

大面積用検出器

佐久山 博 史

1 Introduction

宇宙線空気シャワー（一次エネルギーで 10^{14} ev 以上の現象）も現在までにいろいろな実験が行なわれてきた。最近では 10^{18} ev 以上のデータもどんどんできてきている。一次エネルギーのシャワーはおよそ 10^9 の電子成分が数 km にわたって地上にふってくる。このため 10^{18} ev 以上のシャワーをある程度精密に測定するには、大きな土地と、大きな面積の検出器が必要となってくる。空気シャワー中の電子成分を測るには、現在までによく使用されているシンチレーション検出器でまにあうが、大面積用検出器（空気シャワー中の μ 中間子や核活性成分を測定するもの）としては、シンチレーション検出器では沢山の光電子増倍管が必要であり、価格の点で困難となる。そこでシンチレーション検出器より $1/4 \sim 1/5$ の価格で製作できる比例計数管による大面積化の可能性を追求した。平型の大きな比例計数管は殆んどガスフロー型にせねばならないので大変めんどうである。そこで、長くて幅のせまい検出器（ $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 6\text{m}$ ）をガス封じ込め型としてつくり、これを沢山連ねることにより大面積となるようにしてみた。その結果、大変いい精度で使用可能なことがわかった。この方が精度もよく解析上も都合がよいと思われる。

2 比例計数管

a) 比例計数管の特性

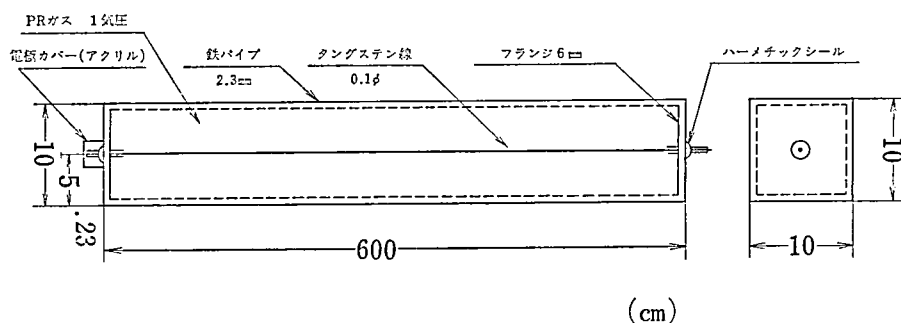
パルス型電離箱では出力電荷と一次電離の間に比例関係が有るがパルスの大きさが非常に小さいので高性能の増幅器を必要とする。一方 GM 計数管は非常にガス増幅度が大きく、大きな電圧パルスを出す。一次電離とパルスの大きさの比例関係が全くない、比例計数管はこの比例関係があり、しかもガス増幅により電離箱よりもパルス波高が非常に大きい利点を持っている。角型鉄パイプの中にガスをつめ、中心に細い金属線を張って、筒に対して十分高い正電位にすると、細い金属線の近傍では電場が非常に強く、近くにいる電子は加速されて、ガスの分子をたたいて電離するようになる。電離によって生じる電子は、又加速されて電離をする。このように一個の電子から電子がなだれが成長しながら中心線に向って走る。中心線近傍で電子数の増幅が行なわれる。この際電子による電離で、光子の放射が起り、この光子の光電効果により電子を 2 次、3 次とたたき出す。その確率を γ とし、ガス増幅度を M とすると

$$M = n + \sigma n^2 + \sigma^2 n^3 + \dots \gamma^n n^{n-1} = \frac{n}{1 - \gamma n}$$

ここで n は第一の電子なだれにおける電子数、 $\gamma n \ll 1$ だから $M \approx n$ となり比例関係がある。 M は全電子数に比例していて、電離作用によるイオン対の数と M との積が総電子数と

