

南極域におけるプロトンとヘリウムの観測

国本修司^{*1}・村上 聡^{*1}・中川道夫^{*1}・高橋 保^{*1}・西村 純^{*2}・山上隆正^{*3}
小玉正弘^{*4}・河野 毅^{*4}・山極 巖^{*4}・森本幸司^{*5}・村上浩之^{*5}・山内 誠^{*6}

OBSERVATIONS OF THE COSMIC-RAY PROTON AND HELIUM IN ANTARCTICA

By

S.KUNIMOTO, S.MURAKAMI, M.NAKAGAWA, T.TAKAHASHI, J.NISHIMURA,

T.YAMAGAMI, M.KODAMA, T.KOHNO, I.YAMAGIWA, K.MORIMOTO,

H.Murakami and M.Yamauchi

Abstract : The Polar Patrol Balloon Experiment has successfully carried out the observations of the cosmic rays with three balloon-borne detectors of PPB#6. PPB#6 was launched from Syowa Station, Antarctica by the 34th JARE (Japanese Antarctic Research Expedition) on 5th Jan. 1993. The balloon moved westward by 1.5 circumpolar rounds over Antarctica, covering 6-13 g/cm² atmospheric depth and 63° S - 70° S geographic latitude. The long duration flight of PPB#6 over 20 days became possible using auto ballast control system, and the total of 584 hours of observations was obtained. The observed intensities of cosmic-ray protons and heliums ranging from 100-500 MeV/n increase linearly with the invariant latitude from 50° to 80°. The spectra for cosmic ray proton and helium were obtained at various invariant latitude including the cusp region.

概 要

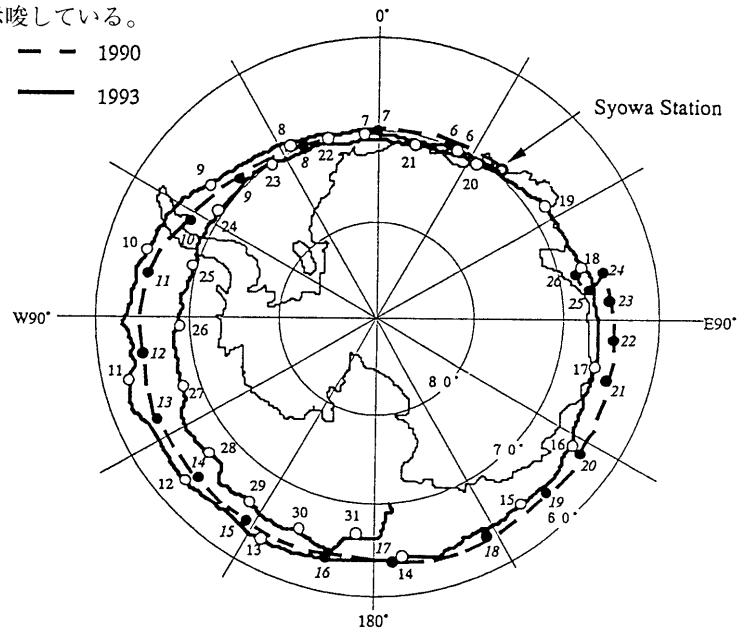
南極大陸周回気球実験計画〔1、2〕におけるPPB6号気球（PPB#6）〔3〕の観測目的の一つは、同一の検出器を用いて未だに行われていないカットオフ・リジディティが低いところから高いところまでを連続的に測定する事にある。具体的には宇宙線中に存在するエネルギー領域が100MeV/n から500MeV/n までのプロトンとヘリウムの存在量を精度良く観測し、さらに全く未測定のカस्प内での宇宙線粒子の存在量をも定量的に求めることである。この様な目的で、平成5年1月5日にPPB6号気球を第34次隊が昭和基地から放球した。今回の観測で得られた解析結果の一部を報告する。

気球飛翔

PPB6号気球は、南極の昭和基地より1993年1月5日8時55分(UT)に放球された。この気球は日本が南極観測で使用した最大の大気球(約59000立方メートル)である。放球後の気球の航跡は昭和基地より南極大陸を反時計回りに約1.5周した。この気球の放球から地上への降下までの航跡を第1図に示す、気球の航跡に書き込まれた算用数字は1月5日以降の日付を意味している。なお、破線で示された航跡は1990年1月5日に放球されたPPB2号気

