

大型超伝導スペクトロメータによる宇宙線観測計画

吉田 哲也*・安楽 和明*・井森 正敏*・折戸 周治*
島村光太郎*・野崎 光昭*・原 敏光*・山川 裕司*
山本 明**・春山 富義**・東 保男**・榎田 康博**
三戸 利行***・山上 隆正

The Cosmic Ray Observation Using a Superconducting Spectrometer

By

T. YOSHIDA, K. ANRAKU, M. IMORI, S. ORITO,
K. SHIMAMURA, M. NOZAKI, T. HARA, H. YAMAKAWA,
A. YAMAMOTO, T. HARUYAMA, Y. HIGASHI, Y. MAKITA, T. MITO and T.
YAMAGAMI

Abstract: We are preparing a series of balloon-borne experiments to search for anti-protons and anti-matter of cosmic origin. The thin model solenoid for the ASTROMAG project will be equipped with a cylindrical jet chamber resulting to a large solid angle of $1 \text{ m}^2 \text{ sr}$. Anti-helium will then be searched for to a flux level of 10^{-8} relative to the helium. Simultaneously, we can perform a very sensitive search for GeV γ -rays from point-sources. The energy spectra of the positrons and of various isotopes can be measured over a wide energy range. The detectors are now under construction. A prototype detector was launched from Sanriku in June 1988 and the total system worked as expected.

* 東大・理

** 高エネルギー物理学研究所.

*** 京大・ヘリオトロンセンター.

概 要

気球搭載用超伝導ソレノイドマグネットとジェット型ドリフトチェンバーを用いた大型のスペクトロメータの製作を現在進めている。この測定器により反ヘリウムを $\overline{\text{He}}/\text{He} \sim 10^{-8}$ の微量まで探索し、かつ特に低エネルギーの反陽子のエネルギー・スペクトラムを測定することによって宇宙起源反陽子を探す。同時に本測定器ではガンマ線をコイルで電子陽電子対にコンバートさせることによりそのエネルギー及び方向を精度良く測定できる。また宇宙線中の陽電子についてもこれまで指摘されているような 10 GeV 以上での流束過剰の存在についても調べることができると思われる。63年6月にプロトタイプの小型測定器を三陸より気球で打ち上げほぼ期待された性能を得ることができた。本年度中に大方の測定器を完成させ、来年以降観測を始める予定で現在準備を進めている。

重要語：超伝導スペクトロメータ、反ヘリウム、反陽子、GeV-ガンマ線

1. 序

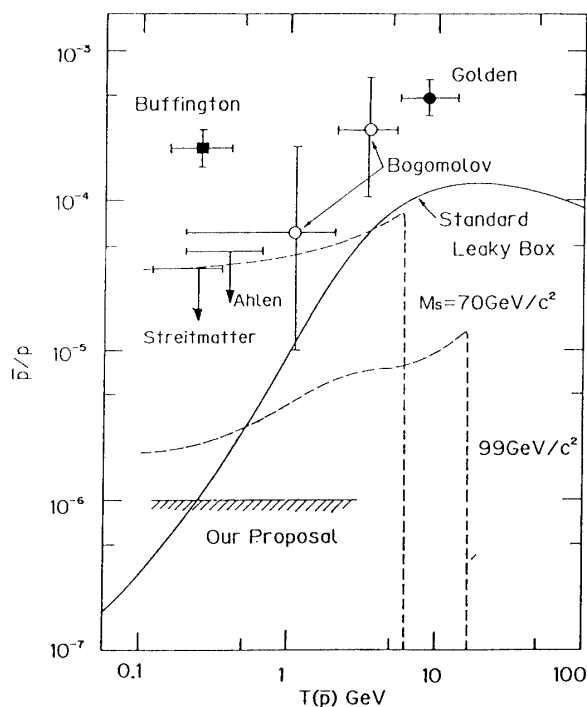
一次宇宙線の観測はこれまで気球や人工衛星によって行われてきており、最近ではその結果は素粒子物理学や宇宙論に対しても重要な意味を持ってきている。我々は超伝導ソレノイドマグネットとドリフトチェンバーなどの測定器を組み合わせた大立体角・比較的軽量のスペクトロメータによる気球実験を計画し[1, 2]現在製作を進めている。この測定器を気球により高度 40 km 程度まで打ち上げることによって、以下のような観測が行える。

