

# 宇宙断層撮像装置の開発(1)

甲南大学工学部物理学科 宇宙粒子研究室

学籍番号 11061019

氏名 鴨川 敦樹

## 目次

### 第 1 章 序論

- 1.1 宇宙線
- 1.2 空気シャワー
- 1.3 電磁成分
- 1.4 ミュオグラフィ
- 1.5 火山の透視
- 1.6 研究目的

### 第 2 章 装置特性

- 2.1 シンチレータ
- 2.2 光電子増倍管 (PMT)
- 2.3 波長変換ファイバー
- 2.4 モジュール

### 第 3 章 基礎実験

- 3.1 実験装置
- 3.2 光電子増倍管を用いて 1p.e.の測定
- 3.3 宇宙線 1 粒子当たりの 1p.e.の測定
- 3.4 宇宙線 1 粒子当たりの 1p.e.の測定(塗装したシンチレータのみ)

### 第 4 章 まとめ

- 4.1 結果
- 4.2 今後の課題

参考文献

# 第1章 序論

## 1.1 宇宙線

宇宙線とは、宇宙から地球に降り注いでいる原子核や素粒子のことです。私たちの体や身近な物にも、いつも膨大な数の宇宙線が通り抜けています。

遠い銀河から、また近傍からも、多くの宇宙線がやってきます。宇宙線は地球に到達して大気中に飛び込み、空気中の酸素や窒素の原子核と核反応を起こします。地球大気に飛び込む前の宇宙線を“一次宇宙線”と呼ぶ。(一次宇宙地球…大気に入射する前の高エネルギーの放射線。主成分は陽子。)

一次宇宙線が大気中に飛び込んで変化し新たに生まれた宇宙線を「二次宇宙線」と呼びます。(一次宇宙線が大気に入射してつくる宇宙線、空気の原子核と衝突して生じた $\pi$ (パイ)中間子が、さらに分裂して生じた電子や $\mu$ (ミュー)中間子など。)

二次宇宙線は、ミューオン、ニュートリノ、電子、ガンマ線、中性子が主要な成分です。このうち電子やガンマ線は大気中で吸収されて減少し、地上や地中まで到達するのは”ミューオン”と”ニュートリノ”がほとんどです。

## 1.2 空気シャワー

高エネルギー宇宙線が大気中に突入すると、大気中の原子核と相互作用し、多数の2次粒子を発生させる。生じた2次粒子もエネルギーが高いため、さらに粒子を生成する。このような反応が連鎖的に生じて、その総粒子数をネズミ算式に増加させ、宇宙線の入射方向に沿って大気中を伝播していく。このように、相互作用と粒子生成を次々に繰り返す現象をカスケードという。これに伴い、2次粒子は、宇宙線入射方向に対して垂直な横方向にも広がり、入射方向に垂直な円盤内に分布する。この多量の粒子群がほぼ光の速さで大気中を進行し、入射エネルギーが $10^4\text{EeV}$ を超えると海面高度にまで達するようになる。この現象を”空気シャワー”と呼ぶ。

補足(宇宙線(一次宇宙線)が地球に突入する際、主成分である陽子(水素の原子核)やアルファ粒子(ヘリウムの原子核)は空気中の窒素や酸素の原子核と衝突して核破壊をおこす。これにより中間子、ニュートリノなどの二次宇宙線を生成する。またこれらの素粒子が大気中の原子核と衝突することでミューオン、電子、ガンマ線、中性子を生成する。突入した宇宙線が最高エネルギー宇宙線の場合、非常に高いエネルギーの核子が原子核と衝突する。このとき多数の中間子を発生し、多くの二次宇宙線を連続的に生成する。そのため1つの一次宇宙線が各種の粒子の集合となり、大気中でシャワー状に降る。これを「空気シャワー」と呼んでいる。)