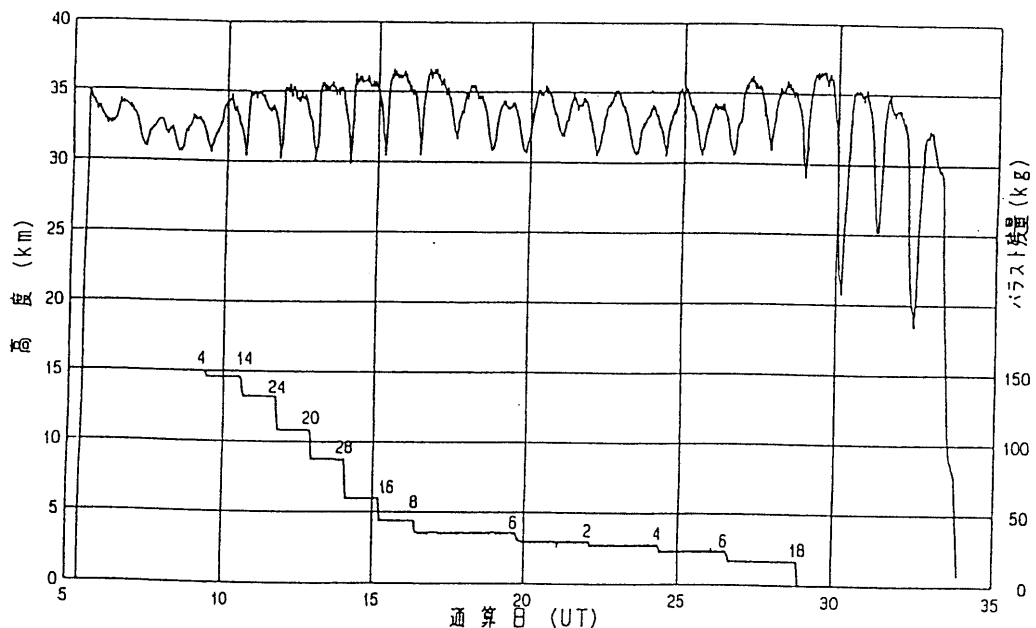
*1 大阪市立大学理学部 *2 神奈川大学工学部 *3 宇宙科学研究所 *4 理化学研究所
*5 立教大学理学部 *6 宮崎大学工学部

球のものである。2機の気球は良く似た航跡を示しており、1月5日付近に放球すると、きれいに南極大陸を周回する可能性が高い事を示唆している。



第1図 P PB 2号および6号気球の南極大陸に於ける航跡図

南極大陸を周回したゼロプレッシャー気球の高度は自動的に制御され、その結果を第2図に示す。図によれば、P PB 6号気球の高度は、約25日間オートバラストによる制御（プリセット値を30.7kmとしてこの値以下に高度が下がらないようにバラストを投下する）の効果により約31km以上を維持し続けた。なお、最高高度は36.5kmであった。さらに、搭載した150kgのバラストはその全量を1月29日には使い果たし、以後は温度変化にともない大きく上下しながら高度を下げて2月1日には降下した。図中の階段上のグラフはその時時のバラストの残量を示し、算用数字は投下されたバラストの量を示してある。



