

シンチレーティング・ファイバーを用いた一次電子観測装置

鳥居祥二^{*1}・山上隆正^{*2}・村上浩之^{*3}・小林 正^{*1}・吉田健二^{*2}・田村忠久^{*1}
西村 純^{*1}・笠原克昌^{*1}・立山暢人^{*1}・湯田利典^{*5}・内山貞夫^{*6}・森 国城^{*6}

A Balloon-Borne Electron Telescope with Scintillating Fibers

By

Shoji TORII, Takamasa YAMAGAMI, Hiroyuki MURAKAMI, Tadashi KOBAYASHI,

Kenji YOSHIDA, Tadahisa TAMURA, Jun NISHIMURA, Katsuaki KASAHARA,

Nobuhito TATEYAMA, Toshinori YUDA, Sadao UTIYAMA and Kunishiro MORI

Abstract: We describe a new balloon-borne cosmic-electron telescope which incorporates a trigger system (TS) and an imaging calorimeter (IC). The TS has the capability of reducing background protons to about 2% above 10GeV. The IC consists of scintillating-fiber belts, emulsion plates and lead plates (~8c.u. thick in total). The two-dimensional profile of cascade development observed with the IC can be employed additionally to reject 95% of the background protons. Some results by a balloon flight at Sanriku in Sep. 1994 are shortly reported with the performance of detector.

概要

トリガーシステムとイメージングカロリメータからなる新方式の気球搭載用一次電子観測装置について報告する。このトリガーシステムは機上で10GeV以上の陽子雑音を2%まで減らす性能がある。8c.u.の鉛板と原子核乾板、シンチレーティング・ファイバーからなるイメージングカロリメータは、シャワー発達の様子を2次元的に観測することより、さらに95%の陽子雑音の除去が可能である。装置の概要及び性能を、1994年9月の観測結果とあわせて報告する。

1 はじめに

高エネルギー電子成分はおもに超新星残骸内で加速され、銀河内を伝播するうちにシンクロトロン輻射や逆コンプトン過程によってエネルギーを失う。そして、超新星残骸内や銀河内の滞在時間（捕捉寿命）のエネルギー依存性により、数GeV以上の領域でエネルギースペクトルに変化が現れると考えられている[1]。しかしながら、これまで観測の難しさのため精度の高いエネルギースペクトルが得られず、その変化を十分に観測出来ているとは言い難い状況である。このため、単一測定器による数GeVから1000GeVの領域での、高精度のエネルギースペクトルの測定が必要とされている。

このような観測を実現させるためには、高い電子検出効率と大面積という互いに反する性能を合わせ持つ測定

* 1 神奈川大学工学部 * 2 宇宙科学研究所 * 3 立教大学理学部 * 4 青山学院大学理工学部
* 5 東京大学宇宙線研究所 * 6 クリアーパルス株式会社

器の開発が不可欠である。従来用いられてきたチェレンコフ光測定器[2]や遷移放射検出器[3]は、100GeV以下では高い電子検出効率を持つが、有効立体角が小さく装置が大型化する。このため気球実験では統計精度を上げることが難しいだけでなく、100GeVを越す領域では検出効率自身が悪くなる。エマルジョン・チェンバーは、大面積化が容易で1000GeV以上の領域まで観測が可能な唯一の装置である[4]。しかし、100GeV以下ではシャワーの検出が困難で、時間分解能がないため到来方向の測定が出来ないという欠点がある。我々はこのような既存の測定器の欠点を克服し、エネルギースペクトルの精密測定を行なうために、シンチレーティング・ファイバー(SCIFI)を活用した新しい方式の観測装置を開発している。この装置は、数100GeV以上のエネルギー領域で時間分解能を持つ唯一の装置で、加速源の同定の有効な到来方向の観測を行なう性能を備えている。

この装置の特徴は、SCIFIベルトと鉛版からなるシャワー検出器を用いて、シャワーの形状から電子の選別を行なう点にある。さらに原子核乾板とSCIFIを併用する事により、これまでのエマルジョン・チェンバーのデータを参考に、電子選別の性能を確認することが出来る。観測するエネルギー領域としては、三陸地方でのRigidity Cutの影響を考慮して、10GeV以上の電子の観測を行なうようデザインしてある。本稿では、観測装置、モニタリングシステムの概要と1994年度の気球実験について報告する。

2 一次電子観測装置 (BETS)

我々が一次電子観測のために開発を行なっているのは、BETS (Balloon Borne Electron Telescope with Scintillating Fibers) と呼ぶ装置である。この装置は、検出器、データ記録システム、回路システム、及びテレメータ伝送システムから構成されている。検出器の SCIFI で観測された宇宙線シャワーは、電子起源以外のシャワーを可能な限り除くため、トリガーシステムによる判定を行なう。トリガーされたシャワーの SCIFI からシンチレーション光は、トリガー信号に同期するゲート機能を持つイメージ・インテンシファイアー (I. I.) で増幅され、電子シャッター機能をもつ CCD カメラで撮像される。撮像された画像データは機上でデータ処理を行ない、アドレス値と輝度値を機上に搭載された EXB8mm テープに記録すると同時に、PCM テレメータによって地上に伝送している。

これらのデータ処理とトリガー信号を作る回路システムは、VME 規格と同じサイズの基板で統一されており、南極周回気球で開発された PPB 用のバスラインを使用している。このシステムでは、高速化のため各部の処理を並列して行うことができる Z80 のマルチ CPU システムを採用している。図1に観測システム全体の構成図を示す。