### 1.3 電磁成分

空気シャワーではまず、核カスケードが起こる。これにより、大量の $\pi$ 、 $K$ ができるがその中には当然、 $\pi^0$ が含まれている。 $\pi^0$ は $10^{-16}$ 秒という非常に短い寿命のために、すぐに崩壊する。その崩壊のモードの99%が、二つの $\gamma$ 線になるというものである。高エネルギー $\gamma$ 線は、電子・陽電子対生成をおこし、さらにその高エネルギーの電子・陽電子は、主に制動輻射を起こして、 $\gamma$ 線を生み出す。このようにして、あるエネルギーになるまで電子・陽電子・ $\gamma$ 線が大量に作られていく。これらをまとめて、電磁成分と呼び、空気シャワー成分の約90%を担っている。この他、電磁成分の親としては、ミューオンの崩壊時にできた電子、ミューオンにより原子からたたき出される電子などが存在する。電磁カスケードの発達に関しては、電子・陽電子対生成、制動輻射という二つの相互作用が主に関与しているが、電磁成分が、臨界エネルギーより大きなエネルギーを持っている限り、電磁カスケードの発達に対し、電離損失、コンプトン錯乱などのエネルギー損失は無視できる値であるために、上の二つを考慮することで、電磁カスケードの発達の様子や、動径方向への広がりなどが計算できる。電磁成分は、空気シャワー成分の大部分を担っているため、空気シャワーの発達を表す式も、電磁カスケード方程式に非常に似た形をとっていて、空気シャワーデータ解析や、シミュレーションにおいても、電磁カスケード理論が良く用いられている。電磁カスケードにおいても、重要となる値を次に挙げる。

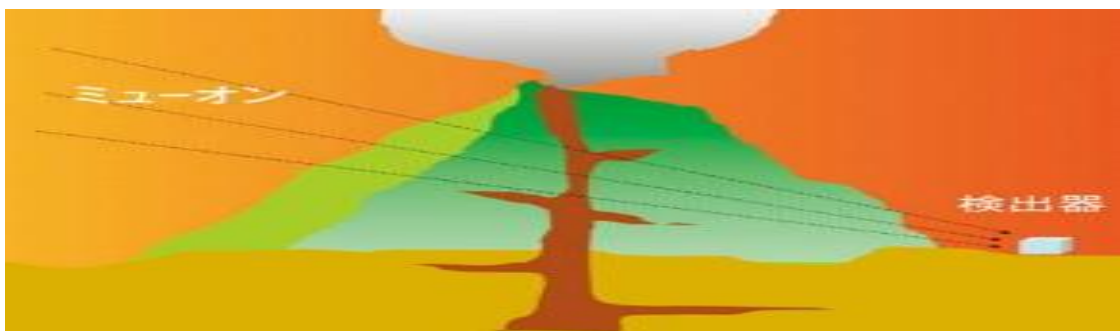
・Radiation length: 制動輻射により、電子のエネルギーが $1/e$ になるまでの物質の厚さ。空気では $37.1\text{g/cm}^2$ 、コンクリートでは $26\text{g/cm}^2$ 。

・臨界エネルギー: 電子が1 Radiation lengthの物質層を走る間に、電離損失により失うエネルギー値。空気では $81\text{MeV}$ 。コンクリートでは $29\text{MeV}$ 。

ここで、電子のエネルギーが、臨界エネルギー付近になると、空気シャワーの発達には寄与しなくなり、逆に、急激に減少していく。空気シャワーは、サイズが最大時の観測が好ましく、空気シャワーサイズが最も大きくなる時の値を1として、空気シャワーの発達段階を示すAgeパラメータというものを解析に用いていく。

## 1.4 ミュオグラフィ

ミュオンの透過性を利用して撮影する手法を“ミュオグラフィと呼んでいます。ミュオグラフィで見ることのできる対象は検出器を置いた位置よりも高い位置のものだけに限られるので、山は格好の対象になります。また、その利点はもう一つあり、ミュオンは水平方向から飛来するものの方が垂直からのものと比べて通り抜ける力が強いのです。水平方向から飛来するミュオンの方が元々高いエネルギーを持っているからです。

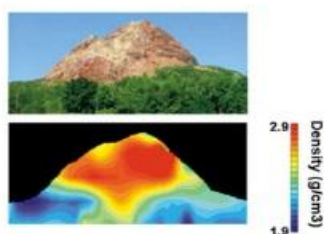


火山内部の透視法の原理： 火山の麓に設置した検出器を用いて、火山を通り抜けてきたミュオンの方向と数を測定する

## 1.5 火山の透視

マグマが火山内部の通り道を上ってくると減圧を受け、マグマに溶け込んでいた揮発成分がガスとして分離します。火山噴火ではガスがマグマに閉じ込められ、マグマの中のガスの体積はどんどん膨張し爆発するか、マグマからのガスが効果的に抜けて静かな噴火が起きるかのどちらかです。

