と電子レンズの印加電圧は固定で地上で設定した。

CCD カメラはノン・インターレースで Donpisha シャッターモードでトリガーシステムからのゲート信号に同期してシャッターが切られる。Donpisha シャッターはゲート信号が入ってから $1 \mu s$ 以内にシャッターが開けられるのでテーパーレンズでのロスを見れば3段目の蛍光の90%以上の光が露光される。ノン・インターレースモードでは奇数番目の走査線が読み出されるので CCD カメラの有効画素数は垂直方向が半分になり $756 (H) \times 290 (V)$ であるが、AD 変換するのは $512 (H) \times 256 (V)$ 画素である。画像の位置は画像読み出しのクロッ

ク制御回路で任意に設定できるのでシンチファイバーの位置のずれは CCD の有効画面内で修正可能である。CCD カメラの制御装置からの画像信号（アナログ信号）はオフセット電圧を加えて増幅してから 8 ビットフラッシュ ADC でデジタル化される。オフセット電圧はコマンドで輝度の閾値を設定するのに使用するが EXB 8 mmMT 用とテレメータ用で共通である。

3-5. 画像データ取得システム

画像データ取得システムは X 方向と Y 方向の同じ構成の独立した 2 系統で構成されている。トリガー回路のゲートは X, Y の両系統の処理が終了すると開けられる。フラッシュ ADC でデジタル化された画像データは走査線単位で 512 画素を順次 2 画素ずつ加算して平均し 256 画素に圧縮する。2 画素を平均した画素の輝度を設定した EXB 8 mmMT 用とテレメータ用の独立した閾値とそれぞれ比較して閾値以上であれば水平 (H)、垂直 (V) の画素位置と輝度の 3 バイトをそれぞれの 16K × 3 バイトの画像バッファーマモリーに順次記録する。画像バッファーマモリーへの記録までの処理はハードウェアロジックで処理される。画像バッファーマモリーへの書き込みが終了すると画像データ取得プロセッサは EXB 8 mmMT 用データとテレメータ用データを画像データバッファーマモリーから読み出し、それぞれの画像転送メモリーへ書き移す。この時、イベント番号、時刻及びトリガー・シンチレータのパルス波高値を画像データに付加する。時刻データはテレメータフレーム番号で表された分解能 1/64 秒の 3 バイトデータをテレメータシステムから読み取ったものである。トリガー・シンチレータのパルス波高値は画像データを取得している間に MT 用画像データ処理システムから画像データ転送メモリーへ書き込みが行われる。X 方向と Y 方向の画像データの取得は XY の 2 系統で平行処理されるので画素数の多い系統の処理時間で画像取り込み時間が定まる。1 系統の取り込み画素数の最大値は 16K × 2 画素で、その時に要する画像取り込み時間は約 1.2 秒になる。EXB 8 mmMT 用の画像データ転送メモリーが空でないときは画像バッファーマモリーに記録された画像データの処理は待たされる。テレメータ用画像転送メモリーが空でなく前の画像データが残っている場合は EXB 8 mmMT 用画像転送メモリーだけに画像データの書き込みが行われる。したがって、テレメータで伝送される画像データのイベント番号は連続しているとは限らないが、EXB 8 mmMT の画像データのイベント番号は連続している。

3-6. MT 用画像処理システム

MT 用画像処理システムはトリガー・シンチレータのパルス波高値の読み取り、MT 用画像データの圧縮、MT 用画像データの編集及び HK データの取得を行う。MT 用画像データの処理はトリガー信号で起動される。最初にトリガー・シンチレータのパルス波高値を読み込み画像データ転送メモリーを通して画像データ取得システムへパルス波高値を転送する。次に、MT 画像データ転送メモリーに画像データの書き込みが終了するまで待ってから画像データの圧縮と編集を行う。

表 3-1 に示す EXB 8 mmMT に記録されるデータのフォーマットに編集された 1 イベントの画像データは 16M バイトバッファーマモリーの制御システムに 8 K バイトの双方向の共有メモリーを通して送られる。画像データが 8 K バイトよりも大きいときは複数回に分割して 16M バイトバッファーマモリーに送られる。1 イベントの MT 画像データは可変長のフレームで構成され、フレームの先頭は EB90h で 2 バイトのフレーム同期コードである。続く 3 バイトはこのイベントの時刻を表し PCM テレメータのフレームカウンタである。続いて、圧縮前の画素数、圧縮後の画素数、トリガー・シンチレータのパルス波高値、圧縮した画素データが送られる。フレームの長さは圧縮後の画素数から計算ができるのでデータの欠落はチェックできる。2 つの 16M バイトバッファーマモリー切り換えや EXB 8 mmMT への書き出し開始の管理は MT 用画像処理システムが行う。16M バイトバッファーマモリーが 1 杯になるとバッファーマモリーを切り換えて EXB 8 mmMT への書き出しを開始する。16M バイトメモリーの読み出しと EXB 8 mmMT への書き出しは MT 用画像処理システムとは独立に 16M

表3-1 EXB 8mm MT データフォーマット

ワード	名称	機能
W 1	SYNC1	同期コードの第一コード [E B h]
W 2	SYNC2	同期コードの第二コード [9 0 h]
W 3	EFLM1	イベント発生時刻の下位ワード
W 4	EFLM2	イベント発生時刻の中位ワード
W 5	EFLM3	イベント発生時刻の上位ワード
W 6	EVNT1	イベント番号の下位ワード
W 7	EVNT2	イベント番号の中位ワード
W 8	EVNT3	イベント番号の上位ワード
W 9	PIX01	X軸 CCDの総ピクセル数の下位ワード
W10	PIX02	X軸 CCDの総ピクセル数の上位ワード
W11	PIX11	X軸 CCDの圧縮後の総ピクセル数の下位ワード(P1)
W12	PIX12	X軸 CCDの圧縮後の総ピクセル数の上位ワード(P1)
W13	PIX21	Y軸 CCDの総ピクセル数の下位ワード
W14	PIX22	Y軸 CCDの総ピクセル数の上位ワード
W15	PIX31	Y軸 CCDの圧縮後の総ピクセル数の下位ワード(P2)
W16	PIX32	Y軸 CCDの圧縮後の総ピクセル数の上位ワード(P2)
W17	PHAD1	UP, SCIN, の波高データの低位8ビット
W18	PHAD2	UP, SCIN, の波高データの上位4ビット
W19	PHAD3	MID, SCIN, の波高データの低位8ビット
W20	PHAD4	MID, SCIN, の波高データの上位4ビット
W21	PHAD5	LOW, SCIN, の波高データの低位8ビット
W22	PHAD6	LOW, SCIN, の波高データの上位4ビット
W23	CX001	X軸 CCDのピクセル1のX位置データ
W24	CY001	X軸 CCDのピクセル1のY位置データ
W25	CD001	X軸 CCDのピクセル1の輝度データ
W26	CD002	X軸 CCDのピクセル2の輝度データ
W27	CD003	X軸 CCDのピクセル3の輝度データ
W28	CD004	X軸 CCDのピクセル4の輝度データ
~	~	~
N	CXP1-3	X軸 CCDのピクセルP1-3のX位置データ
N+ 1	CYP1-3	X軸 CCDのピクセルP1-3のY位置データ
N+ 2	CDP1-3	X軸 CCDのピクセルP1-3の輝度データ
N+ 3	CDP1-2	X軸 CCDのピクセルP1-2の輝度データ
N+ 4	CDP1-1	X軸 CCDのピクセルP1-1の輝度データ
N+ 5	CDP1	X軸 CCDのピクセルP1の輝度データ
N+ 6	CX001	Y軸 CCDのピクセル1のX位置データ
N+ 7	CY001	Y軸 CCDのピクセル1のY位置データ
N+ 8	CD001	Y軸 CCDのピクセル1の輝度データ
N+ 9	CD002	Y軸 CCDのピクセル2の輝度データ
N+10	CD003	Y軸 CCDのピクセル3の輝度データ
N+11	CD004	Y軸 CCDのピクセル4の輝度データ
~	~	~
Q- 5	CXP2-3	Y軸 CCDのピクセルP2-3のX位置データ
Q- 4	CYP2-3	Y軸 CCDのピクセルP2-3のY位置データ
Q- 3	CDP2-3	Y軸 CCDのピクセルP2-3の輝度データ
Q- 2	CDP2-2	Y軸 CCDのピクセルP2-2の輝度データ
Q- 1	CDP2-1	Y軸 CCDのピクセルP2-1の輝度データ
Q	CDP2	Y軸 CCDのピクセルP2の輝度データ

$$Q = ((P1 + P2) / 4) * 6$$

バイトメモリー制御システムと SCSI 制御システムが行う。

3-7. HKデータの計測

HKデータはクロック発生器からの0.5秒 (PCMテレメータの32フレーム) のクロックに同期して計測され、EXB8mmMTのステータスデータと共に画像データ取得システムを経由してPCMテレメータシステムへ送られる。HKデータの計測システムは4ch12ビットADC+2ch12ビットDACモジュール3台、8ch8ビットADCモジュール1台、8ch16ビットスケーラモジュール1台で構成されている。

入力電圧±5Vの12ビットADCはPMの高圧電源電圧(3系統)、圧力容器の内圧、温度(6点)、磁場(2

系統：但し、外部で0.5秒で切り替えている)、コマンド応答(電圧)のモニターを行う。

I.I.の増幅率の設定はコマンドからの制御信号で32段階に設定できるUP/DOWNカウンタの値をDACモジュールのCPUが読み取りその値に対応した値に12ビットDACを設定する事で行う。I.I.の増幅率のモニターは12ビットDACのデジタル設定値をそれぞれ読み取る事で行う。

入力電圧0～+5Vの8ch8ビットADCはトリガー・ディスクリミネータの電圧(6系統)とCCD画像信号増幅器のオフセット電圧(2系統)のモニターを行う。

16ビットスケーラはトリガー・シンチレータのそれぞれのシングルチャネルPHA信号、シングルモード・コインシデンス信号、シャワーモード・コインシデンス信号及びトリガー信号の計数を行う。スケーラの計数値はリセットせずに積算し、計数値を0.5秒のHKデータ読み出し間隔で読み取る。スケーラをリセットせずに積算する理由はPCMテレメータでデータが欠落しても時刻と積算した計数値の差分から計数率を算出する事ができるからである。