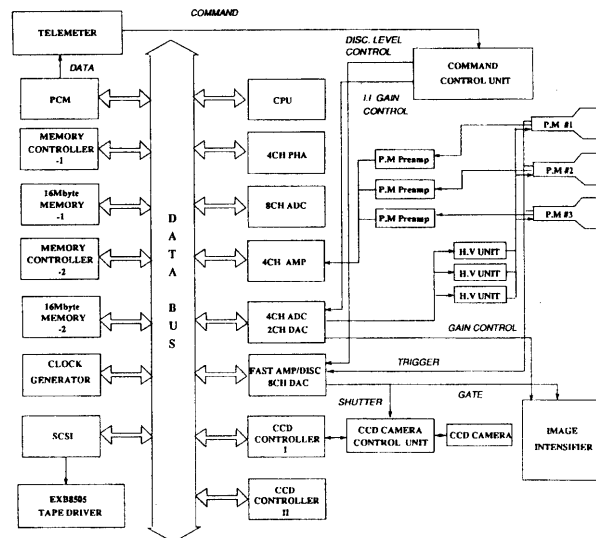


図1 電子観測装置のシステム構成図。

I. I. や光電子増倍管 (PM) では、数kVを越す高圧電源を使用しているため、気球環境下での放電を避けるために観測装置全体を直径1 m、高さ1.2mの円筒形のアルミ製耐圧気密容器に収納している。EXB8mmテープドライバは、発熱量が大きいことやテープ交換作業を行う必要があることを考慮して、本体とは独立した小型の気密容器に収納している。バッテリー、ゴンドラ、容器等を除いた装置本体の重量は約120kgで、全消費電力は約45Wである。II用の高圧電源については、特別な電源を開発し消費電力を1.5Wに抑えている。装置の主な諸量を表1に示す。

表1 装置諸量

装置	重量	電力	電圧	サイズ
Image Intensifier	30kg	1.5W	15V	径 20cm 長さ 70cm
CCD camera	0.5kg	5.5W	12V	
trigger system	12kg	1W	2.5kV ×3	
SCIFI Detector	40 kg			28(W) ×28(D) ×10(H) cm
PPB system	35 kg	37W	5V 12V 15V	19(W) ×22(D) ×27(H)cm
合計	117.5 kg	45W		

2.1 検出器

検出器は、図2に示されているように、SCIFIベルトおよび原子核乾板を鉛版と交互に重ねた構造をしており鉛は全体で約8c.u.の厚さで、面積は28×28 cm²である。電子シャワーのトリガーを行なうため、0、2及び8c.u.の深さのところと各々厚さ1cm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、SCIFI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ニングを行い、100GeV以上のシャワーのエネルギーカーリブレーションと電子の最終的確認を行うために用いる。

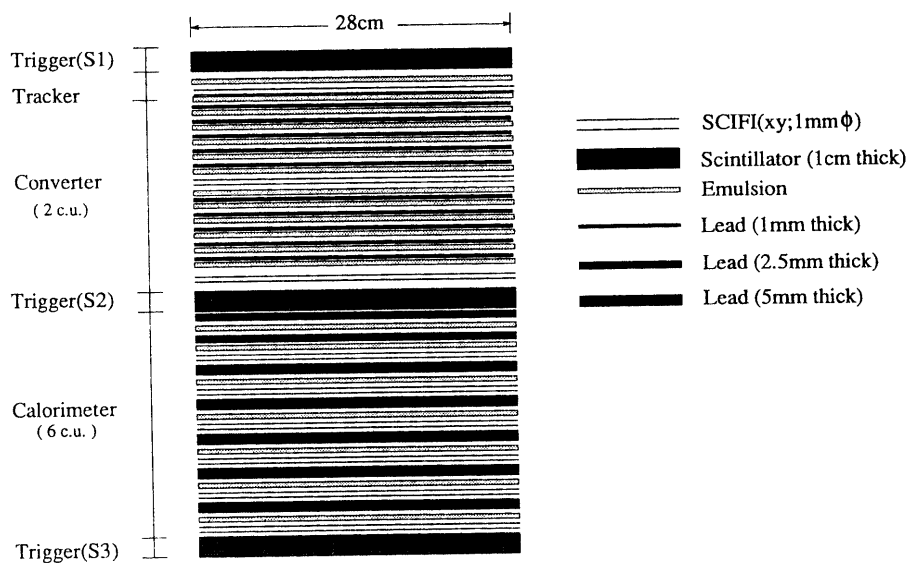


図2 シャワー検出器を横から見た概念図。シンチレーティング・ファイバーは1c.u.の鉛と交互に入っている。

SCIFIは径が1mmで長さが150cmあり、検出器の部分ではこのSCIFI280本を巾28cmの1枚のベルト状に束ねている。読みだし側では、7cm巾の4本のベルトに分解して4層に重ね、直径10cmのI. I.の入力窓に内接する形で接続している。2次元の位置情報を得るために、このようなベルトをx、y方向に交互に直角に重ね、この一組を1c.u.の鉛版と交互に積み重ねている。そして、図3に示すように、x、y両方向のSCIFIベルトを1台のI. I.に接続している。検出器におけるSCIFIベルトの数は、x、y各々の方向に各9層で、合計18層分のベルトを用いている。SCIFIの総本数は5,040本で、1台のI. I.で5040チャンネル分の読み出しをしていることになる。

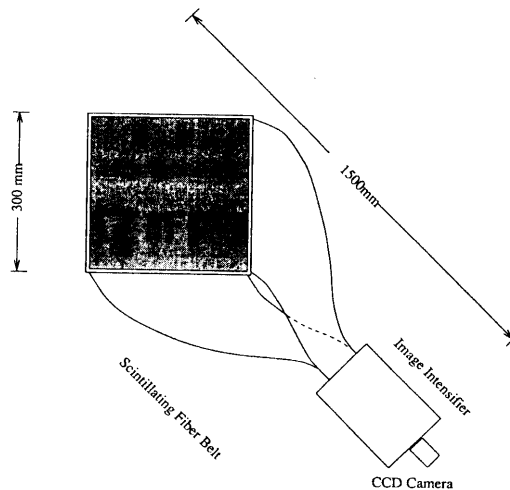


図3 シンチレーティング・ファイバーベルトの概念図。互いに直角方向のベルトを1台のI. I.に接続している。

I. I.にはゲート機能が設けられており、トリガーによるゲート信号がきた時のみ増幅を行うようになっている。内部の蛍光体が発光の記憶素子として働き、このようなゲート機能を可能にしている。蛍光体の減衰時定数が約100 μ sであることから、光量を確保し雑音をできるだけ減らすため、ゲート幅は約10 μ sとしている。CCDカメラ (SONY, XC-77RR-CE) は、トリガーから約1 μ s後に約70 μ sのシャッターを開けるシャッターモードで使用している。このCCDカメラはシャッターモードで使用すると、ノンインターレースモードとしてのみ動作するため、水平方向には1本おきに走査し縦方向の分解能は半分になっている。CCDカメラ全体の画素数は750×581画素であるが、SCIFIからの画像データは512×512のサイズに収まるよう縮小している。ノンインターレースモードを使用するため、実際に取り込む画像データの画素数は、水平方向のデータが半分に減り512×256画素である。

