

大気ニュートリノ・フラックス計算較正のための BETSによる大気ガンマ線の観測

笠原 克昌¹・望月 永子¹・鳥居 祥二²・立山 暢人²
田村 忠久²・吉田 健二²・大内 達美²・西村 純³
山上 隆正³・斉藤 芳隆³・村上 浩之⁴・小林 正⁵
古森 良志子⁶・本多 守弘⁷・緑川 章一⁸・湯田 利典⁹

Measurement of Atmospheric Gamma Rays with BETS for Calibrating Atmospheric Neutrino Flux Calculations

By

Katsuaki KASAHARA¹, Eiko MOCHIZUKI¹, Shoji TORII², Nobuhito TATEYAMA²,
Tadahisa TAMURA², Kenji YOSHIDA², Tatsumi OHUCHI^{2,3}, Jun NISHIMURA³,
Takamasa YAMAGAMI³, Yoshitaka SAITO³, Hiroyuki MURAKAMI⁴,
Tadashi KOBAYASHI⁵, Yoshiko KOMORI⁶, Morihiko HONDA⁷,
Shoichi MIDORIKAWA⁸ and Toshinori YUDA⁹

Abstract: We have performed a series of observation of atmospheric gamma rays to determine the absolute flux of neutrinos in relation to presence of the neutrino oscillations which have been claimed by the Super-Kamiokande experiment. The observations were carried out with the BETS instrument which was improved for the gamma-ray detection by adding the trigger system. In 2000, we obtained reliable data by using an optimized trigger system. The gamma-ray fluxes at balloon altitudes were compared with the expected ones by Monte-Carlo simulations using different nuclear interaction models. The best-fit model for the gamma-ray flux is proposed for the calculation of the absolute neutrino flux.

概 要

最近のスーパーカミオカンデの実験で明らかになったニュートリノ振動に関連して、ニュートリノフラックスの絶対値を求めるためのガンマ線強度の高度変化を気球観測により測定している。観測には、一次電子を観測するために開発されたBETS測定器にガンマ線用のトリガーシステムを付加した装置を用いている。2000年度の観測では、これまでよりトリガーシステム

¹ 芝浦工業大学システム工学部, ² 神奈川大学工学部, ³ 宇宙科学研究所, ⁴ 立教大学理学部,
⁵ 青山学院大学理工学部, ⁶ 神奈川衛生短期大学, ⁷ 東京大学宇宙線研究所, ⁸ 青森大学理工学部,
⁹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

を高性能化することにより、信頼度の高いデータが得られている。データ解析により得られた気球高度でのガンマ線フラックスと、核相互作用モデルの異なるシミュレーション計算の比較により、ニュートリノフラックスの計算に必要なモデルの確定を試みている。

重要語：大気ガンマ線，大気ニュートリノ，シンチレーティング・ファイバー

1. はじめに

周知のようにスーパーカミオカンデ(SK)グループは大気ニュートリノ観測データの分析から、ミューオン型ニュートリノの欠損を見いだした。これは主にニュートリノの到来方向の天頂角依存性から、ミューオン型ニュートリノが他の型のニュートリノに振動しているためと解釈され、ニュートリノに質量があることの決定的証拠と考えられるようになった[1]。このような結論はニュートリノ振動がないとしたときのニュートリノ強度の予想値との比較が根拠になる。大気ニュートリノ強度の予想値は、1) 地球に到来する1次宇宙線の強度(主に陽子)の不確定性、2) 大気中での宇宙線の生成、伝播(主に粒子発生モデル化)の不確定性、によって20%~30%程度は不確実性があると予想される。この他、実際の観測データとの比較には水とニュートリノの反応の断面積の不確実性や実験装置の効率等も重要なチェックポイントになる。SKデータの解析はこうした問題に結論が左右されないように、主として観測値や予想値の相対値を用いて慎重に行われている。一方絶対値を比較して見ると必ずしもニュートリノ強度の全てが無矛盾に説明できるレベルにはなっていない。これによってニュートリノ振動が否定されることはないにしても、ニュートリノ振動のパラメータのより精密な決定や新しい可能性の発見などの障害になる。