(1) 反ヘリウム

陽子より重い原子核の反物質はこれまで宇宙線中に観測されていない。これらの反原子核は二次的に生成されることはなく、一例でも観測されればそれは反物質銀河などから飛来した一次起源のものと考えられる。我々の測定器では反ヘリウムを $\overline{\text{He}}/\text{He} \sim 10^{-8}$ 程度まで探索できる。

(2) 反陽子

これまでに観測されている宇宙線中の反陽子は一次宇宙線と星間物質の衝突で作られたと考えられており、特に低エネルギー領域の反陽子は運動学的制限により二次起源での生成が困難である。しかしながらこれまでの反陽子の観測は $\bar{p}/p \sim 3.5 \times 10^{-5}$ 程度の上限值を与えるに留まっており[3, 4]、二次的起源を積極的に支持するに至っていない(図1)。もし一次起源の反陽子が存在するとすれば、それは二次起源の反陽子の少ない低エネルギー領域で観測されるはずである。我々の測定器では \bar{p}/p 比を二次生成モデルの予言する 10^{-6} のレベルまで観測可能であり、また反陽子のスペクトラムを広いエネルギー領域に渡って正確に測定できる。一次起源の反陽子についてはいくつかの生成メカニズムが考えられて

\bar{p}/p ratio図1 \bar{p}/p 比の理論値とこれまでの観測値

おり[5, 6], もし検出されれば宇宙論にも大きな影響を与え得る。

(3) ガンマ線

本測定器ではガンマ線をマグネットコイルでコンバートさせ対生成する電子陽電子対のエネルギーと方向を精度良く測定でき、これによりガンマ線の方向とエネルギーを測定できる。超新星爆発などのガンマ線点源や銀河中心からの 100 MeV~100 GeV のガンマ線の観測が行える。

(4) その他

宇宙線中の陽電子についてはこれまでの気球実験によって観測が行われているが、10 GeV 以上の領域で理論値を上回る流束が得られている。我々の測定器ではコイル中での制動輻射と電子陽電子対生成によって陽電子を観測できる。さらに宇宙線中の同位体についても、運動量測定と飛行時間(TOF), エネルギー損失(dE/dx)の測定により陽子・ヘリウム・リチウム等のアイソトープについて観測できる。我々の測定器の立体角がこれまでの実験に比べて非常に大きいため、圧倒的な精度で流束やエネルギースペクトラムを測定できる。