2.2 トリガーシステム

トリガーシステムは、荷電粒子によって各シンチレータ内で発生したシグナルを検出し、それらの同期をとることによってトリガーを発生するようになっている。各シンチレータからの蛍光は、PMで電子に変換しアノードとダイノードからそれぞれ信号として取り出す。ダイノードの信号は、電荷有感型の前置増幅器で積分したのち波形整形を行ない、その波高値を入射粒子のエネルギー情報として記録している。一方アノードの信号は増幅した後に波形整形を行ない、パルス波高弁別によりトリガーの信号として用いている。各PMからのアノード信号の同期によりトリガーが発生し、画像データ処理作業のシーケンスが開始される。

トリガーには、3層のシンチレータからのシグナルの同期を用いるシャワー・モードと上の2層のシンチレータのみの同期を用いるシングル・モードの2種類のモードがある。これらのモードは、観測目的に合わせて地上からの指令電波によりコマンド・コントローラを作動させて選択することが出来る。シャワー・モードの場合は、

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時にトリガーがかかるようになっている。シミュレーション計算によれば、この様なトリガー条件により10GeV以上の電子は85%以上がトリガーされるのに対して、主なバックグラウンドである陽子は約98%が除去される。これは、陽子が相互作用してこの条件を満たすシャワーを作る確率が、電子に比べて非常に低いためである。

この検出器に、1秒間あたりに入射すると期待される陽子と電子の（単位立体角あたりの）フラックスは、表2に示すとおりである。陽子以外の原子核成分がトリガーにかかる確率は無視できるほど小さい。出来る限り陽子を機上で除去して、トリガーのレートを1～2Hzに押さえるためにはシャワー・モードでの観測を行なう必要がある。また、7mbでの二次 γ 線の一次電子の数とほぼ同じになるので、これより高い高度での観測が望ましい。

表2 宇宙線の入射量(/sec・sr)

エネルギー	> 10GeV	> 30GeV	> 100GeV	> 300GeV
陽子	16	2.4	0.28	4.1×10^{-2}
電子	1.1×10^{-1}	8.1×10^{-3}	5.1×10^{-4}	4.1×10^{-5}

シングル・モードでは、1層目のシンチレータは0.7～5粒子、2層目は0.7粒子以上のシグナルが同時に発生した場合にトリガーがかかるようになっている。このモードでは、荷電粒子がこの2枚のシンチレータを通過した時には、ほとんどの場合にトリガーがかかる。シャワーの観測が困難な地上での性能テストや光量のキャリブレーション、上昇中での装置のレスポンスの確認等にこのモードを用いている。トリガーを発生するための各シンチレータからのシグナルのしきい値は、各モード毎に先に述べた値に設定されているが、トリガー頻度を調節する必要が生じた場合のために、地上からのコマンドで変更できるようにもなっている。

2.3 画像データ処理システム

1. I.の出力窓に接続したCCDカメラからのビデオ信号は、増幅後オフセット調整を行ない、8ビットのフラッシュADCでデジタル信号に変換する。実際に取り込みを行なう画像データは512×256画素であるが、水平方向の画素については隣り合う2画素ずつの算術平均をとって、1画面の大きさを256×256画素に圧縮している。各画素の輝度値は、それぞれ独立にデジタルコンパレータにより、しきい値より明るい画素のみ記録している。画像データは、x, yアドレスと輝度値の3バイトのデータを一組としてデュアルポート・メモリーに書き込むようになっている。このメモリーは全画面の約6%に相当する4kまでの画素を読む込むことが出来る。もし画素数がこれ以上になった場合は、dead timeを減らすため始めの4k分だけを記録してあとは捨てている。画像データは、このデュアルポート・メモリーをとうしてテレメータ系と記録系に分け、一部を地上に伝送すると同時に機上でEXB8mmテープに記録している。

EXB8mmテープへの記録は、次節で述べる電力消費の節約と発熱量の抑制のため、大容量バッファメモリーにデータを転送してから行なっている。この際、デュアルポート・メモリーの一方からデータを読み出し中であっても、他方が空であれば新しい画像データの取り込みが可能で、両方が一杯の時にのみトリガーシステムに対して禁止信号を送出する。そして、バッファメモリーへのデータの転送が完了して、デュアルポート・メモリーのいずれか一方が空になると禁止信号を解除する。テレメータ系へのデータの送付もやはりバッファメモリーを用いて行なっているが、この場合はデータの転送がまだ終了していない時はこのバッファメモリーへの書き

込みは行わず、テープ用のバッファメモリーのみ書き込みを行なう。テープ用バッファメモリーへの転送は約0.2秒で完了し、テープへの書き込みは最大画素数(4k)の場合でも毎秒約3画面が可能である。一方テレメータで1画面を伝送するためには、画素数が4kの場合には約7.2秒が必要である。

2.4 データ記録システム

EXB8mmテープドライバは、市販のものをそのまま利用しているので電力消費量大きい。このためバッファメモリーにデータを一旦蓄え、メモリーが一杯になると間欠的にテープドライバを動作させ、それ以外の時は電源を切る方法により消費電力を節約している。テープへの書き込み速度は100kByte/s以上で、バッファメモリーに貯えたデータを書き込む時間は十分短いので、電力消費量を平均的に軽減できる。バッファメモリーの容量が大きいほどテープへの書き込み回数は少なくなり、電力消費量を押さえることができるので、このシステムでは16Mバイトの大容量メモリーを2系統使用している。観測データの欠損が起らないようにするため、まず1系統にデータを書き込み、データが16Mバイト貯まりテープへの書き出しが始まると、もう一方の系統のメモリーに次のデータを書き込みを開始する。メモリーが一杯になると予想される時間の少し前に、テープコントローラによってドライバに電源が入り、データの最後までテープを送って追記するようになっている。そして、書き込みが終了するとテープを巻き戻してドライバの電源を切る。最後のデータまで、テープを送るためにドライバに電源が入っている時間は、2時間テープ(5Gバイトテープ)では最大7分である。

