

共同研究

宇宙環境におけるシンチファイバー検出器の実証化研究

田村 忠久* 鳥居 祥二** 常 進***
高柳 昌弘**** Maurice Haguenaer*****

Study on the performance of a scintillating fiber detector for cosmic-ray observations in the space

Tadahisa TAMURA * Shoji TORII ** Jin CHANG ***
Masahiro TAKAYANAGI **** Maurice HAGUENAUER *****

1. はじめに

宇宙線は、超新星爆発やブラックホール、活動銀河核といった宇宙の中でも特異な高エネルギー現象(Fig.1)において加速される電子、陽子、原子核によって構成されている。従って、可視光や電波の観測では不可能な非熱的な宇宙像を、宇宙線の観測により明らかにすることができる。さらに、天文学における最大の謎である暗黒物質の正体や起源についても重要な手がかりを与えることができる。しかしながら、宇宙線は大気との相互作用により地上ではそのままの姿で観測することが不可能である。特に、宇宙線の種類やエネルギーを決めるためには大気の影響を受けない宇宙空間での人工衛星や宇宙ステーションにおける観測が不可欠である。さらに、宇宙線の強度はエネルギーのほぼ3乗に比例して減少するため(Fig.2)、高エネルギー領域での観測を行うためには、装置の面積を大きくする以外に方法がない。宇宙観測において面積の大きな装置を用いることは、必然的に重量の増大やデータ量の増加をもたらす。これまでの観測で

は10トンに近い観測装置がすでに用いられている。しかしながら、これ以上の装置を打ち上げることはロケットの打上げ能力や予算的な問題から現在では不可能な状況である。

我々はこのような状況にブレークスルーをもたらすために、シンチファイバーと呼ばれるシンチレータ(荷電粒子の通過によって蛍光を発する物質)の機能をもつ光ファイバーに注目して、宇宙線観測用の測定器を開発してきた。このファイバーの利用により、従来は不可能とされてきた、宇宙線の種類と到来方向、およびエネルギーを同時に測ることが可能な測定器の製作が可能である。このファイバーは断面が1mm角のサイズであり宇宙線が通過するときに出すシンチレーション光の測定が容易であるため、宇宙線が鉛などの物質で起こす反応を画像イメージとして検出することができる。可視化されたイメージの解析から宇宙線の種類と到来方向が分かり、光量からエネルギーが求まる。従来の測定器では、これらの測定を各々別の装置で行っているために大型化している。

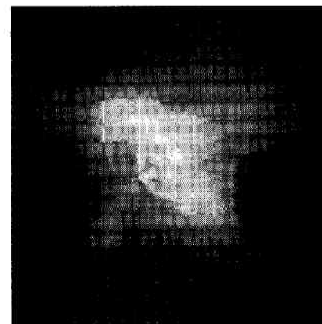


Fig.1 X-ray image of Crab pulsar obtained with CHANDRA X-ray observatory (satellite of USA). Super nova remnants are candidates of the most likely sources of cosmic rays.

* 助教授, 物理学教室
Associate Professor, Institute of Physics
** 教授, 早稲田大学理工学総合研究センター
Professor, Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University
*** 教授, 中国科学院紫金山天文台
Professor, Purple Mountain Observatory
Chinese Academy of Sciences
**** 副主任研究員, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
Japan Aerospace Exploration Agency
***** 教授, エコールポリテクニク大
Professor, Ecole-Polytechnique, Paris

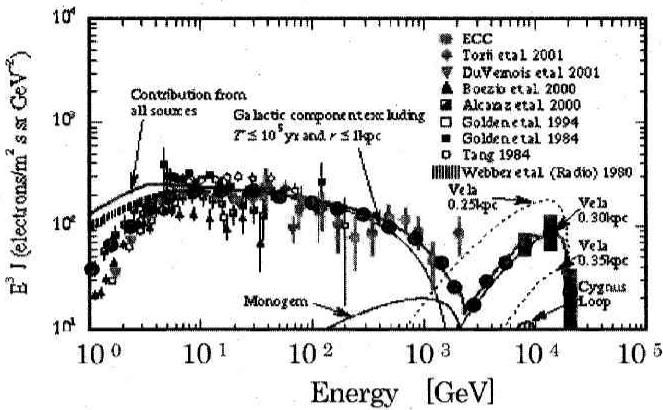


Fig.2 Spectrum of cosmic-ray electrons measured by several experiments. In vertical axis, electron flux is multiplied by the third power of electron energy. An expected spectrum to be obtained by CALET for 3 years is also indicated with large circles.

これまでの研究において、我々は気球搭載型のシンチファイバー検出器を世界に先駆けて開発し¹⁾、すでに10~100GeV領域での電子線観測²⁾、数GeV領域でのガンマ線観測に成功している³⁾。これらの結果は、宇宙における電子加速の研究や、大気中のニュートリノ振動問題に関連して重要な成果となっている。特に、電子線観測の成果は高く評価され、国立極地研が実施する南極観測事業の一環として、南極大陸における長時間気球観測のテーマにも選択され、2004年1月に13日間におよぶ気球観測を実施した。さらに宇宙ステーション(Fig.3)に搭載する観測装置としても、有力な候補として開発研究を実施している^{4) 5)}。

この研究では、特に宇宙環境下でも利用が可能なシンチファイバー検出器の研究開発を行った。そのため、放射線医学総合研究所にある重粒子線加速器 (HIMAC) や、欧州にある世界最大の加速器 (CERN-SPS) によるビーム照射テストを実施して、SciFi 検出器の性能を実証した。

2. ステーションでの宇宙線観測計画

現在、国際共同で建設が進んでいるスペースステーションには、日本が担当する JEM (Japanese Experiment Module) の居住区「きぼう」の船外に、宇宙空間での様々な実験を行うための複数のモジュールを搭載することができる EF (Exposed Facility) が用意されることになっている (Fig.3)。JEM / EF の標準の実験モジュールの重量は500kgに制限されるが、この他に最大2.5トン

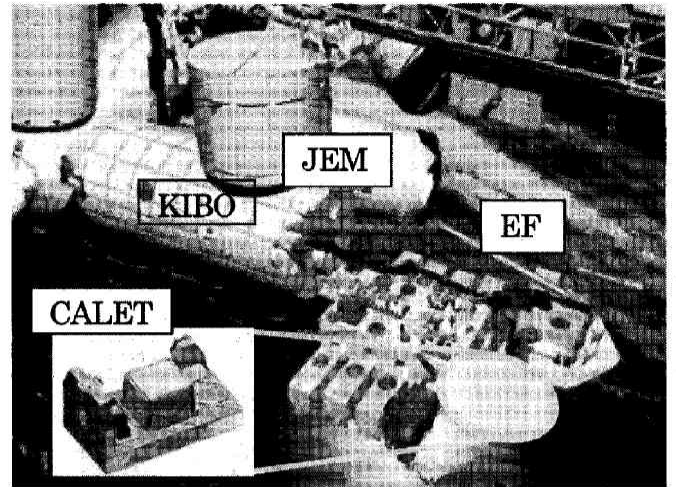


Fig. 3 We have been developing a cosmic-ray detector CALET to make observations of high energy electrons, gamma rays, and heavy nuclei at the JEM/EF on the International Space Station.

