

高エネルギー宇宙電子の観測

石井千尋*・小林正*・横井敬*
松尾満喜子・西村純・平良俊雄**
丹生 潔***

1. はじめに

高エネルギー一次電子のスペクトラムは、宇宙線の起源、その加速機構及び銀河中の宇宙線の平均寿命についての重要な情報源であると考えられている。そのため昨年8月、デンバーで開かれた第13回国際宇宙線会議においても、これに関する観測結果が、多くのグループによって報告された[1]。各グループの観測結果は、3年前のホバート会議の時より、かなり良く合うようになってきているが、エネルギー・スペクトラムの形及び強度について、まだ完全な一致を見るには至っていない。

この観測結果の不一致は、主に次の二つの原因によるものと思われる。第1に、高エネルギー電子の強度が低いので十分な統計量を得ることがむずかしいこと。第1に、エネルギー増加と共に、一次電子によるシャワーと他の原因によるシャワーとの区別が難しくなること。特にカウンター実験においては、エネルギーが高くなるにつれて電子成分が核子成分やガンマ線と比較して少なくなること、エネルギーとともに、シャワーのバックスキャタリングの影響がふえることなどで、その識別はむづかしくなることなどである。

この点、乾板による実験では、直接シャワーの起源をチェックすることができるので、一次線の識別には有利であり、さらに、エネルギー決定も、三次元カスケード理論により[2]、約10%の精度で行うことができる。エネルギーキャリブレーションについては、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ の観測実験により、理論値は10 TeVまで正しいことが、確かめられている[3]。

われわれは、1968年以来、エマルジョン・チェンバーを用いて、一次電子の観測を続けているが、この装置の利点は、容易に立体角を大きくとれること、及び、低い強度の高エネルギー電子を精度良く観測測定し得ることである。

1973年には、今までの4倍の規模の大型のチェンバを作成し、気球により、長時間露出に成功した。このチェンバの大きさは、 $2,000\text{ cm}^2$ であり、 8 g/cm^2 の高度で約14時間観測することができた。このチェンバは現在も解析を進めているが、昨年夏、デンバーで行われた第13回宇宙線国際会議において、その結果の一部を報告した。得られたデータ及び今までに得られたデータを合せて、一次電子のエネルギー・スペクトラムを求めると、次の式で表わすことができる(100 GeV以上)。

$$J(E) = 1.5 \times 10^{-4} (100\text{ GeV}/E)^{3.2 \pm 0.3} / \text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str} \cdot \text{GeV}$$