なる⁽¹⁾。

ここで比例関係が成立するためには、ガス増幅度が一次電離の量とは無関係でなければならない。このことは陽イオンによる空間電荷があまり大きくない場合、又はガス増幅の起こる領域を一次電子群が走る距離が同じ場合に限り成立する。ガス増幅率は印加電圧だけの関数となっている。従って出力パルスの大きさは一次電離の量（宇宙線が検出器内を通る path の長さ）に比例することになる。一次電離が起る位置によって二次電離の量が変わることがあるが、これは比例計数管の幾何学的構造を選ぶことによって避けられる⁽²⁾。上に述べたように計数管の陽極が0.1mm オーダーの細線であるので電場が非常に強い。しかも殆んど全ての二次電離が起りうる全体積と比較して無視できるので、一次電離の位置によってガス増幅度が小さくなることはない。この実験に用いた比例計数管は角型鉄パイプ（ $10 \times 10 \times 600 \text{ cm}^3$ ）で陽極は0.1mm タングステン線を用いた。これを Fig. 1 に示す。



PROPORTIONAL COUNTER

Fig. 1

比例計数管内に封入するガスはアルゴンやヘリウムなどの純粋ガスよりも多原子分子ガスを加える方が印加電圧に対して、ガス増幅の安定度が増す。即ち多原子分子の安定化作用は、多原子分子が光子を吸収しても光電子放出が減少するためであり、こういう特性を持ったガスでなければガス増幅率が大きくできない。それ故96%ヘリウム+4%ブタン又は今回用いたPRガス（90%アルゴン+10%メタン）が適当だと思われる。

b) 角型比例計数管の製作

(1) 材 質

材質を選ぶうえで、まず製作が簡単であり、持ち運びが便利、安価である等が条件となる。又検出器にPRガス1気圧を封入するため、真空ポンプで引く。この時機密性、耐圧に注意し、それに管アースを完全にすることが大切である。このようなことを考慮した結果、規格品としてある $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 600 \text{ cm}$ の角型鉄パイプ（厚さ2.3mm）を使用した。

(2) 製 作

- トリクロロールエチレン又はガソリンで鉄パイプ内をよく洗いとる。
- フランジ（ $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ のもの2枚；2枚とも中心にハーメチックシールをとりつける穴をあけておく、片方のフランジにはガスをつめるためのコックを取り付ける）をつくり、これらを鉄パイプの両端に溶接した。（密封管アースのため）
- フランジの中央にハーメチックシールをハンダ付けした後、リークを防ぐためハーメチックシールをアルコールでよくふきとる。

d) タングステン線をたわまないように強く張りハンダ付けで固定する（この時タングステン線にさわらぬこと、ごみをにつけないこと）

e) 鉄パイプをロータリーポンプ+拡散ポンプで1～2日間引き、空気もれのチェックをした後、マノメータを使いPR ガスを1気圧封入する。

(3) 検出器 Check

a) 宇宙線のパルスによる Check

パルスにスローノイズ等のノイズがあるかないか、ある場合ノイズがシングルピークに対してどの程度あるか、パルスにラジオが乗っているか、リークパルスが出ているか、パルスにゆがみ等があるかを調べ、あれば取り除く。

b) 定期的 Check

検出器各々についてシングルピーク、パルス波形、ノイズ等の変化を調べる。

3 対数増幅器 (Log. Amp.)

宇宙線の実験では検出器に入ってくる宇宙線粒子は1個の時もあれば 10^4 個も同時に入ってくる場合もあるのでダイナミックレンジとして60～80dB以上も必要とされることが多い。検出器からのパルスを $10^3 \sim 10^4$ 倍以上に直線的に増幅表示するLinear Amp. は製作困難である。パルス波高値をパルス幅に変換するLog. Amp. は現在プラスチックシンチレーション検出器に使われており1個の粒子が入った場合のパルス波高値とパルス幅があらかじめ分っていれば、パルス幅を測ることにより実際のパルスの大きさがわかる。比例計数管に荷電粒子が通ると計数管内でその通った個所で電離作用が起り、続いてガス増幅が起ってパルスを生ずるが、このパルスの最初の方（立上がり付近）は主に電子によるものであり、あとの方はイオンによるものが重なってくるものと思われる。