2. 測定器

現在製作中の測定器の全体図を図2に示す。測定器は超伝導ソレノイドマグネット、ジ

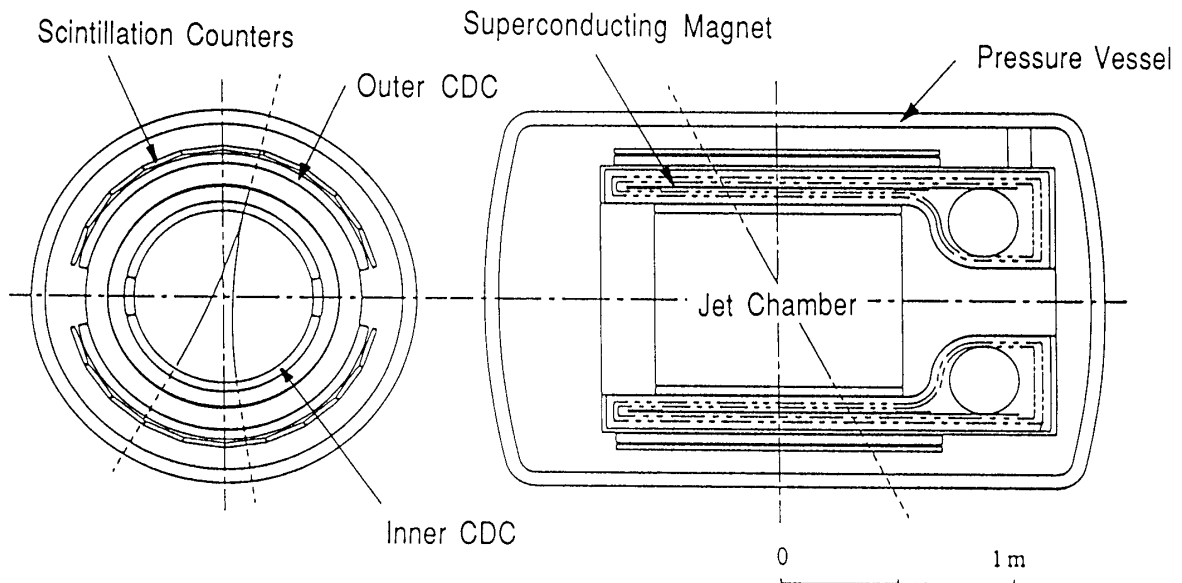


図2 大型超伝導スペクトロメータ全体図

表1 気球搭載用超伝導マグネットの諸元

Geometrical Factor	$\geq 0.3 \text{ m}^2 \text{ sr}$
Coil Sizes	
Outer Diameter	1.0 m
Length	1.3 m
Tracking Volume	$0.8 \text{ m} \phi \times 1 \text{ m}$
Central Field	1.2 T
Field Distribution	1.0~1.3 T
Integral B-dl	$0.64 \sim 1.0 \text{ T} \cdot \text{m}$
Material Thickness	$0.2 X_0$ ($0.04 \lambda_0$)
Total Magnet Weight	350 kg

ジェット型ドリフトチェンバー（ジェットチェンバー）、円筒型ドリフトチェンバー（CDC）、シンチレーションカウンターからなり、全体が圧力容器に入られている。各測定器からの情報はデータ収集システムによって測定器内に置かれるビデオテープに記録されると同時に地上へテレメトリで送信される。本測定器の重量は約 850 kg、消費電力は約 400 W、立体角は $1.2 \text{ m}^2 \text{ sr}$ 程度である。

(1) 超伝導ソレノイドマグネット

超伝導ソレノイドマグネットは ASTROMAG 計画用のモデルマグネットとして高エネルギー研究所で設計されたものである[7]。マグネットの諸元を表1に示す。マグネットは地上で励磁された永久電流スイッチにより実験中電源なしで内部磁場約 1.2 T を作る。コイルの物質量は約 $0.2 X_0$ で反陽子の測定には影響を及ぼさないと考えられる。クライオ

スタットはアルミハニカムで作られ重量約 350 kg と軽量になっている。冷却用の液体ヘリウムは内部のタンクに蓄えられ一日程度の気球実験を行うには十分である。

(2) ジェットチェンバー

超伝導マグネットの内側に捉え付けコイルの作る 1.2 T の磁場と併せて荷電粒子の運動量を測定する。φ800 mm×L 1000 mm の円筒型で 4 つのセルに分かれている。センスワイヤは全部で約 170 本有り、通過粒子に対して最大 50 点サンプルできる。ドリフト速度が遅く拡散の小さい「slow gas」と 30 MHz 程度のフラッシュ型 ADC を用いて 100~300 μ の位置分解能を得ることができる。このことからこの測定器の運動量分解能は $\Delta P/P \sim 0.3P(\text{GeV})\%$ と予想され、運動量 20 GeV 以下の荷電粒子の電荷を間違える確率は 10^{-20} 以下である。