1), 2)の問題を解決するには、1次宇宙線を精密に観測するなどの努力が必要であるが、簡単ではない。一方大気中で発生している2次宇宙線は1次宇宙線と大気中の伝播の双方の情報を反映しているから、それらを精密に観測し、大気ニュートリノの計算値を較正することが考えられる。こうした目的にはニュートリノと直接カップルしているミューオンを観測する事がまず考えられる。ミューオンの観測はこれまでも多く行われ、現在も新たな観測が大気ニュートリノ問題との関連で行われようとしている。

ミューオン以外に比較的容易に観測できる大気宇宙線成分としてはガンマ線や電子がある。これらの成分はニュートリノとは直接カップルしていないが、ニュートリノ成分を計算するコードの較正と言う点からはミューオンと同様の役割を担えるものである。更に、ミューオンは同じ大気厚の所で観測しても大気構造(密度の高度変化)によってフラックスが変わるのに対して、ガンマ線や電子のフラックスは観測点上空の大気厚のみにより、その構造には関係しないという利点がある。我々はこれまで開発してきた電子観測装置(BETS)を改良し、大気ガンマ線の観測を世界に先駆けて実施した。ガンマ線の観測を行った理由は、フラックスが多い大気中での観測ではバックグラウンドを効率的に落とす必要があるが、この点で電荷を持たないガンマ線はバックグラウンドが少なく、トリガー時における選別が電子に比べて容易なためである。

これまでに東京大学宇宙線研究所の乗鞍岳宇宙線観測所において装置の性能評価を兼ねたガンマ線観測を2週間行った。そのデータ解析から、気球高度での観測には、さらにガンマ線のトリガー効率を高める必要があることが判明した。そこで装置にアンタイ・コインシデンス用のシンチレータを付加し、1999年度には宇宙科学研究所三陸大気球観測所から気球を飛翔させ、15km~25kmでの観測を行った。上昇中のトリガーレートの実測値と予想値は極めて良い一致を示し、装置及び計算値の健全さを示す結果が得られている。そして、陽子バックグラウンドの増える20km以上の高度では、一次電子の観測で用いたシャワーのイメージ解析による陽子の除去が不可欠であることも判明した。このため、2000年度には、アンタイ・コインシデンス用のシンチレータをさらに完全なものにして、再度気球高度での観測を行った。その結果、信頼度の高いガンマ線強度を得ることができた。この結果は、まだデータ解析に若干の改良の余地があるものの、大気ニュートリノフラックスの計算値の較正が可

能なレベルになっている。最終的な結論は、今後の更に詳細な計算との比較や、ミューオンデータとの整合性のチェックによって求めることになる。

2. 2000年度の観測における装置改良点

BETS の性能、構造等の詳細 [2] はすでに発表されているので、ここではその模式図を図1に示すこととした。もともとの BETS の構造は S1 で示す上部のプラスチック・シンチレータ (1 cm 厚)、15 cm のスペース、下部の本体からなる。本体は鉛とシンチファイバーのベルトのサンドイッチからなり、図中の S2, S3 には 1 cm 厚のプラスチック・シンチレータである。イベントトリガーは S1, S2, S3 の値の組み合わせによる。1999年度は厚さ 1 cm のシンチレータを上部の 15 cm のスペース部分を覆うように加えた (side anti scintillator)。しかし、この観測では 20 km を越えるフライト時に上部の gap 部分からの陽子の混入が多くなり、装置の不感時間が増えたために、結果的にガンマ線イベントのトリガーロスが起っていた。2000年度は、装置の不感時間を減らして、ガンマ線を効率的にトリガーするために、回路の高速化とアンチシステムの改良を行った。図右に示すように最上部に 1 cm 厚のプラスチック・シンチレータを増設して (図に見える外周部は構造上 1.5 cm 程度の厚さになっている)、より完全なアンチシステムを用いた。シンチレータからのシグナルの読み出しは、図2左に示すようにシンチレータに溝を彫り、波長変換型光ファイバー (x, y 方向にそれぞれ 8 本) を埋め込み、小型の PMT (Hamamatsu H6780) で光量を測定する方法を用いている (サイドアンタイに取りつけた様子が同図右)。