第2図 P PB 6号気球の高度とバラスト使用量の変化

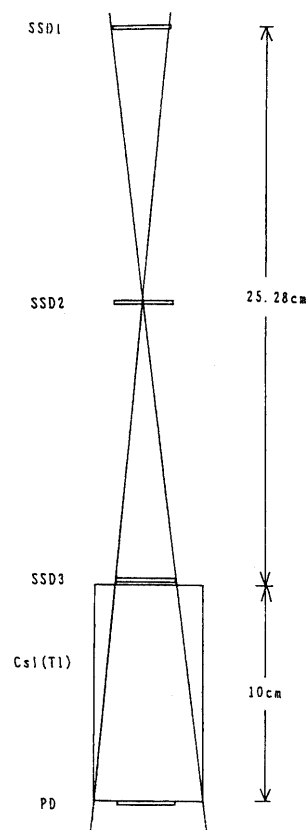
観測装置

搭載された粒子検出器には2種類の検出器系が3台用意されている。今回その結果について報告するのはD3と呼ぶ第3図に示すような検出器である。この検出器は、従来の結晶シンチレーターの受光部に使用するPMTに変えてフォトダイオードを使用して検出器の小型・軽量化を行った。図中の、前方のSSDからはここを通過する時の損失エネルギーを計測し、主検出器であるCsI(Tl)結晶で入射粒子の全エネルギーを計測し、さらに前方にある3台のSSDが同時に信号を出したときのみ主検出器の信号を得られるようになっている。この検出器系は口径が28mmで長さが252.8mmの望遠鏡状態になっている、したがってこの検出器系の有効 $S\Omega$ は $0.088\text{cm}^2\cdot\text{sr}$ となる。このような検出器で、大気頂上での宇宙線粒子のスペクトラム〔4〕から推定すると、20日間の観測時間で $100\text{--}500\text{MeV}/n$ の測定エネルギー範囲で期待される計数量は、プロトンが約 1×10^4 cts、Heは約 1×10^3 ctsとなる。この宇宙線望遠鏡で観測されたプロトンとヘリウムによる信号はアルゴス・システムにより人工衛星を経由して地上局に電送される。なお、電送システムでは、30秒に1回1フレームが送られる。そこで、このD3で得られるプロトンについては、おのおののエネルギーを 100MeV から 350MeV までの領域で 50MeV 毎の5チャンネルに分割して各チャンネル毎に30秒間でのその計測数を収納する。ヘリウムについては30秒間にD3に入射したときのSSDから得られた dE と、CsIから得られた全エネルギー E とを1組として1イベントとする。1フレームには2イベント分まで記録出来るようになっている。なお、この観測装置、HKシステム及びデータ伝送システム等の詳細については気球シンポジウム〔5〕および〔6〕に記載されている。

観測結果

PPB6号気球は、地理学上南極点を中心にして南緯63度から70度の範囲内をほぼ円周状に周回した。その結果として地磁気座標での緯度(Invariant Latitude)が49度から81度までの範囲内を気球が移動した事になる。Inv. Lat.が49度から81度までの移動は、宇宙線粒子が地球大気に垂直入射するときの下限の運動量に相当するカットオフ・リジディティ(Cut-off Rigidity)で表せば、 3.00GV から 0.01GV までになる。

放球された1月5日から1月30日までの、気球高度変動とこの観測装置で得られたプロトンの強度変動とを得た。この中から11日と13日の2日間での気球高度とプロトンの強度との各々の一日における相関を第4図の上段と下段に示す。丸印は気球の高度を、誤差棒のついた+印はプロトンのカウント・レイトを各々示している。11日は地磁気緯度の値が51度から55度まで変化しており、また13日は62度から68度まで変化している。いずれも気球の移動につれて、24時間かけて増加を示している。気球に太陽光線がもっとも強く照射されるのは、定義によれば地磁気座標系における磁気地方時(MLT)が12時のときである。そこで、 $MLT=12$ 時となるのを求めると、11日の場合には $UT=19$ 時頃と13日の場合には $UT=$



第3図 PPB6号気球に搭載された宇宙線望遠鏡(D3)、SSDのサイズは $28\times 28\times 0.5\text{mm}$ 、CsIは $50\text{mm}\phi\times 100\text{mm}$

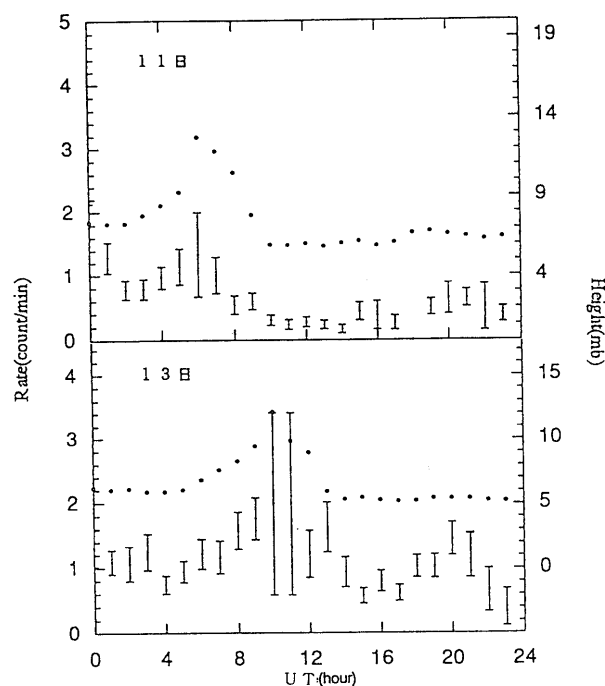
23時頃である。この逆のMLT = 0時頃が気球の温度は最低となる、従って気球高度は最低になる。まず、11日については、9 mb以下と高度の低い5時 (UT) から8時 (UT) までの4時間を除いた時間帯のプロトン強度の平均値を求めてみると、 $0.510 \pm 0.030 \text{ c/min}$ が得られた。なお、20時 (UT) 過ぎに小さいピークが存在するが8時から23時までの強度変動は統計誤差を考慮するとほぼ一定と見なせる。さらに13日の場合は9時 (UT) から12時 (UT) までが9 mbより低いのでこの4時間を除いた時間帯のプロトン強度の平均値は $0.991 \pm 0.046 \text{ c/min}$ となる。なお、12時 (UT) から23時 (UT) までその強度は変動しているようにみられるが23時 (UT) 頃は強度が最小になっている。しかし全体的にみて平均値からそれほどずれてはいないと見られる。