3-8. 画像データの圧縮

CCDカメラの全画素数は756(H)×581(V)であるがトリガー信号で撮影を行うノン・インターレースのDonpishaシャッターモードでは走査線が半分になり読み出し可能な画素数は756(H)×290(V)になる。ADCで読み出す画像の範囲はCCDカメラのクロック制御回路で指定した512(H)×256(V)画素で相対位置はデジタルスイッチで指定できる。データ圧縮の第1段階は走査線毎に2画素を平均して256(H)×256(V)にする。第2段階のデータ圧縮では輝度が設定した閾値よりも大きな画素の位置と輝度を16K×3バイトの画像バッファメモリーに記録する。画像の画素数は閾値により変化し、閾値が大きければ画素数は少なくなるが光量が少ないと画像は映らなくなる。MT記録用画像とPCMテレメータ用画像は画素数を独立に制限できるように独立した閾値と画像バッファメモリーを持っている。ここまでの処理は全てハードウェア・ロジックで行っている。

画像データは輝度が閾値以上の画素の位置と輝度の3バイトで構成されている。全ての画素に位置情報を付けているのはデータの欠落が生じて画像が再生できるからであるが、エネルギーの大きなシャワー像は画素数も多く閾値以上の画素が連続している部分が多いので全ての画素が位置情報を持つ必要はない。第3段階のデータ圧縮は画素位置が連続した画像データの画素位置の情報を一部省略する事で実現している。BETS-2では画像データ取得システムで得られた(1)の様な画像データを(2)の様に圧縮する。

$$H_1V_1L_1H_2V_2L_2H_3V_3L_3H_4V_4L_4H_6V_6L_6H_{11}V_{11}L_{11}H_{12}V_{12}L_{12}H_{13}V_{13}L_{13}H_{14}V_{14}L_{14} \dots (1)$$

$$H_1V_1L_1L_2L_3L_4H_6V_6L_6D_7D_8D_9H_{11}V_{11}L_{11}L_{12}L_{13}L_{14} \dots (2)$$

H_n は画素の水平位置、 V_n は垂直位置、 L_n は輝度、 D_n はダミー輝度で0を表す。圧縮は4画素を1組にして画素位置は1番目だけに付ける、連続した画素位置が4未満であればダミー輝度0を挿入する。すなわち、CCDの走査線毎に連続した4画素にまとめて位置情報は先頭の画素に付け続く3画素は位置情報を省略して輝度データのみにする。この圧縮により12バイトのデータは半分の6バイトに圧縮する。但し、4画素連続した画素データが無いときはダミーデータを挿入するので50%までの圧縮は出来ない。全ての画素が4画素連続しているならばデータ量は半分になるが全ての画素が4画素以上離れているとデータ量は2倍になる。データ圧縮はPCMテレメータのデータが欠落しても画像の再現ができるように4画素毎に行っている。画素の位置情報の省略によるデータ圧縮効果とデータ欠落により生じる画素データの損失を考慮すると、走査線単位でシンチファイバー1本分程度の損失であれば損失データの補完や無視を行っても問題は少ない。この画像圧縮方法は圧縮効率が良くないが元の画像情報を完全に保存しているという利点がある。シャワー画像のように現象の判定に注意深

い考察を必要とする場合は元の画像データを忠実に保存する事は重要な事項である。

3-9. 大容量機上データ記録システム

PCM テレメータで伝送可能な画像データ量はテレメータのビットレート32.768 kbit/s で決まり、およそ3 K バイト/秒で画素数が最大のときは1枚の画像を送るのに約14秒かかる。電子シャワーは陽子によるハドロンシャワーの1%以下でトリガーシステムで電子シャワーを選んでも数%以下である。したがって、PCM テレメータだけでは取得した画像データを全て地上に送ることはできない。BETS-2では画像データを機上のデータ記録装置に記録し、回収する事を行った。BETS-2では EXB 8 mmMT を気密容器に収納して観測したシャワー画像のデータを全て記録する。EXB8mmMT の記録容量は5 G バイトで1回の観測で得られるデータ量が1 G バイト程度と予想されるので十分に余裕がある。EXB8mmMT は連続してデータを書き込む方が動作が安定するため EXB8mmMT に記録するデータは16M バイトバッファメモリーに貯め、16M バイト1ブロックで EXB 8 mmMT に書き込む。MT 用画像データは画像取得システムで1 イベントのシャワー画像は X 方向及び Y 方向それぞれに MT 用の画像転送用双方向メモリーに記録される。この画像は画像処理システムでデータ圧縮を行い EXB 8 mmMT 用のフォーマットに編集されて16M バイトバッファメモリーに転送される。16M バイトバッファメモリー2組あり、MT 画像データ処理システムからの書き込みと EXB 8 mmMT への書き出しを交互に行っている。16M バイトバッファメモリーへの読み書きは16M バイトバッファメモリーモジュールの CPU で行い、EXB8mmMT への書き出しは SCSI バスコントロールモジュールの CPU で行っている。

3-10. PCM テレメータシステム

画像データ取得システムは PCM テレメータ用の画像データ、トリガー・シンチレータのパルス波高値、イベント番号及び HK データを PCM テレメータシステムのメモリーに8 K バイトの共有メモリーを通して書き込み、PCM テレメータシステムのプロセッサは画像データの圧縮、PCM テレメータの伝送データの編集及び32.768 kHz Bi-Phase PCM エンコーダへの書き出しを行う。画像データの圧縮は MT 画像と同じアルゴリズムで行う。PCM テレメータのフォーマットは HK データ伝送用と画像データ伝送用の2種類がある。データ伝送は画像データが優先され、画像データの無いときに HK データが伝送される。

PCM テレメータは1フレーム64ワードで1ワードが8ビットで構成されている。ビットレートは32.768 kHz で1秒に64フレームを伝送する。HK データフォーマットは、1~2ワードがフレーム同期コードで EB90h で固定である。3~5ワードはフレーム番号で1フレームずつ増加する。フレームカウンタは電源投入かコマンドによるシステムリセットでカウントを開始し約72時間で1順する。イベントの発生時刻はフレームカウンタを使用しているので画像データにはイベント発生時刻に相当するフレーム番号が付けられている。6~7ワードは HK データで32フレームで HK の全データを送り出す。8~64ワードはダミーデータで FFh である。画像データフォーマットは画像の大きさに応じて複数のフレームが使用される。1~6ワードまでは HK データフォーマットと同じである。7ワードは画像データのサブフレーム番号で画像データの順番を識別するのに用いる。画像データは可変長のサブフレームで構成され画素数によりサブフレーム長が変化する。第1サブフレームと第2サブフレーム以降ではフォーマットが異なっている。第1サブフレームのフォーマットは、8~10ワードがイベント番号、11~13ワードがイベント発生時刻でイベント発生時のフレームカウンタの値、14~21ワードが X 方向及び Y 方向のデータ圧縮前と後の画素数、22~27ワードがトリガー・シンチレータのパルス波高値、28~63ワードが圧縮した4画素ずつの位置と輝度データ、64ワードがダミーデータ (FFh) である。第2サブフレーム以降のフォーマットは8~10ワードがイベント番号、11~64ワードが続きの圧縮した4画素ずつの位置と輝度データである。最後のサブフレームは画素データが途中で終了するので後ろに64ワードまでダミーデータ (FFh) を挿入する。PCM テレメータは通信回線の状態によりデータの欠落を生じ易いので部分的な画像データ

であっても画像（部分的な画像）が再生出来るようにサブフレーム番号とイベント番号をフレーム毎に挿入している。

3-11. コマンドシステム

BETS-2は観測器を制御するために気球システムの15ch コマンドシステムを使用している。気球システムのコマンドの出力はリレー接点で観測器は7ch から15ch を使用した。BETS-2のコマンド項目は次の通りである。ディスクレベル 6 ch の UP/DOWN, 画像信号のオフセット 2 ch の UP/DOWN, I.I.増幅度4ch の UP/DOWN, トリガモードの Single mode/Shower Mode, MT 強制書き込み, CPU リセットの28項目を 7 ch~15ch の送出順による組み合わせで作りに出している。

3-12. コマンド受信機に対する電磁干渉対策

BETS-2は多数のCPUとメモリーを使用しているためコマンド受信機で使用している周波数帯域（72 MHz）で妨害電波を輻射している。エレクトロニクス部分は圧力容器でシールドされているが圧力容器の外に出ている電源ライン、コマンド接点信号ライン、SCSI バスライン及びPCM テレメータのビデオ信号ラインは電磁輻射の防止対策が必要である。BETS-2では電磁輻射の防止対策として圧力容器の外に出ているラインに対して各ピンに電磁輻射防止コンデンサーの入ったコネクタを使用すると共に各ラインに電磁輻射防止用のフェライトコアを圧力容器の内側に入れた。更に、ゴンドラのアルミフレームと圧力容器やコマンド受信機のアースを強化した。この対策によりBETS-2の電磁輻射はコマンド受信機の雑音レベルと同程度にする事が出来た。

4. 気球飛翔

BETS-2は、1995年9月13日7時19分48秒に岩手県気仙郡三陸町吉浜にある宇宙科学研究所三陸大気球観測所より放球された。気球は毎分235 m の速度で正常に上昇した。放球3時間後、気球は高度39.2 km (3.5 hPa)、三陸東方海上110 km 上空（東経143°6′, 北緯39°20′）で水平浮遊状態に入った。その後、気球は南西にゆっくり進行し、宮城県仙台湾上空に達した21時50分指令電波を送信し観測器を気球から切り離れた。観測器はパラシュートにより地上換算で7.5 m/s の速度で塩釜港東方20 km の海上に緩降下した。観測器は翌14日回収船により完全な形で回収された。この気球飛翔実験で約15時間に渡る観測を行うことができた。

使用した気球の諸元は下記の表4-1に示す通りであり、米国ウィンゼン製の容積8.78MCF (248,753m³)のキャップ付きゼロ・プレチャー気球であった。

表4-1 気球の諸元

容 積	8. 7 8 M C F 2 4 8. 7 5 3 m ³
直 径	8 5. 1 3 m
長 さ	1 2 1. 3 9 m
重 量	5 2 4. 4 k g
最大搭載重量	8 4 9. 0 k g
膜 厚	Shell : 1 7. 8 μ m Cap : 1 2. 7 μ m

表4-2 重量表

項目	重量
気球	524.4 kg
観測器	377.2 kg
物傘・アクセサリ等	27.7 kg
パラスト	131.0 kg
合計	1063.3 kg

表4-3 観測器重量の内訳

項目	重量
検出器本体	176.7 kg
回路	55.0 kg
ベッセル	70.5 kg
テレメータ・コマンド	25.0 kg
電池	25.5 kg
ゴンドラ	25.0 kg
合計	377.2 kg

B100-4気球 航跡図

観測項目 シンチファイバーによる一次電子の観測
 放球日時 1995年 9月13日 7時19分48秒

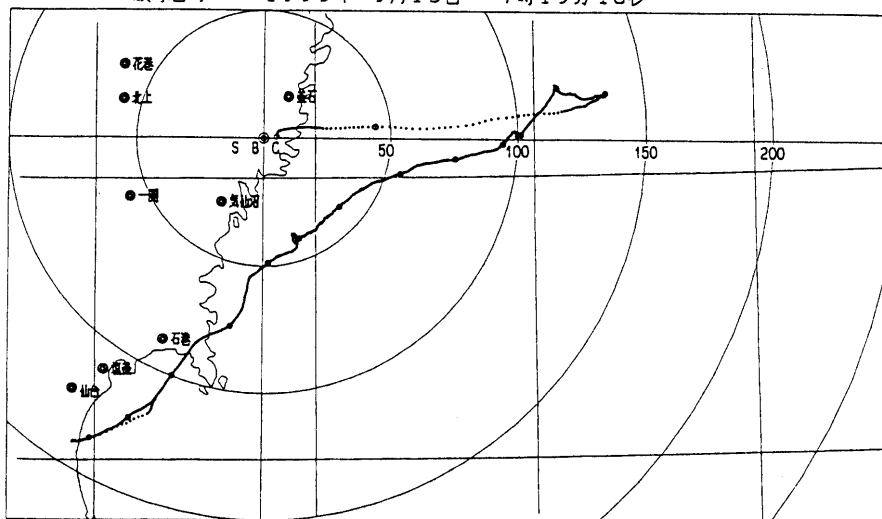


図4-1 BETS-2の気球の航跡図.