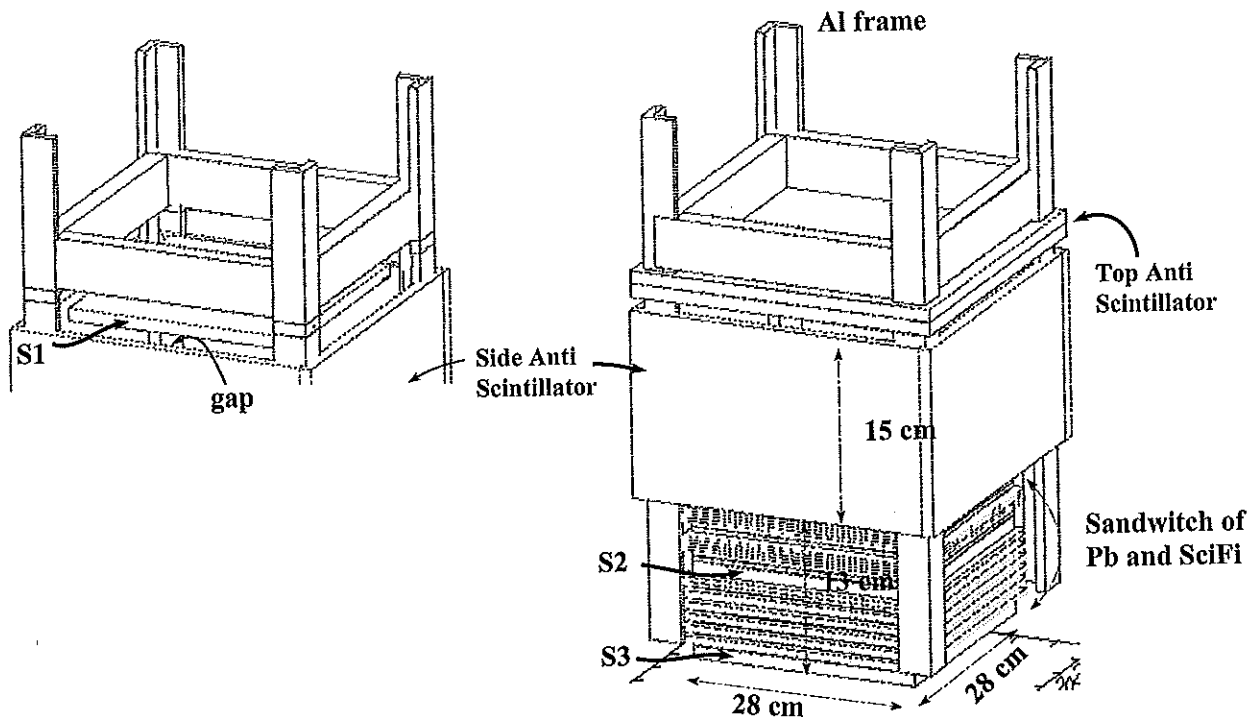


図1 BETS の模式図

左はTop Anti 無しの図。 gap の部分からの陽子やミューオンの混入を防ぐため、2000年度は右図のように S1 と gap 部分を覆う Top Anti シンチレータを増設した