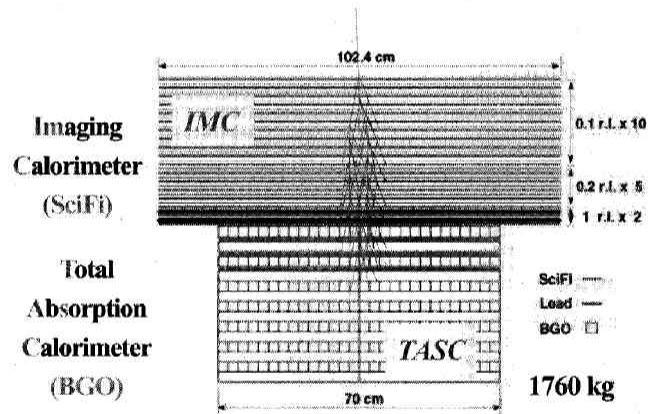


Fig. 4 Schematic drawing of CALET detector composed of the imaging calorimeter assembled with SciFi's and lead plates and the total absorption calorimeter of BGO.

のモジュールの取り付けが可能なアタッチポイントが2箇所準備される。前述したように、高エネルギーの宇宙線観測装置は大面積化が必須であるが、JEM/EFの許す2.5トンの観測装置重量と長期間の観測時間によって、強度が微弱となる高エネルギーの電子やガンマ線の観測が可能となる。特に Fig.2 のように 1 TeV 以上の宇宙線電子のスペクトルは、近傍の超新星残骸の影響を反映して、様相が大きく変わることが予想されている⁶⁾にもかかわらず、観測データがほとんど無く、スペースでの長時間観測のみが、その窓を開く鍵となり得る。

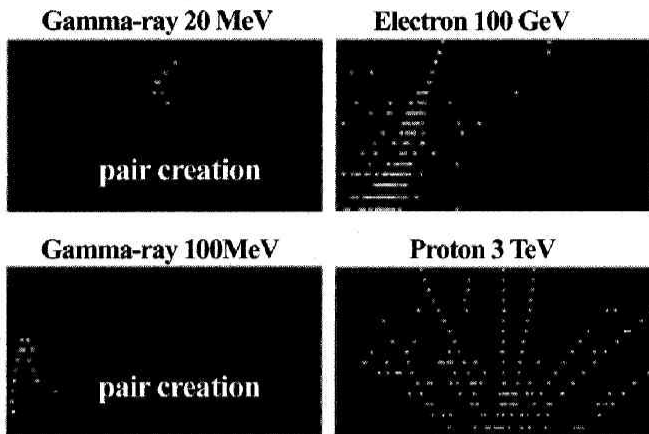


Fig. 5 Examples of simulated shower images of gamma rays, electron, and proton to be taken with the imaging calorimeter of CALET.

我々が提案している宇宙線観測装置 CALET (CALorimetric Electron Telescope) は、**Fig.4**に示すように約 1 m^2 の面積を持ち、上部と下部の検出器からなる。上部は 1 mm 角のシンチファイバー (SciFi: Scintillating Fiber) からなるベルトと鉛板を交互に積層したイメージングカロリメータとなっている。入射してきた高エネルギーの宇宙線は、合計 4 radiation length (r.l.) の鉛中で雪崩的に相互作用を繰り返す、多数の粒子を生成するカスケードシャワーと呼ばれる現象を引き起こす。シンチファイバーではカスケードシャワー中の荷電粒子 (主に電子と陽電子) によってシンチレーション光が発光するので、それを検出することによって、カスケードシャワーをイメージとして捉えることができる。直交する二方向に向けて積層されるシンチファイバーベルトによって、カスケードシャワーを X、Y 方向へ投影したイメージが得られる。**Fig.5** はイメージングカロリメータによって検出されるカスケードシャワー画像の例で、ガンマ線、電子、陽子が入射した場合についてシミュレーションを行った結果である。このイメージ情報によって、入射粒子の種類の選別、入射方向の決定、シャワー発達の開始点の決定などを行うことができる。

CALET の下部は BGO シンチレータの角柱で組み込んだ全吸収型のカロリメータとなっている。BGO はほぼ鉄と同様な密度の結晶物質であるため、高エネルギー粒子の阻止能が高い。しかも荷電粒子によってシンチレーション光を発するので、それ自身が検出器となるため、入射してきたカスケードシャワーの全エネルギーを測定することができる。BGO の厚みの合計は 32 r.l. であるため 10 TeV の高エネルギー電子に対しても十分な阻止能を有し、TeV 領域の電子に対して 1 % を切る高いエネルギー分解

能を持つ。また、この厚い吸収層によって、電子観測のバックグラウンドとなる陽子を 100 万分の 1 のレベルにまで除去することも可能となる。イメージングカロリメータと全吸収型カロリメータで用いる物質を合計した検出器重量は 1760 kg となる。CALET によって 3 年間の観測を行った場合に得られる 1 GeV から 20 TeV の宇宙線電子スペクトルを、**Fig.2** に大きい丸印で示してある。高エネルギー側以外の誤差棒は表しきれないほど小さい。

3. シンチファイバー検出器

3.1 シンチファイバーの PMT 読出し

荷電粒子が 1 mm 角のシンチファイバーを通過すると電離損失によっておよそ 200 keV のエネルギーを損失し、そのエネルギーに比例したシンチレーション光が発生する。シンチレーション光はシンチファイバー中で等方的に発光し、そのうちシンチファイバー中を伝播できる角度に出たものがファイバー端面に到達するが、そこでの光子数は 30 個弱である。この微弱光を検出するために光電子増倍管 (PMT: Photo Multiplier Tube) を用いる。PMT の光電効率は約 20% なので、PMT のカソードで発生する光電子は約 5 個である。この光電子は PMT の数段のダイノードで段階的に増幅され、電気パルス (電荷) として最終段のアノードから出力される。