4k画素のデータが毎秒3画面観測された場合、16Mバイトメモリーへの書き込みは約7.4分で終了するので、テープの終り近くではドライバの電源が常に入った状態になる可能性がある。しかし、実際の観測では平均の画素数は200程度で、観測時に取り込むのは毎秒2画面程度であるので、テープに対する書き込みは2~3時間に1回の割合であり、大いに消費電力の軽減が図られている。テープへの書き込みフォーマットは可変長形式で、PCMテレメータと同じように、シンク・コード、イベント番号、データ数、次に順次画像データが入る構成になっている。

2.5 テレメータシステム

PCMテレメータは、32.768 kHz Bi-phase 変調方式で8ビット/ワード、64ワード/フレームで32フレーム/秒のデータ伝送を行っている。表3にイベントが発生した場合のPCMデータフォーマットを示す。イベントが発生しない場合のフォーマットは、W5までは同じで残りの画像データ部分をFFhで埋めるようになっている。PM用高圧、LI用高圧、ディスクリレベル、温度、気圧、気密容器圧力、磁気センサー(x軸、y軸)等のHKデータは32フレームのサブコミでW3に入っている。PCMテレメータは、画像データ処理部と共有しているデュアルポート・メモリーのデータが新しく書き換えられた時に、シャワーが観測されたと認識して読み出しを開始するようになっている。

表3 シャワーが観測された場合のPCMフォーマット

W 0	SYNC1 EBh	W 0	SYNC1 EBh	W 0	SYNC1 EBh
W 1	SYNC2 90h	W 1	SYNC2 90h		W 1	SYNC2 90h
W 2	FC1 xxh	W 2	FC1 xxh		W 2	FC1 xxh
W 3	FC2 xxh	W 3	FC2 xxh		W 3	FC2 xxh
W 4	FC3 xxh	W 4	FC3 xxh		W 4	FC3 xxh
W 5	FFh	W 5	FFh		W 5	FFh
W 6	EVNT1 xxh	W 6	EVNT1 xxh		W 6	EVNT1 xxh
W 7	EVNT2 xxh	W 7	EVNT2 xxh		W 7	EVNT2 xxh
W 8	EVNT3 xxh	W 8	EVNT3 xxh		W 8	EVNT3 xxh
W 9	TOTL1 xxh	W 9	02h		W 9	nnh
W10	TOTL2 xxh	W10	CX017 xxh		W10	CXnnn xxh
W11	PHAD1 xxh	W11	CY017 xxh		W11	CYnnn xxh
W12	PHAD2 xxh	W12	CD017 xxh		W12	CDnnn xxh
W13	PHAD3 xxh	W13	CX018 xxh		W13	FFh
W14	PHAD4 xxh	W14	CY018 xxh		W14	FFh
W15	PHAD5 xxh	W15	CD018 xxh		W15	FFh
W16	CX001 xxh	W16	CX019 xxh		W16	FFh
W17	CY001 xxh	W17	CY019 xxh		W17	FFh
W18	CD001 xxh	W18	CD019 xxh	W18	FFh
.
.
.
.
.
W61	CX016 xxh	W61	CX034 xxh		W61	FFh
W62	CY016 xxh	W62	CY034 xxh		W62	FFh
W63	CD016 xxh	W63	CD034 xxh	W63	FFh

3 モニターシステム

シンチレーティング・ファイバーによる宇宙線シャワーの観測は、世界でもはじめての試みであり、どのような画像データが得られるかを完全に予測することは困難である。したがって、地上からのモニターは単に観測の状態を知るだけでなく、最適な観測条件を地上からのコマンドで設定するためにも不可欠なものである。このため、これまでに開発されてきたVMEバス・ボードコンピュータ（OS9）によるPCMデータ受信システムに、UNIXワークステーションをネットワークで接続する高機能モニターシステムを開発した。このシステムでは、シャワー画像のリアルタイムの表示、トリガー頻度の時間変化等のグラフ表示をすることが出来る。またコマンドシステムは、観測高度に応じた最適の観測条件を得るため、トリガー条件やI. I.のゲインを変更するために用いた。図4には、モニターシステムのハード及びソフトの構成図を示す。