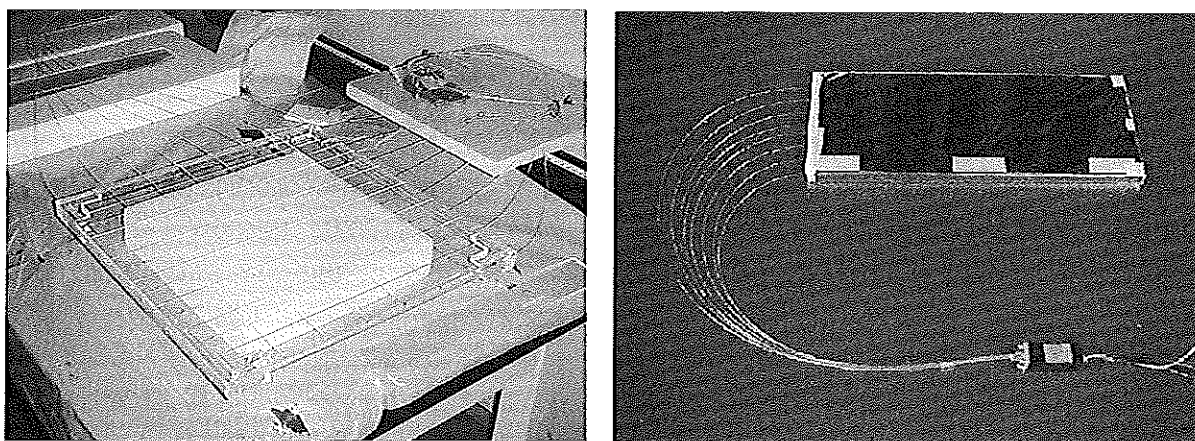


図2 Top Antiには縦横にそれぞれ8本の光ファイバーを埋めこみ(左図)、小型のPMTで読み取る方式とした(右図:これはサイドアンタイに取りつけた様子である)

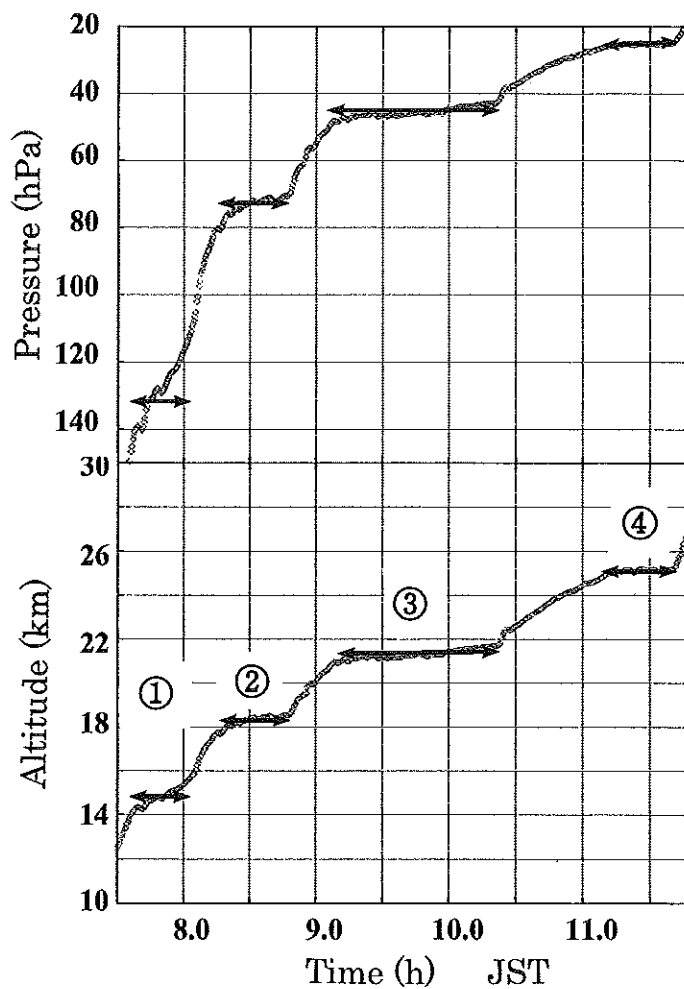
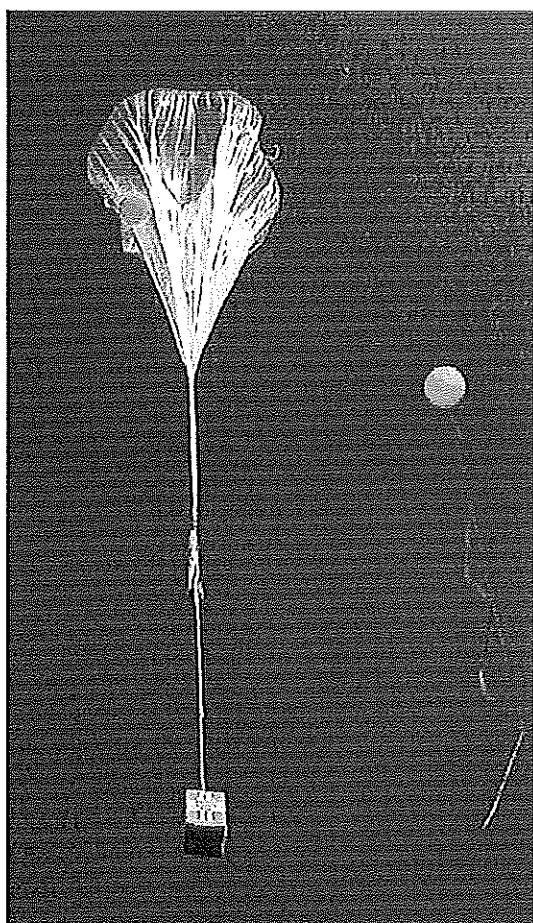


