

BETSによる10 GeVから100 GeV領域での 電子エネルギースペクトルの測定

鳥居 祥二¹・山上 隆正²・村上 浩之³・田村 忠久¹・吉田 健二¹
立山 暢人¹・大内 達美¹・斎藤 芳隆²・小林 正⁴・古森 良志子⁵
笠原 克昌⁶・湯田 利典⁷・西村 純⁸

Measurements of the Electron Flux from 10 to 100 GeV with the BETS Calorimeter

By

Shoji TORII¹, Takamasa YAMAGAMI², Hiroyuki MURAKAMI³, Tadahisa TAMURA¹,
Kenji YOSHIDA¹, Nobuhito TATEYAMA¹, Tatsumi OUCHI¹, Yoshitaka SAITO²,
Tadashi KOBAYASHI⁴, Yoshiko KOMORI⁵, Katsuaki KASAHARA⁶,
Toshinori YUDA⁷ and Jun NISHIMURA⁸

Abstract: We report new measurements of the electron flux from 10 GeV to 100 GeV observed with the BETS (Balloon-Borne Electron Telescope with Scintillating fibers) instrument. The detector is an imaging calorimeter consisting of $\sim 10,000$ scintillating fibers and 7.1 r.l. thick lead. Rejection power of the background protons by the imaging capability of showers was proved to be 2,500. The balloon observations were carried out in 1997 and 1998 at Sanriku in Japan. Comparing the present results with previous ones, we discuss the diffusion characteristics of electrons in the Galaxy and the solar modulation effects.

概 要

BETS (Balloon Borne Electron Telescope with Scintillating Fibers) による、10 GeV から 100 GeV までの電子エネルギースペクトルの最新の観測結果を報告する。この装置は、約 10,000 本のシンチレーティング・ファイバーと 4 cm (7.1 r.l.) 厚の鉛板から構成されたイメージング・カロリメータである。電子選別のために、陽子の除去を宇宙線シャワーのイメージングによって行っており、その除去能力は約 2,500 倍であることが確かめられている。この報告では、1997 年と 1998 年に三陸で行った気球観測の結果について、これまでの他の観測値と比較する。そして、銀河中での電子の拡散係数や solar modulation の効果について議論している。

重要語: 宇宙線電子, 高エネルギー, シンチファイバー, カロリメータ

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神奈川衛生短期大学,

⁶芝浦工業大学システム工学部, ⁷東京大学宇宙線研究所, ⁸山形工科アカデミー短期大学校

1. はじめに

高エネルギー電子成分の加速は超新星爆発時の衝撃波で行われ、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と理解されている。このため、10 GeV から 100 GeV の電子のフラックスは、それらの様子を直接反映することができ、電子の加速機構や銀河内伝播中の拡散過程の様子を理解するために重要な量である [1]。これらの電子のエネルギー損失の割合はエネルギーの2乗に比例しているため、電子の寿命はエネルギーが高くなるほど短くなる。このため、TeV 領域まで観測がすすめば、エネルギースペクトルの変化や到来方向の異方性によって、近傍ソースの影響が直接的に観測できるようになることが強く示唆されている [2]。

しかしながら、これまでに30年間にわたってさまざまな測定器による観測が行われたにもかかわらず、これらを正確に議論するには電子観測はまだ決して十分とは言えない状況である。たとえば、10 GeV 領域であってもこれまでの信頼できるとされている観測の間にもファクター2以上の違いがあり、100 GeV 以上ではエマルジョン・チェンバー以外に有意な観測が行われていない。この原因は、おもに電子自身の数がエネルギーの増大とともに急激に減少する ($\sim E^{-3}$) ことと、雑音である陽子の割合がエネルギーとともに増大することによる。この結果、電子の観測装置は、高エネルギーになるほど大きな有効面積と優れた電子選別能力という相反する条件を同時に満たす必要がある。

従来用いられてきたチェレンコフ光測定器 [3] や遷移放射検出器 [4] は、100 GeV 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、100 GeV 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 TeV 以上の領域まで観測が可能な唯一の装置である [5]。しかし長時間の観測では雑音の蓄積により解析が困難になるほか、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た。この装置は、数 100 GeV 以上のエネルギー領域でも時間分解能を持つ唯一の装置で、電子加速源の同定に有効な到来方向の観測を行う性能を備えている。