これらの図から気球高度が9 mb以上であれば、測定されたデータの統計誤差の大きさを考慮するとプロトンの強度はほぼ一定であると考えられる。そこで、高度を 9 g/cm^2 以上の範囲に設定してプロトンの強度変動を調べた。

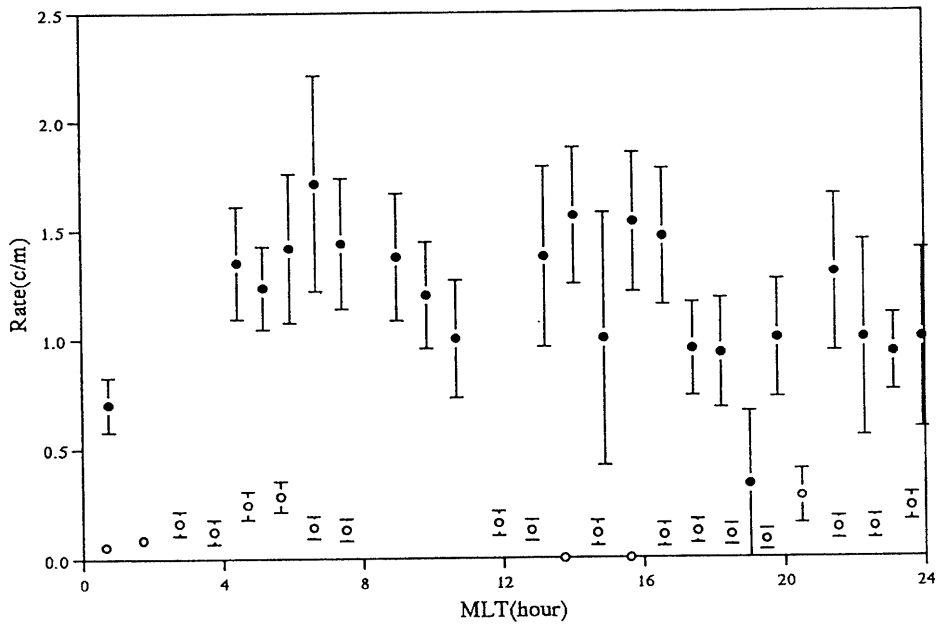
宇宙空間から地球に入射した粒子は、大気上層部で空気の原子核と衝突し、多くの二次宇宙線を作りエネルギーを損失する。宇宙線粒子中の陽子の場合の大気中での平均自由行程は 100 g/cm^2 となる。この事から気球高度では、入射原子核のフラグメンテーションは無視でき、エネルギー損失としては、電離損失のみを考えれば良い。そこで、陽子とヘリウムのスペクトラムについて、5から 10 g/cm^2 までの高度でのスペクトラムを求めてみた。100 MeVから500 MeVのエネルギー領域ではほとんど変化が見られない事が分かった。したがって、大気頂上でのスペクトラムに変換する場合、5%前後の強度の増加を行えば良い。

高度については、上記の条件を設定して、さらに、Inv. Lat.が80度と55度の場合についておのおのの地磁気経度に相当するMLTを変数としてプロトンの強度変動を第5図に示した。図からわかるように、プロトンの強度はいずれのInv. Lat.においてもMLTが12時の付近で特に大きな値を示していない。この事は、太陽光により検出機の温度が上昇しても、検出器の性能には変動がない事を示している。