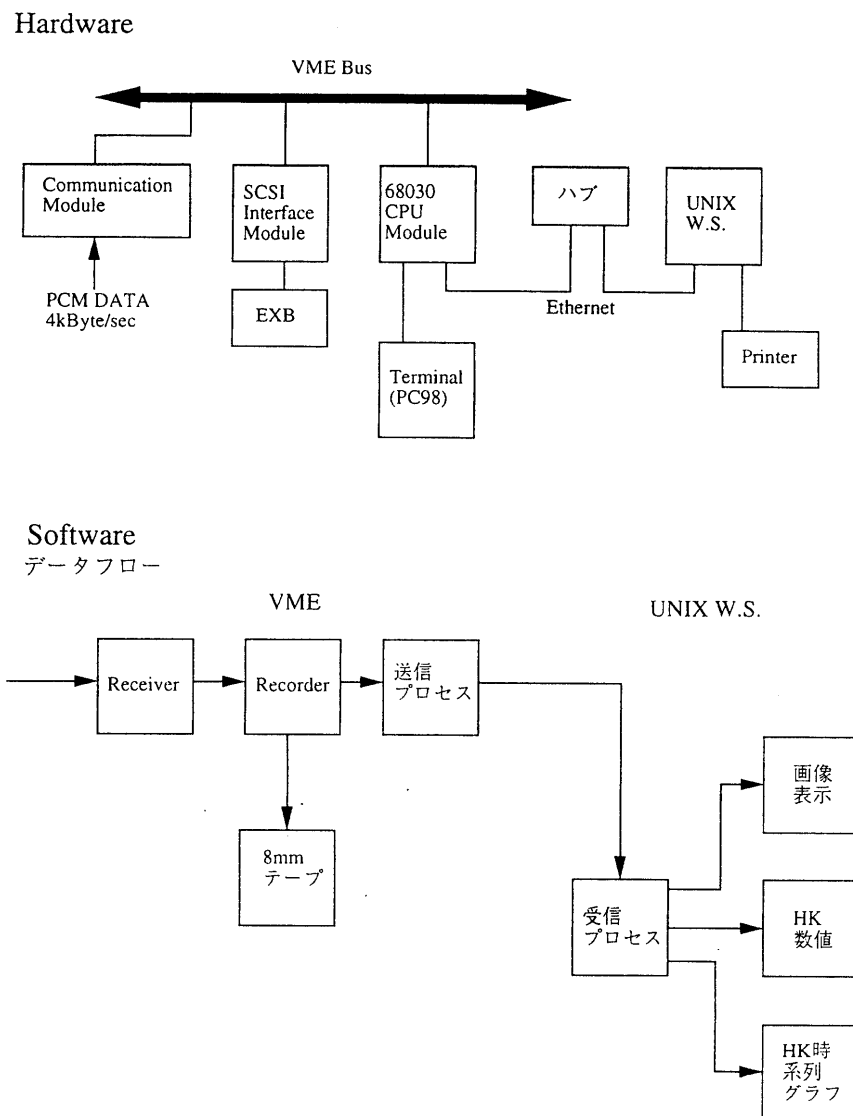


図4 モニターシステムの概念図。上はハードウェア、下はソフトウェアについて示す。

3.1 ハードウェア

モニターシステムのハードウェアは、VMEバス・ボードコンピュータ（以下VME）とUNIXワークステーションの組合せで構成されている。VME側では受信されたPCMデータの取得、UNIXワークステーション側ではそのデータ処理を行なっている。VMEバスには、PCMデータを取得するための通信モジュール、受信データをEXB8mmテープに記録するためのSCSIインターフェースモジュール、及び32bitの68030マイクロプロセッサを搭載したCPUモジュールがある。UNIXワークステーションは、micro Sparc (70MHz) の Sparc Classic 互換機を用いている。両システムは、ハブを介して Ethernet (10Base-T) でネットワークを形成している。

3.2 ソフトウェア

VME側でのソフトウェアとしては、ブラジルでの気球によるX線観測[5]のために開発されたNOVAバッファーマネージャ[6]を使用した。このソフトウェアは、まず32kbpsのPCMデータを受信プロセスで取得し、次に記録プロセスで8mmテープに記録を行なう。さらに送信プロセスでソケットを生成して、バッファの内容をネットワーク上のワークステーションに送信する。ワークステーションでは、送信側のホストを指定して接続を受け付けるソケットを受信プロセスにより生成し、データを標準出力に出力する。最後に、表示プロセスで標準入力からデータを受け取り、データ処理をおこなって画面に表示する。HKデータの表示は、数値表示だけでなくX-Windowシステムによるグラフ化も行なっている。観測データとしては、トリガー用シンチレータからのシグナルの波高値とシャワーイメージの画像データ表示を行なった。画像データの表示は、X-Window上で輝度に応じて色分けを行なうほか、マウス操作によって表示の停止や再表示、重ね書などが行なえるようになっている。さらに表示画像上でのマウスによるポインティング操作で、イメージの拡大やその点での輝度表示ができるようになっている。このようなモニター画面の表示例を図5に示す。

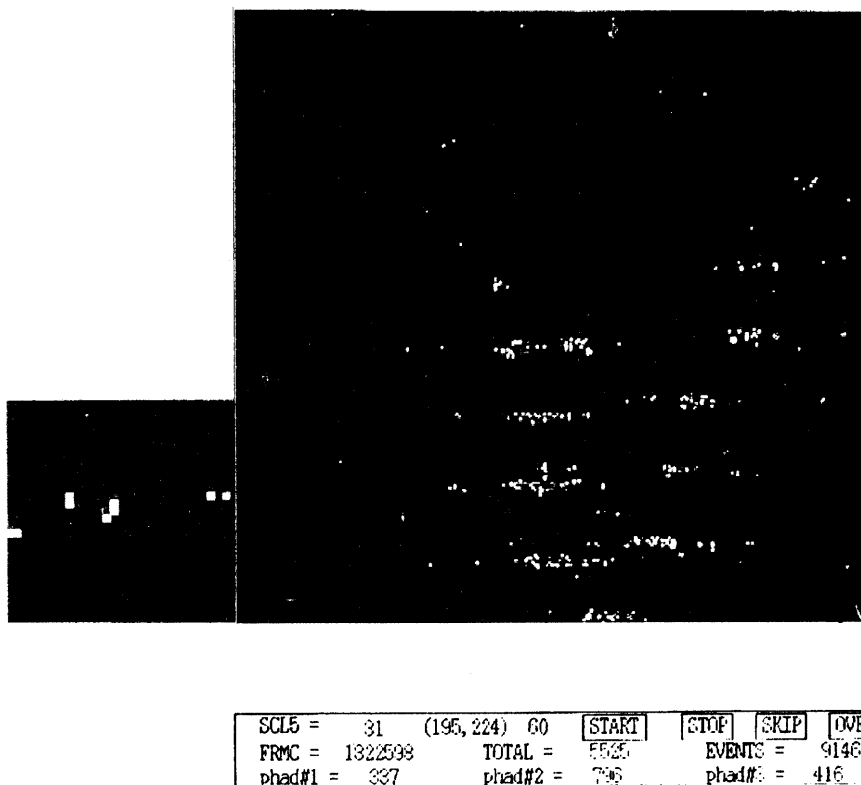


図5 モニター画面の表示例。x、y両方向のシンチレーティング・ファイバーで観測されたシャワーが同じ画面に表示されている。左下の画面は、画面の一部を拡大して表示したもの。

