

一次電子の観測について

西村 純・松尾 満喜子・三雲 瑛子*
丹生 潔†・平良 俊雄‡

§1. はじめに

1968年以來、エマルジョンチェンバーを用いて、高エネルギー1次電子の観測を行ってきたが[1]、これは、1次電子のスペクトラムの形や、その強度が、銀河系内磁場の状況や、宇宙線の加速機構、特に宇宙線の寿命との関連において重要であるからである。銀河系内の高エネルギー電子は、磁場で曲げられてシンクロトロン輻射を行なう。またさらに銀河内電磁波と衝突して、逆コンプトン効果を起こし、エネルギーを失う。上記の過程によるエネルギー損失は、電子のエネルギーの2乗に比例するので、高エネルギー電子ほどそのエネルギー損失は大きい。電子の発生スペクトラムが、冪関数であれば、電子の平均寿命 τ の間で失うエネルギー損失、 $h\nu$ 、に近いところで、スペクトラム折れ曲がることになる。一般的には、電子の発生場所や、銀河内での拡散の状況については、いろいろな仮定を設けることが可能であり[2]、それによって、電子の寿命の分布をさまざまな形をとることが可能になるので、単純に、スペクトラムの形が、高エネルギー側で、冪が一つふえているとは限らない。しかし、いずれにせよ、高エネルギー側で、1次電子の強度が著しく下がっているということには変わりがない。

宇宙線の平均寿命 τ は、宇宙線の同位元素の比からも推定することができる。原子番号の小さい元素は、より重い元素の宇宙線が銀河の中で星間ガスと衝突して作られると仮定すると、平均的に宇宙線が銀河中で通過する物質量は $3\sim 4 \text{ gr/cm}^2$ 位であると考えられる。

銀河内の電磁場について、他の実験から、数マイクロガウス程度と推定されている。また銀河中の電磁波として星の光、 3°K 輻射などを考えて、電子スペクトラムの折れ曲がるエネルギーを推定することができるが、おもに平均寿命の不確かさによって、1 GeV から 100 GeV 程度の不確かさをともなう。

この折れ曲がりの点を求めて、多くの研究者によって宇宙一次電子の観測が行なわれてきているが、各グループとも、完全な一致を見るに至っていない。第1表に示すように、一次電子の観測は主としてカウンターを用いた実験が多く、原子核乾板を用いているのはインドのグループとわれわれの実験だけである。カウンターの実験では、1次電子と、その100倍にも及ぶ一般の宇宙線（主として陽子）とを統計的に分離する方法をとる。すなわち、電子によるカスケード・シャワーと、核子などによる原子核反応およびその発生粒子によるカス

* 原子核研究所

† 名古屋大学理学部

‡ 神奈川大学

第1表 Summary of Experimental Data in the World

Name of group	Detector	Height	SQT (m ² ·sec·str)
Tata	E. Stack E. Chamber	6 & 10 mb	572 } 455 } 2,900 } 3,927
Chicago	Counter	4.6	23,040
Goddard	"	6 & 7.9	4,800
Lebedev	"	10	4,140
Leiden	"	"	~500
Fanselow et. al.			
Tokyo	Emulsion Chamber	6 & 7	2,160 } 1,526 } 6,449 } 10,125
Tokyo ('72 Plan)	2 Chs.	5~7	40×50 cm ² , 20 has.×2 40,000

ケード・シャワーの発生頻度の相違から統計的に粒子を識別する。しかし、これは、高エネルギーになると、1次電子の頻度は減り、さらに折れ曲がりがあるとするれば、核子などのバック・グラウンドとの相対頻度は急激に減少するので観測が非常にむずかしくなる。さらに、エネルギーの測定は、カスケード・シャワーの大きさから推定する訳であるが、そのキャリブレーションは、そのような高エネルギー加速器が存在しないことと相まって、非常に困難になってくる。原子核乾板を用いる方法はその点、電子を直接追跡し、電子シャワーの発達の様相を観測し得るので有利であるが、電子のトラックを顕微鏡下で追跡していくので、時間と労力が問題になってくる。