CALET における SciFi は数万本に及ぶため、PMT はコンパクトで多チャンネルのものが必要である。そこで我々は浜松ホトニクス社の H7546 (**Fig.6**) というアノードを 64 チャンネル持つマルチアノード PMT (MAPMT: Multi-Anode PMT) を使用することにした。この MAPMT は **Fig.6** のようにカソードに続くダイノードが 8×8 のマトリックス状に区分されており、それがその上に位置するカソード上の 2.1 mm 角の受光面に対応する。この各

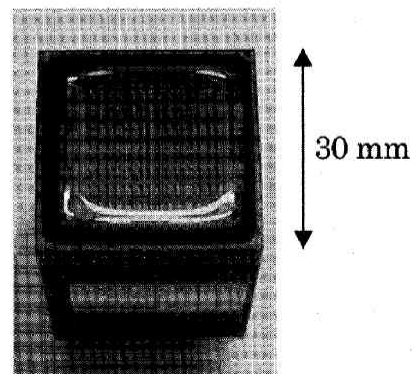


Fig. 6 64 channels Multi-Anode PMT (Hamamatsu H7546). Viewed from the photo-cathode surface.

受光面に 1 mm 角の SciFi を接続することで、SciFi からのシンチレーション光を 1 本ごとに MAPMT のアノードからの電気信号として読み出すことができる。

MAPMT からの信号の読み出しは後述する VLSI チップによって行う。MAPMT の出力電荷を、VLSI チップの入力レンジに合わせるためには、MAPMT による光電子の増幅率を 5000~10000 程度に設定する必要がある。これに対して、市販されている H7546 の増幅率は、標準印加電圧 800V のときに 3×10^5 となり、数 10 倍高い。印加電圧を下げれば増幅率も下がるが、印加電圧を低くしすぎるとダイノード間の電位差が不足して、ダイノード後段での空間電荷飽和によるリニアリティの低下を招いてしまう。そこで、印加電圧を下げる代わりにダイノードの段数を 12 段から 8 段に減らすことで、ダイノード間の電位差を保ったまま増幅率を下げることにした。ダイノードの段数を減らしたことによって、目標の増幅率を得るための印加電圧は 600 V 前後となる。

CALET について 10 TeV の電子によるカスケードシャワーのシミュレーションを行った結果、1 本の SciFi に入射する粒子数の最大は約 3000 である。シンチレーション光の量は通過粒子数に比例するため、SciFi によって 1 粒子から 3000 粒子までを検出するためには、MAPMT およびその読み出し回路に要求されるダイナミックレンジは 3000 となる。Fig.7 はダイノードの段数を 8 段にした MAPMT について、増幅率を 5000 と 15000 に設定した場合についてのダイナミックレンジを LED を光源としてその光量をフィルタで調節しながら測定した

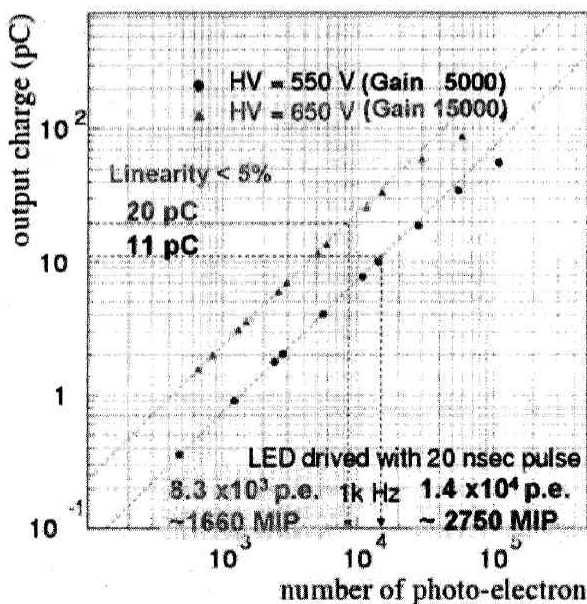


Fig. 7 Dynamic range of MAPMT calibrated with LED.

結果である。図の横軸は MAPMT のカソードでの光電子数であり、光電子約 5 個が 1 粒子 (1MIP : 1 Minimum Ionizing Particle) に対応する。それに対して縦軸は MAPMT の出力電荷になっている。図中の測定点上に引いた点線は、入射光量の少ない測定点にフィッティングした直線である。図のように入射光量の増大とともにこのリニアリティを示す直線からはずれてくるが、5% までのずれを許容した場合、5000 の増幅率に対しては出力電荷 11 pC まで、15000 の増幅率に対しては 20 pC までリニアリティが保たれた。それぞれの出力電荷を光電子数に戻し、さらに粒子数に換算すると、増幅率 5000 のほうがダイナミックレンジが広く、2750 粒子まで 5% のリニアリティが確保されることがわかった。またリニアリティの許容範囲を 10% にすればダイナミックレンジはさらに 2 倍になる。

3.2 MAPMT の読み出し回路 (フロントエンド回路)

CALET における数万チャンネルの MAPMT 読み出しには、コンパクトかつ低消費電力の回路が必要となる。ケーブルの使用もノイズ面と重量制限の両側面から極力避けなければならない。このような理由から、読み出し回路の VLSI 化が必須となる。しかし、一般にその開発には多額の費用と多くの時間がかかることが予想される。そこで MAPMT の読み出し回路として、シリコンストリップ検出器の読み出しのために開発された Viking チップと呼ばれる IDEAS 社 (ノルウェー) が開発したアナログ ASIC (Application Specific Integrated Circuit) の利用を試みた。市販されていた Viking チップのうち最もダイナミックレンジの広い VA32HDR2 というチップを用いて MAPMT の読み出しを行った。VA32HDR2 は電荷有感型前置増幅器と波形整形増幅器とサンプルホールド回路の組を 32 チャンネル分内蔵している。Fig.8 に

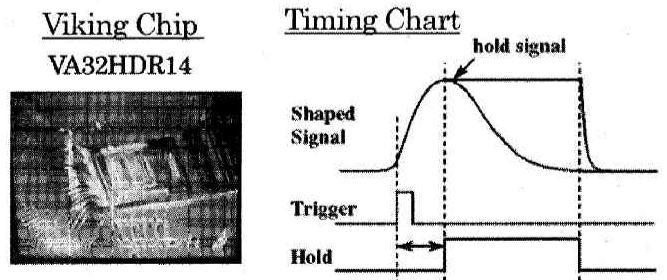


Fig. 8 Viking Chip VA32HDR14 containing 32 sets of a pre-amplifier, a shaping amplifier, and a sample hold circuit and one multiplexer. Peak voltages of uni-polar outputs of the shaping amplifiers are held with an external hold signal.