総重量は、1063.3 kgであった。その内訳を表4-2、表4-3に示した。

気球の航跡図を図4-1に、高度曲線を図4-2に示した。また、飛行中の観測機器の各部（データ記録用エクスバイト、観測器を収納したベッセル、電池箱、制御回路）の温度変化を示したのが図4-3である。この図から、各機器は日没前までは摂氏12度から33度の状態にあり、ほとんど実験室と同じ環境状態にあったことがわかる。また、日没後各機器の温度は減少したが摂氏0度以下までは下がらなかった。

検出器は、高圧を使用するため上空で気圧が低下すると放電の心配があるため、観測器全体を厚さ4mmのアルミ製の耐圧ベッセルに納めた。ベッセル内は、漏れることを懸念し多少加圧状態（摂氏20度で1053 g/cm²）に設定して放球した。飛行中のベッセル内の圧力の変化を図4-4に示した。また、この図の中には図4-3に示したベッセルの温度変化から期待される圧力の値を+印で示してある。この図より、ベッセル内の圧力の変化はベッセルの温度変化によるものであり、ベッセルは完全に気密が保たれていた。

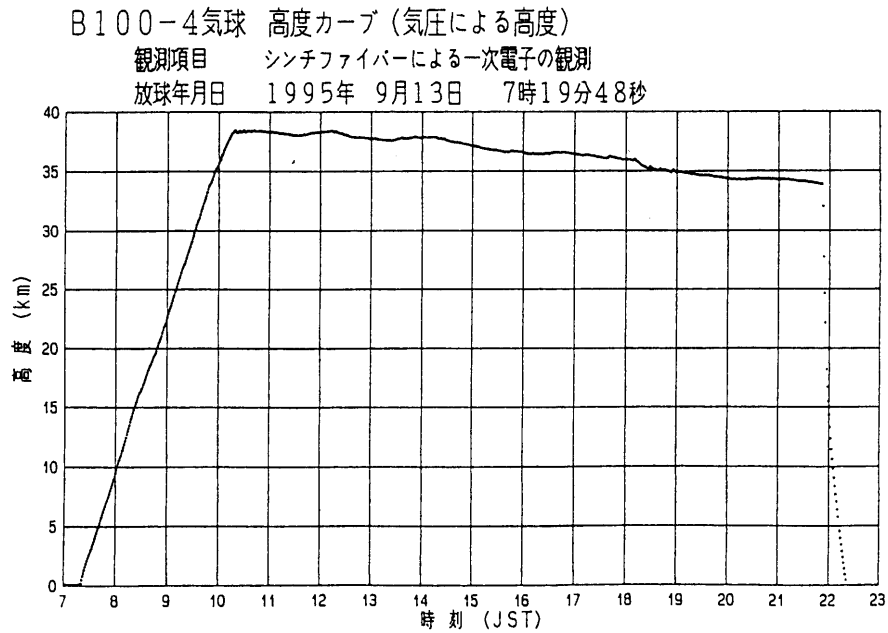


図4-2 BETS-2の気球の高度曲線.

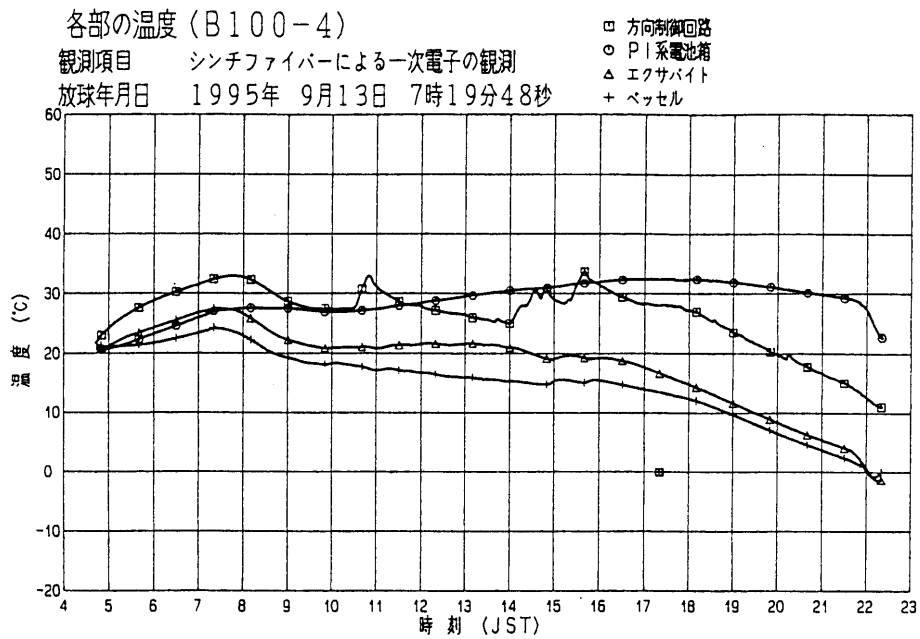


図4-3 飛行中の各機器の温度変化.

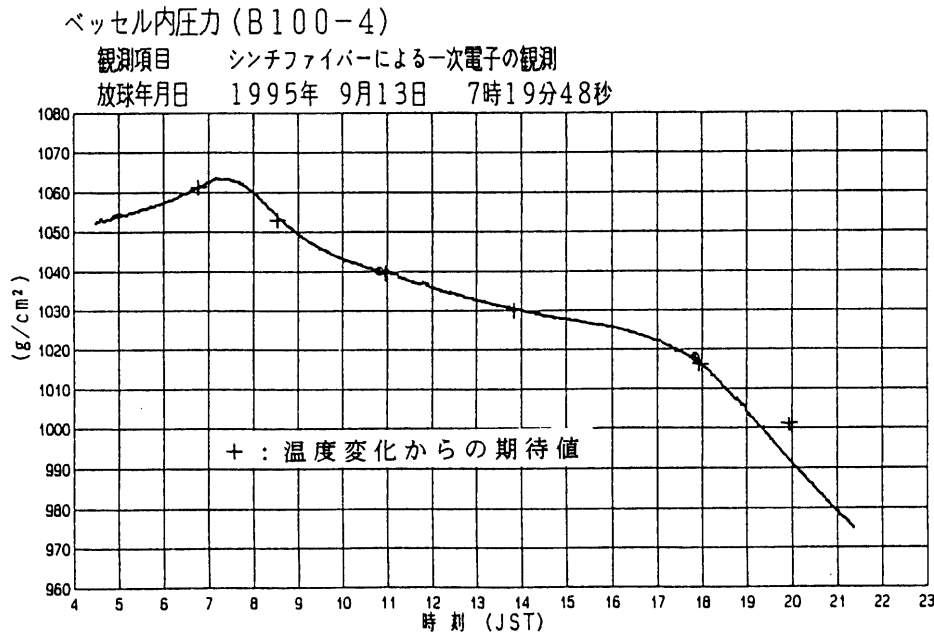


図4-4 飛行中のベッセル内の圧力変化.

5. シャワー画像解析

5-1. ファイバー位置の決定

第3-1章の検出器の所で述べたようにシンチファイバーの読み出し側がI.I.光電面の形状に合わせて束ねられているため、CCD画像はシャワー画像をファイバー70本(70mm)毎に折り返したものになっている。これを再構成して元のシャワー像を得るために、CCD画像上での各ファイバーの位置を決定しておく必要がある。総数10,080本のシンチファイバーの位置決めを比較的容易に行うために、地上テストで収集した μ 粒子によるシングルトラックの画像データを用いた。

この検出器には通常のシャワートリガー・モードの他に、一粒子の突き抜けでトリガーがかかるシングル粒子トリガーのモードがある。地上テストにおいて、このシングル粒子トリガーによるデータ収集を行うと μ 粒子が検出器を突き抜けるシングルトラックが検出される。このとき各シンチファイバーベルトでは一層280本のうち約1本のシンチファイバーが光り、図5-1のような μ 粒子のシングルトラックのCCD画像が得られる。この画像では18層分のファイバーが光っており、一本のファイバーは約 3×3 画素のクラスターになっている。各クラスターの重心がファイバー位置にほぼ対応するが、光が1mm径のファイバーから出るとき中心軸からばらつくため、多数のシングルトラック画像を収集してクラスター重心をプロットし、図5-2を得た。この図は 256×256 画像の一部である。ファイバーが俵積み状態に束ねられていることもこの図からわかる。このようにして得られた重心プロットの 3×3 画素程度の各領域に対して、二次元正規分布関数(但し $\sigma_x = \sigma_y$ とした)をフィットして各ファイバーの中心位置を出す。横一列に並んだ70本ファイバーのうち、端2本の位置をフィットすると、残りの68本は図5-3のように半自動的にフィットできる。ファイバー位置を正規分布フィットしたときの分散の結果を図5-4に示した。図5-4の(a), (b), (c)はそれぞれ0~50画素, 50~100画素, 100~150画素のファイバーについての分散の分布を示している。画像中心から離れるほど分散が大きくなるのは、I.I.初段での画像収縮が一様でなく、外側ほど画像が伸びるためである。図5-4の(All)は全ファイバーについての分散である。このファイバー位置をもとに画像を再構成することではじめてシャワー画像が得られ、入射粒子の

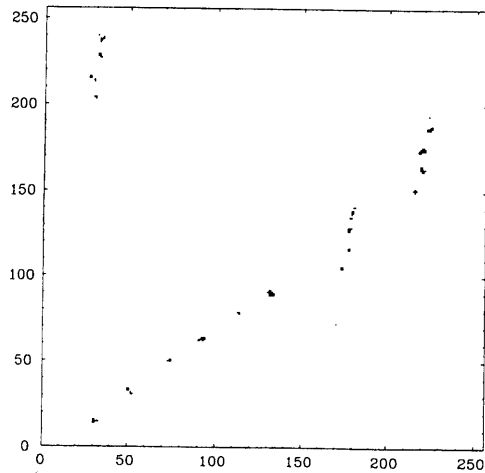


図5-1 μ 粒子によるシングルトラック画像. 地上テストでシングル粒子トリガーによって得たデータ.