3.3 LEDを用いたファイバー位置の測定

観測に用いたSCIFIベルトは、先にも述べたようにI. I.への接続のため1枚のベルトを4層に重ねている。またx,y方向のSCIFIベルトを1台のI. I.に接続している。従ってシャワーを幾何学的に再構成するには、各ファイバーの位置と画像との対応を求めておく必要がある。このため、SCIFIの一本、一本にLEDを照射して、CCDの画像上での各SCIFIの位置を測定した。実際には、LEDを一定時間の間SCIFIの検出器側の端に照射し、モニターシステムでその画像データを記録して各SCIFIの位置測定を行なった。図6はその位置測定のための画像データの表示例であるが、約25本のSCIFIがはっきりと分離して写っており、直径1mmのSCIFIの断面がCCD画像上では約10画素の拡がりを持っていることが確認出来る。放球前に5,040本すべてのSCIFIについて、そのCCDの画像上での中心位置を画素数単位の座標値で決定した。

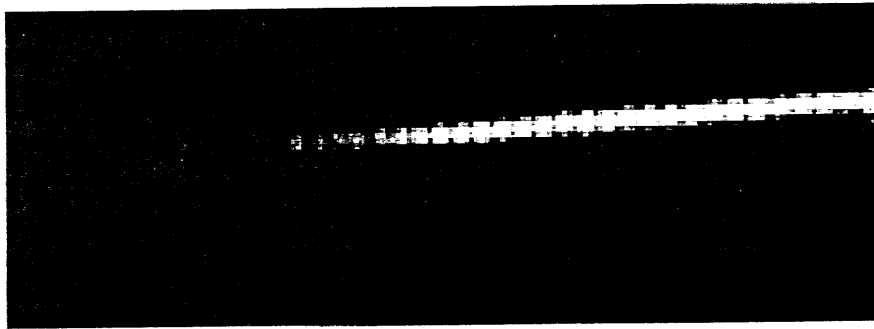


図6 シンチレーティング・ファイバーにLEDを照射してその位置を決めるための画像の表示例。

4 1994年三陸気球実験

1994年の気球観測は、9月8日に三陸基地において行なわれた[7]。この観測では、初回(93年8月)の観測[8]に用いたプロトタイプ回路システムに改良を加え、長時間安定した観測を行なうことが出来た。放球は午前10時55分に行なわれ、その後約3時間で33~37km (4.8~8.4 g/cm²)の高さのレベル・フライトに入り約11時間半の観測が行なわれ、この間に約10万例の宇宙線シャワーが記録された。図7にこの観測での経過時間と大気の厚みで表した観測高度の関係を示す。

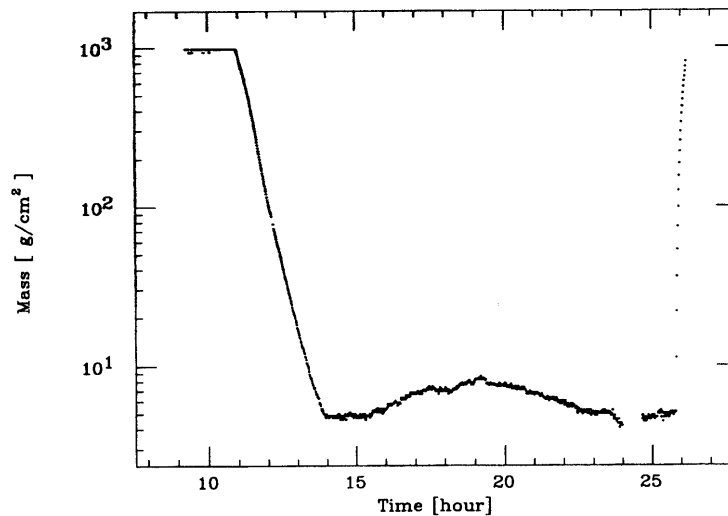


図7 大気の厚さで表した気球高度と経過時間の関係。

4.1 観測

上昇途中の約 120 g/cm^2 の高度まで、装置のテストのためシングル・モードで観測を行ない、その後シャワー・モードに切替えている。図8に示されているように、レベル・フライト中でのシャワーのトリガー頻度は約4Hzであったが、実際のデータ取り込みは約2.5Hzであった。フライト中に機上のEXB8mmテープに書き込まれたデータの総量は約450MBであった。

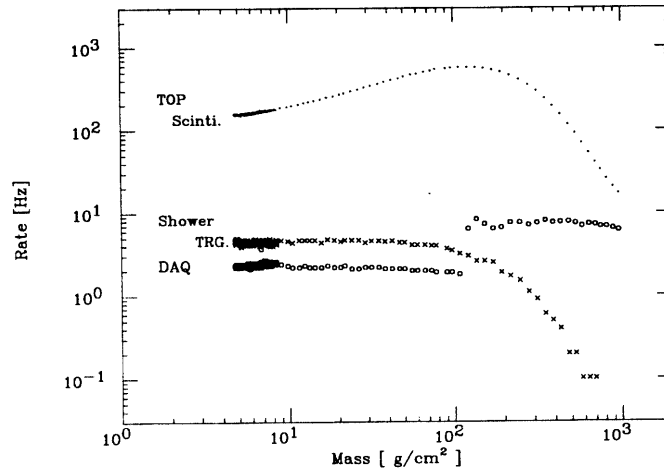


図8 カウンティングレートと大気の高さを示した気球高度の関係

シミュレーションによれば、シャワーモードでのトリガー条件では電子に対するトリガー効率、同じエネルギーの陽子の約50倍高く、 10 GeV 以上の電子に対する有効面積は $1090 \text{ cm}^2 \text{ str}$ であるのに対して、陽子に対しては $22.7 \text{ cm}^2 \text{ str}$ に過ぎない。この場合に、 $10 \sim 100 \text{ GeV}$ のエネルギー領域で天頂角が 30 度以内の入射角に対しては、電子が全トリガーイベントに占める割合は $30 \sim 40\%$ であると予想される。