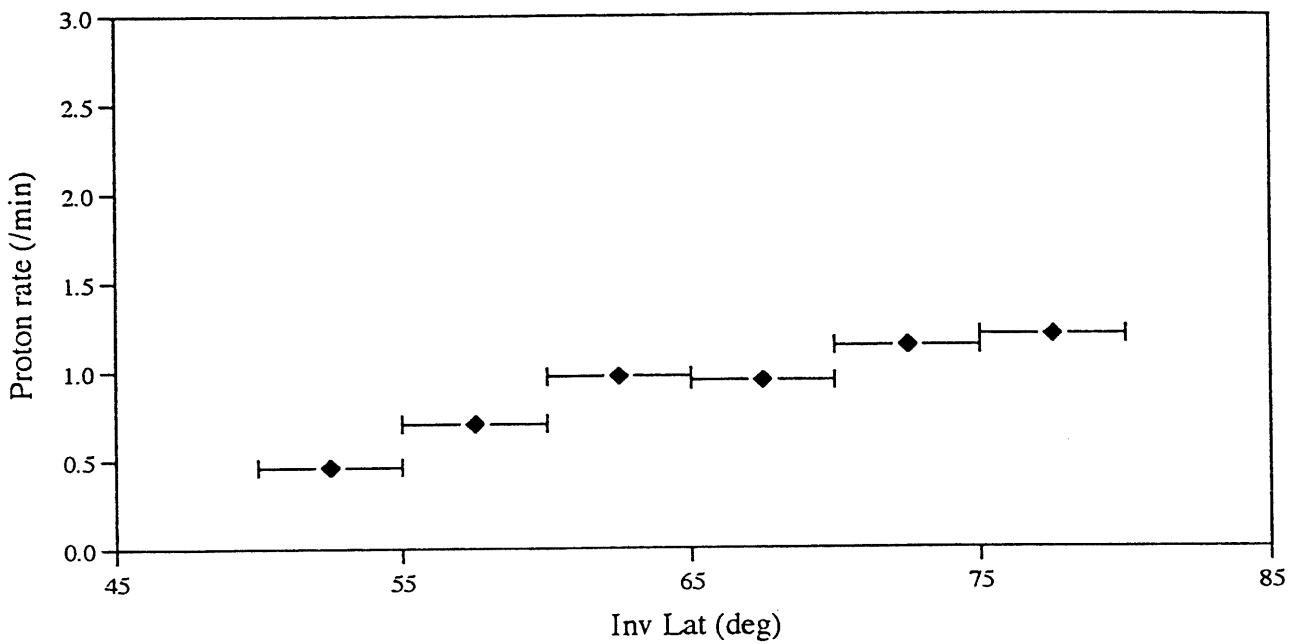
各気球位置での地磁気緯度 (Inv. Lat.) を変数にして、その場所で気球高度が9 mb以上のプロトンの強度を集めて、その平均のレイトを第6図に示した。図からプロトンの強度は磁極に向かうほど、すなわちInv. Lat.が増大するにつれてゆっくりと増大している様子が見られる。増加率としては $0.25 \text{ [c/min]} / 10 \text{ [deg]}$ が得られる。