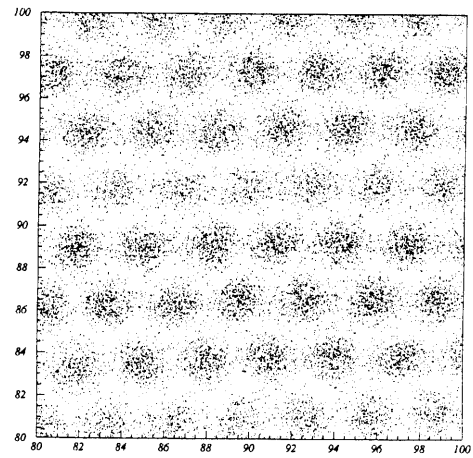


図5-2 シングルトラックのクラスター重心のプロット. 256×256画像の一部である.

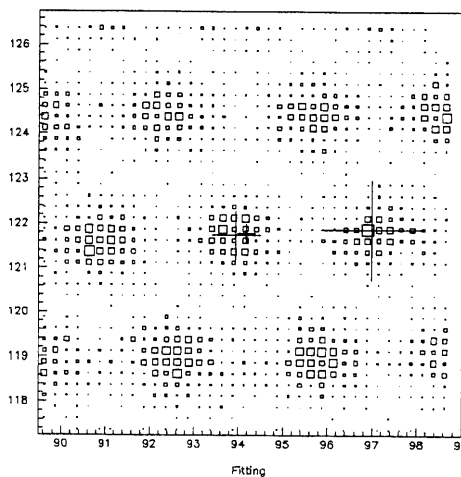


図5-3 ファイバー位置のフィッティング. 中央小さい十字は中心の推定位置. 中央大きめの十字はフィット結果で, 長さが分散に対応. 中央右の十字は次の中心の推定位置で, 長さがフィットを行う正方形の領域を示している.

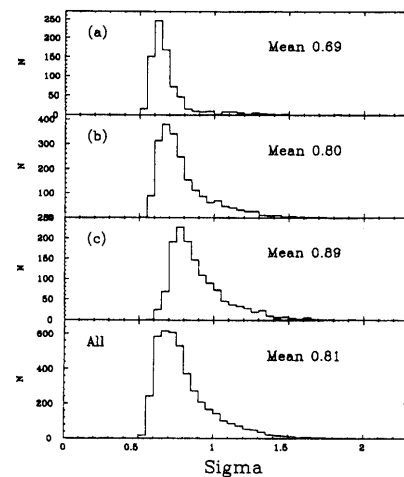


図5-4 ファイバー位置を正規分布フィットしたときの分布. ファイバー半径に対応する.

角度分布や入射位置などの情報が得られる.

5-2. 画像再構成

図5-5は高度約37 kmで検出された約100 GeVの電子によるシャワー画像である. このイベントはエマルションとの対応で電子であることが確かめられている. この図のようにシャワーが発達して粒子数の多いところでは, 一本のファイバーからの光が周りのファイバー部分ににじむようになる. これはI.I.内部で蛍光板が使われており, 高輝度になるとそこで像がにじむことが原因と考えられる. 横方向ににじむのは, 隣合ったファイバーなのでほとんど問題は無いが, 縦方向は実際に離れたファイバーが並んでおり, そのまま画像再構成を行うと, 実際は光らなかったのに光ったことになってしまうファイバーが約 $7 \times n$ (cm)離れたところに出てくる. そこで本当に光ったファイバーを決めるために, 画像を縦方向にスライスして輝度中心を求めることにした. 一

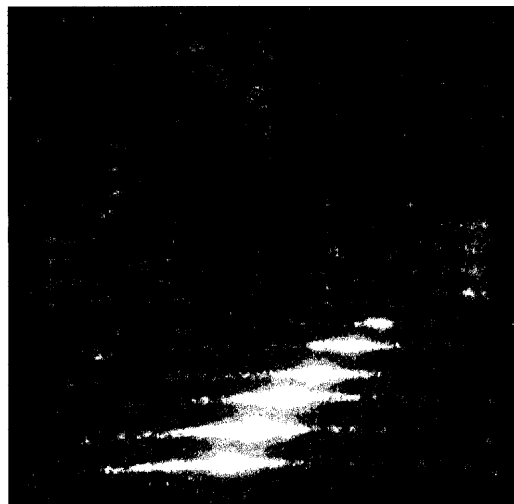


図5-5 観測中に得られた約100 GeVの電子によるシャワー画像。エマルジョンとの対応で電子であることが確かめられている。

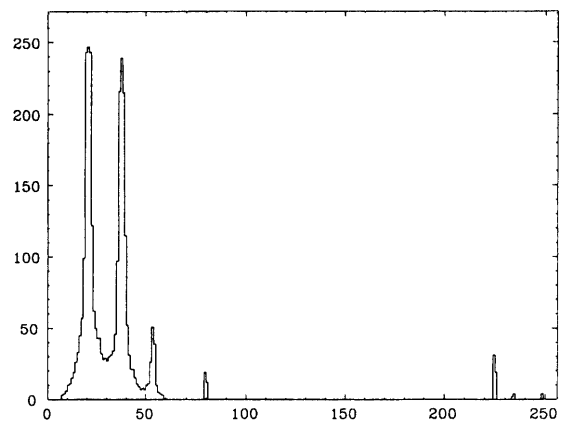


図5-6 シャワー画像(図5-5)を横軸(101-102)のバンドでスライスした図。

30184

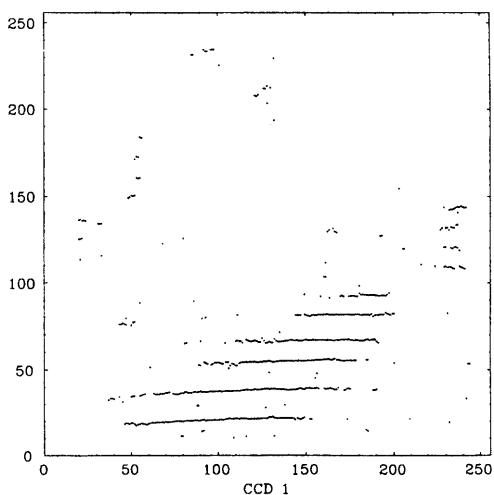


図5-7 シャワー画像(図5-5)を縦軸にスライスし各スライスでピーク位置をプロットした図。

Evt 30184 (CCD 1)

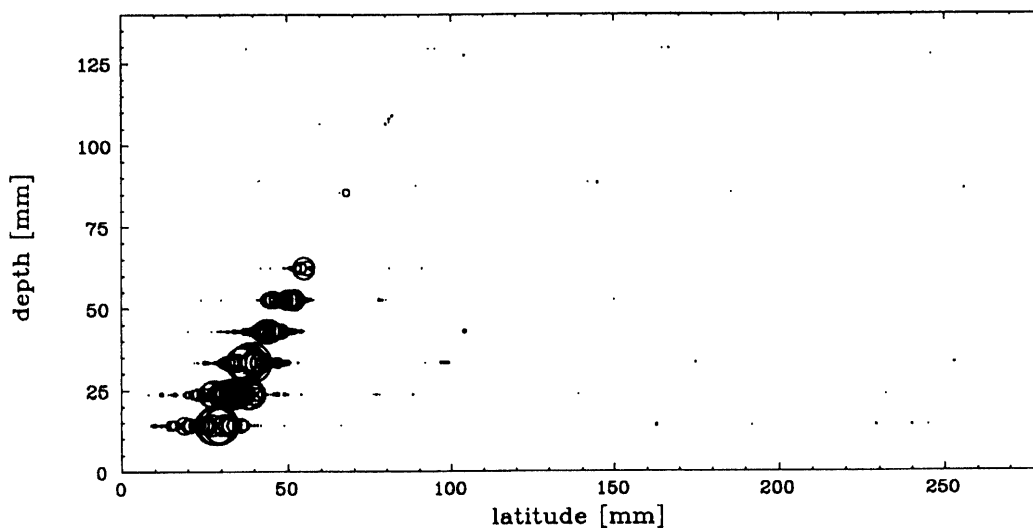


図5-8 再構成されたシャワー画像(生画像は図5-5)。

画像で256枚のスライスができるが、図5-6はそのうちの一枚である。これを複数の正規分布関数で近似して、ピーク位置と輝度（正規分布関数の面積）を出す。各スライスでのピーク位置をプロットすると図5-7のようになる。このようにして求めた各ピークの輝度をその位置にもっとも近いファイバーに加算していく。この結果得られた再構成画像の一例を図5-8に示す。この図では各ファイバー位置を中心とし、そのファイバーに積算された輝度の大きさに比例する半径の円が描かれている。横軸縦軸のスケールは検出部の実際の寸法比になっている。

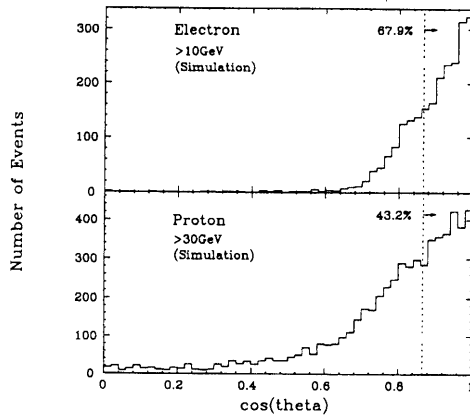


図5-9 シミュレーションによるシャワーを直線フィットして得られたシャワー軸の角度。上図は10 GeV以上の電子、下図は30 GeV以上の陽子についての分布。

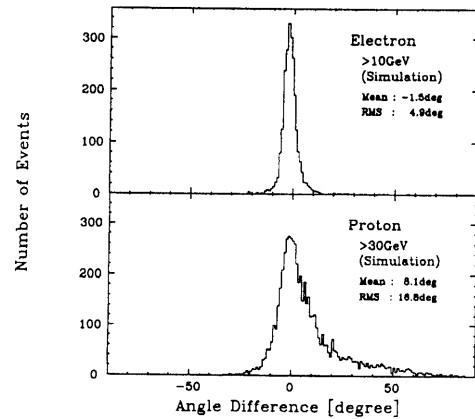


図5-10 シミュレーションによるシャワーを直線フィットして得られたシャワー軸の角度と入射角度の差。横軸は前者から後者を引いた値で、縦軸は頻度。上図は10 GeV以上の電子、下図は30 GeV以上の陽子についての分布。電子に比べて陽子シャワーのシャワー軸フィットは実際の入射からのずれが大きい。