この装置の特徴は、シンチレーティング・ファイバーベルトと鉛板を交互に重ねた構造のシャワー検出器を用いて、シャワーの形状をイメージングして電子の選別を行う点にある。その性能は、シミュレーション計算と高エネルギー加速器 (CERN-SPS) によるビームテストによって確かめられている [6]。観測するエネルギー領域は、三陸地方での Rigidity Cut の影響を考慮して、10 GeV 以上の電子の観測を行うようデザインされている。装置の詳細な内容はすでに報告しているため [7, 8]、ここでは次節で簡単に紹介するとともに、1997年と1998年に行った合計12.8時間の観測から得られたエネルギースペクトルについておもに報告する。

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した BETS (Balloon Borne Electron Telescope with Scintillating Fibers) は、検出器、トリガーシステム、データ取得システムから主に構成されている。検出器のイメージング型カロリメータは、18層ずつ直角方向に交互に設置した36層のシンチレーティング・ファイバーのベルトとその間に挿入された鉛板 (全部で4cm厚) からなっている。各ベルトは、1mm径のシンチレーティング・ファイバー280本をシート状に並べたものがある。したがって、シンチレーティング・ファイバーの総数は10,080本で、各方向ごとに5,040本である。各シンチレーティング・ファイバーは、一本ごとにライトガイド用のクリアーファイバーと、検出器の外側で融着されている。この結果、以前の装置にくらべて検出器以外からのノイズがほとんどなくなり、画像再構成の精度が極めてよくなっている。

トリガーシステムは、検出器の中で0cm, 1cm (1.8r.l.) および4cm (7.1r.l.) の鉛の深さのところに設置し

た1 cm厚のプラスチック・シンチレータ3層からのシグナルの同期をとることにより、トリガーシグナルを発生する。各深さでの光量はライトガイドをつけた光電子増倍管をもちいて測定する。1層目のシンチレータで0.7～5 MIPs (Minimum Ionizing Particle) 相当、2層目で10 MIPs以上、3層目は40 MIPs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。このトリガー条件は、10 GeV以上の電子をもっとも効率よくトリガーするように、シミュレーション計算により最適化されたものである。この結果、天頂角が30度以内のイベントについては、電子にたいして85%の検出効率で、陽子を1/150に減らすことができると予想される。この主な理由は、陽子が検出器内で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。実際の観測では、イベントの入射方向をリアルタイムで知ることができないので、シャワーの画像解析によってシャワー軸を決定後、このような電子選別を行った。

画像データを記録するシステムは、大口径のイメージ・インテンファイヤーとCCDカメラ、そしてCCDデータを処理する画像処理ボードから構成されている。互いに直角方向の5,040本のシンチレーティング・ファイバーが、各々まとめて1台のイメージ・インテンファイヤーの入力窓に接続されている。トリガーシグナルは、このイメージ・インテンファイヤーのゲートとCCDのリセットを作動させ、必要なタイミングでシャワーイベントのイメージを取り込むことができるようになっている。CCD画像は、256×256ピクセルのサイズで、各ピクセル毎にノイズレベル以上のデータについて、輝度を8ビットで記録している。

表1にBETSの性能をまとめておく。

表1 装置性能

エネルギー領域	10 GeV ～ 数100 GeV
幾何学的因子 (天頂角30度以内)	～ 300 cm ² sr (平均値)
陽子の除去性能	～ 2,500
エネルギー分解能	17 % (平均値)
角度分解能(r.m.s)	0.8 ～ 1.2 度
装置総重量	320 kg
消費電力	130 W (最大時)

3. 気球実験のデータ解析

気球観測は、1997年の6月2日と1998年の5月24日の2回にわたって三陸大気球観測所において行われた。1997年は35 km ~ 36 kmの高度で4.5時間のレベル観測を行い [9]、1998年は34 km ~ 35 kmにおいて8.3時間の観測 [10] であった。これらのレベルフライトでのデータのトリガーレートは、いずれも約1.7 Hzであった。