* 青山学院大学・理学部

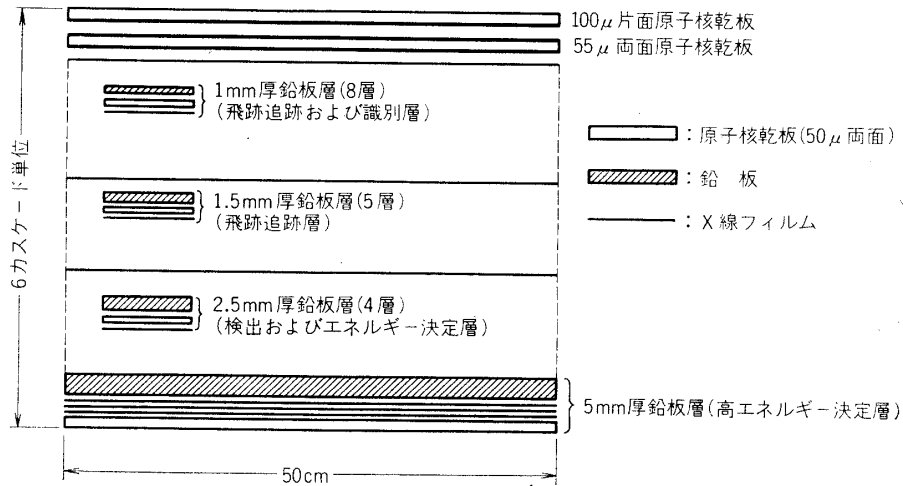
** 神奈川大学・理学部

*** 名古屋大学・理学部

この結果は、1968年以来、われわれが得た観測結果と本質的に同じであり、一次電子の強度が、高エネルギー側で著しく低くなっていることを示している。

2. 観測器について

観測器は、第1図に示すように、原子核乾板と鉛板と交互に積み重ねた、いわゆるエマル



第1図 一次電子用エマルジョンチェンバー

ジョン・チェンバーを用いているが、特に一次観測に適するように、鉛板の構成、及び用いる原子核乾板の種類を選択に考慮が払われている。チェンバーの大きさは、 $40 \times 50 \text{ cm}^2$ で、深さは、6 c. u. である。原子核乾板は、メタアクリルの薄いベースに、 $50 \mu\text{m}$ 厚のエマルジョンフジ ET7A を両面塗布したもの、及び $100 \mu\text{m}$ 厚のものを併用し、それぞれ飛跡の追跡及び検出に適するよう配置してある。また、高エネルギーシャワーを肉眼でも容易に検出し得るようサクラ N タイプ及び RF タイプの X 線フィルムも併用してある。鉛板の厚さについては、1 mm, 1.5 mm, 2.5 mm, 5 mm 厚のものを用いたが、これは、チェンバ中のシャワー発達均質物質中のシャワー発達とみなし得るよう配置し、チェンバ最上層部からの深さにかかわらず、スペイニング・ファクタ [2] が 2.1 ± 0.1 になっている。このエマルジョンチェンバーを、海水中での回収を考慮し、1 mm 厚のゴム布で真空包装を行い、リモート・コントロール可能な回転装置に装着した観測器を用いた。

3. 実験経過について

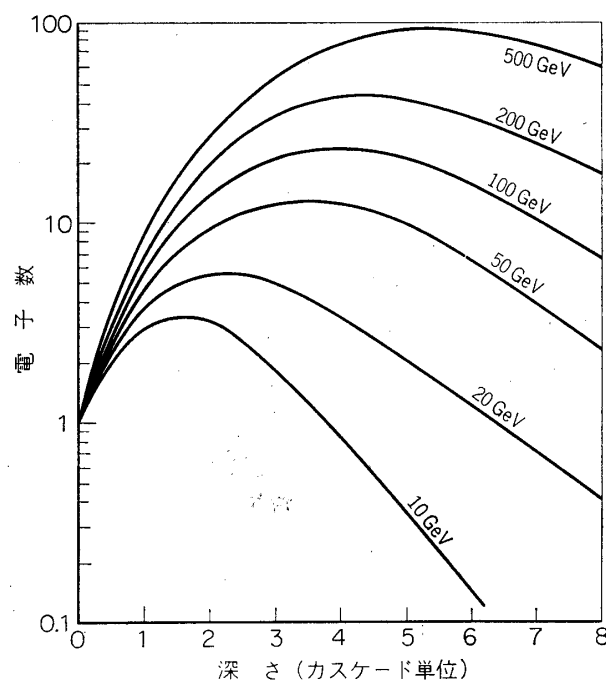
バック・グラウンド・トラックをできるだけ少なくするため、観測器に用いた原子核乾板はできるだけ新しいものを用い、また観測時以外は、チェンバーを上下逆にして鉛のシールドの中に保管してあった。気球飛揚は1973年6月5日、19時05分に、B₅₀-11によって三陸大気球実験場で行われ、平均観測高度 8 g/cm^2 で、13時間54分間の観測を行い。翌6月6日、20時57分に秋田沖に着水し、6月7日、14時頃、海上保安庁の巡視艇により発見、回収された。この気球は、最近開発された、ブーメラン方式によって行われ、風向、風速その

他の条件から見て、比較的長時間にわたる観測を可能にした。その結果、 $20,000 \text{ m}^2 \cdot \text{sec str}$ にわたる良い統計精度を得る観測を可能にした。観測器のリモート・コントロールによる回転装置は、多少のトラブルがあったが、正常に作動し、気球の上昇、下降の間のバックグラウンド、トラックと水平浮遊時のトラックとの識別を可能にした。

回収後直ちに現像が行われたが、原子核乾板の有効感光期間は42日間であった。現像は検出効率を上げるため強化現像を行い、 20°C 、40分のアミドール現像で $35/100 \mu\text{m}$ のグレイン・デンシティを得ている。