(3) CDC

超伝導マグネットの内側と外側におかれるそれぞれ 2 層、ドリフト距離 4.5 cm 程度のドリフトチェンバーである。このチェンバーは通過粒子のワイヤ方向の位置を精度良く測定すると同時に ($\sigma_z \sim 1 \text{ mm}$), 大量のバックグラウンドとなる低エネルギー陽子のイベントを 100 μs 程度で除去するための情報を提供する。またガンマ線のトリガにも用いられる。信号の読み出しには低消費電力型の ADC, TDC を用いる。

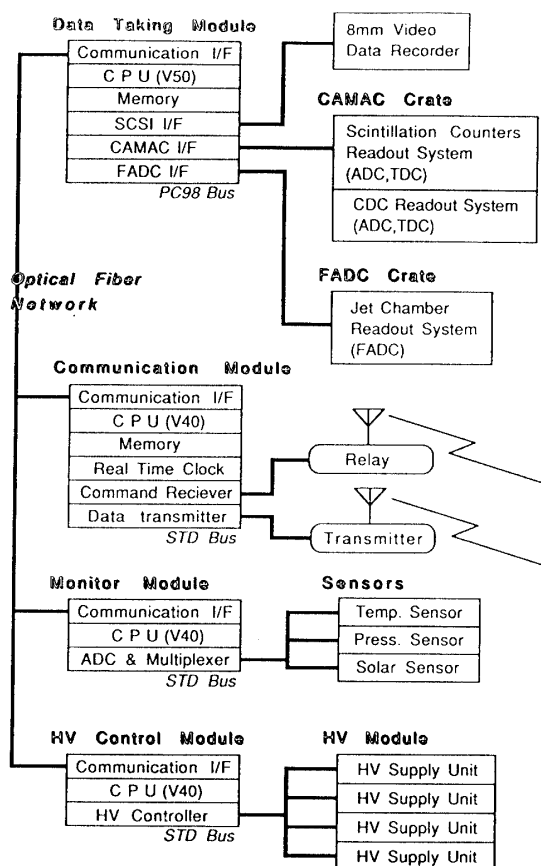


図3 データ収集システム概念図

(4) シンチレーションカウンター

超伝導マグネットの外側上下におかれ(10 セグメント), 通過荷電粒子の飛行時間とエネルギー損失を測定する. 時間分解能 $\sigma_t \sim 200$ ps, エネルギー分解能 $\Delta E/E \sim 10\%$ が得られる. これにより荷電粒子の種類, 方向を識別すると共に, ガンマ線のトリガに用いられる. シンチレーションカウンターの光電子増倍管は 5 kG の磁場中におかれるので, 現在高磁場用光電子増倍管を製作している. また読み出しには高分解能, 低消費電力の ADC, TDC を用いる.

(5) データ収集システム

全てのイベントデータ, ハウスキーピングデータの収集, 及び搭載機器の制御は気球上のコンピュータが行う. 気球上のコンピュータと地上のステーションとはコマンドとテレメトリを介して結ばれており, イベント・モニタや搭載機器の制御・監視をリアルタイムで地上から行うことができる(図3). 気球から地上へのデータ転送はテレメトリによって限られているので, 気球上に 8 mm ビデオ記録装置をおきデータを記録し回収した上でデ