示すタイミングチャートのように、外部からの $1.85\mu\text{s}$ 遅れた Hold 信号によって各チャンネルの波形整形増幅器の波高値が保持される。各波高値はマルチプレクサによって順次読み出すことができる。試験ではまず MAPMT の数 ns という出力パルスを読み出せることを確認した。さらに MAPMT に印加電圧を供給する電源に低ノイズのものを使うことで、このチップのダイナミックレンジである230という値が、MAPMT の読み出しでもほぼ実現されることを確認した。

この結果をもとにして、IDEAS 社にチップの改良を依頼し、さらにダイナミックレンジを広げた VA32HDR14を開発した (Fig.8)。このチップの設計では、入力電荷の最大値を VA32HDR2の 0.8 pC から 15 pC にまで増大させながらも、ノイズレベルを VA32HDR2の4倍の 0.8 fC に抑えることで、数1000のダイナミックレンジの実現を目指した。ダイナミックレンジを拡大するために、チップの電源電圧を $\pm 2.0\text{ V}$ から $\pm 2.5\text{ V}$ へ上げた結果、消費電力が 1.5 mW/ch から 3.4 mW/ch へと増加することになったが、仮に4万チャンネルとすると 136 W であり、CALET に許される総電力 600 W の範囲で十分にまかなうことができる。

3.3 プロトタイプ検出器の性能テスト

CALET のフロントエンド回路に用いる VA32HDR14 からマルチプレクサによって読み出される波高値を順次 AD 変換するためには、Viking チップを搭載するフロントエンド基板 (FEC: Front End Card)、マルチプレクサ読出しを制御するシーケンサ、そして ADC 回路が必要である。いずれも最終的にはコンパクト化、低ノイズ化、省電力化が必要であるが、まずは既存の Viking チップ用 FEC、および市販品の VME 規格のシーケンサボードと ADC ボードを組み合わせた読み出しシステムを構築してテストを行った。その後、Viking チップ

の読み出しシーケンサと ADC までを搭載した新たな FEC の設計製作へと開発を続けた。

3.3.1 既存のフロントエンド回路によるテスト

Viking チップの VA32 シリーズ用の既存 FEC は、1枚の基板に4チップをボンディングすることができ、128チャンネル読み出しの FEC として VA32HDR14にも適用できた。この FEC は Viking チップのマルチプレクサ読み出し用シーケンサと ADC を外部に用意しなければならない。シーケンサとしては Viking チップをはじめとするアナログ ASIC 一般の読み出しをコントロールできる VME 規格の汎用シーケンサボード (CAEN V551B) を用い、ADC としては V551B と組み合わせることで多チャンネルを順次 AD 変換することが可能な VME 規格の ADC ボード (CAEN V550) を用いた。FEC 外の ADC までアナログ信号を取り出すため、この読み出しシステムのノイズレベルは 12 fC とかなり高めであったが、低ノイズ化は次期段階で行う新 FEC の開発において検討する方針とした。

この読み出しシステムのテストを行うために、Fig.9のようなプロトタイプのシンチファイバー検出器を製作した。この検出器は、 1 mm 角のシンチファイバー (クラレ SCSF-38) を一列に32本および64本並べて製作した二種類のベルトの間に、鉛板を挿入して積層したサンプリングカロリメータとなっている。検出器の粒子入射口に近い方 (Fig.9の左側) から 32 mm 幅のシンチファイバーベルトを4層、その後方に 0.5 r.l. (2.8 mm 厚) の鉛板とシンチファイバーベルトを交互にして、 32 mm 幅シンチファイバーベルトを4層、 64 mm 幅シンチファイバーベルト4層を順に並べてある。鉛板の厚みは合計 4 r.l. (22.4 mm)、シンチファイバーは合計512本である。各シン

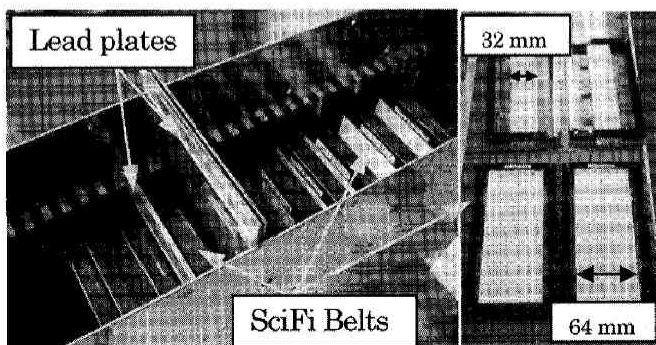


Fig.9 Prototype SciFi detector to carry out beam test

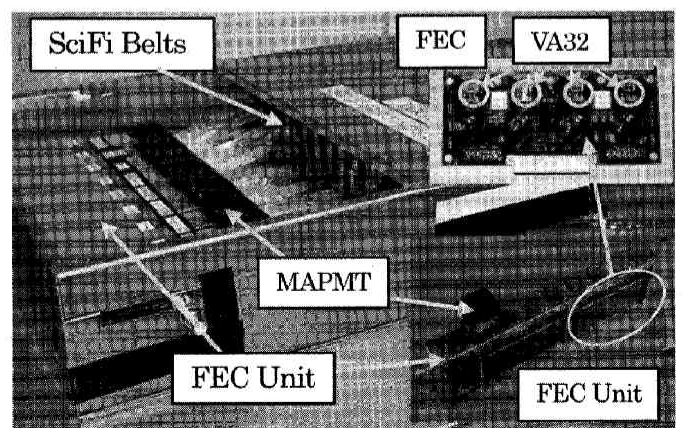


Fig.10 Prototype SciFi detector with an FEC unit.
SciFi Belts FEC UnitFEC FEC Unit VA32MAPMT

チファイバーベルトは Fig.9 に見えている端面の反対側で 8×8 のマトリックス状に束ねられ、Fig.10 のように64チャンネルの MAPMT に取り付けられている。MAPMT は8本が一行に並び、512チャンネル分の FEC を内蔵する FEC ユニットに接続されている。FEC ユニット内には VA32HDR14 を4チップ搭載した FEC が4枚入っており、合計16チップ分のマルチプレクサ読み出しが順次行われるようになっている。

FEC ユニットは VME 規格のシーケンサボード V551B に接続されており、このシーケンサによってマルチプレクサ読み出しの制御が行われ、FEC ユニットに保持されている波高値が順次取り出される。V551B によって取り出された波高値は V550 に送られ AD 変換が行われる。V550 の AD 変換のシーケンスも V551B によって、マルチプレクサ読み出しに同期するように制御されている。