§2. 観測器について

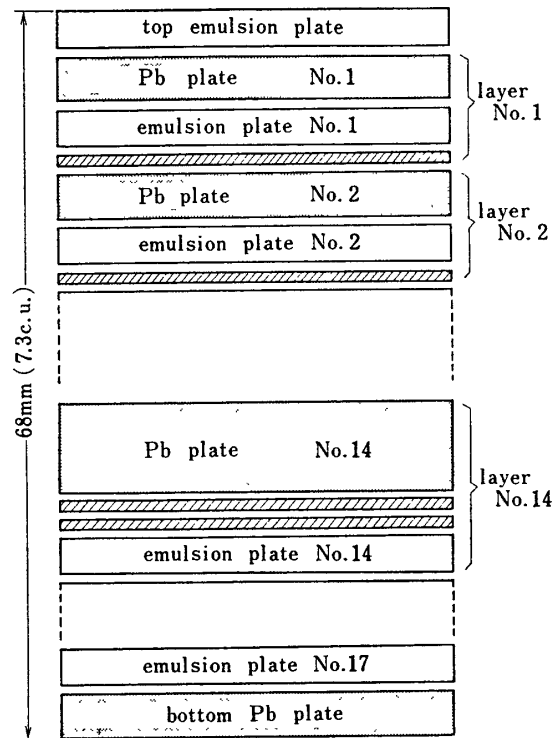
インドのグループが、原子核乾板を用いて1次電子の観測に成功した頃、われわれのグループも高エネルギー1次電子の観測を計画していた。電子シャワーの分析については、日本は、理論的にも、実験的にも永い経験を持っており、タタの実験結果[3]が報告されたとき、今までの実験結果といろいろと矛盾を生ずることが1目瞭然であった。実際、彼らはその後は実験では最初の一桁以上も低い強度になっている。タタのグループは、原子核乾板をそのまま重ねて用いているが、われわれはエマルジョン・チェンバーを用いることによって、さらに効果的に、電子シャワーをとらえることを考えた。

エマルジョン・チェンバーは、原子核研究所において、高エネルギー核反応研究のために開発されたものであるが、これを電子検出用に設計変更して用いることにした。その構造は、第1図に示してあるように、原子核乾板と薄い金属板を交互に重ねたもので、金属板中で、電子シャワーを発達させ、原子核乾板で、これを記録する。核現象と電子シャワーを区別するためには、特に最初の段階で、金属板の下の乾板から上の乾板へ、同一粒子の飛跡を

つなげることが必要である。そのためには、金属板はある程度薄くなければならない。われわれの実験では、1 mm の厚さのものをを用いた。

原子核乾板は、飛跡の方向を正しく観測するため、1 mm 程度のガラス板またはポリエステル板の両面に乳剤を塗布したものをを用いる。また現像については、適当な増感現像を行ない、飛跡の追跡が容易になるように考慮している。

エマルジョン・チェンバーは、原子核乾板をそのまま用いたものより、飛跡の追跡はややむずかしくなるが、電子シャワーの発達が早く、検出しやすい。また大型化して統計精度の向上を計ることも容易である。



第1図 Design of Chamber

§3. 観測器の露出について

実際の観測は第2表に示すように、1968年以來3年の間に、毎年1回ずつ気球にとりつけられて実験が行なわれた。実験の詳細ことは第1表にまとめてあるが、観測器の断面積はすべて、 $25 \times 20 \text{ cm}^2$ であり、観測の有効断面積 (SQT) は全部で、 $10,125 \text{ m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str}$ にのぼっている。本年度は、 $40 \times 50 \text{ cm}^2$ の大