観測中のオンボードトリガーにより取り込まれたデータは、すべてEXB 8 mm テープに記録されている。この全データについて、CCD イメージから画像の再構成を行い、そのシャワー画像に対してエネルギー重みをつけた最小二乗法によりシャワー軸を求め、以下の条件によって電子の選別を行った。

1. シャワー軸が、検出器を完全に上から下へ通過している。
2. シャワー軸から求まる天頂角が30度以内である。
3. 入射粒子の電荷が、1 MIP 相当である。
4. シャワー軸から5 mm 以内のエネルギーの全体にたいする割合（以下REと呼ぶ）が、70%以上である。

4番目の条件は、電子の選別を画像解析によって行う方法として、シミュレーションで得られたデータをもとに開発された方法である。さきにも述べたように、1から3番目までの条件によって、陽子の数はもとの約1/150になっていることが予測される。電子と陽子にできる限りこれまでの観測値に近い値を与えてシミュレーションを行い、1から3番目までの条件でイベント選別を行った後のRE分布を図1に示す。シミュレーションでは、電子と陽子の数の比は10 GeVの積分値として約1 : 150が仮定されているが、図1からわかるとおり選別後の数はほぼ同じになっている。これからさらに4番目のREに対する条件により、電子の約85%が残り陽子は約95%が除去されることがわかる。このシミュレーションの結果を、図2に示した1997年の観測データのRE分布と比較すると、両者は非常に良く一致しており、ほぼシミュレーションの予想と等しい陽子の除去率が観測において達成されていることがわかる。この除去性能は、他の性能とともにCERN-SPSのビームテストでも直接的に確かめられている。