図3 放球とレベルフライト時のフライトカーブ
右上図:時刻 vs 気圧, 下図:時刻 vs 高度
矢印の範囲でデータ解析をした

3. 2000年度のフライト

2000年度の観測は6月5日に宇宙科学研究所三陸大気球観測所で行われ、午前6時49分に気球(B50-46)は放球され、午後5時30分地上からの指令電波により観測器は気球より切り離され、午後6時頃に三陸大気球観測所南東方、北緯38.667度、東経141.680度の海上に緩降下し、ヘリコプターの支援を受けて漁船により気球、観測装置本体とも迅速に回収された。途中4つの高度でレベルフライトを実現し、各高度でのガンマ線観測が行われた。図3に放球の様子と、フライトカーブを示した。矢印部分がデータ解析に使用したレベルフライトに対応する。解析対象データの平均高度等概要を表1に示した。

表1 解析対象データの概要

気球観測	1	2	3	4
高度 (km)	15.3	18.3	21.4	25.1
観測時間 (s)	1559	2160	4320	2320
イベント数	18808	25795	46675	17436
LiveTime (s)	752	928	1805	790

4. 画像解析によるガンマ線の選別

BETSのイメージングカロリメータでは、どのようにシャワーイメージが観測されるかを概念的に理解するために、検出器におけるシャワー発達の様子を実際に得られた画像とそれに類似するモンテカルロシミュレートによるイベントの比較を図4に示す。

シャワーイメージによるガンマ線イベントの選別のために、電子選別の場合と同様に、シャワーの軸に対するシャワー粒子の集中度(コンセントレーション)について解析を行った。コンセントレーションのパラメータとしては、シャワー軸から5mm以内に集中しているファイバーの輝度(エネルギー)の割合を用いている。図5の(a)に示すように、陽子は約0.5をピークに幅を持った分布となる。電子は約0.8以上にピークがあり、これはCERNでのビームテストの実験結果とも一致している。ガンマ線の場合のコンセントレーションは電子の場合とほぼ同じか、むしろ少し大きいので、電子と同様の方法で陽子の除去が可能である。(b)に示すのは今回の実験の結果である。このコンセントレーションの分布は、0.7以上ではほぼ全てがガンマ線とした場合に一致しており、選別が正しく行われていることがわかる。ガンマ線のバックグラウンドとしては、中性子が混入している可能性があるが、シミュレーションによると、これらはコンセントレーションが0.7以上という条件で~0.5%以下の割合である。

5. ガンマ線スペクトルの観測値と計算値の比較

2000年度のフライトで得られた各レベルでのガンマ線のエネルギースペクトルを図6に示す。これまで、ニュートリノの計算には、核相互作用のモデルとしてLund Fritiof v.1.6 [3]を用いてきたが、今回の計算では、これに加えてLund Fritiof v.7.02 [4]も用いて予想値を求めた。1次宇宙線には最も信頼度が高いと思われるBESSグループによる陽子、ヘリウムスペクトルを仮定している[5]。v1.6とv7.02の間には図7にみるような差があり、v7.02の方が2次粒子(π)のスペクトルがハードで、leading nucleon (N)については、その反動として、v7.02の方が非弾性度が大きいことである。この結果、上空でのガンマ線の強度は両者のモデルで明らか差があり、今回の観測結果はv7.02の方と良い一致を示している。また、低空での強度は核子が早く減衰するため、v7.02の方が小さくなるが、この結果も乗鞍高度での観測結果と良い一致を示している。