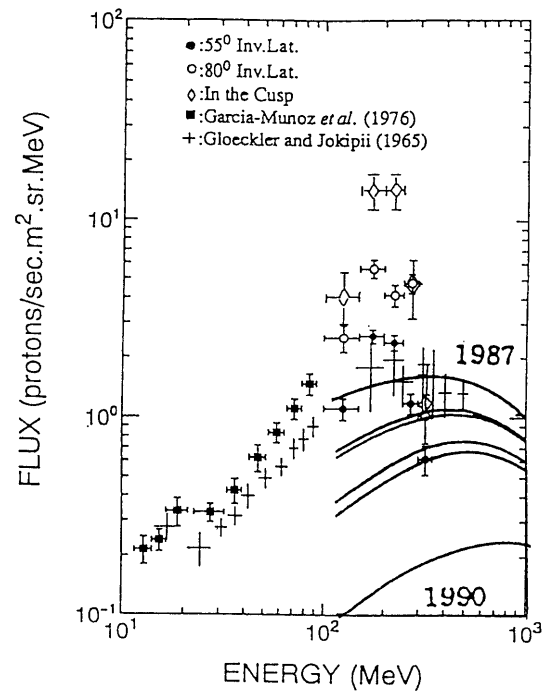
第4図 1月11日と13日の気球高度とその時のプロトンの強度の変動



第5図 P P B 6号気球位置のMLTによるプロトンの強度変動
○印と●印とは、おのおのInv.Lat.が55と80度とを示す。

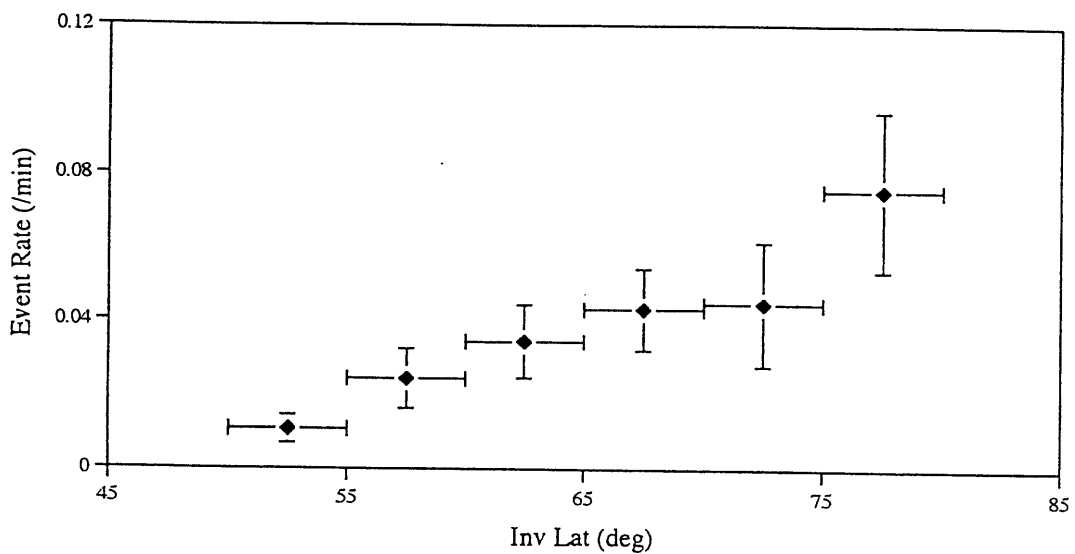


第6図 P P B 6号気球位置のINV Lat.におけるプロトンの強度変動

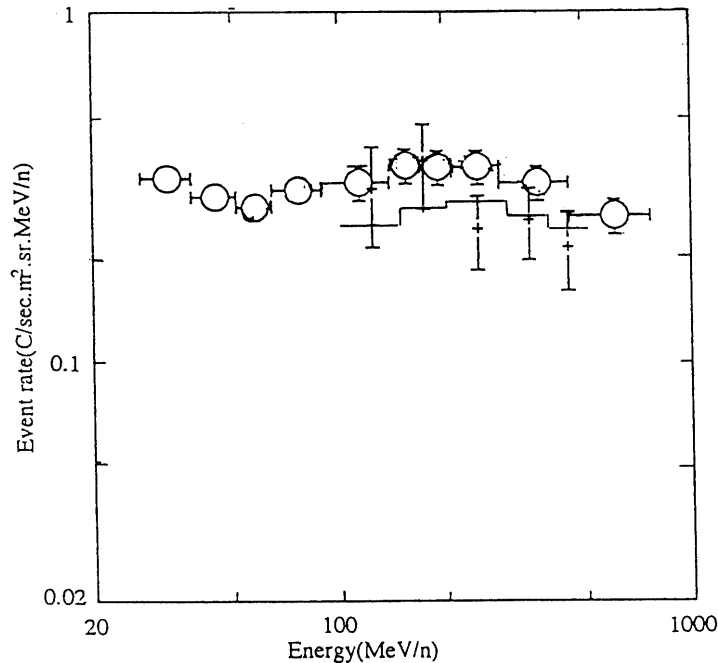


第7図 プロトンのスペクトラム (カusp領域を含む)、実線は上から順に1987、1993、1979、1992、1980、1990年における太陽活動を考慮して Webber 達が計算したものである。