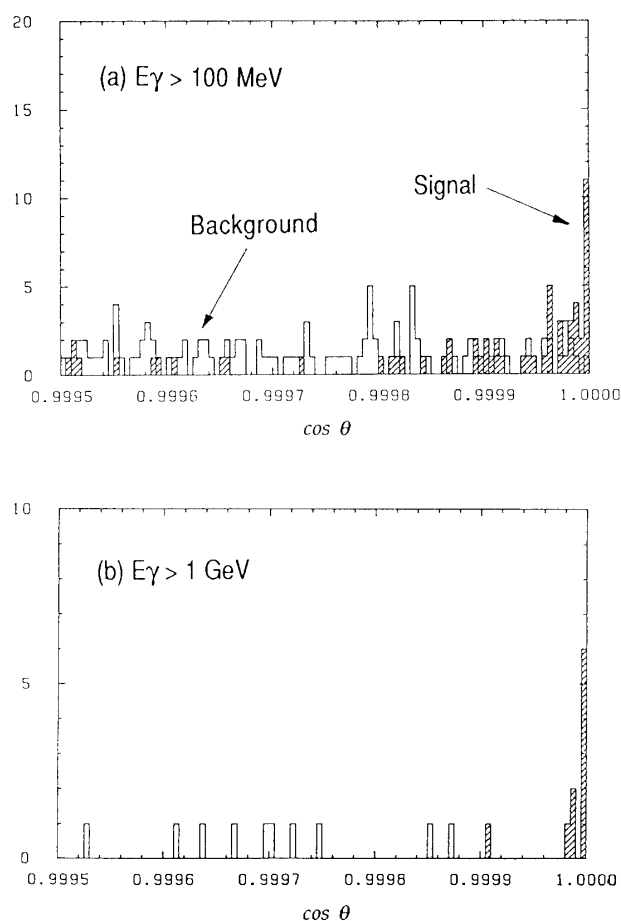


図4 (a) ガンマ線エネルギー 100 MeV 以上の角度分解能
(b) ガンマ線エネルギー 1 GeV 以上の角度分解能

ータ解析を行う。この8mmビデオ装置は2~4GBの記憶容量を持ち、10~20時間程度の飛行中のデータを蓄えることができる。

3. GeV-ガンマ線点源探索

我々の測定器でGeV領域のガンマ線点源の探索を行った時の角度分解能についてモンテカルロ・シミュレーションを行った。

ガンマ線はマグネットコイルで電子陽電子対にコンバートし、ジェットチェンバー中では電荷の異なる2本の荷電粒子の飛跡として観測される。シミュレーションでは電子陽電子対への変換効率、電子・陽電子のマグネット中でのエネルギー損失と多重散乱を考慮してジェットチェンバー中で測定される電子・陽電子の運動量を求めた。そしてガンマ線の方法を電子・陽電子の運動量の和として測定器の角度分解能を求めた。

図4に点源としてCygX-3の3倍の強度を仮定し、10時間の気球実験で得られるデータを示す。バックグラウンドとしては、太陽活動最盛期の一次宇宙線中の陽子と残留大気(4.2 g/cm², 高度38 km)との衝突で生成されるガンマ線をシミュレーションで計算した。図より100 MeV以上のガンマ線の到来方向を調べれば点源の方向に有意やピークが見られ、さらにエネルギーのしきい値を上げることによってイベントは減るものの著しくS/Nを上げられることが解る。点源から来る1 GeV以上のガンマ線についての角度分解能は約0.4°であった。

将来、我々の測定器を宇宙空間に類くことができれば、大気によるバックグラウンドが無くなりさらに弱い点源まで探索すふことができる。COS-8, GROとの面積、見込む角度の比較を表2に挙げる。このように我々の測定器は他に比べ広い領域について微弱なガンマ線まで捕らえることができると考えられる。

4. テスト実験

現在製作中の測定器のプロタイプとして図5に示すような小型のスペクトロメータを63年6月に三陸大気球観測所より打ち上げた。測定器はシンチレーションカウンター、チェレンコスカウンター、マグネット、ジェットチェンバー及び鉛コンバータからできている。磁石にはフェライト製永久磁石を用いて、磁極間に置かれたジェットチェンバーと合わせてスペクトロメータを構成した。シンチレーションカウンターではトリガ信号を作ると共に通過粒子の飛行時間とエネルギー損失を測定した。データ収集システムは図6に示されるもので、基本的に本実験のシステムと同様のものである。総重量は470 kg、消費電力は約200 Wであった。