このプロトタイプ検出器の読み出しテストは、欧州共同原子核研究所 (CERN) において、SPS (Super Proton Synchrotron) 加速器の T4-H6 ビームラインの電子ビーム、陽子ビーム、ミュオンビームを用いて行われた (Fig.11)。検出器に照射したビームのエネルギーは、電子は50 GeV と100 GeV、陽子は150 GeV、ミュオンは120 GeV であった。取得したデータは合計約50万イベントである。Fig.11 のようにシンチファイバーのプロトタイプ検出器の下流に、プロトタイプの BGO 検出器も設置して、CALET に近い検出器構成にしてテストを行った。

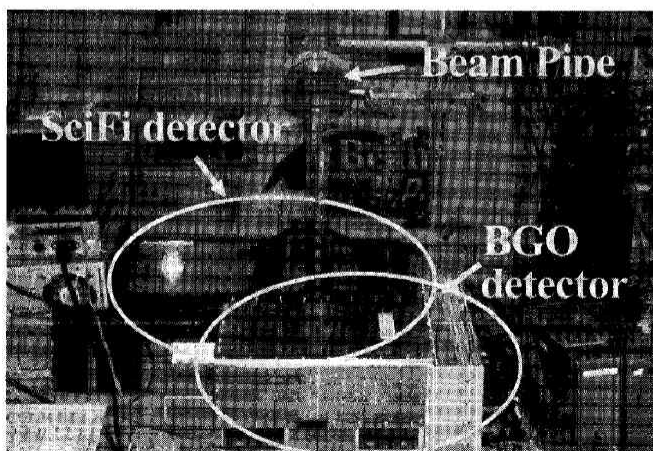


Fig.11 Beam test of a prototype detector of CALET carried out at CERN-SPS.

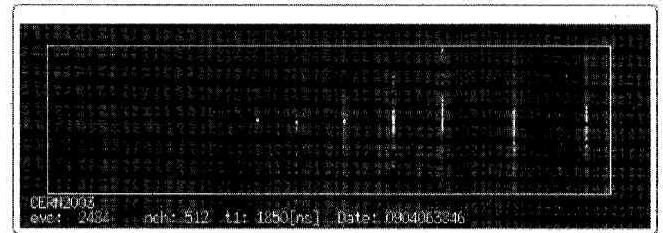


Fig.12 An example of shower image obtained with prototype SciFi detector at CERN-SPS. Electron with beam energy 100 GeV from left side generated the shower.

Fig.12 は SciFi 検出器によって取得した100 GeV の電子ビームを照射したときのカスケードシャワーのイメージである。電子ビームは図の左から入射し、はじめの鉛板のないシンチファイバーベルト4層によって入射電子のトラックが捉えられている。さらにその後方では、シンチファイバーベルトの間に置かれた鉛板を通過するとに相互作用を起こしてカスケードシャワーが発達していく様子が捉えられている。このようにして得られたシャワーイメージに直線をフィットすることによってシャワー軸を求めることができる。Fig.13 は検出器に50 GeV の電子ビームを垂直入射した場合のシャワー軸の決定精度を示している。フィットで求めたシャワー軸つまり入射角度の分布に、ガウス分布をフィットした結果、角度分解能として 0.25° の標準偏差を得た。

電子が起こす電磁相互作用によるカスケードシャワーは、ほとんどが Fig.12 に示した例のように、シャワー軸中心にエネルギーが集中する対称なシャワー形状となる。それに対して陽子が起こす核相互作用によるカスケードシャワーは、形状が様々になるだけでなく、シャワー軸に直交する横方向に広がる傾向がある。このように入

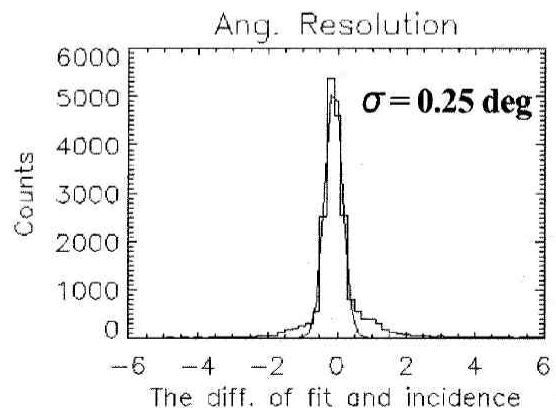


Fig.13 Angular resolution obtained by shower axes fitting was 0.25 degrees for electron showers with beam energy 50 GeV.

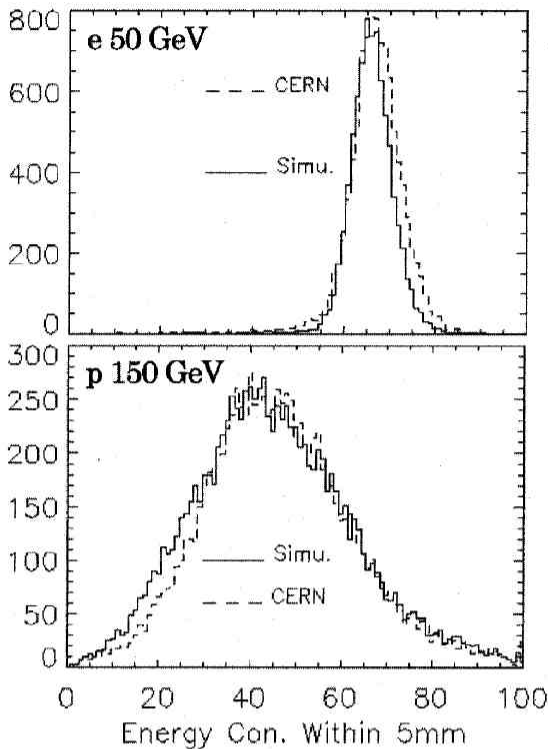


Fig.14 Percentage of energy concentrated within 5 mm from shower axes for electron showers of 50 GeV in the upper histogram and that for proton showers of 150 GeV in the lower histogram. Distributions obtained by simulations and beam experiments at CERN-SPS were indicated by solid and dashed lines respectively.