これらの強度変動に対する結果に基づき、カusp領域および、Inv. Lat.が80度と55度の3箇所での大気頂上に換算したプロトンのスペクトラムを求め、第7図に示した。低緯度でのスペクトラムは、従来の観測〔7〕(図中の+印)と比べて良く一致している。



第8図 P P B 6号気球位置のINV. Lat.におけるヘリウムの強度変動



第9図 ヘリウムのスペクトラム

しかし、磁極付近のInv. Lat.80度付近では、今まで観測が無いために比較できないが人工衛星（IMP 8）で得られたスペクトラム〔8〕の延長上に位置しているようである。これらはアルベド・プロトンの再入射〔9〕等の効果が考えられるが、その量については検討中である。さらに、カスプ領域での観測として初めてプロトンのスペクトラムが得られたと考えられる。なお、このカスプ領域としての定義は、Lemaire and Roth〔10〕により、Inv. Lat.が70度から85度までの範囲とMLTが10時から14時までの範囲とで制限された領域を意味する。なお、図中の実線は Webber & Potgieter〔11〕の太陽の影響を考慮した計算によるスペクトラムで、上から順に1987年、1993年、1979年、1992年、1980年と1990年の時のものである。1987年は太陽活動が極小期、1990年は極大期に相当する。1993年1月に観測されたPPB 6号気球のスペクトラムは1987年の極小期のスペクトラムとほぼ一致しているが、測定誤差を考慮すれば1993年のシミュレーションとも一致していると言える。

ヘリウムの場合もプロトンの場合と同様にInv. Lat.を変数としてその強度変動を纏めて見た。この結果を第8図に示す。ヘリウムもプロトンと同じようにInv. Lat.の増加にともなってその強度を増している事が明らかになった。その強度が直線的に増加するとして、増加率を求めると $0.02 [c/min] / 10 [deg]$ を得た。

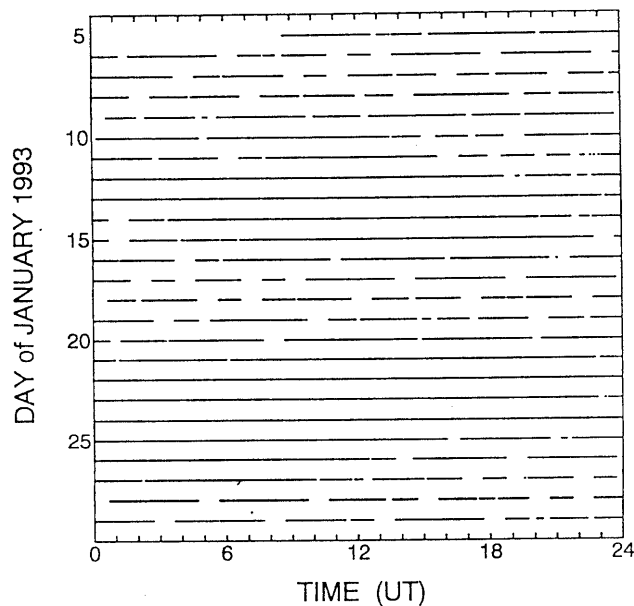
これらのデータを用いて、ヘリウムについてのスペクトラムを求め、図9にその結果を示した。図中の階段上の実線は中緯度帯の宇宙線粒子中のヘリウムのスペクトラム〔4〕を示し、誤差棒付きのデータがPPB 6号気球により得られたスペクトラムである。さらに、○印のデータはGarcia-Munoz et al〔8〕による。得られたスペクトラムはどのエネルギー・バンドでも各々の計測値が統計的に十分でないために、誤差棒は長くなっているが、中緯度帯のヘリウムのスペクトラムと誤差の範囲内で一致している。また、PPB 6号気球で得られたデータはGarcia-Munoz et alの高エネルギーでの値に比べて低い目にてでているが、誤差を考慮すればほぼ一致していると思わせる。

まとめ（南極での有効性とグレードアップについて）

本実験での目的である同一の検出器を用いてカットオフ・リジディティが低いところから高いところまでを連続的に測定して、プロトンとヘリウムとの存在量を系統的に求める事が出来た。それによると、統計精度は不十分であるがInv. Lat.の増加にともない各々の粒子の計測率が直線的に変化している事が分かった。大気頂上での宇宙線粒子のスペクトラム〔4〕から期待される各々の粒子の強度と一致するInv. Lat.は50度あたりの低緯度帯になる。従って高緯度帯の強度については低緯度帯の強度に付加される量が存在するのかまたは固有の量が存在するのかを考えねばならない。この点については別の機会に述べる。