表2 他のガンマ線観測器との比較

Our Apparatus	0.8 m ²	±60°
GRO	0.2 m ²	±45°
COS-B	0.058 m ²	±30°

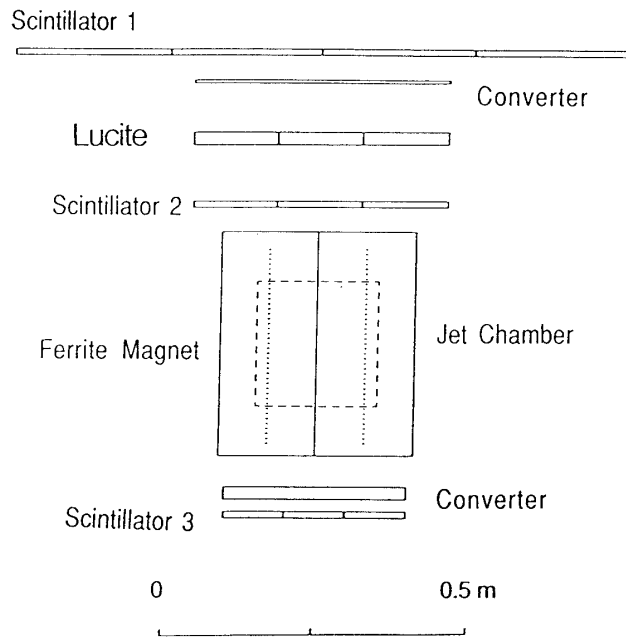


図5 テスト実験測定器全体図

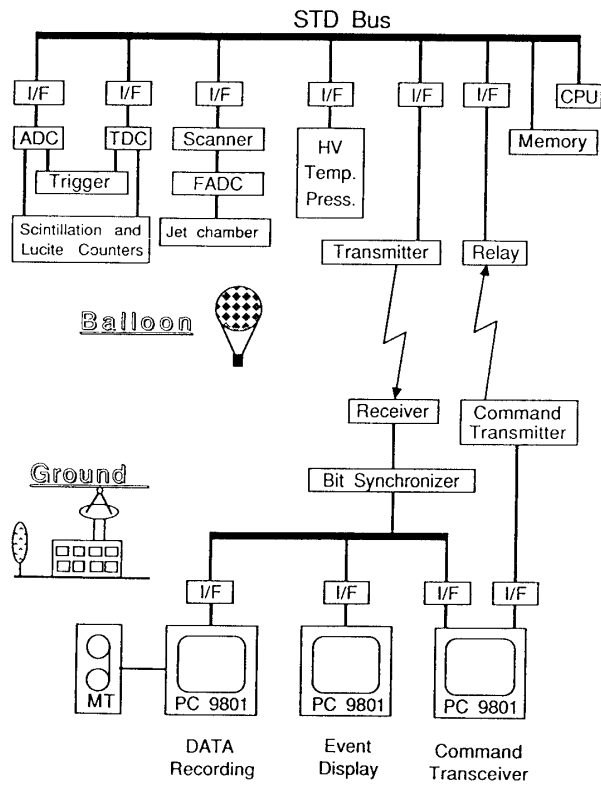


図6 テスト実験データ収集システム

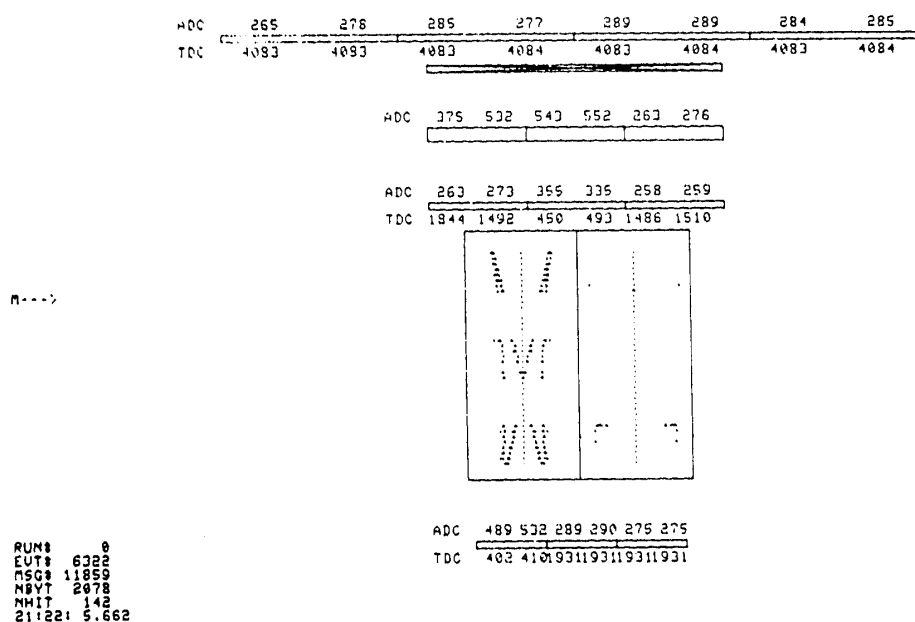


図7 テスト実験で得られた典型的なガンマ線イベント

今回のテスト実験では観測の対象をガンマ線とし、上部鉛コンバータでコンバートした電子陽電子対をジェットチェンバーで測定することとした。63年6月6日午後6時に放球され、2時間程度で高度32 kmに到達した。その後約11時間レベルフライトを行い、6月7日午前7時頃切り離し、日本海側で回収された。

その間、測定器・データ収集システム・テレメトリ・コマンド・地上系共にほぼ順調に動作し満足できる結果を得られた。テスト実験で得られた典型的なガンマ線のイベントを図7に示す。気球ゴンドラ内部の温度コントロールも、外気温 -40°C 、内部発熱量200 Wという厳しい環境にも関わらず、計算通りほぼ 35°C 前後に保つことができた。テスト実験によって得られた様々な貴重なデータは本実験の測定器の設計に大いに役立った。

5. スケジュール

現在測定器・超伝導マグネット・エレクトロニクスの最終設計が進められており、既にジェットチェンバーについては製作が始まっている。64年2月には測定器・エレクトロニクスの製作を終了し、加速器のビームによるテストを行う予定である。超伝導マグネットについても来春には完成の予定である。

その他、ゴンドラの着地時の衝撃を吸収するためのいろいろな衝撃緩衝材のテストも進められている。