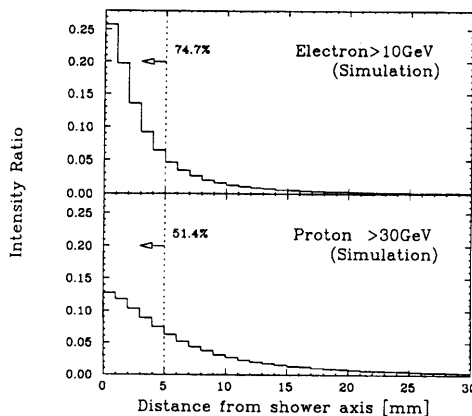


図5-11 シミュレーションによるシャワープロファイルの平均値。横軸は直線フィットで得られたシャワー軸からの距離。縦軸は全輝度に対する割合。上図は10 GeV以上の電子、下図は30 GeV以上の陽子のプロファイル。電子シャワーは中心に輝度が集中するのに対して、陽子は広がった分布になる。シャワー軸から5 mm以内への輝度の集中度は、電子の場合74.7%、陽子の場合51.4%になる。

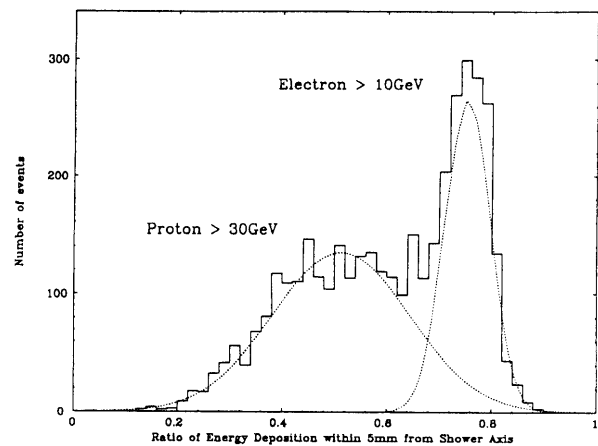


図5-12 シミュレーションによるシャワー軸から5 mm以内への輝度の集中度。実線は10 GeV以上の電子と30 GeV以上の陽子をたし合わせた分布。破線はそれぞれをガウス分布でフィットした結果を示す。

5-3. 画像解析

シャワートリガーの検出感度は電子に対して最適化されているが、観測されたシャワーには電子シャワーの他に、雑音となるハドロンシャワーも含まれている。そのほとんどが陽子シャワーであり、トリガーにかかる電子、陽子は、それぞれのフラックスなどを考慮すると電子/陽子=1/3の比になる。従って再構成されたシャワー画像について電子と陽子の選別する解析を行い、さらに電子/陽子の比を向上させる必要がある。シャワー画像の解析では、その形状の特徴を分析するためにシャワー軸を求めなければならない。図5-9は上図が10 GeV以上の電子、下図が30 GeV以上の陽子について、シミュレーションのシャワー画像を直線フィットして得られたシャワー軸の角度である。解析ではシャワー軸の傾きが30°を越えるものは除去する。この図から陽子シャワーの除去率のほうが大きいことがわかる。この直線フィットによる角度の精度を示したのが図5-10である。上図が10 GeV以上の電子、下図が30 GeV以上の陽子について、直線フィットで得られたシャワー軸の角度と実際の入射角度の差を示している。この図から電子シャワーに比べて陽子シャワーのシャワー軸フィットは、実際の入射角からのずれが大きいことがわかる。これは陽子シャワーが拡がって、その形状がばらつく傾向にあることを反映している。特に陽子シャワーは正の方向へのずれが多いが、これはシャワーのばらつきによって、フィット軸の傾きが実際よりも大きくなってしまっていることを表している。

つぎに電子シャワーと陽子シャワーのシャワープロファイルの特徴の差を表しているのが図5-11である。上図は10 GeV以上の電子、下図は30 GeV以上の陽子についてシミュレーションデータによるシャワープロファイルの平均値を示している。横軸は画像の直線フィットで得られたシャワー軸からの距離であり、縦軸は各イベントの全輝度に対するその距離における輝度の割合を積算してイベント数で規格化した数値である。このように電子はシャワー中心に輝度が集中するのに対して、陽子は拡がった分布になる。シャワー軸から5 mm以内への輝度の集中率は、電子の場合74.7%、陽子の場合51.4%である。このことから、シャワー軸から5 mm以内への輝度の集中率の分布が、電子と陽子ではそれぞれ75%、51%付近を中心に分布することが期待される。実際、シミュレーションデータについてこの分布をとってみると図5-12のようになる。実線は10 GeV以上の電子と30 GeV以上の陽子をたし合わせた分布、破線はそれぞれをガウス分布でフィットした結果を示す。この図から輝度集中度70%辺りに境界を設定すると、電子と陽子の分布がかなり良く分かれることがわかる。これらの選別方法をシミュレーションデータに対して行なうと表5-1のように電子、陽子の各イベントが選別される。表のTriggerredはトリガーにかかるイベント数で、これを基準の100%としている。その隣の欄は、直線フィットで求めたシャワー軸の角度が30°以下のイベントの数である。

表5-1 電子陽子選別 (シミュレーションデータ 10-100 GeV)

Particle	Triggerred	≤ 30°	Inside & Single	Concentration
Electron	2355(100%)	1598(67.9%)	1554(66.0%)	1317(55.9%)
Proton	5798(100%)	2506(43.2%)	2316(39.9%)	219(3.8%)

次の欄の Inside & Single は、フィット軸の延長線が検出器最上部シンチファイバーベルトを通過し、かつ重粒子などが突き抜けたイベントを除去するためのカットにかからなかったイベントである。この表に挙げた電子陽子選別を行えば電子陽子比が、

$$e/p = (1 \times 0.559) / (3 \times 0.038) = 5/1$$

となる。

5-4. 気球観測データ

気球観測によって得られたデータについて、画像再構成と前述の電子陽子選別解析を行った結果が図5-13である。上図が高度37~40 kmを水平浮遊中の電子観測を行った26580秒間（7時間23分）のデータである。この図は、シャワー軸が30°以内で、検出器上部を通過し、重粒子などの突き抜けを除去したあとに残った1469イベントである。シミュレーションデータと同様、輝度集中度の高い領域に電子イベントによるピークが現れている。輝度集中度70%以上のイベントは620イベントである。下図は高度22~28 kmの上昇中の3840秒間（1時間4分）の観測データである。図中の223イベントのうち輝度集中度70%以上のものは127イベントである。これは水平浮遊中の電子と陽子の割合より大きい。これは大気中の二次電子成分が効いているためである。

電子陽子選別の手法はさらに改良を重ねる必要がある。特に100 GeV~TeV領域の電子観測では陽子残存率が 10^{-3} を下回る必要がある。ニューラルネットワークによる電子陽子選別はかなり有力な手段になると考えている。実際にこの方法でシミュレーションした結果では100 GeV~TeV領域でも強力な陽子除去能率を示している。また実際に検出器の性能を確かめるために、1996年9月にCERNにて5~100 GeVの電子ビームを用いた加速器実験を行った。このデータと、さらに陽子ビームによるキャリブレーションデータを得られれば、シミュレーションデータの信頼性と電子陽子選別の精度を向上させることができるものと考えている。

水平浮遊時のデータは、輝度集中度の分布の形状がシミュレーションと良く一致しているので、電子と陽子の分布の様子から電子の数を推定すると約700イベントとなる。これまでの観測結果に対して、大気の影響（ $\sim 4 \text{ g/cm}^2$ ）と10 GeV以上での検出効率（ $\sim 80\%$ ）を考慮して得られるこの観測での電子の観測量の期待値は730イベントで、データ解析の結果はこの値とほぼ一致している。

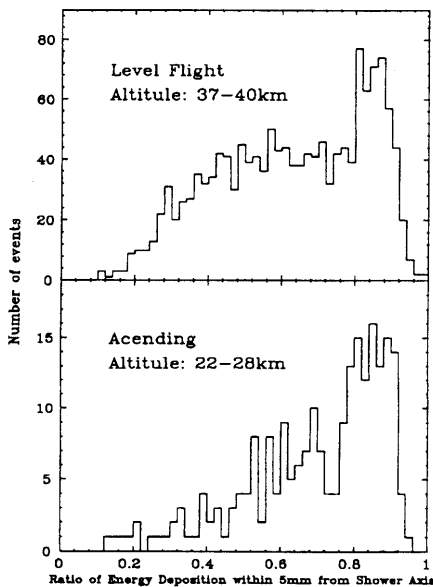


図5-13 シャワー軸から5 mm以内への輝度の集中率を気球観測で得られたデータについて解析した結果。上図は高度37~40 kmの水平浮遊中、下図は高度22~28 kmの上昇中の観測データ。

6. 重原子核飛跡解析

6-1. 重イオンモードでの観測

今回の気球実験では、機上キャリブレーションの必要性もあり、通常の一次電子の観測の他に重イオンモードを設け重イオン粒子のテスト観測を行った。重イオンモードでの観測は、レベル・フライトに達して約1時間経過した後一度、観測装置の電源オフの約3時間前にもう一度、合わせて約80分間行った。重イオンモードはトリガー用シンチレータのトリガー条件を変えることによって実現することができる。重イオンモードでのトリガー用シンチレータのトリガー条件は上段ディスクリ：4粒子以上、中段ディスクリ：4粒子以上、下段ディスクリ：なし、となっており、上段と中段のシンチレータによってトリガーをかけている。重イオンモードでのデータ取り込みレートは約3.8 Hzであり、トリガーレートはその2倍であった。

電子シャワーの観測では、輝度のオーバーフローをできるだけ避けるため、I.I.ゲインを入射粒子の観測が可能な範囲でできる限り低く設定してある。このため、地上シングルトラックに対する1本のシンチファイバーの検出効率を求めると80%であるが、0 r.l.から2 r.l.までのファイバーシートをそれぞれ4層にしてあるため、シングルトラックに対する検出効率は1 r.l.当たりほぼ100%になっている。重イオンモードでもこのI.I.のゲインは変更せず、シンチレータのトリガー条件だけを変えている。