第2表 Experimental Conditions

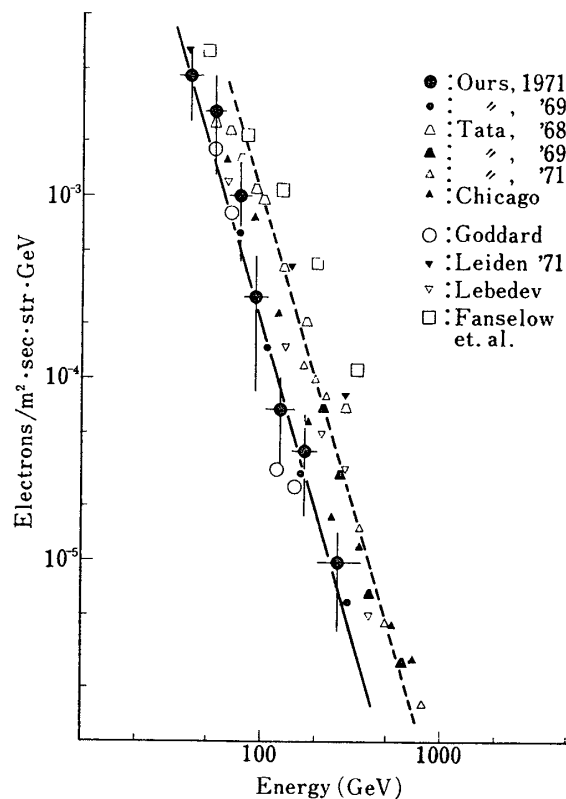
name of chamber	'68	'69	'70
data of flights	9.16 '68	9.13 '69	9.24 '70
data of recover	9.17 "	9.14 "	9.26 "
data of dev.	9.19 "	9.16 "	10.1 "
sensitive periods	14 d.	16 d.	35 d.
size of detectors	$25 \times 20 \text{ cm}^2$ 7.3 c. u.	" 7.3 c. u.	" 6.5 c. u.
exposure times	380.5 m.	267 m.	1,136 m.
altitudes	6 mb	7 mb	6 mb
SQT ($\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str}.$)	2,160	1,526	6,449
Total SQT	10,125		

型チェンバーを用意し、気球実験にそなえたが、気球飛揚は長時間にわたって好調に行なわれたが、残念なことに、回収できなかった。

ここで実験に当たって、特に留意すべき点について述べる。まず、上空におけるすなわち観測時の飛跡と、それ以外のときの飛跡とを区別するため、遠隔操作可能な回転装置の中に観測器を入れ、観測時にのみ正常な位置に向うようにする。また放球前、および回収後の地上にある間は、よけいな飛跡を少なくするため、シールドについても考慮を払う必要がある。さらに、電子シャワーの観測は最終的には、1本の飛跡まで追跡することになるので、各乾板の相互位置を正確に再現できなければならない。そのために、チェンバー作成後、乾板の各側面に計8本の垂直座標をX線を照射することにより焼付ける。さらに、原子核乾板は、常に新しいものを用い、現像するまでの感光可能な期間をできるだけ少なくし、飛跡の追跡に障害となるバックグラウンドを少なくするように努めなければならない。また第1図からもわかるように、原子核乾板とともに、高感度のX線フィルムが入っているので、数百 GeV 以上の電子シャワーは肉眼で容易に検出することができ、よって、高エネルギー電子の検出は、100% の効率で行なうことができる。われわれが 1968 のこの露出に成功した頃、タタのグループの実験結果は数百 GeV まで折れ曲がりのない、単一年のスペクトラムで、これから推測すると、450 GeV 以上、つまりX線フィルムで容易に検出できる電子の総数は、われわれの観測器では 10 個以上と推定されることになる。しかし、われわれの分析から実際に得られた電子は、わずか1個であり、それも、低いエネルギーの電子の数から考えて、確率的に、たまたま1個入射してきたという結論であり、高エネルギー電子はきわめて少ないということがわかった [1]。

§4. 実験結果およびその吟味

第2表に示したように、われわれは1968年以來3回の観測を行なっているが、これから得られた電子のエネルギースペクトラムを第2図に、他のグループの実験結果とともに示してある。これは、1971年8月、オーストラリアのホバートで行なわれた第12回宇宙線国際会議に報告されたデータをまとめたものである。各グループの観測器の方式と、観測有効面積 (SQT) は第1表に示したというりであり、シカゴのグループが、カウンター方式で、大型観測器を用いて実験を行なっているのが注目される。一般