実験は64年度より始めることを予定している。まず64年度は超伝導マグネットを搭載せずに代わりに鉛コンバータとシャワーカウンターを乗せて、測定器・データ収集システムのテストとガンマ線点源の探索を目的として三陸大気球観測所で実験を行いたいと考えている。

65年度以降は超伝導マグネットを搭載して測定器を組み上げ、カナダなどの磁気限界硬度の小さい気球基地より放球し、年に2~3回のフライトを行いたい。測定器を回収してまたそれを放球することによって十分微量の反ヘリウムなどを探索することが可能である。

さらにこの計画が順調に進行した場合には、将来的な展望として同様の測定器を宇宙基地に設置することも考えられる。

参 考 文 献

- [1] S. Orito, Proc. of the ASTROMAG Workshop, KEK Report 87-19, 111 (1987).
- [2] T. Yoshida et al., Proc. of the 2nd Workshop on Elementary-Particle Picture of the Universe, KEK, 142 (1988).
- [3] S. P. Ahlen et al., Phys. Rev. Lett., **61**, 145 (1988).
- [4] R. E. Streitmatter et al., Preprint (1988).
- [5] J. Silk et al., Phys. Rev. Lett., **53**, 624 (1984).
- [6] S. Rudaz et al., Ap. J., **325**, 16 (1988).
- [7] A. Yamamoto, Proc. of the ASTROMAG Workshop, KEK Report 87-19, 13 (1987).