上に述べたLog. Amp. を比例計数管に使用すると、exponential pulseのおちをあるところでDiscriminationしてえられたLog 幅を粒子数に変換しても、パルスの形がある一定の時定数でおちないためLog 幅と粒子数の対応がつかない。そこでパルス波高値をLog 圧縮すればパルスの時定数が長くしかも指数関数波形がくずれていても、影響のない出力パルスが得られる。この方法を以下に示す。

今回の実験に使用したLog. Amp. はトランジスタとツェナーダイオードの対数圧縮積み重ね方式によりダイナミックレンジを60dBカバーできる。この回路はツェナーダイオードでLog 特性をつくったので $15^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ の間で最大2～3%の変動があるが、Log. Amp. は恒温室($21 \pm 1^\circ\text{C}$ 以内)に入れて使用したので温度変化に関しては問題とならなかった。又電源電圧による変動はLog 特性が1V当り最大11%程度の変動があるが安定化電源により $12 \pm 0.1\text{V}$ 以内におさえたので問題とならなかった。（このAmp. は東大原子核研究所の棚橋氏の製作による）

さらにもっと温度特性のよいdecade数の大きなLog. Amp. をつくるためにIC化Log. Amp. を試作した。Fig.2に示したようにLog. IC を用いICの4つの入力①, ②, ③, ④にそれぞれ約30dBずつDCレベルをずらせた入力を入れる。ICの内部では2つつつLog Amp 出力の和(Σ)がとられており各部の和の出力に極性の異なる大きさの等しいもの($X, \bar{X}; Y, \bar{Y}$)がある。これらの出力を演算増幅器で和をとればダイナミックレンジを広げることができる。

ここでLog. でおよそ30dBがFig.2の構成では100dBをもつダイナミックレンジが得

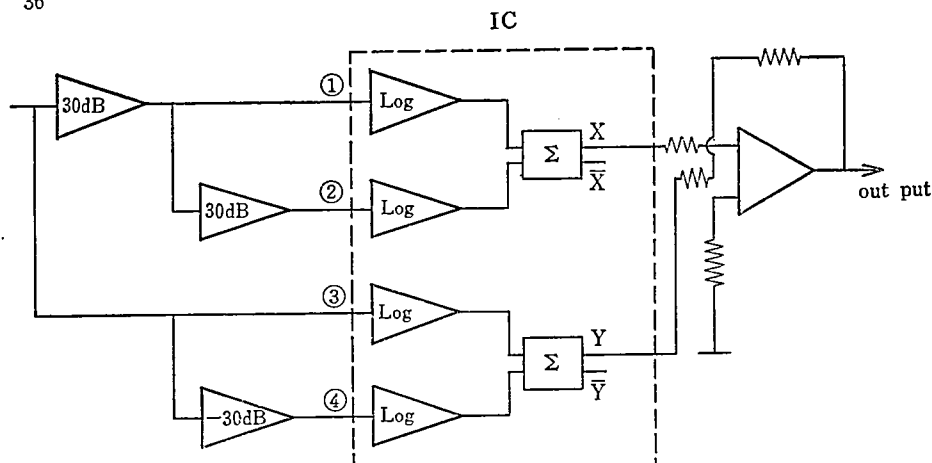


Fig. 2

られた。IC化する目的には4～5 decade (ダイナミックレンジ80～100dB)を作る, 温度特性がよい, 安定性がある, 安価である, 周波数特性がよい等である。以上のような利点を生かして試作した Log.Amp. の回路とその特性を Fig.3 に示した。