第2図 Energy Spectra of Primary Electrons

に、一次電子の強度は、各グループとも、よく一致しているとはいえ、もっと統計精度のよい観測が望まれている。

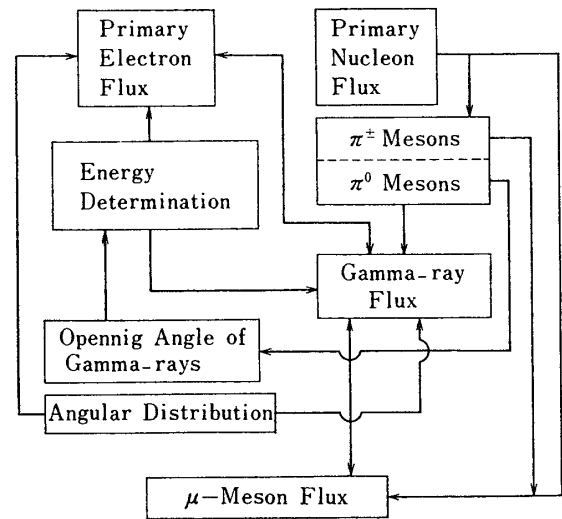
エマルジョン・チェンバーは、電子のみならず、 γ 線および核成分を同時に検出できる。電子と γ 線は、電子シャワーを起こすという点では全く同じように振舞うので、両成分の検出効率およびエネルギー決定精度は全く同じである。また核成分の強度も、他の実験と比較して、得られた実験が適当であるかどうか、チェックすることができる。各グループで得られた1次電子の観測結果は、それぞれ相当の開きがあるが、これは、検出効率、エネルギー決定精度、および、電子・ γ 線・核子成分の識別の方法などによって左右されるものである。これらの点について、実験結果のコンシステンシーを議論しなくては、いずれのデータが正しいか判別できない。第3図は、われわれの観測結果のコンシステンシー・チェックをまとめたものであるが、そのおもなものについて触れることにする。

i) エネルギー決定精度

われわれのエネルギー決定は、各層の乾板中で半径 100μ の円内にある電子の数の盛衰を、電子シャワーの理論値 [4] と比較して決めるのであるが、その理論値を実験的にチェックすることが必要である。そのチェックは、次のようにして行なうことができる。核反応によってできた π^0 中間子は直ちに二つの γ 線に崩壊するが、そのときの γ 線の開角は運動学的に一義的に定まる。実際にこの方法で、実験的に、エネルギー決定精度のチェックを行なっている。最近の、ポリビアのチャカルタア山上で行なわれている、超高エネルギー核反応の研究 [5] の実験結果によると、われわれの用いているエマルジョン・チェンバーのエネルギー・決定精度は、約 10 個の中性中間子を使って調べたところ、開角とエネルギーの関係から、誤差 10% 以内であることがわかった。これはきわめて高い精度のエネルギー・キャリブレーションである。

ii) 電子と γ 線の観測比 γ/e

電子スペクトラムを出すためには、観測しようと思うエネルギーのシャワー・極大になると思われる付近の乾板中で、電子シャワーとして検出し、それを最上段の乾板まで追跡し、電子によるものか、 γ 線、核成分によるものか識別しなくてはならない。この識別の方法は、エネルギーには無関係であり、何らかの理由で誤認して、識別に誤差が生じたとしても、それはエネルギーに無関係なものであるはずである。また電子と γ 線の検出効率は全く同じである。 γ 線のスペクトラムは他の実験からも、折れ曲がりのないことが確かめられているので、もしわれわれの実験結果が正しく、電子スペクトラムに折れ曲がりがあるとすれば、電子と γ 線の強度の比は、エネルギーとともに大幅に変わるはずである。すなわち、エ



第3図 Consistency Checks

エネルギー測定の見誤差, 検出効率などに無関係に, 電子スペクトラムの折れ曲がりの有無を調べるができる。われわれの実験では, 実際に, γ/e の値はエネルギーとともに大きくなっており, 電子スペクトラムに折れ曲がりのあることを示している。

iii) ガンマ線スペクトラム

第 4 図に, われわれのチェンバーで観測された γ 線スペクトラムを示してあるが, これは, 他の方法で観測された μ 中間子との間に, コンシステンシーが成立しなければならない。大気中の γ 線は, 核反応によってできた中性中間子が崩壊してできるが, これと同時に荷電中間子も作られ, これは μ 中間子に崩壊する。核反応によってできる中間子の荷電独立性を仮定すれば, γ 線と, μ 中間子の強度には, ある一定の関係がある。すなわち, 実測されている μ 中間子のスペクトラムから, 荷電中間子の空気中での発生率を求める。