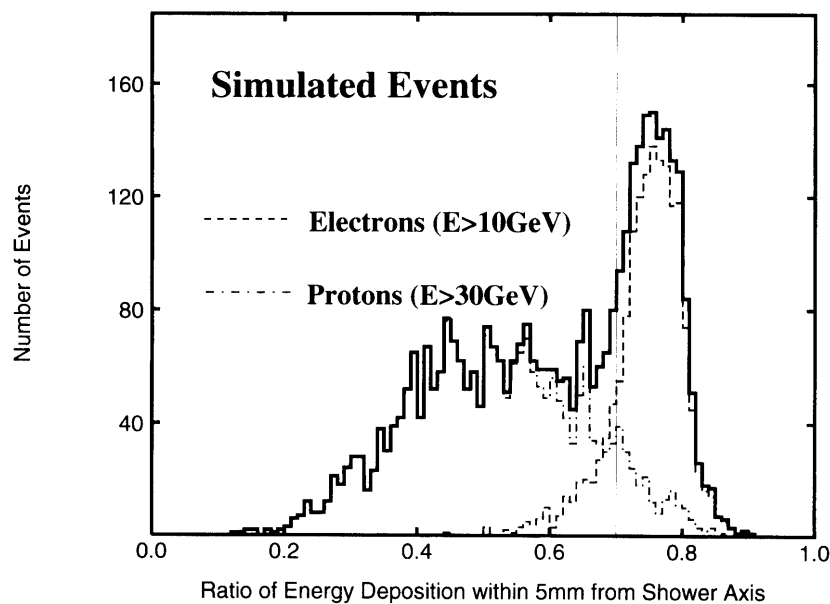


図1 シミュレーションで得られたRE分布（詳しくはテキスト参照）

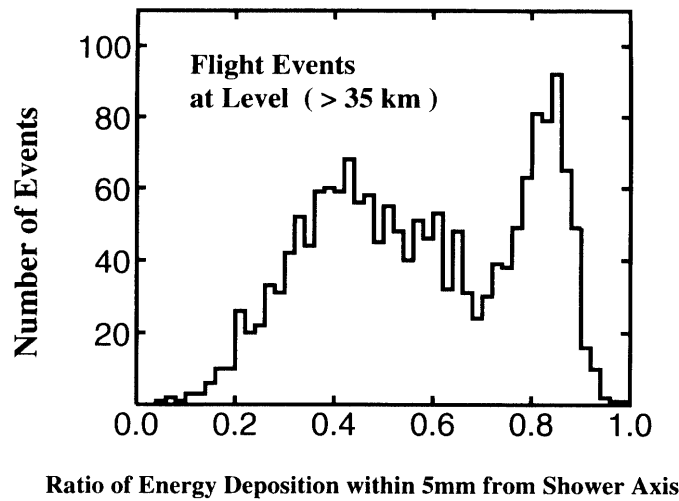


図2 1997年の観測で得られたRE分布
データ解析をシミュレーションと同じ条件で行っているため、図1と直接比較できる。

4. 電子のフラックス

前節で述べた解析により得られた電子候補の数を、各エネルギービンごとに表2に示す。この値から、観測装置の幾何学的因子のエネルギー依存性、大気による減衰の効果（平均で21.2%）、RE分布から電子数を求める時の補正（11.5%）、装置の不感時間の補正（19.5%）、エネルギー分解能による補正（4%）などを考慮して電子のフラックスを求めた。各ビンごとのエネルギー重みをつけた平均エネルギーとエネルギー幅は、べきが-3の微分エネルギースペクトルを仮定している。

図3に、10 GeVから100 GeVの領域で求めたエネルギースペクトルの結果を示す。我々が今回得た結果は、これまでに得られている結果（Tang '84）と比較すると有意に低い値であるが、最近のHEATの値 [11] とは10～30 GeVのあたりではよく一致している。しかし、50 GeV以上の領域ではまだ統計が不足しており比較を行うことは難しい。

電子選別の間接的証明のひとつとして、Rigidity Cut付近のエネルギー領域で東西効果を調べる方法がある。図4には、8 GeVから14 GeVの電子候補についての方位角分布を示す。この図からわかるとおり、明らかに東(270°)方向からのイベントが多く、さきに述べた電子選別の性能と定量的に一致した結果が得られている。

表2 観測された電子候補数

エネルギー幅 (GeV)	1997年	1998年	合計
11.09 ~ 13.91	102	163	265
13.91 ~ 17.45	72	123	195
17.45 ~ 21.89	37	73	110
21.89 ~ 30.76	40	57	97
30.76 ~ 43.22	23	37	60
43.22 ~ 60.71	12	22	34
60.71 ~ 85.30	5	8	13
85.30 ~ 119.84	0	6	6
総数	291	489	780

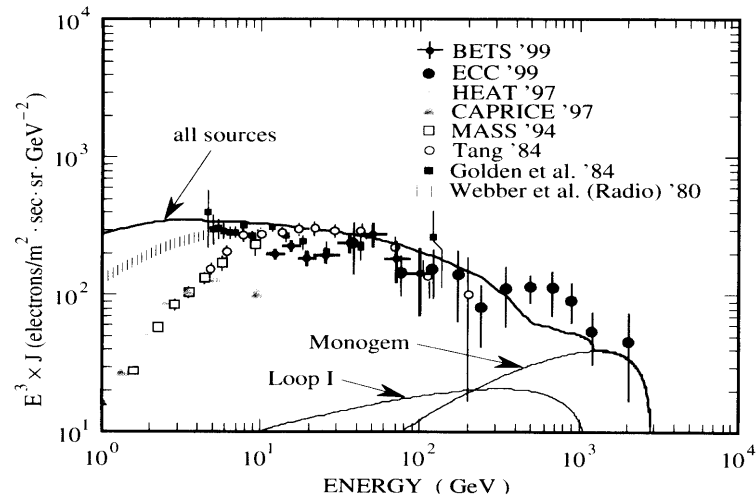


図3 1997, 1998年の観測で得られたBETSによるエネルギースペクトルと他のデータの比較
図には、拡散モデルによる電子の期待値 (all sources) が、個々のソースからの寄与 (Loop I, Monogem) とともに、実線で示されている。