入力が $50\mu\text{V}$ から6Vまで5decade (ダイナミックレンジ100dB)をカバーした。温度特性は 0°C ～ 60°C まで最大で4～5%以内にできた。トランジスタ方式と比較するとほぼ半分の費用ですんだ。Fig.3に示したように, Log.Amp.の前の2つの Linear Amp. は発振が少なくノイズの少ない NE501 (シグネティクス)を使用した。Log.Amp. は SN76502 (Texas Instrument) を用い最後に用いた differential Amp. ($\mu\text{A}709$; Fairchild) は, これにこだわる必要はなく, この代りにより立上りの早いものを使えば, より早い出力パルスを出せる。

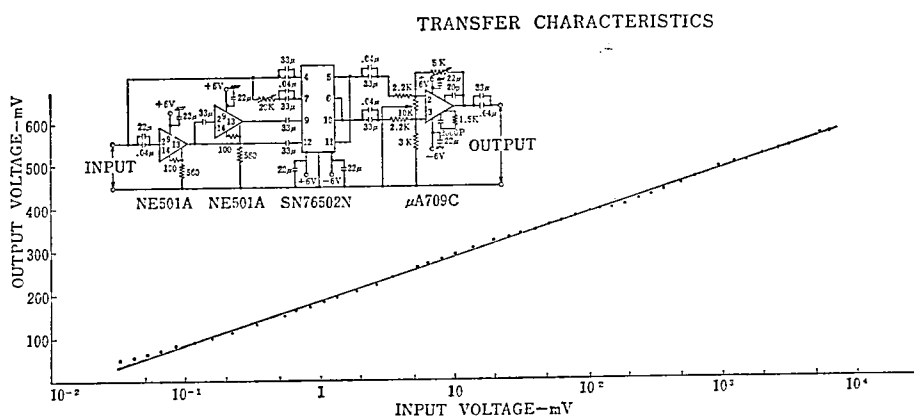
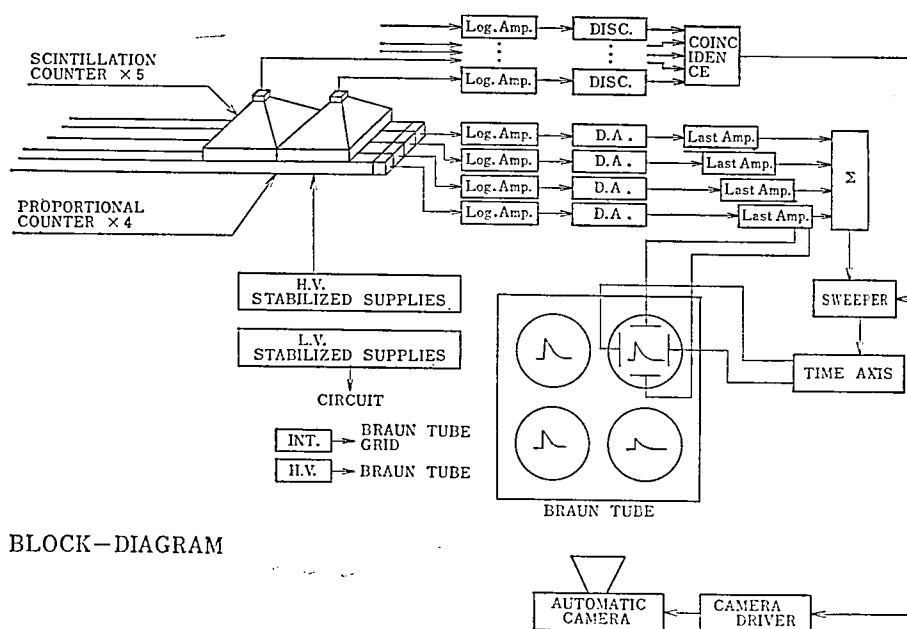


Fig. 3

4 観測装置

シンチレーション検出器と比例計数管の粒子数比較のためのブロックダイアグラム及びその観測装置の写真を Fig.4,5 に示した。シンチレーション検出器はまずシンチレーター