PPB実験は、第1図に示されているように、南極域で文字どおり地球の自転軸まわりの周回飛行が可能となりさらに、地磁気の軸が自転軸とずれている事により、周回すれば広い範囲にわたる地球磁場下における種々の観測が行える事になる。一方、過去の宇宙線粒子の観測においては同一の検出器で地球磁場の値を変えての観測はなかった。今回、PPB実験を行う事により初めて一つの検出器で連続して観測する事が出来た。第8図の2機の気球はどちらも1月5日に放球されている良く似た航跡を残しており航続時間の差は気球高度の差ではないかと考えられる。もちろん、航跡はその年の気圧配置によって微妙に変わるので、同じ経路を通るとは限らないが、ほぼ同じ航跡を取る可能性は十分高いと考えられる。従って、1月5日に放球し、その後31km以上の高度を維持する事になれば、ほぼ1カ月の連続観測が可能になると期待できる。

さらに、周回気球からのデータの取得について、今回はアルゴス・システムを採用した。この方式は気球からさらに上空にいる人工衛星にデータを送信し、衛星は受信したデータを地上局に送信するシステムであり、このためにデータ列の破損が多くなっている。第10図に全フライト中のデータの欠落状態を示す。この事は、観測時間の減少となり有効面積の小さい検出器の場合には、統計誤差の増加をもたらす事になる。しかし、検出器の大型化により単位時間あたりの計測数を増加させる事すなわち統計を良くする事が可能になり、さらに観測されたデータの欠落を減少させる為には送信方法を改良することである。



第10図 P P B 6号気球のアルゴス・システムのデータの取得状態、実線部が観測した部分である。

謝 辞

南極における放球、および放球に至るまでの種々の協力をいただきました、南極観測隊の第34次隊と第33次隊の方々、極地研の江尻全機氏と超高層グループの方々、と宇宙研の矢島信之氏と気球工学グループの方々に深く感謝いたします。さらにゴンドラの完成のために、(株)クリヤパルスの森國藏氏と内山貞夫氏、とアルゴス送信に関する東洋通信機の方々に深く感謝いたします。

参考文献

1. M.Ejiri, A.Kadokura, T.Hirasawa, N.Sato, R.Fujii, H.Miyaoka, J.Nishimura, N.Yajima, T.Yamagami, S.Kokubun, H.Fukunishi, M.Yamanaka, and M.Kodama, Adv. Space Res., 13, 127-130, 1993.
2. T.Hirasawa, M.Ejiri, N.Sato, R.Fujii, H.Miyaoka, A.Kadokura, J.Nishimura, N.Yajima, T.Yamagami, S.Kokubun, H.Fukunishi, M.Yamanaka, and M.Kodama, Proc. ISTS Sympo., 1593-1597, 1990.
3. T.Yamagami, M.Namiki, S.Ohta, H.Suzuki, Y.Hirashima, H.Murakami, K.Morimoto, I.Yamagiwa, M.Nakagawa, T.Takahashi, S.Murakami, J.Nishimura, Y.Tonegawa, M.Ejiri, N.Sato, T.Kohno, and M.Kodama, J.Geomag. Geoelectr., 46, 903-908, 1994.
4. M.S.Longair, High Energy Astrophysics, vol 1, p III, 1992.
(Cambridge University Press 2nd ed.)
5. 村上聡他、平成4年度大気球シンポジウム報告
6. 国本修司他、平成5年度大気球シンポジウム報告
7. G.Gloeckler and J.R.Jokipii, Ap. J. Lett., 148, L41-L46, 1967.
8. M.Garcia-Munoz, G.M.Mason, and J.A.Sampson, 15th Int. Conf. Cosmic Rays, 3, 209-214, 1977.
9. F.B.McDonald and W.R.Webber, Phys. Rev., No.1, 194-205, 1959.
10. J.Lemaire and M.Roth, Space Sci. Rev., 57, 59-108, 1991.
11. W.R.Webber and M.S.Potgieter, Ap. J., 344, 779-785, 1989.