電子シャワーの検出は、肉眼による X 線フィルムによるものと、顕微鏡下で行われる精査によって行われた。X 線フィルムによる検出は、450 GeV 以上のシャワーについて全面積にわたって行われたが、顕微鏡下で行なわれた精査は、3 c. u. の深さで、電子飛跡数 15 以上という条件で行われ、現在迄に約 10 分 1 のを完了したところである。検出されたシャワーは、最上段まで追跡され、 γ 線、核成分と電子との識別が行われた。この識別方法は、これまでも数回述べてきた通り信頼度の高いものである [4]。

エネルギーは、シャワー軸から半径 $100 \mu\text{m}$ 以内にあるシャワー粒子数を各観測層で記録し、これと、このチェンバのスペイシング効果 [5] を考慮した 3 次元カスケード理論から得られるトランジション・カーブと比較して決められた。この実験で用いられた、トランジション・カーブを第 2 図に示す。



第2図 トランジション・カーブ
電子によるカスケードシャワー粒子数の遷移曲線
(半径 100μ 以内の電子数)

第1表 実験条件の詳細

実験年度	1968	1969	1970	1973
チェンバーの大きさ	25×20 cm ² 7.3 c. u.	25×20 cm ² 7.3 c. u.	25×20 cm ² 6.5 c. u.	50×40 cm ² 5.5 c. u.
観測時間	380分	267分	1,136分	833分
平均高度	6 g/cm ²	7 g/cm ²	6 g/cm ²	8 g/cm ²
原子核乾板の有効感光期間	14日	16日	35日	42日
有効断面積 SQT(cm ² ·sec·sr)	2,160	1,526	6,499	20,900

第2表 各グループとの比較

大気頂上で, $SQT=3\times 10^4 \text{ m}^2\cdot\text{sec}\cdot\text{str}$. あたりに入射する電子数の推定値 ($E\geq 600 \text{ Gev}$)

日	本	イ	ン	ド	ゴ	ダ	ー	ド	シ	カ	ゴ
	5ケ*			12ケ				7ケ			17ケ

* 実測値である。エネルギーは観測高度が 7 mb であるので、空気中の損失を補正して 600 Gev 以上となっている。

4. 実験結果及びその吟味

我々は、今までに4回にわたり気球による1次電子の観測を行ってきたが、その詳細については、表1に示す。この表からも判るように、今回の有効断面積 (SQT) は、20,900 m²·sec·str. にも及び、前3回の合計の2倍にも達している。したがって、非常にその強度が低い 100 Gev 以上の1次電子についても、実験データの統計精度は高く、エネルギースペクトラムを 1 Tev 近くまで延ばすことができた。

高エネルギーシャワーについては (450 Gev 以上)、全面積について解析が行われ、観測高度で、4個の電子と、14個の γ 線を検出した。100 Gev 以上のシャワーについては、全チェンバの約10分の1の解析を終り、7個の電子と、11個の γ 線を検出した。

今回得られたデータと、今までに得られた全てのデータをまとめると、全有効断面積 (SQT) $3.0\times 10^4 \text{ m}^2\cdot\text{sec}\cdot\text{str}$, 平均高度 7 g/cm² で、450 Gev 以上の電子及びガンマ線は、それぞれ、5個及び18個検出したことになる。ちなみに、他のグループのスペクトラムが、もし正しいとすると、このエネルギーに対応する電子数は、表2に示したように、ゴダード以外は、この2倍から3倍の値を示している。この値は、エマルジョン・チェンバのX線スキャンによる検出効率が、ほとんど100%に近いことを考えると、ゴダード以外は、あまりにも大きく、開きすぎている。

観測データに、補正を加え、大気頂上における1次電子のエネルギースペクトラムを求めたものを第3図に示す。なお比較のため、デンバー会議で報告された、他のグループのデータも共に記してある。

今回のデータは、100 Gev 以上については、前回までのものより、高い統計精度を有して

いるが、得られたエネルギースペクトラムは、今までに報告してきたものと、本質的に同じであり、高エネルギー側では、エネルギースペクトラムは、10 GeV 領域から外挿したものにくらべて、はるかに低い値を示している。

我々の実験結果が、実験的見地から見て、十分妥当性を有するものであり、内部矛盾がないことを強調しておく必要があると思われるので、以下に、箇条書きに、その要点をしるすことにする。