射粒子によってシャワー形状に差があるので、シャワー軸から5 mm以内へのエネルギーの集中度を比較することによって電子と陽子を見分けることができる。**Fig.14**はエネルギー集中度の分布を、50 GeVの電子シャワーと150 GeVの陽子シャワーに対して、シミュレーション(実線)とCERN-SPSでのビーム実験(点線)から得た結果である。電子の場合、エネルギー集中度が高い55%から80%の間に分布が集中していることがわかる。ここでエネルギーが電子の3倍である陽子を扱う理由は、陽子の起こす核相互作用によるカスケードシャワー中の電子・陽電子成分が、電子の起こす電磁相互作用によるカスケードシャワーの場合のおよそ3分の1となるためである。図から陽子については、エネルギー集中度が低い40%をピークとして広く分布することがわかる。分布が広がるのは陽子のシャワー形状がイベントごとにばらつくことを反映している。ここで、エネルギー集中度が55%以下のイベントを取り除くことによって、SciFi検

出器のみでも、かなりの陽子イベントを除去できることがわかる。

このテストでは、シンチファイバーからの微弱光をMAPMTで検出し、Vikingチップを用いたFECで読み出すという方式で、SciFi検出器が期待通りの性能を発揮することを確認できた。しかし、既存のFECを外部のシーケンサボードとADCボードで読み出すシステムでは、FEC全体のノイズがVikingチップ自身のノイズの15倍にもなり、1 MIPの信号レベルがノイズに埋もれないようにMAPMTの印加電圧を800Vに上げて増幅率を稼いだため、ダイナミックレンジが犠牲になった。これは概ね予想されていたことではあるが、次の段階の新しいFECの設計開発では、コンパクト化や省電力化の他に、ノイズ対策が最も重要な課題であることが明確になった。

3.3.2 新フロントエンド回路の開発

新たなFECの設計では、まずMAPMT一本単位に対応する独立したFECを検討した。そして、MAPMTの出力信号からVA32HDR14、ADCへと至るアナログ部分を最短距離で結び、デジタル部分から極力分離するように努めた。MAPMT間の隙間は2 mmしかないので、FECはMAPMTの後方(アノード出力側)の $30 \times 30 \text{ mm}^2$ のスペースに収めなければならない。

そこで**Fig.15**のようにFECを4枚の基板に分割してMAPMTの後方に取り付ける方法を取った。MAPMTに取り付けたときに外側の2枚となる基板は同じもので、それぞれの基板にVA32HDR14が1チップずつボンディングされ、最小AD変換時間4 μ 秒の16ビットADCが同じ基板上に1チップ配置されているため、アナログ部分の配線がかなり短くなった。実際のADCの動作速度はAD変換時間10 μ 秒に設定してあり、32チャンネルのVikingチップの読出しにかかる時間は320 μ 秒であ

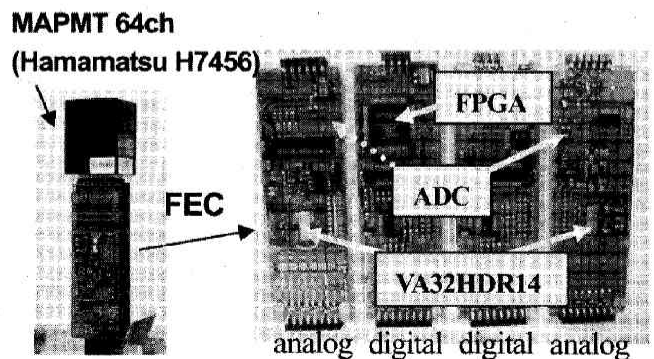


Fig.15 A newly designed and developed FEC for the readout of MAPMT with VA32HDR14.

る。これは他の Viking チップの AD 変換とは独立しているため、MAPMT の本数にかかわらず、全チャンネルの AD 変換が $320 \mu\text{s}$ の間に並行して行われる。その結果、全体の読み出し時間が大幅に短縮され、計算機へデータを吸い上げる時間を含めても、512チャンネルの場合は1ミリ秒で充分である。これに対し、前述のシステム(3.3.1)では4ミリ秒以上かかっていた。

デジタル部分は中央の2枚の基板に収められている。VA32HDR14のマルチプレクサとADCを制御するためのシーケンサは、デジタル基板上のFPGA(Field Programmable Gate Array)が担う。このFPGAはAD変換されたデータを計算機に吸い上げる際の通信制御も行う。

このFECを用いてMAPMT 8本分のFECを内蔵したFECユニットを製作し、このユニットに対応するVME規格のインターフェイスボードを製作して、VME計算機によってデータを収集するシステムを構築した。このシステムを用いて、まずノイズを測定したところ、VA32HDR14への入力信号がない状態のノイズレベルは 1.3 fC (r.m.s)であった。VA32HDR14のチップノイズが 0.8 fC であるため、FECのVA32HDR14チップ以外のノイズは 1.0 fC となる。Fig.16の上図に示すようにVA32HDR14への入力電荷(テストパルス)に応じてノイズは増加していくが、逆に入力電荷の大きさに対するノイズの割合はFig.16の下図のように下がっていくため、全く問題のないノイズレベルである。同様にテストパルスによるVA32HDR14のダイナミックレンジを測定した結果、Fig.17に示すような入力電荷に対するリニ

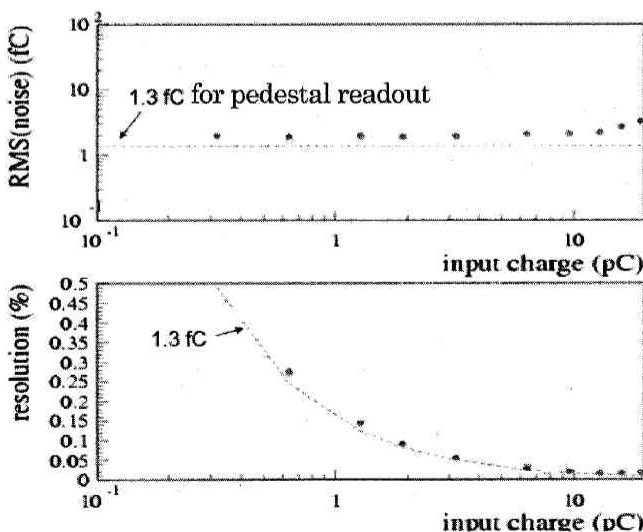


Fig.16 Noise level measurements of the new FEC with test pulses (input charges).