次にこの発生率の 1/2 を中性中間子の発生率として, γ 線のスペクトラムを推定する。このようにして, いろいろな高度における γ 線強度を計算することができる。このようにして得られた期待値を第 4 図に実線で示したが, 実験誤差の範囲でよく一致している。

iv) その他

その他, 得られた実験結果の妥当性をチェックするものとして, γ 線と電子の角分布相違から, これを統計的にチェックすることができる。またカスケードの発達の様相は, 電子, γ 線, 核成分などでそれぞれ特徴があるので, この相違を統計的にチェックすることもできる。さらに核成分の強度は, 他の実験の結果と直接比較してその妥当性を確かめることができる。

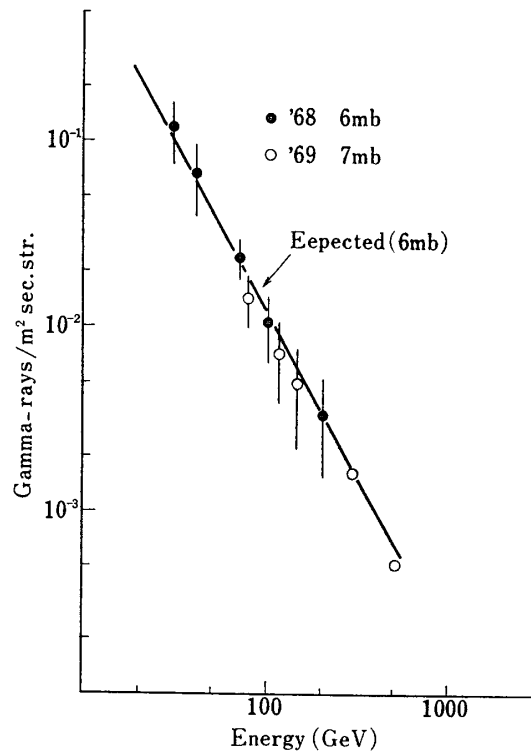
以上のような, さまざまな吟味を行なって最終的に得られた 1 次電子のスペクトラムが, 第 2 図に示したものであり, これは本質的に, 1969 年のブタペスト会議で報告したものと同じであり, 約 50 GeV のところで, スペクトラムは折れ曲がっていることを示している。

以上われわれのデータのコンシステンシーについて述べてきたが, 他のグループとの一致は良好であるとはいえない。それで, 他のグループのデータと測定法についてその特徴を述べてみたい。

§5. 他のグループとの比較

i) タタ・グループ (インド)[6]

タタのグループは, 第 1 表に示すように, 3 回にわたって実験を行なっているが, 最新の



第 4 図 Gamma-ray Flux

ものは、乾板のスタックではなく、乾板とチェンバーの組合わせで、われわれの観測器に近い。今までの観測有効面積 (SQT) はわれわれの半分位であるが、観測強度はわれわれの数倍もある。同じような観測器を用いて、このように大きく食い違うのは、何に起因するのか、まだはっきりしていないが、最も考えられることはエネルギー推定が約2倍程度高いのではないかという点である。というのは、観測器のデザインを見ても、不均一な構造になっているので、エネルギー推定がむずかしいと思われる上に、彼らの γ 線スペクトラムは μ 中間子から推定される強度にくらべて約3倍多すぎるようである。このことは、エネルギー測定が約2倍高すぎるといふ推定とよく一致している。

ii) シカゴグループ [7]