図6-1に重イオンモードで取得した CCD 画像の観測例を示す。電子シャワーのイメージとは異なり、スポット状にファイバーが発光している様子がわかる。ファイバーをI.I.に束ねて取り付けているため、このままでは実際の粒子飛跡とは異なるが、CCD画像上でのファイバー1本1本の位置は前節で述べたように地上および機上キャリブレーションによって決定されており、CCD画像を元のイメージへと再構成することができる。図6-2に図6-1のCCD画像を再構成した例を示す。スポット状に発光したファイバーが0から8 r.l.まで直線上に並んでいることがわかる（直線からのわずかなずれについては、検出器部のファイバーシートのずれも含めて今後補正する）。このように再構成したイメージに対して χ^2 フィッティングを行うことによって、粒子の入

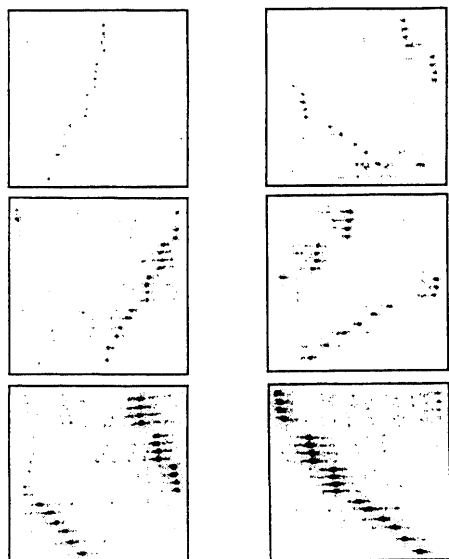


図6-1 重イオンモード時のイベントの CCD 画像例。
原子核乾板との対応では、上段左から He、
B 核、中段左から C、N 核、下段左から S、
Fe 核に相当する。

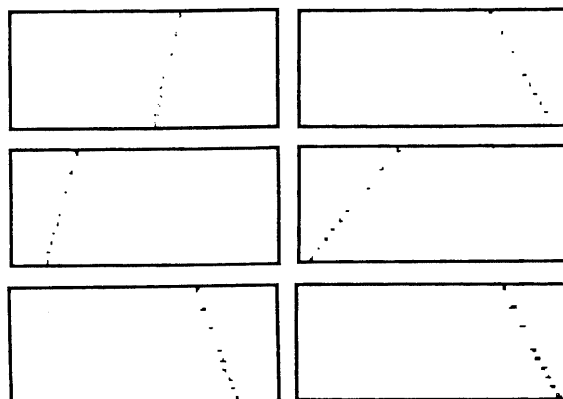


図6-2 重イオンモードの画像の再構成例。図6-1
と同じイベントに対応している。

射位置や入射方向を求めることができる。トリガー用シンチレータの波高値から入射イオン粒子の電荷を算出し、求まった入射位置・方向とともに原子核乾板との比較を行った結果、これらのイベントが重イオン粒子によるものであることを同定することができた。

6-2. シンチファイバーによる電荷の弁別

1ファイバーシート当たりのCCD輝度は、ファイバーの発光量を表しており入射イオン粒子の電離損失エネルギーを反映している。三陸上空のcut-off rigidity (R) は天頂角や方位角によって異なるが、天頂角 0° では

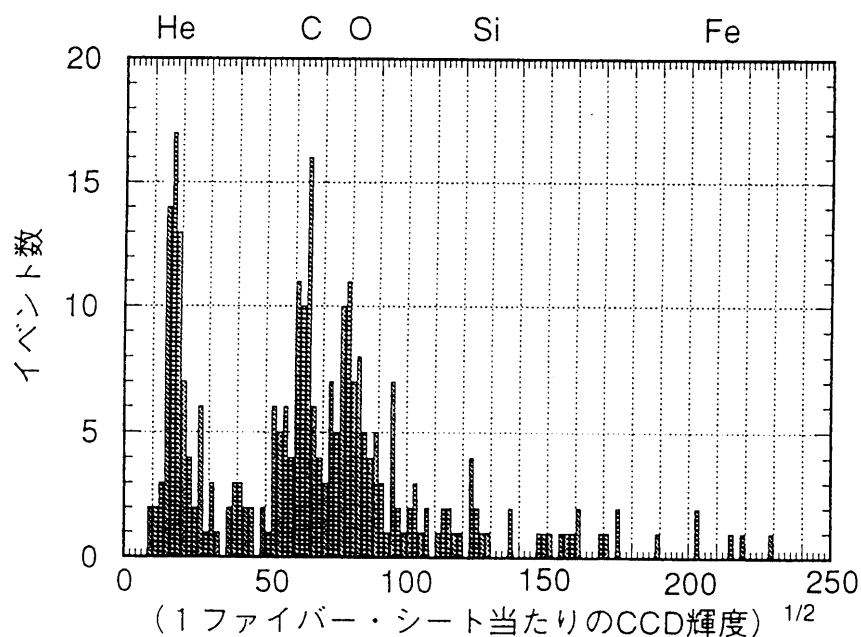


図6-3 (1ファイバー・シート当たりのCCD輝度) $^{1/2}$ のイベント数分布。

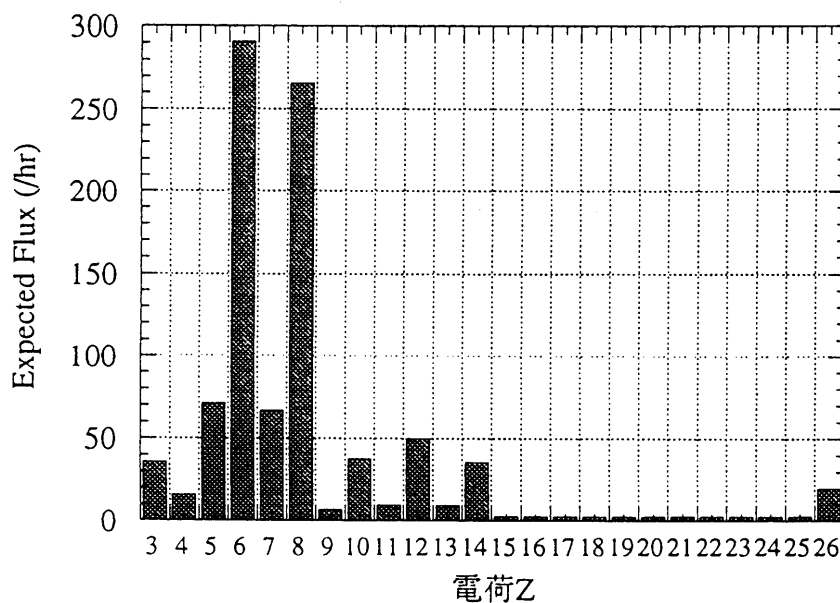


図6-4 検出器部に入射する重原子核成分の予想強度。

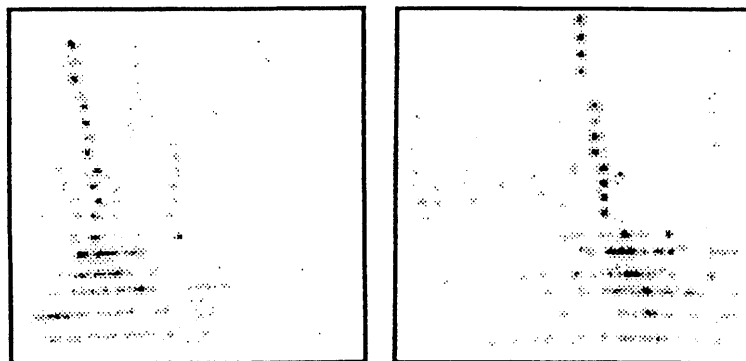


図6-5 重原子核が検出器部で核相互作用したイベントのCCD画像例（左はX方向，右はY方向）

10GVになる [近藤他1981]。このため，入射する重イオン粒子は相対論的粒子でありほぼ光速に近い速度を持っており，その電離損失はほぼ Z^2 に比例する。実際，図6-1からわかるように，イオン粒子を観測した時には，原子核乾板から求めた核電荷量が増えるにしたがって，1ファイバーシート当たりのCCD輝度やピクセル数が増加する傾向を示し，CCD輝度から核電荷 Z を分離できる可能性がある。すなわち，CCD輝度のイベント数分布を取れば，重原子核成分の存在量に応じた頻度分布を示すはずである。図6-3に1ファイバーシート当たりのCCD輝度の $1/2$ 乗のイベント数分布を示した。ただし，ここでは核相互作用を示していないイベントだけを選別している。1ファイバーシート当たりのCCD輝度と電荷量の対応を調べると，トリガー用シンチレータの波高値や原子核乾板との対応から， $\Delta Z = 1$ 程度の電荷分解能がある。図6-3にはCCD輝度がどの電荷（原子核）に対応するのかも同時に示しており，C核やO核のピークがはっきりと立っているとわかる。このイベント数分布をガウス関数でフィッティングしてC，N，O核領域の核電荷分解能を求めると

$$\Delta Z = 0.4 \pm 0.1$$

となる。

今回の観測装置の（有効面積） \times （立体角）を計算し，検出器部に入射する重原子核成分の強度を求めると図6-4のようになる。図6-3と図6-4を比較すると，重原子核成分の存在比が良く一致していることがわかる。また，予想される重原子核粒子（ $Z > 2$ ）の総強度は $1 \times 10^3/\text{hr}$ となるが，今回の気球実験での検出器部へ入射する重イオン粒子（ $Z > 2$ ）の総強度は，デッドタイム（50%）等を補正すると $6 \times 10^2/\text{hr}$ となり，計算値とほぼ一致する。このように，シンチファイバーを用いた観測装置は重イオン粒子の観測にも極めて有効であると言える。この他に，原子核乾板と比べると，重イオンがどのカスケードで核粉碎などの相互作用を起こしているかどうかを容易に判別できる，という利点もある。図6-5にその一例を示した。このように重原子核の相互作用の位置がわかるので，その後のシャワーのエネルギーを測定することにより，重原子核のエネルギーを求めることも可能である。これらについて重イオンの加速器によるビームテストを行い，その性能を明らかにする予定である。

7. シンチファイバーと原子核乾板での対応イベントの解析

BETS-2は，電子観測用エマルジョンチェンバー [Nishimura et al. 1980] と同様の構成で原子核乾板と鉛板が入っている。エマルジョンチェンバーの特徴は各層の原子核乾板中で検出したシャワー飛跡を顕微鏡でシャワー発生点まで追跡して詳しく調べることによって親の粒子（電子， γ 線，陽子等）を正確に分類することができることである。従って，BETS-2の電子判別性能を調べるには一次電子飛跡のシンチファイバーと原子核乾板両方で観測されたイベントを対応させ，比較することが重要である。気球実験のシンチファイバーの解析から得られた

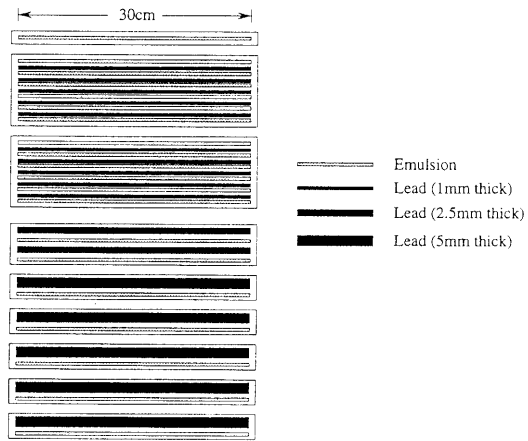


図7-1 BETS-2の原子核乾板と鉛板の構造.