BLOCK-DIAGRAM

Fig. 4

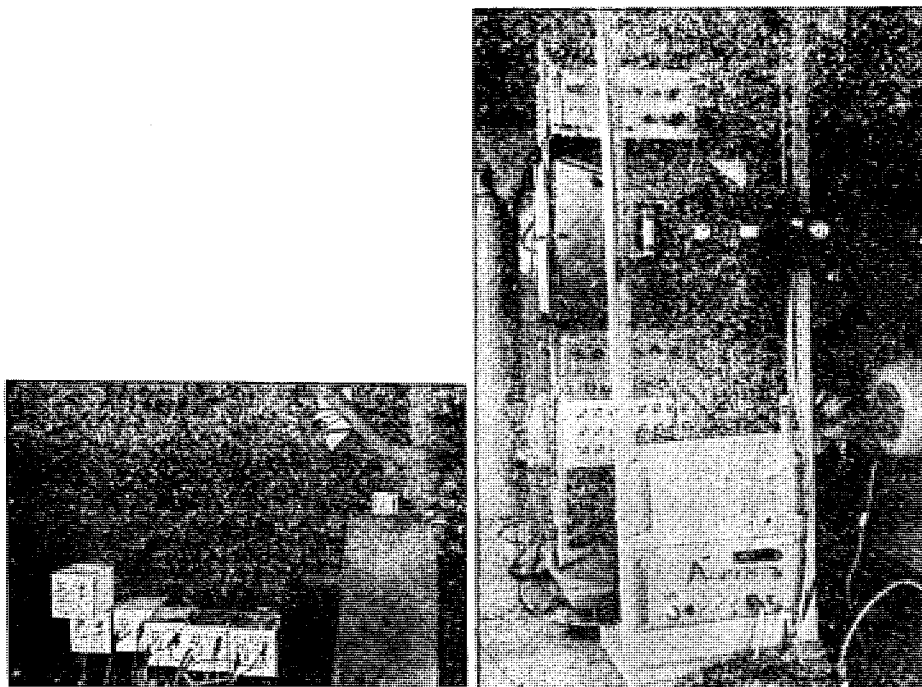
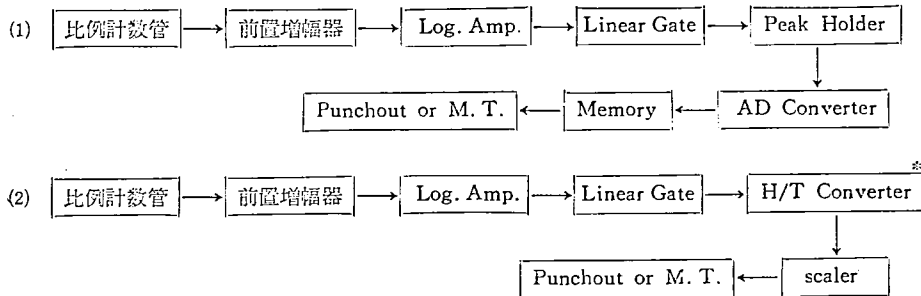


Fig. 5

からの光を光電子増倍管によって電気的パルスに変換しこれを前置増幅器に通して、さらに対数主増幅器を通して自動デジタル記録装置により記録される。比例計数管はまずカウンタからのパルスを Log 圧縮 Amp. にいれ、これを linear amp. してパルス波高値のままブラウン管にスイープさせ、それを写真にとって後でこれを読んで粒子数に変換する。比例計数管からのパルスを処理するデジタル方式は現在のところ次の二つの方式が考えられる⁽³⁾。