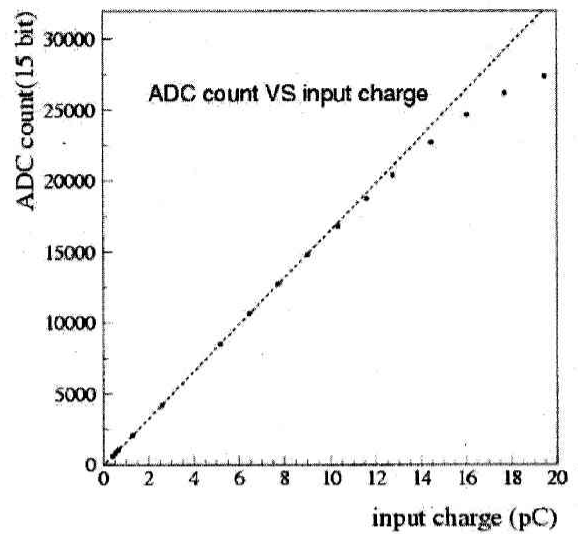


Fig.17 Measurements of the dynamic range of the new FEC with test pulses (input charges).

アリティが得られ、入力電荷 15 pC でのリニアリティからのずれは10%であった。以上のように、ノイズ、ダイナミックレンジともにVA32HDR14の設計値を満足する結果が得られた。

3.3.3 新フロントエンド回路による実証化テスト

新しく開発したFECユニットを用いたSciFi検出器の性能テストを2004年7-8月にCERN-SPSのT2-H4ビームラインにて行うことができた。このテストで用いた検出器は、タングステンとプラスチックシンチレータを積層したサンプリングカロリメータのタワーで、タングステンの厚みが6 r.l., 10 r.l., 34 r.l.となる各位置にXとYの二方向に重ねたSciFiベルトを挿入したものである。二本のタワーの断面積はそれぞれ $2 \times 2 \text{ cm}^2$ と $4 \times 4 \text{ cm}^2$ である(Fig.18左)。SciFi検出器はタワーで発達するシャワーを各深さにおいてイメージとして捉え、シャワーの横広がりやシャワー軸の検出を行う。SciFiベルトは1mm角のシンチファイバー(クラレSCSF-38)を横一列に並べて組んだ。Fig.18右上のように2cmタワー用の幅2cmのSciFiベルトは、20本のSciFiからなる。Fig.18右下のSciFiベルトはライトガイドとして用いるクリアファイバーに接続される。クリアファイバーはMAPMTまでのライトガイドとしての柔軟性を考慮して1mm径の丸ファイバーを用いた。

ビーム実験では、検出器に50~250 GeVの電子、150~350 GeVの陽子、150 GeVのミューオンを入射した。Fig.19は200 GeVの電子を4cmタワーに入射したとき

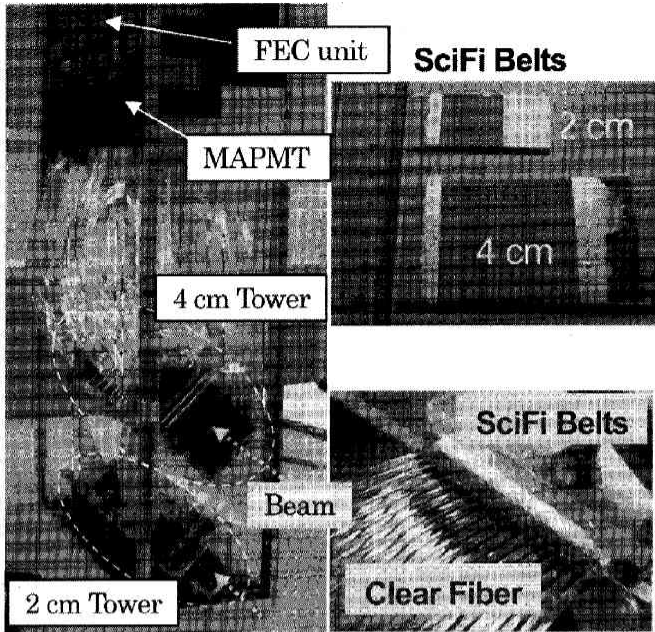


Fig.18 Sampling calorimeter towers of 2 cm and 4 cm square in cross section composed of tungsten plates, plastic scintillators, and SciFi belts (Left). SciFi belts of 2 cm and 4 cm wide in assembling (Right upper). SciFi belts were connected to clear fibers for light guide (Right lower).

に SciFi 検出器で得られたシャワー画像である。MAPMT の印加電圧は600 V にセットしてあり、6 r.l. と10 r.l.でのシャワーの中心とその両側への拡がり、X と Y の二方向で捉えられている。電子によるシャワーは200 GeV のエネルギーでは34 r.l.には到達しない。

電子の起こすシャワーは前述したようにシャワー軸に对称で、イベントごとのばらつきも少ない。Fig.20は200 GeV の電子を4 cm タワーに入射したときの10 r.l.におけるシャワーの横広がり分布を、全イベントについて重ね合わせた結果である。シミュレーションの結果とも

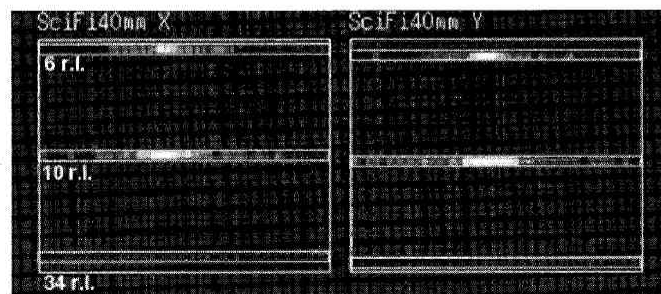


Fig.19 An example of Shower image of electron with beam energy of 200GeV taken with the 4cm tower.

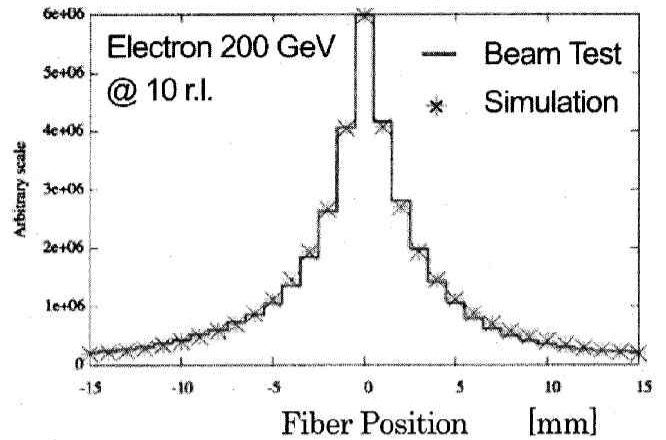


Fig.20 Lateral distribution of electron showers with beam energy 200GeV at 10 r.l. A Simulated result was also superimposed.