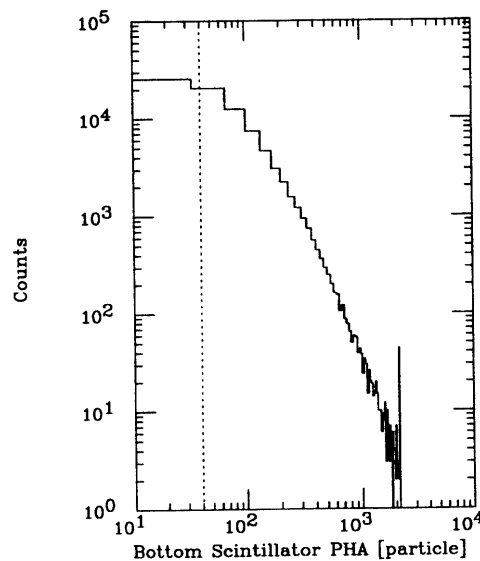


図9 最下段シンチレータの波高値の微分スペクトラム。横軸の単位は、波高値を粒子数に勘算して示してある。点線はしきい値を示す。

4.2 トリガーレート

検出器の最上部のシンチレータ (S_1) の計数率は、図8に示されているように約 120 g/cm^2 の高度で最大になっており、シミュレーションの結果と良く一致している。図9は検出器底部に取り付けたシンチレータ (S_3) の波高値から求めた粒子数の微分スペクトルである。約2000粒子でADCが飽和しているが、これは電子の場合に約300GeVのエネルギーに相当する。原子核乾板では、300GeV以上のシャワーは30例検出されており、その内電子と思われるイベントは4例であった。しかし、このいずれも2000粒子以上のシャワーとは対応していないので、これらのイベントは装置の dead time の間に入射したものと考えられる。実際、シングル・モードで観測を行なった場合にはほとんどのシャワーに対してトリガーがかからないことや、レベルフライト中の dead time が35%近くあったことを考慮すると、300GeV以上の電子数はほぼ1個となり統計的に矛盾しない。

トリガーレートが予想の2Hzより大きくなっているのは、 S_2 、 S_3 のシンチレータのしきい値を低く設定したため、10GeV以下のシャワーからトリガーがかかったことによる。実際、ソフト的に10 GeVに相当するしきい値を設定した解析では、トリガーレートは約1.6Hzとなりシミュレーションの期待値とほぼ一致する。

4.3 画像データ

先にも述べたようにこの装置では、x、y方向のSCIFIを一台のI. I.で観測しているため、両方向のシャワーイメージがひとつのCCD画像として表示されている。このため、イメージをx、y方向に分離して各方向ごとに入射粒子の方向を決め、幾何学的に再構成する必要がある。このような画像処理を行なった例を図10に示す。取り込みが可能な画素数の最大値は4kであるが、エネルギーが大きくなるとこの値を越すシャワーが存在する。図11に示す画素数と S_3 のシンチレータの波高値との相関からわかるとうり、100GeVのシャワーエネルギーに相当する600粒子相当以上では、多くのイベントの画素数が4kをこえている。このようなイベントでは、画像データに欠損があるため画像の正確な再構成は困難であるが、今回は100GeV以下の電子が大部分なので解析における問題はない。

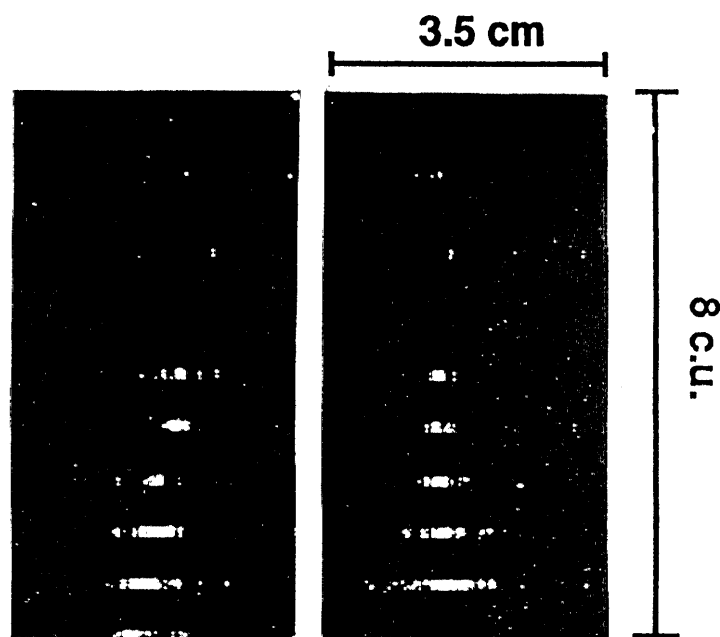


図10 CCDの画像をx、yの方向に分離して再構成したシャワー画像の表示例。

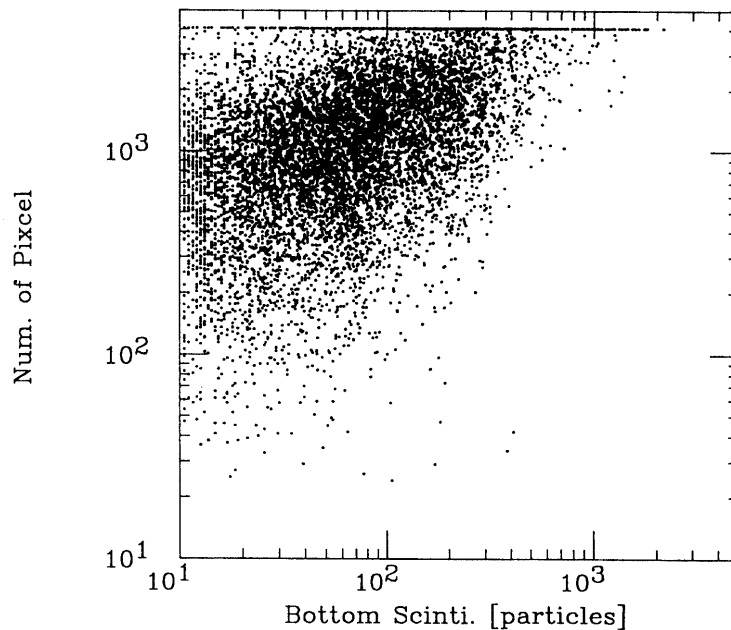


図11 8 c.u.の深さにあるシンチレータ (S_3) の波高値から換算した粒子数と画素数の相関。観測できる画素数の最大値は4kであるが、6000粒子以上のイベントは大部分が4kを越えている。