* Pulse height to width converter

シンチレーション検出器と比例計数管の粒子数の比較の時、同時に働かせた原子核研究所の空気シャワー観測装置を Fig.6 に示しておく。

原子核研究所空気シャワー観測用シンチレーション検出器
 □: シンチレーション検出器出力
 ●: 空気シャワー観測装置出力

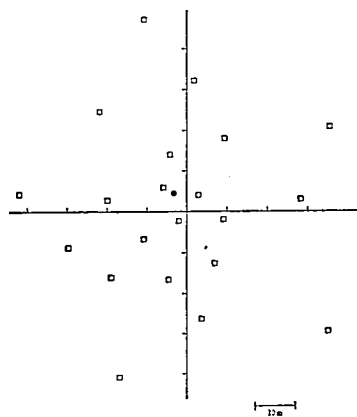


Fig. 6

のために精度のいい高圧電源が必要である。今回用いた高圧電源は変動率 0.001% 以下、安全度 0.005% 以下の非常によいものを用いた。実験に使用した電圧付近の印加電圧と宇宙線粒子によるパルス波高値分布のシングルピークの値との関係は Fig. 7 に示されている、即ち次の式で表わせる。

$$M = M_0 \exp(v/v_0)$$

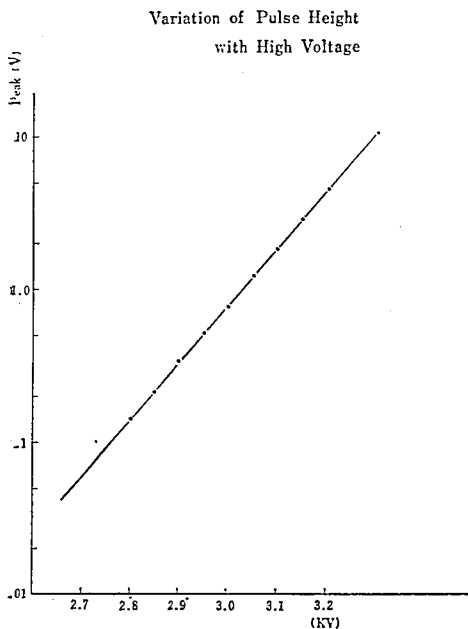


Fig. 7

Vは印加電圧, Mはパルス波高値である

(B) 比例計数管の single peak の分布

比例計数管の性質として, 入射粒子の位置により, 二次電離の量が変わることがあるが, 計数管の幾何学的構造を選ぶことによりさけられる。比例計数管の出力パルスは一次電離に比例するから中心線(陽極)からの距離に無関係, いいかえると粒子が通過する計数管の場所に関係であるといわれているが, 今回試作した計数管($10 \times 10 \times 600 \text{ cm}^3$)が放射線の通過した場所に対して, single peak の変化があるかどうか, 分解能のちがいがどの程度あるかどうかを測定した。

比例計数管の上に鉛スリットを用いて直接 ^{241}Am の放射能 (60keV の γ 線を放射する) を乗せて測定して得られた特性曲線を Fig. 8, 9 に示した。図からわかるように single peak の変動は比例計数管の場所に殆んどよらないが, 全長 6 m の計数管の両端わずか 6 cm 程度から single peak のずれが現れたがこれらは計数管全体の面積からすれば 2% にすぎず, 又最大で数% のずれであるので問題とならない。分解能も殆んど single peak の変化と同様なものであった。

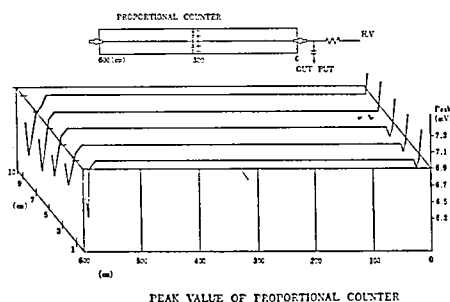


Fig. 8

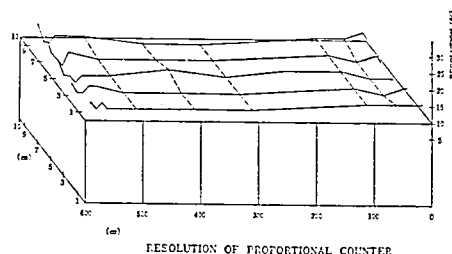
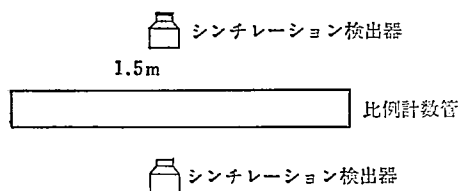