良く一致している。さらに6 r.l.におけるシャワーの横広がり分布の中心をイベントごとに求めて、シャワー軸を決定した結果を Fig.21 に示す。この分布にガウス分布をフィットしたところ、X、Y の二方向についてそれぞれ $\sigma_x = 0.171 \pm 0.006$ mm、 $\sigma_y = 0.127 \pm 0.004$ mm という標準偏差を得た。この値はシャワー軸の決定精度を表し、シミュレーションで予想される0.2 mm 以下の決定精度が得られた。

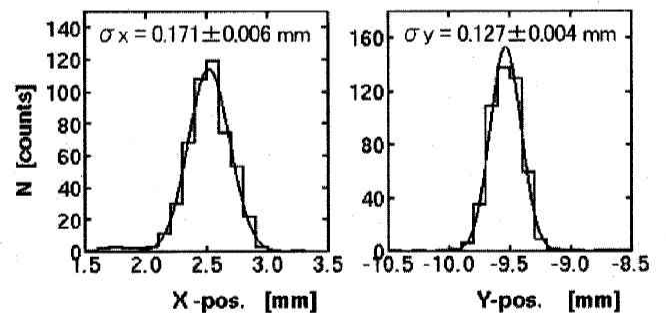


Fig.21 Position resolutions of electron shower axes determined with the SciFi belts in X direction (left) and Y direction (right) at 6 r.l. Electron beams of 200 GeV were irradiated to the 4 cm tower.

新たに開発した FEC ユニットを用いた SciFi 検出器の読み出しでは、250 GeV の電子に対して、各 SciFi の信号がダイナミックレンジの5分の1に収まることも確認できた。これは CALET による TeV 領域の観測にも対応できることを意味する。この FEC ユニットはその

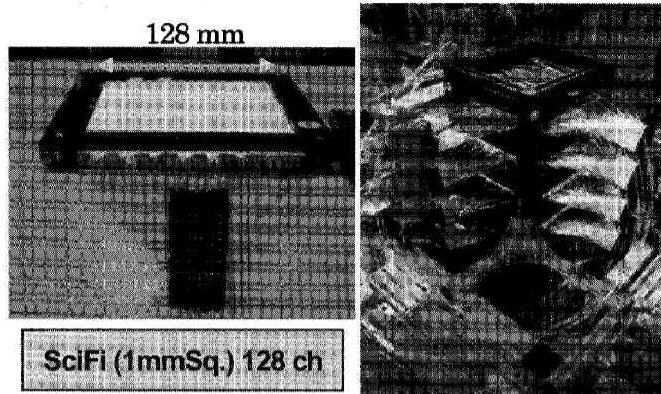


Fig.22 SciFi detector to carry out a balloon-borne observation of electrons and gamma-rays.

まま容易に複数化することができ、最終的なデータ取り込みレートは、計算機側のインターフェイスにまで吸い上げられたデータを処理するCPUの能力によるが、1 kHzは実現可能である。またFECユニットの消費電力については1チャンネル当たりの実測値が4.7 mWなので、CALETにおける4万チャンネルのSciFi検出器を190Wで実現できる。

4. 気球実験による実証化試験

SciFi検出器の宇宙線観測性能を実証するために、宇宙環境とほぼ等しい上空37 kmにおける宇宙線電子、ガンマ線の大気球による観測を行う準備を進めた。FECユニットを2台用いて、1024本のSciFiからなる検出器を製作した。Fig.22左は128本の1 mm角のSciFiを並べて製作したベルトで、2本のMAPMTによって読み出す。このベルトを計8枚製作し、タングステン板と合わせてFig.22右のようなSciFi検出器を組上げた。読み出し用のMAPMTは計16本である。

このSciFi検出器の下に24本のBGOで組上げた検出器を組み込み、エレクトロニクスの各システムを取り付けたFig.23のような観測装置を完成した。地上における調整において、宇宙線ミュオンのトラックイメージなどが確認できた。気球の打ち上げは2005年8月にJAXAの三陸大気球観測所において実施されたが、放球作業の失敗によって観測装置は浮上せず、残念ながら次年度の観測へと持ち越されることとなった。それまでの間、地上におけるキャリブレーションを行って基礎データを取得する予定である。

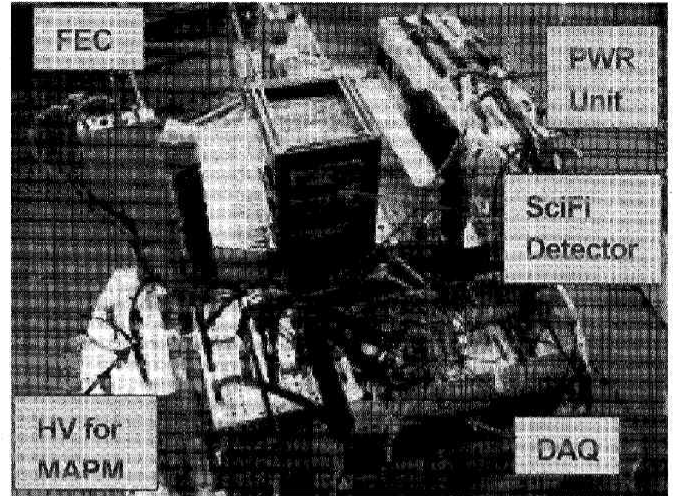


Fig.23 SciFi detector assembled into the payload together with electronics systems.

5. まとめ

SciFi検出器について気球実験でイメージインテンシファイアとCCDでイメージを取得していた経験をもとに、MAPMTによるSciFi一本ごとのより高速な読み出しへと改良することができた。MAPMTの採用を可能にしたことで、故障等の危険の分散という意味において宇宙環境での検出器としての実用性が高まった。

SciFi検出器のためのFECはほぼ完成の域に達した。現在は、更なる低ノイズ化と高速化を目指した改良を行っている。また宇宙環境でのエレクトロニクスの耐放射線性能の向上は今後の課題である。

装置全体の实証化に向けて、今後数年間の間に段階的にCALETのスケールモデル(1/16、1/4)による気球実験を重ね、CALET実現への足固めを行う予定である。

参考文献

- 1) S. Torii *et al.*; *NIM A*, 452, 81 (2000).
- 2) S. Torii *et al.*; *ApJ*, 559, 973 (2001).
- 3) K. Kasahara *et al.*; *Phys. Rev. D*, 66, 052004 (2002).
- 4) S. Torii *et al.*, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, 134, 23-30 (2004).
- 5) 鳥居祥二、槇野文命; *日本物理学会誌*, 1月号, 8 (2001).
- 6) T. Kobayashi, Y. Komori, K. Yoshida, and J. Nishimura, *ApJ*, 601, 340-351 (2004).