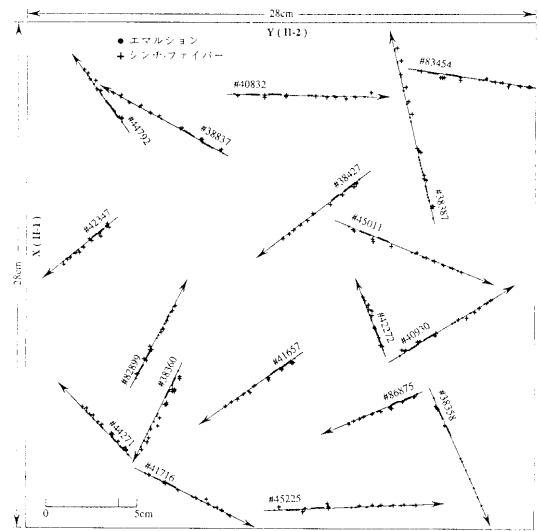


図7-2 原子核飛跡のシンチファイバーと原子核乾板の位置の関係.

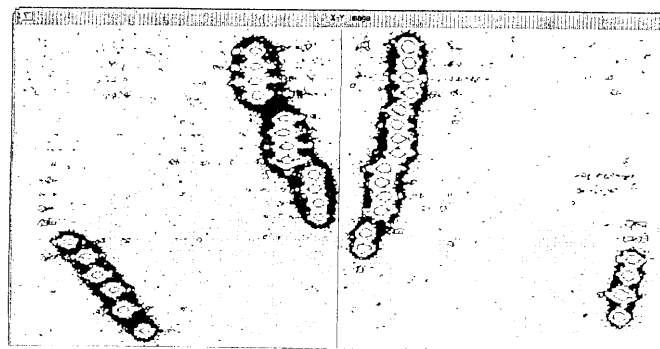


図7-3 硫黄(S)核飛跡のシンチファイバー像.

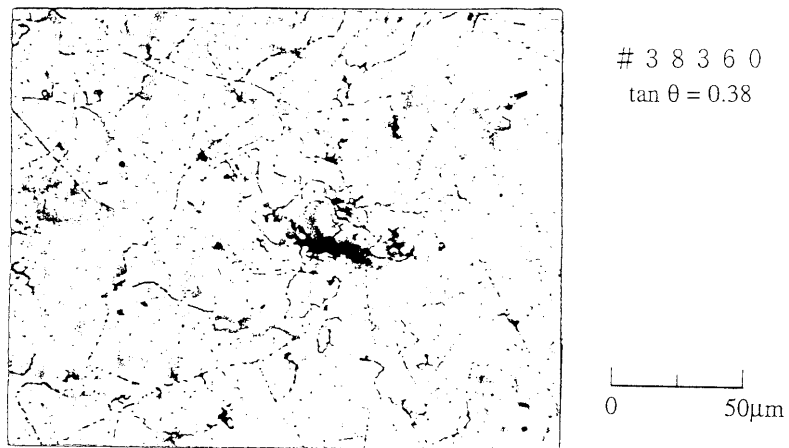


図7-4 硫黄(S)核飛跡の顕微鏡写真.

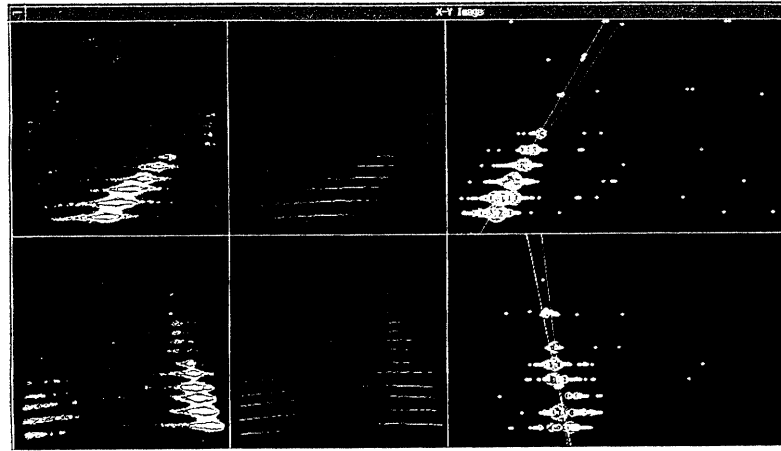


図7-5 一次電子シャワーのシンチファイバー像.

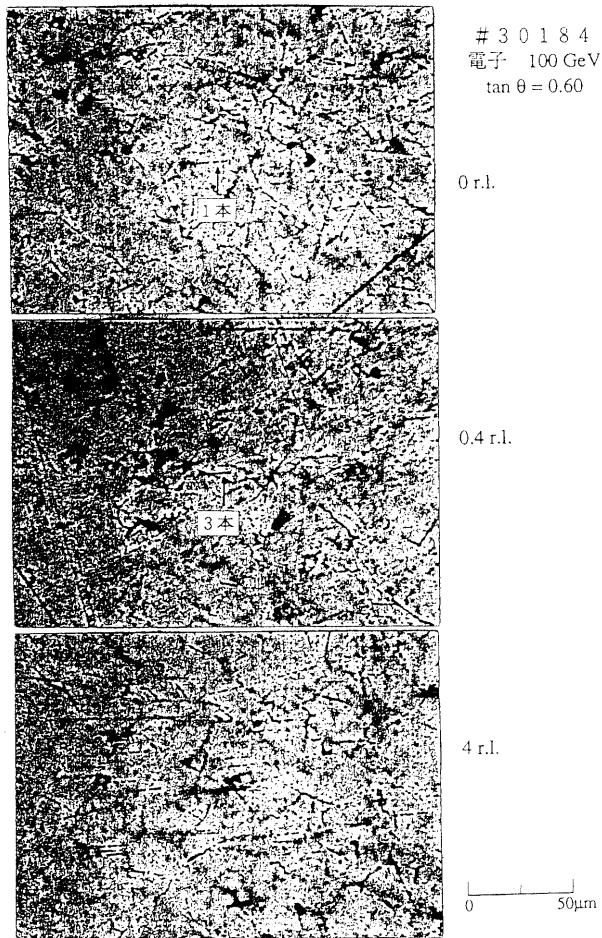


図7-6 一次電子シャワーの顕微鏡写真.

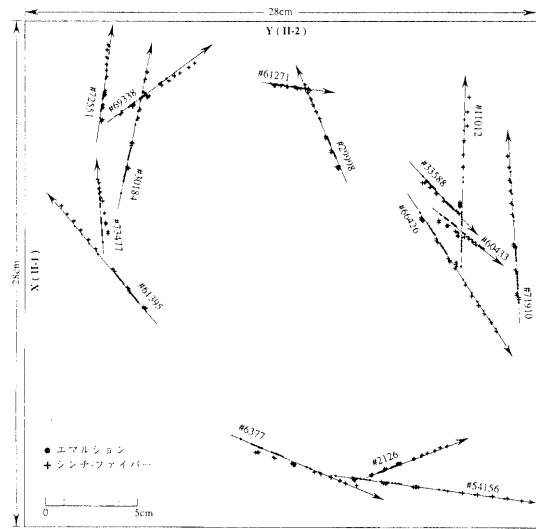


図7-7 一次電子飛跡のシンチファイバーと原子核乾板の位置の関係.

28イベントの電子候補について原子核乾板との対応を行った結果、28イベント中15イベントが原子核乾板で電子と同定されている。

重イオンモードでの観測で得られた重原子核の飛跡の対応を調べることにより、位置のキャリブレーションを行った。シンチファイバーで観測されたヘリウム核から鉄核までの飛跡に対して原子核乾板で100%対応ができ、両方の位置のずれは1～2 mm以内と非常に良く、シンチファイバーの二次元位置情報の正確さが確認されている。

7-1. 重粒子飛跡のシンチファイバーと原子核乾板の対応

原子核乾板と鉛板は観測装置への組み込みを容易にするために1 r.l.毎に黒いメタクリルの遮光箱に入れられている。遮光箱は図7-1に示す9箱で構成されている。シンチファイバー間に遮光箱が挿入され粒子飛跡の対応を行う。

原子核飛跡を用いてシンチファイバーの二次元位置精度を調べるため次のような測定を行った。重イオンモードの観測から任意に取り出したイベントのシンチファイバーの位置情報から対応する原子核乾板を顕微鏡で調べ同定を行う。図7-2に同定できたヘリウム核から鉄核飛跡の位置の二次元地図を示す。各々の深さでの原子核乾板の位置とシンチファイバーの位置のずれは1～2 mm程度、検出器の場所による依存性もなく、良い対応が得られた。図7-2より任意の深さのシンチファイバーの位置を原子核乾板で数 mm²程度顕微鏡で精査することで100%対応ができる。以上の原子核乾板の解析からシンチファイバーの位置情報が正確であることがわかったと共に、詳しいシンチファイバー画像の解析から電荷や核相互作用の情報が得られることもわかった。図7-3にS核飛跡のシンチファイバー画像と図7-4に原子核乾板の顕微鏡写真を示す。

7-2. 一次電子飛跡のシンチファイバーと原子核乾板の対応

原子核乾板の解析はシンチファイバーの電子選別法により選びだされた28イベントの電子候補について行った。代表的なイベントとしてシンチファイバーの解析から100 GeVの電子と判断したシャワー画像を図7-5に示す。このイベントの原子核乾板への対応はシンチファイバーの位置情報から電子シャワーの粒子数が最大となる4 r.l.の深さ（原子核乾板ではシャワー軸付近の電子数のみを対象にするため）の原子核乾板を10mm²程度顕微鏡で精査して電子シャワーを見つけ、これを各段の原子核乾板へつなぎ上げて発生点まで追跡した。シャワー発生点の深さは0.4 r.l.で、シャワー粒子数は銀粒子数の測定から3本である。これより上段の原子核乾板では全て1本である。図7-6に各深さでの一次電子シャワーの顕微鏡写真を示す。