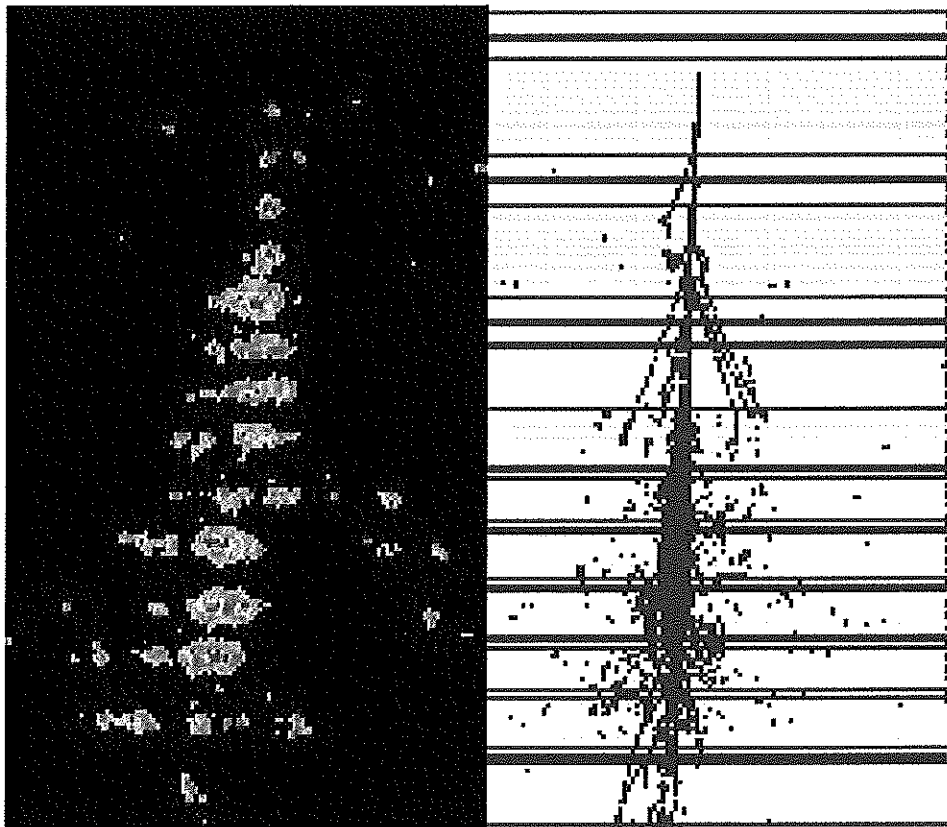


図4 シンチファイバーによるシャワー画像
右側のモンテカルロシミュレーションのように検出器内で発達するシャワーの画像がこのような得られる。左の画像は実際のイベントであり、シミュレーションとは概念的な対応以上のものはない

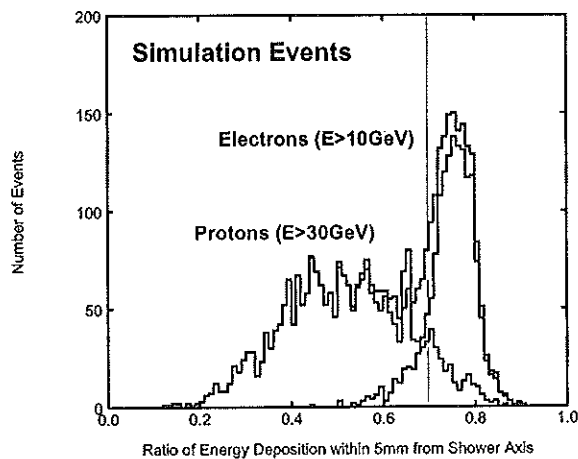


図5-(a)