Fig. 9



この両者の変化は実験において殆んど無視してもさしつかえないと思われる。次に宇宙線を用いてこの比例計数管の single peak を出してみた。2つのシンチレーション検出器をこの比例計数管の上下にはさんで (2つのシンチレーション検出器はおよそ 1.5m はなれている) 左図のようにテレスコープにして, 2つのシンチレーション検出器のコインシデンスにより比例係数管をトリガーし, その計数管のパルスをマルチチャンネルに入れて single peak を書かした。その結果 single peak の mean value 1.19V, peak value 1.0V, median value 1.13V となった。

(C) プラスチックシンチレーション検出器と比例計数管の粒子数の比較

シンチレーション検出器と比例計数管で同じ粒子数を測定して検出器による粒子数の対応関係を知り, この結果が 1対1の対応をなしていれば, 現在多くのところで使用されているシンチレーション検出器と同様に, この長い比例計数管が宇宙線観測に使用可能であり又それにとって変わることができると考えられる。

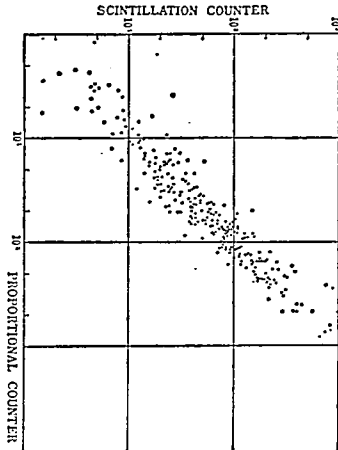


Fig.10

6 討論及び結論

印加電圧とパルスハイトの問題では比例領域で印加電圧におけるパルスハイトが指数関数的に変化する。ガス増幅により生ずる全イオンの大きさは通過する荷電粒子の数に比例することがわかる。Fig.8 に示されているようにこの長い 6 m の比例計数管の場所によるシングルピークのずれは両端 6 cm までは全く変化なく、両端 6 cm にしても他の部分の数% にすぎず殆んど無視できる。又 Fig.9 からわかるように分解能も殆んどシングルピークの変化と同様に問題とならない。この両者のデータより、この計数管が非常に精度のよいものであることがわかる。又現在までによく用いられているシンチレーション検出器の分解能は大体 100% である。比例計数管のシングルピークの分解能はこれよりややよいようである。空気シャワーを用いたシンチレーション検出器と比例計数管の粒子数の比較より両方の粒子数が factor 2 の精度で 45° の真線上によくのっていることはこの比例計数管が検出器として使用可能なことがわかる。

以上のことよりシンチレーション検出器に比べて非常に安価で ($1/4 \sim 1/5$) 大面積が得られ、又分解能もよいという利点をもっているこの比例計数管を今後宇宙線実験の測定に用いることが可能であることがわかる。

この実験にあたって、東京大学原子核研究所の宇宙線部及び神戸大学の亀田グループの人々にお世話になりました。深く感謝致します。

References

- (1) 三浦功, 菅浩一, 俣野恒夫; 放射線計測学
- (2) W. J. Price; Nuclear Radiation Detection
- (3) Mutron Project 状況報告 I; CKJ-報告-1

この長い比例計数管の上にシンチレーション検出器をのせて、空気シャワートリガーによる両カウンターの粒子数の比較を求めた。

その結果は Fig.10 に示されている。

グラフよりわかるように、factor 2 のふらつきで 45° のラインの上に非常によくのっている。トリガー方法は比例計数管の上のせたシンチレーション検出器による 4 fold coincidence による。この coincidence pulse により東大原子核研究所にある外周のシンチレーション検出器を動作させ粒子数を自動記録装置で数える。