電子シャワーの飛跡特に1本の飛跡を正確につなぎ為に入射電子とほぼ同じ入射方向を持つ重粒子飛跡をガイドに使い相対的に位置を決める方法を使用している。この位置決定精度は10 μ mと正確で、つなぎ間違えることはない。このイベントは原子核乾板内で1本の飛跡から出発し、1 r.l.以内の深さで制動放射と電子対生成で3本となり、4 r.l.の深さで電子数27本（半径100 μ mの円内）の多重構造を持たない電子シャワーに発達した100 GeV相当の一次電子である。

原子核乾板の解析結果を表7-1に示す。同定できた30 GeV以上の電子は28イベント中15イベントで、陽子と判定したイベントはなく、シャワーの形状を用いた陽子除去が正確に行われていることを示している。一次電子のシャワー発生点での粒子数が3本のは約70%の割合であり理論的な推定値と良く一致している。又シャワー発生位置分布も期待値と良く一致している。

図7-7に同定できた15イベントの電子の二次元地図を示す。原子核乾板とシンチファイバーの位置が良い一致を示している。しかし原子核飛跡の対応に比べて多少位置のずれているイベントがある。これはシャワー粒子に拡がりがあるためで、シンチファイバーのシャワー画像のフィッティングの精度を上げることで更に良い一致が得られる。

表7-1 シンチファイバーの電子候補28イベントに対する原子核乾板の解析結果

イベント No.	入射粒子	入射角 $\tan \theta$	エネルギー (GeV)	シャワー発生点の 深さ(r.l.)	シャワー発生点の 粒子数
# 2126	電子	0.40	30 ~ 40	0.38	5
# 6377	電子	0.61	~ 50	0.21	3
# 11012	電子	0.73	60 ~ 70	0.22	3
# 29998	電子	0.42	~ 50	0.19	3
# 30184	電子	0.60	~ 100	0.41	3
# 33588	電子	0.23	70 ~ 80	0.36	3
# 54156	電子	0.88	110 ~ 120	0.47	5
# 60433	電子	0.24	100 ~ 110	0.72	7
# 61271	電子	0.18	60 ~ 70	0.53	3
# 61395	電子	0.62	~ 50	0.41	3
# 66426	電子	0.64	60 ~ 70	0.63	3
# 69338	電子	0.40	~ 40	0	3
# 71910	電子	0.69	~ 80	0	3
# 72551	電子	0.34	~ 70	0.37	5
# 73477	電子	0.30	60 ~ 70	0.55	5
# 9367	γ 線	0.62	~ 50	0.62	2
# 30833	γ 線	0.33	110 ~ 120	1.66	2
# 55392	γ 線	0.61	20 ~ 30	0.41	2
# 72440	γ 線	0.65	50 ~ 60	0.21	2
# 7940	undetected				
# 30355	undetected				
# 56728	undetected				
# 61446	undetected				
# 65128	undetected				
# 65564	undetected				
# 10691	side out				
# 56538	side out				
# 76812	side out				

原子核乾板でシャワー粒子を検出できなかったものが6イベントある。これらのイベントはエネルギーが小さく、シャワー粒子数のゆらぎとシンチファイバーの位置の少しのずれで数本のシャワー粒子を見つけだせなかったのが原因と思われる。

γ 線が4イベント、斜めから入射して最上部のトリガー用シンチレータを通過しないものが3イベントある。これらは観測器内で発生した二次粒子による後方散乱が原因でトリガーしたと思われる。斜め入射イベントは二次元地図を書くことで取り除ける。西村等の一次電子と大気中で発生した γ 線の観測値を用い計算した γ 線と一次電子の比率を表7-2に示した。エネルギーが小さい領域では、 γ 線の影響は少ないが、100 GeV以上になると一次電子に比べて γ 線の数が増えるので後方散乱の影響を無視できなくなるが、この解析では十分に除去が可能である。 γ 線の寄与を減らすためには、後方散乱によるトリガーを機上で判定するか、高い高度での γ 線そのものが少ない気球実験が望まれる。

表7-2 気球高度4 gr/cm²の γ 線と一次電子の比率(天頂角 $\theta \leq 45^\circ$)

エネルギー	≥ 10 GeV	≥ 50 GeV	≥ 100 GeV	≥ 200 GeV
γ 線/電子	0.3	0.8	1.2	1.8

8. まとめと今後の計画

気球観測で得られた電子候補のイベントに対して、有効立体角（約 $480 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ ）、天頂角30度以内の観測効率（0.62）、大気補正（0.85）を考慮して求めたエネルギー・スペクトルをこれまでのデータとともに図8-1に示す。ライトガイド部からのノイズやシャワー画像の欠損等の影響によりシャワー軸の求め方がまだ完全ではないので、ここで示したデータはまだ初期的な結果である。この定量的評価は、CRERN-SPSで行った5 GeV~100 GeVの電子ビームによるテストのデータ解析により進行中であるが、シャワー軸の修正によりフラックスは増大すると予想している。尚、15 GeV以下の領域では地磁気効果の補正が必要であるが、まだこの補正は行っていないので、フラックスは実際の値より小さな値になっている。観測したシャワーのエネルギーは、最下部のシ

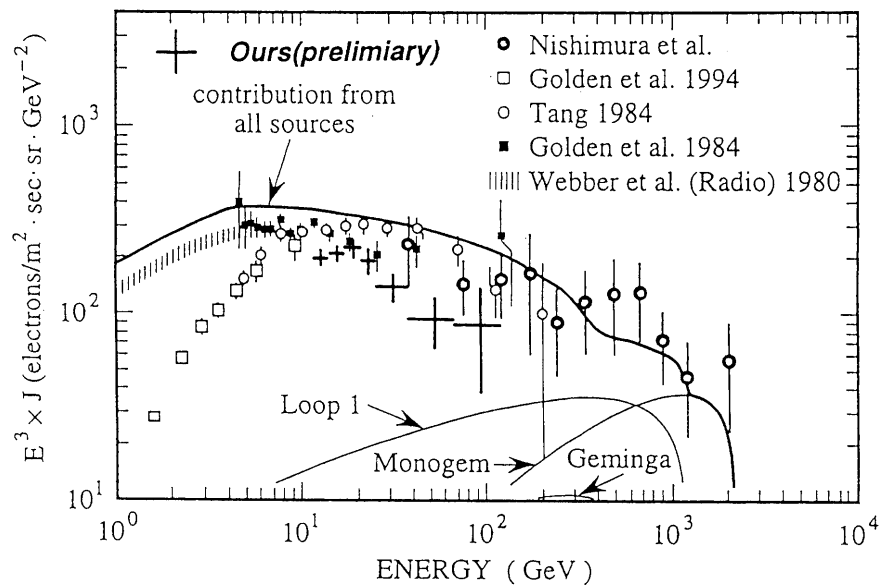


図8-1 BETS-2によって観測された電子のエネルギー・スペクトル(Ours) と他の観測結果の比較。ここに示した我々の観測値は、まだ画像解析の改良や地磁気効果の補正が必要のため、初期的な結果である。実際のフラックスは、ここで示した値よりも増加する。実線で示した曲線は、拡散モデルからの期待値である (Nishimura et al. 1995)。

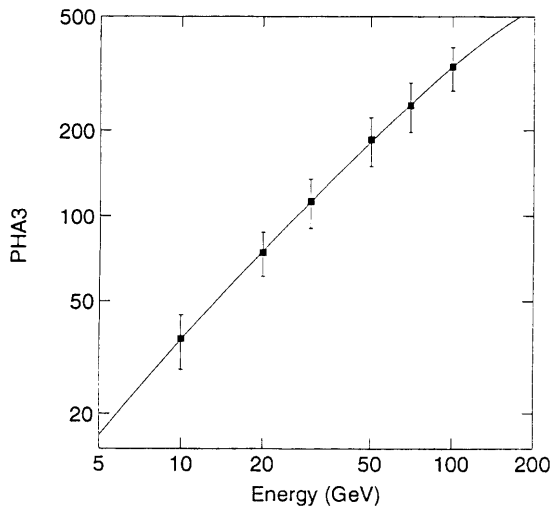


図8-2 加速器 (CERN-SPS) でのビームテストで得られた、最下部 (8 r.l.) のシンチレータの波高値 (PHA 3) と電子のエネルギーの関係 (垂直入射の場合)。二次関数でフィット (実線) して、PHA3の観測データから各シャワーのエネルギーを求めている。

ンチレータの波高値 (PHA 3 値) とエネルギーの関係を CERN でのビームテストの結果から求め、この関係を用いて決めた。図 8-2 に示すように、PHA 3 値とエネルギーの関係はほぼリニアであるが、二次関数でフィットしてエネルギーを求めた。エネルギー測定の見誤差 (RMS) はエネルギーにあまりよらず 15% 程度である。シンチファイバーのデータを用いれば、シャワー発達の様子を考慮して精度の高いエネルギー測定が可能なので、ビームテストの解析を進めてこの方法でもエネルギーを求める予定である。

平成 9 年には、CERN-SPS での陽子によるビームテストが認められているので、このテストを行い陽子の除去性能を確立することによって電子エネルギー・スペクトルの最終結果を得ることができると予想している。これらの加速器テストと平行して、延べ 100 時間程度の気球観測を行い観測量を一桁以上増やして、TeV 領域にせまるスペクトルの観測を行う予定である。さらに、将来のスペース・ステーションを利用して年単位の観測を行って、電子観測の所で述べたような電子加速源の直接的検証を目指している。

参 考 文 献

- J.A. Earland and A.M. Lenchek; *Ap. J.*, 157, 87, (1969)
L. Golden et al.; *Ap. J.*, 287, 622, (1980)
古森良志子; 学位論文 [宇宙線一次電子スペクトルと伝播モデル] (1993)
J. Nishimura et al.; *Ap. J.*, 238, 394, (1980)
J. Nishimura et al.; *Proc. of 24th Int. Cosmic Ray Conf., Rome*, 3, 29, (1995)
S. Ptuskin and J.F. Ormes; *Proc. of 24th Int. Cosmic Ray Conf., Rome*, 3, 56, (1995)
C.S. Shen and C.Y. Mao; *Astrophysical Letter*, 9, 169, (1971)
T. Taira et al.; *Proc. of 23rd Int. Cosmic Ray Conf., Calgary*, 2, 128, (1993)
K.K. Tang; *Ap. J.*, 278, 881, (1984)
S. Torii et al.; *Proc. of SPIE Conf., Gamma-Ray and Cosmic-Ray Detectors, Techniques, and Missions, Denver*, 2806, 145, (1996)
近藤一郎他; 宇宙科学研究所報告特集号第 1 号, 79, (1981)