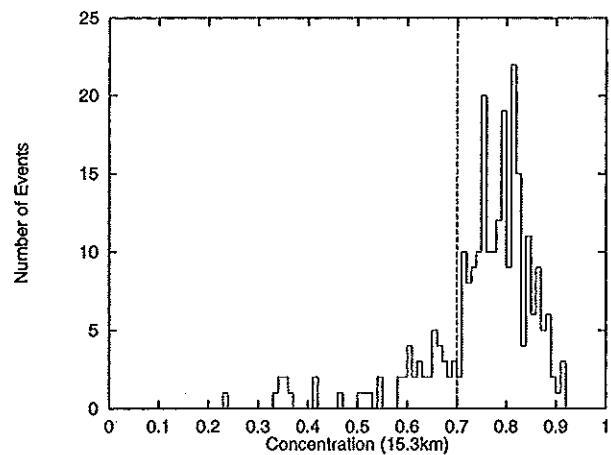


図5-(b)

図5 コンセントレーション分布図

- (a) シミュレーションによる電子10GeV以上と陽子30GeV以上についてのコンセントレーション
(b) 2000年三陸実験による高度15.3km地点でのコンセントレーション

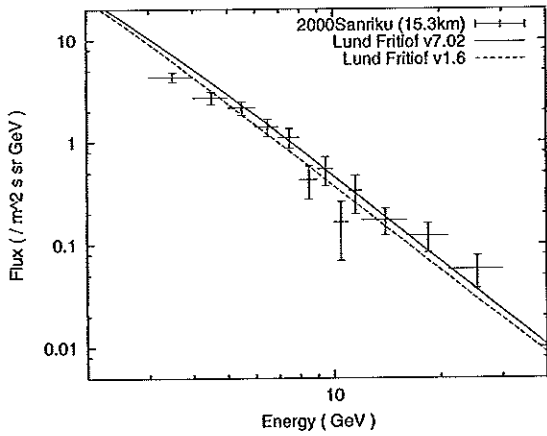


図6-(a)

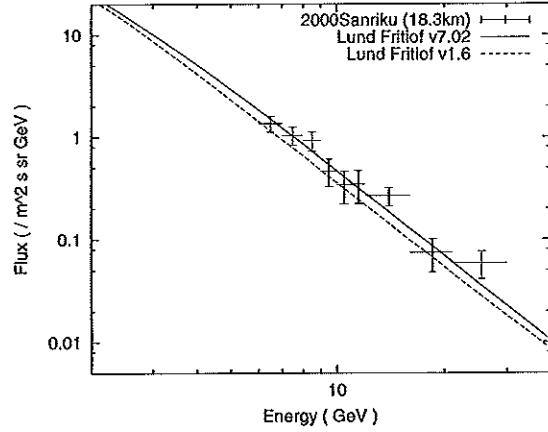


図6-(b)

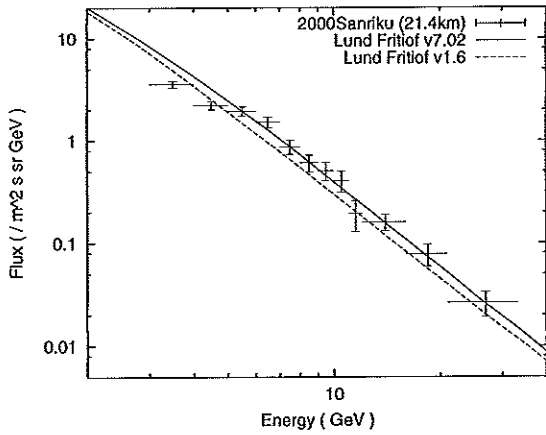


図6-(c)

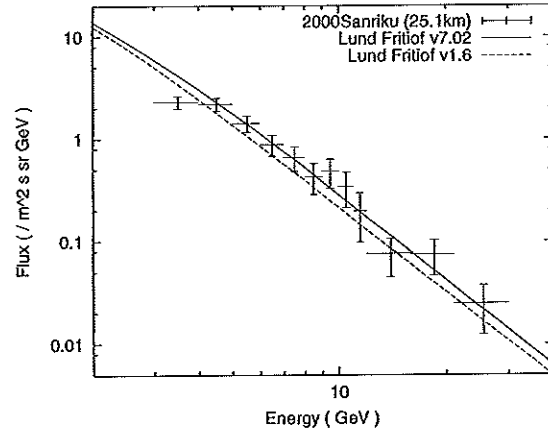


図6-(d)