このグループは、表1でもわかるように、 4.6 g/cm^2 の高度で、観測有効面積が $23,040 \text{ m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str}$ とわれわれの約2倍もの観測を行なっているが、解析されているのは約半分であるので、結局われわれと同じくらいのデータである。このグループのデータは、数 GeV からま TeV で単一の霧でスペクトラムが延びており、折れ曲がり存在しない。X線で肉眼検出可能な 450 GeV 以上に、われわれは1個しか観測できなかった電子が、このグループでは10個近く観測したことになる。観測器はシンチレーターとガスチェレンコク計数管を用いている。カウンターを用いる実験全般についていえることであるが、高エネルギー領域ではエネルギー・キャリブレーションを行なうことができないので、エネルギー決定精度にはいつも難関がある。さらに、非常に強度の小さい1次電子と、他の宇宙線との識別は、直接飛跡などで確認することができないので、大きな誤差をとまうことになる。よって、エネルギー決定か、電子の識別に問題があるものと思われる。

iii) ゴッダード・グループ [8]

このグループは、電子シャワー検出器、スパーク・チェンバー、チェレンコク計数管との組合わせで、有効面積 $4,800 \text{ m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str}$ でわれわれの約半分の統計精度の観測を行なっているが、第4図に示すように、頻度は、われわれのものときわめてよく似ている。しかも、シンチレーター方式の長所である低いエネルギーの領域に至るまでのデータが得られていて、スペクトラムは、やや急な単一の霧の形をもっている。

iv) その他

オランダのライデングループ [9]、モスクワのレベデフグループ [10]、および Fanselow et. al. [11] は、いずれもカウンター方式で測定を行なっているが、いずれもわれわれの頻度より多く、もっと統計精度の良い観測が待れる。

§5. む す び

一般にわれわれのデータは他に比較して低い強度を示し、そのため、有効面積が同じくらいであるのに、見掛け上統計精度が低いように見える。しかし、コンシステンシーの検討から考えて、われわれのデータの精度は最も高いものであることには疑いないものと考えられるが、やはり、統計的精度をさらに上げて、データの相違をうめることが必要であると考えられる。従来に比して数倍ないし1桁の統計精度を上げることにより、問題は自然に解決することになるであろう。エマルジョン・チェンバーは本来 500 GeV 以上のエネルギー領域

で威力を発揮する観測器であり、大型化には、経済的にも技術的にも何ら問題はなく、本年度は、今までの観測器の4倍の面積のものを、打上げる計画を立てていたが、前にも述べたように、回収することができず観測データをふやすことはできなかった。しかし、本年5月の回収可能な時期に、この大型観測器による実験を行ない、より高いエネルギー領域まで観測をのばし、さらに統計精度の良いデータを得たいものと考えている。

1973年2月7日 新設部(工学)

References

- [1] J. Nishimura, E. Mikumo, I. Mito, K. Niu, I. Ohta and T. Taira; Proc. 11th Int. Conf. on Cosmic Rays, Budapest 1969, OG 43
M. Matsuo, J. Nishimura, E. Mikumo, K. Niu, and T. Taira; Proc. 12th Int. Conf. on Cosmic Rays, Hobart 1971, OG 38
- [2] J. R. Jokipii and R. Meyer; Phys. Rev. Letter, **20**, 752, 1968
- [3] R. R. Daniel and S. A. Stephens; Proc. Ind. Acad. Sci., 319, 1967
- [4] J. Nishimura; Suppl. Prog. Theor. Phys., **32**, 72, 1964
Handbuch der Physik 46, II, 1, 1967 (Springer)
- [5] Japan Brasil Collaboration on ECC; Proc. 12th Int. on Cosmic Rays, Hobart 1971, HE.
- [6] K. C. Anand, R. R. Daniel and S. A. Stephens; Proc. Int. Conf. on Cosmic Rays, Hobart 1971, OG 39
- [7] P. Meyer and D. Muller; Proc. Int. Conf. on Cosmic Rays, Hobart 1971, OG 36
- [8] R. F. Silverberg, J. F. Ormes, V. K. Balasubrahmanyam and M. J. Ryan; Proc. 12th Int. Conf. on Cosmic Rays, Hobart 1971, OG 37
- [9] A. Scheepmaker and Y. Tanaka; Astron. & Astrophys. 11, 53, 1971
- [10] V. I. Zatsepin; Proc. 12th Int. Conf. on Cosmic Rays, Hobart 1971, OG 35
- [11] J. L. Fanelow, R. C. Hartman, R. H. Hildebr and Peter Meyer; Astro. J., **158**, 771, 1969