1) 検出効率について

100 GeV 以上のシャワーの検出については、2人以上の観測者が別々にチェックして、その検出効率が95%以上であることを確かめてある。

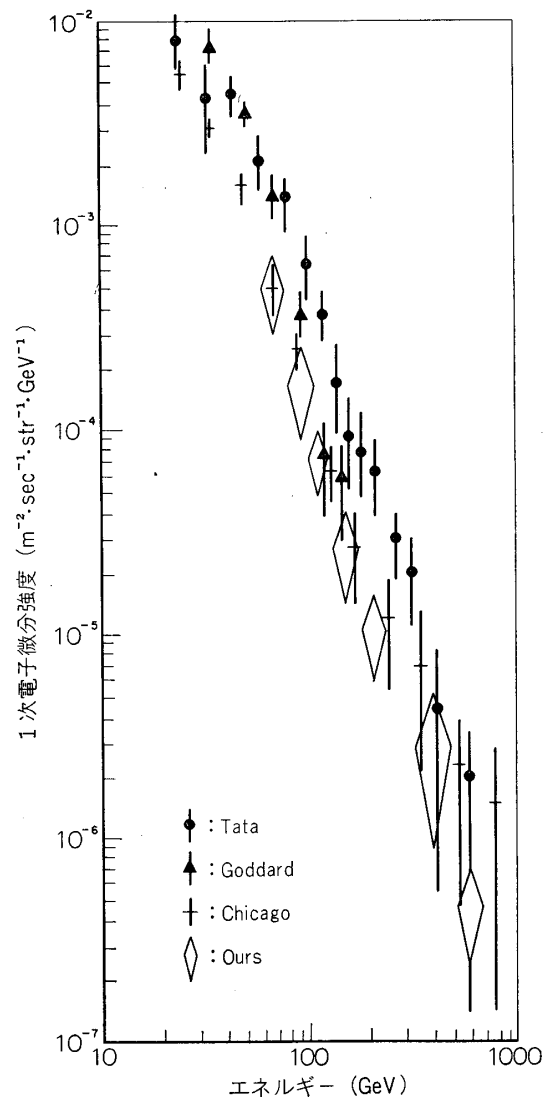
2) 粒子の識別について

乾板実験では、シャワーのスタートの点を観察することができるので、粒子の識別には本質的に有利である。カウンター実験では、電子及び核子成分を統計的に分離するのであるが、 e/p の強度比が非常に小さいときには、この統計的分離は非常に困難である。

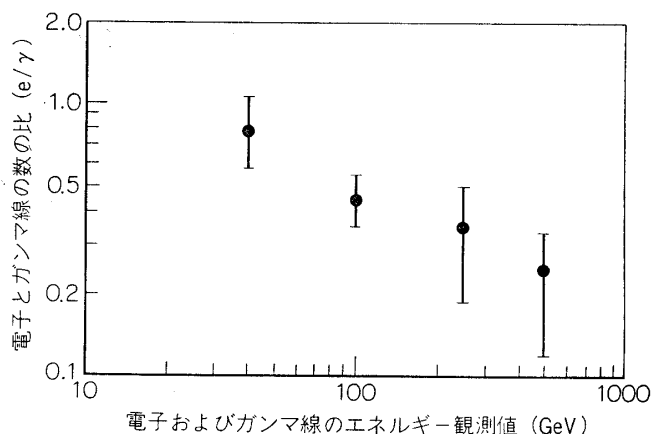
我々の粒子識別法は、直接シャワー、オリジンを見るのみならず、0.2 c.u. ごとに、シャワー粒子数の分布を、モンテ・カルロ・シミュレーションと比較し、統計的に、識別の妥当性をチェックしている。さらに、 γ 線及び電子によるシャワーの天頂角分布を統計的にチェックしてある。これらの識別法相互で、全く矛盾することろはない。

3) エネルギー決定について

前にも記した通り、エマルジョン・チェンバのエネルギー決定方法は、1956年の γ 線実験[5]以来用いられてきた方法であり、直接、中性中間子が二つの γ 線に崩壊するときの開角とエネルギーの関係を用いて、キヤリブレーションを行うことができ、その精度は10%程度であることが確かめられている[3]。さらに、ここで用いた3次元カスケード理論は、地下 μ バースト、高エネルギー・ジェット・シャワー、高空の γ 線スペクトラム等にも用いられており、これらの結果は他の実験方法で得られた結果と一致していることから、エマルジョン・チェンバのエネルギー決定精度が10%内外であることが保証さ