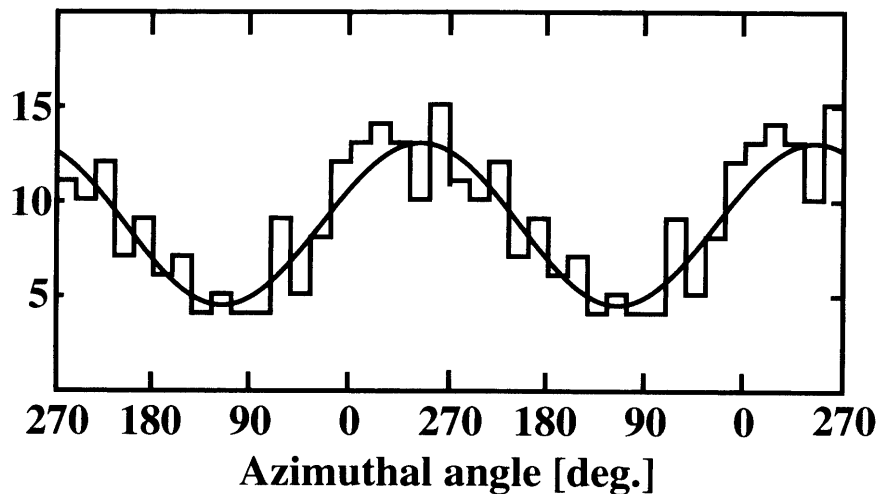


図4 8 GeV から 14 GeV の電子候補の方位角分布 (2 cycles)
0°が北方向で、270°が東方向。負の電荷の粒子に対して期待される通り、東方向からの入射粒子が多い。

5. まとめと今後の計画

BETS測定器を用いて、世界ではじめてシャワーの高精度なイメージングという方法により、10 GeVから100 GeVのエネルギー領域で電子観測を行いフラックスを求めることに成功した。この結果は、これまでのカウンター実験の中でも、最高のエネルギー領域での観測である。今回の結果はまだ最終的なものではないが、今後に必要な修正はあまり大きくないと考えている。

今回のフラックスを拡散モデルによる計算値と比較すると、超新星が我々の銀河で30年に一回爆発するという仮定のもとに、拡散係数として $1 \times 10^{28} (E/\text{GeV})^{0.3} \text{cm}^2/\text{sec}$ がもっともデータと良く一致する値として得られている (図3)。そして、BETSの観測値の年毎の変化から、Force Field近似による solar modulation の効果が推定

されている [12].

今後は、さらに装置の増強をはかり南極周回気球などによって20日間程度の観測を行い、10 GeVから100 GeVのエネルギースペクトルを確定するとともに、加速源の直接的検証が可能なTeV領域にせまる測定を実施する予定である [13]. そして、最終的にはスペースでの年単位の観測により、これまでの宇宙線研究の課題のひとつである近傍にある電子加速源の確実な同定を行うことを目標としている [14].

6. 謝 辞

三陸での気球観測においては、宇宙科学研究所の三陸大気球観測所のメンバーから多大なるご助力をいただき心より謝辞を表します。なお、この研究の一部は、科学研究費一般（A）の費用により行われました。

参 考 文 献

- [1] 小林正他, 宇宙科学研究所報告, 特集39号, (1999) p.107.
- [2] 小林正他, 宇宙科学研究所報告, 特集37号, (1998) p.87.
- [3] Golden R.L. *et al.*, ApJ, **287** (1984) 622.
- [4] Tang K.K. *et al.*, ApJ, **278** (1984) 881.
- [5] Nishimura J. *et al.*, ApJ, **238** (1980) 394.
- [6] Tamura T. *et al.*, Proc. 26th International Cosmic Ray Conference, **5** (1999) p.21.
- [7] 山上隆正他, 宇宙科学研究所報告, 特集34号, (1997) p.45.
- [8] Murakami H. *et al.*, Adv.Space Res. **21** (1998) 1029.
- [9] 吉田健二他, 大気球シンポジウム (平成9年) (1997) p.95.
- [10] 田村忠久他, 大気球シンポジウム (平成10年) (1998) p.30.
- [11] Barwick S.W. *et al.*, ApJ, **498** (1998) 779.
- [12] 古森良志子他, 宇宙科学研究所報告, 特集40号, (2000) P85.
- [13] Torii S. *et al.*, Adv.Polar Upper Atmos.Res. **13** (1999) to be published.
- [14] Torii S. *et al.*, Proc. Space Technology and Applications International Forum, (1999) p.127.