4.4 電子選別法

観測時のトリガーとシンチレータの波高値を用いた選別により、陽子のバックグラウンドは約2%になり、陽子と電子の比(10GeV以上)は約3対1になっていると推定できる。これからさらに陽子を除去するために、電子と陽子のシャワーの形状の違いを用いる次のような電子選別法を開発した。図12は、シャワー軸から5mm以内にあるSCIFIに対するシャワー粒子のエネルギー損失が全エネルギー損失に占める割合の分布を、シミュレーションより求めたものである。陽子起源のシャワーは核相互作用の影響により横方向の広がりが相対的に大きくなるため、この割合は平均的に低くなる。これに対して電子起源のシャワーは広がりが狭い。この結果、70%以上の割合を持つシャワーを選ぶと、電子は85%が残るのに対して陽子は約5%しか残らない。したがって、このような条件でシャワーを選べば陽子の雑音はさらに20分の1に減り、全体として1/1000以下に減らすことができる。

100GeV以下のエネルギー領域では、この方法で電子のエネルギースペクトルを求めることが可能である。しかし、100GeVを越す領域ではさらに除去率を高める必要がある。シミュレーションの結果から、100GeV以上の陽子の核相互作用では二次ハドロンや後方散乱粒子の飛跡が検出可能であることが確かめられている。このような粒子は、100GeV以上の陽子が相互作用した場合に非常に高い確率で存在するので、このような飛跡の観測により陽子の雑音をさらに10分の1に減らせると予想している。この結果エマルジョンチェンバーに匹敵する除去率が実現でき、10GeVから1000GeVでのエネルギースペクトルを十分な精度で求められると考えている。

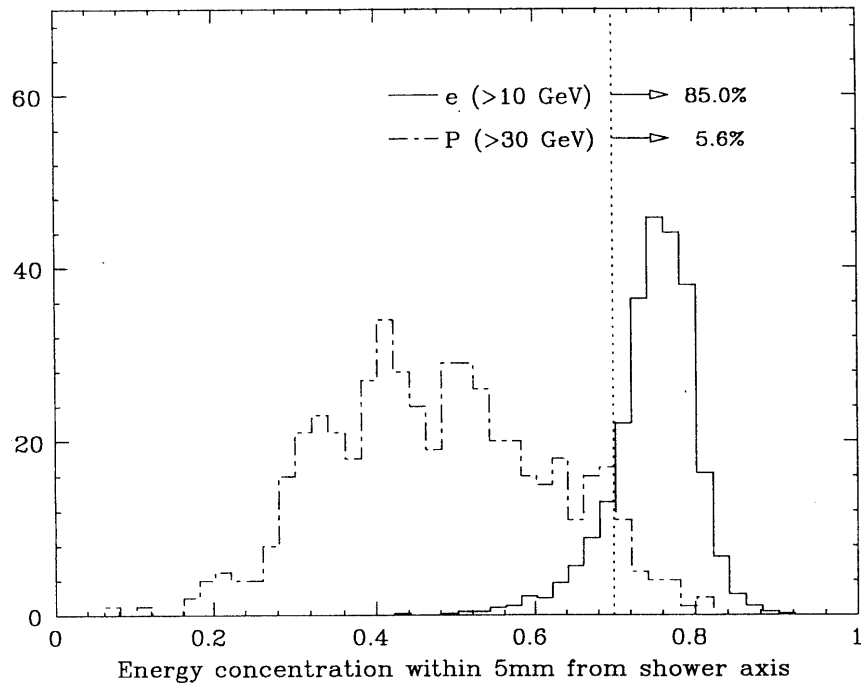


図12 シャワー軸から5mm以内のシンチレーティング・ファイバーでのエネルギー損失が全体に占める割合のシミュレーション計算の結果。この割合が70%以上の領域には10GeV以上の電子(実線)は85%が入っているが、30GeV以上の陽子(一点鎖線)は5.6%に過ぎない。

5 まとめと今後の計画

今回の観測では、100GeVまではほぼ期待どおりに観測が行なわれたので、10~100GeVでのエネルギースペクトルを得るための解析が進行中である。しかし100GeV以上の領域では装置の能力が不足して、完全なシャワーの観測が出来なかったため、装置を大幅に拡充して新たな観測を計画している。このため、BETS-2と呼ぶ装置の製作を行なっているが、その改良の具体的内容は以下のとおりである。

- 0、1、2 c.u.のシンチレーティング・ファイバーベルトの厚さを1層から4層にする。
- イメージ・インテンシファイアを2本に増やし、x、y方向を別々に撮像する。
- 取得できる最大の画素数を、x、y方向について16kとし、全体では32kとする。これにともない、データ量を押さえるためにオンラインで画像圧縮を行なう。

以上の改良にともないデータ量が飛躍的に増えるため、それに応じてデータ処理能力を向上させる必要がある。このためCPUは、現在の5倍の処理スピードをもつものにバージョン・アップする。またトリガーシステムの改善として、最上部のトリガー用シンチレータを15cmに離す。この結果立体角は減るが、二次電子や斜め入射の効果でトリガーにかかっている陽子雑音を抑えることができる。さらに、I. I.は縦置きにして検出部以外のライトガイドに相当するSCIFIを短くする。この結果、検出器以外のところで光るノイズを大幅に減らすことが出来る。

この装置による観測は、1995年9月を予定している。さらに1996年9月には、CERNにおいて10GeVから100GeVの電子ビームによる照射試験を行ない、検出器のエネルギーキャリブレーション、電子選別法の評価等を行ない最終的な結果を得る予定である。

参考文献

- [1] Nishimura J. *et al.*, Proc. of 24th International Cosmic Ray Conference, Vol. 3 (1995) 29.
- [2] Golden R.L. *et al.*, Ap. J., 287 (1984) 622.
- [3] Tang K.K. *et al.*, Ap. J., 278 (1984) 881.
- [4] Nishimura J. *et al.*, Ap. J., 238 (1980) 394.
- [5] 釜江常好他、宇宙科学研究所報告特集第31号 (1993)
- [6] Nomachi M, OS9-MEMO No.4 (1990).
- [7] 田村忠久他、大気球シンポジウム、平成6年、p84.
- [8] 鳥居祥二他、大気球シンポジウム、平成5年、p115.