第3図 1次電子微分スペクトラム
(デンバー会議)

第4図 7 g/cm²における電子とガンマ線の比

れている。

4) e/γ 比のエネルギー変化について

電子及びγ線によって起されるカスケード，シャワーは，全く同じ様に発達していくので，もし，γ線と電子のエネルギー，スペクトラムが同じ形をしているとすると，電子とγ線の強度の比 e/γ は，エネルギーに無関係で，一定であるはずである。さらに，この e/γ の値は，検出効率とか，エネルギー決定精度とは無関係である。第4図に，我々が観測した，26個の電子及び44個のγ線をもとにして，e/γ の値のエネルギー依存性を示した。図から判るとおり，e/γ の値は，エネルギーと共に減少している。我々の観測によると，γ線は，1 TeV 領域まで，単一ベキのスペクトラムで表すことができ，次の式で，実験結果を良く再現することができる。

$$\gamma(E)dE \propto E^{-2.8 \pm 0.2} dE$$

これは，e/γ の値のエネルギー依存性と考え併せると，高エネルギーの1次電子のスペクトラムが，低くなっているという我々の結果を支持するものである。

以上の結論は，100 GeV 以上のシャワーについては，全チェンバーの約10分の1の解析を終った時点でのものであるが，解析を進めれば，さらに統計精度の良いデータが得られる見込みである。

4. ま と め

第13回，国際宇宙線会議（デンバー）においては，いろいろなグループが1次電子のエネルギースペクトラムについて報告を行ったが[1]，前回のポバート会議の報告にくらべると，各グループとも，100 GeV 以上での電子強度が，幾分かぎり，我々のスペクトラムに近づいてきたと云えそうである。

統計的精度は，各グループとも，未だ不十分であるが冒頭にのべたように，カウンタ系統の観測はエネルギーが高くなるにつれて，粒子の識別，エネルギー決定精度ともに問題があり，従来の測定器のままでは，これ以上の進展は望めなさそうである。

表1 デンバー会議に報告された各グループの観測要旨

グループ名	測定器	有効断面積 SQT($m^2 \cdot sec \cdot sr$)	スペクトラムのべき	E_{max} (Gev)
日本	エマルジョン・ チェンバー	3×10^4	3.2	800
インド	スタック	4×10^3	$2.6 \leq$ $3.6 \geq$ 100 Gev	600
ゴダード	カロリメーター	7×10^3	3.2	300
シカゴ	カウンター	2×10^4	2.8	1,000
メリーランド	カロリメーター	5×10^3	3.6	400
カリフォルニア	超電導磁石	$\sim 10^3$		100

我々のエマルジョンチェンバ方式は、SQTを数倍にあげることができれば、高エネルギー領域での、電子スペクトラムは確定的な答が得られるものと考えられ、今後その実現に努力したいと考えている。

デンバーで報告された高エネルギー領域での観測の各グループ別詳細を、表3にまとめたが、この表からも、エマルジョンチェンバは、有効立体角を大きくとることができ、SQTとして大きな値をとり得る有利な点があることを再度指摘しておきたい。

1974年1月30日 新設部(工学)

参考文献

- [1] Proc. Int. Conf. on Cosmic Rays, Denver 1973; J.J. Burger and B.N. Swanenburg, 346.
R. F. Silverberg, J. F. Ormes and V. K. Balasubrahmanyam, p. 347.
Charles A. Meegan and James A. Earl, p. 353.
K. C. Anand, R. R. Daniel and S. A. Stephens, p. 355.
Dietrich Mueller, p. 361.
- [2] J. Nishimura: Handbuch der Physik 46, II, 1, 1967 (Springer).
- [3] Japan-Brasil collaboration on ECC: Proc. Int. Conf. on Cosmic Rays, Hobart, 1971, HE44.
- [4] J. Nishimura, E. Mikumo, I. Mito, K. Niu, I. Ohta and T. Taira: Proc. Int. Conf. on Cosmic Rays, Budapest, 1969, OG 43.
- [5] J. Nishimura: Suppl. Prog. Theor. Phys. 32, 72, 1964.