図6 各高度でのガンマ線スペクトルと予想値

- (a) 15.3km
- (b) 18.3km
- (c) 21.4km
- (d) 25.1km

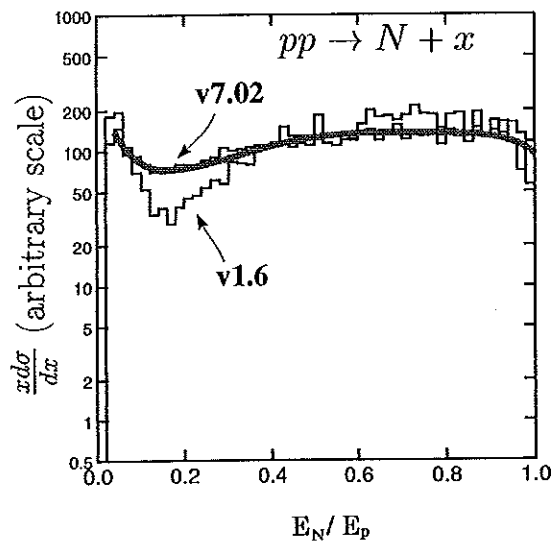
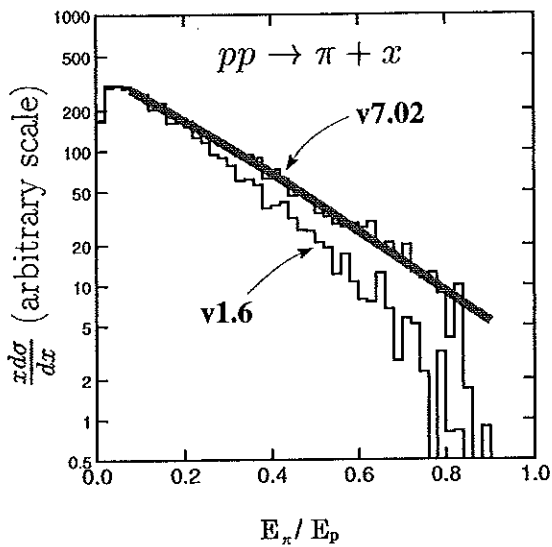


図7 Lund Fritiof v1.6とv7.02の比較: pp 30GeV

今回の観測結果は1999年度の結果とは多少絶対値にずれがあるが、全体の傾向は変わらない。これらと乗鞍の観測結果を総合すると、 $\nu_{7.02}$ の方が全体の傾向として良い結果を与えるようである。

6. 結 論

1998年度の乗鞍高度での観測に続いて、2回の大気ガンマ線の観測を気球高度で行った。これらの観測結果を総合すると、上空での強度、乗鞍での強度をともに良く説明するにはLund Fritiof $\nu_{7.02}$ の方が $\nu_{1.6}$ よりも良いようである。この結果は、データ解析に残されている角分布に関する若干の改良点を除いて、ほぼ最終的な結果であり、ミューオンデータとの一致性をチェックすることにより核相互作用の確定を行って、最終的なニュートリノフラックスの期待値を得る予定である。

7. 謝 辞

今回の観測を成功裏に実施できたのは、宇宙科学研究所気球部門の方々、および、三陸現地の関係者の多大なご支援による。ここに紙面を借りて御礼申し上げたい。また本実験は文部省科学研究費補助金、基盤研究(B:09440110)(笠原)、特定領域ニュートリノ(A:12047224)(鳥居)の補助を受けている。

参 考 文 献

- [1] Y. Fukuda, et al., Super Kamiokande group: Phys. Rev. Lett. 81 (1998) p.1562.
- [2] S. Torii, et al., BETS group: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 452 (2000) p.81-93.
- [3] B. N. Almqvist, E. Stenlund: Comp. Phys. Comm. 43 (1987) p.387.
- [4] H. Pi: Comp. Phys. Comm. 71 (1992) p.173.
- [5] T. Sanuki et al., BESS group: Proc. of the 26th ICRC 3 (1999) p.93-96 and private communications.
- [6] S. Torii, et al., BETS group: Proc. of Neutrino Oscillations and their Origin (Universal Academy Press Inc. Tokyo) (2000) p.35.