これが地下で本当に起きているならば、地下から地表に向かいマグマの泡が増えていき、マグマの通り道が観察されることとなります。

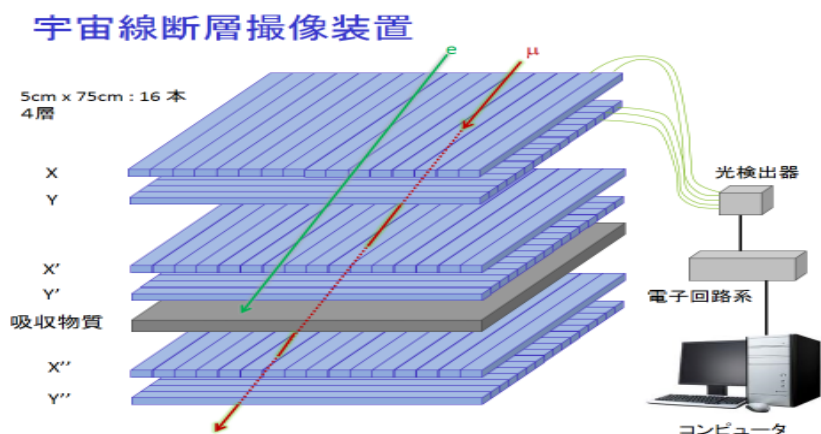


昭和新山の透視画像： ミュオグラフィによって、平均密度の分布が明らかになった。赤は密度が大きく、青は密度が小さい。中央下に周囲より密度が高い部分があり、そこがマグマの通り道ではないかと考えられる。

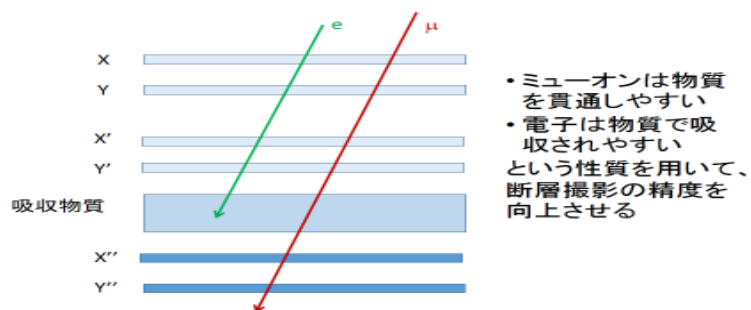
## 1.6 研究目的

宇宙線 1 粒子がシンチレータを通過した時のシンチレーション光を観測し宇宙線 1 粒子がシンチレーション検出器で何 p. e. に相当する光電子を測定する。

空気シャワー現象で発生した  $\mu$  粒子、電子がシンチレータを通過する時にシンチレータ中で電離が起きて電子を発生させる。発生した電子はシンチレータ内の分子を励起状態にし、励起された電子は元の状態に戻る時にシンチレーション光を出すという現象を利用することで、シンチレーションカウンターを用いた宇宙線断層撮像装置の開発を目的としている。



### 宇宙線断層撮像装置の原理



11

## 第2章 実験装置

### 2.1 シンチレータ

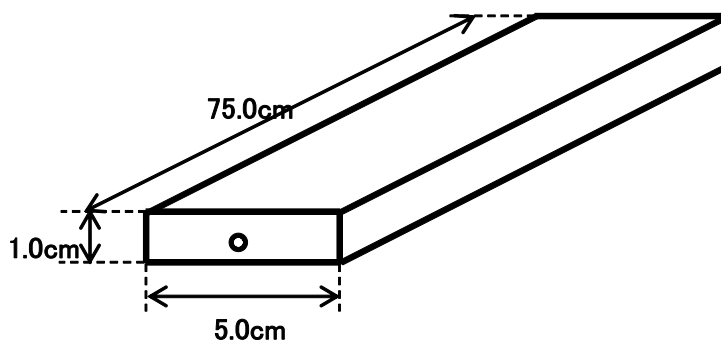
電子やミュオンなどの荷電粒子が通過すると蛍光するものをシンチレータと呼ぶ。粒子がシンチレータを通過する時、シンチレータ中の電子を励起状態にする。しかし、励起された電子は10万分の1秒から10億分の1秒という短い時間で元の状態に戻る。この時に、シンチレーション光を放出する。

ここでの問題は、シンチレーション光はとてまかすかであり、そのままでは、素粒子の実験に使用することは不可能である。そこで、素粒子の実験に使用可能にする為に、光電子増倍管(PMT)が実用化された。光電子増倍管(PMT)を使用することで、シンチレーション光の微弱な光を電流に変えるでき、素粒子の実験が可能になった。

素粒子の検出では、よくプラスチックシンチレータが使用される。

プラスチックシンチレータは厚さ数mm～数cmで長さが数mに及ぶ角型板状のものが広く使われている。この種の応用に際しては、シンチレータの光が、仮に片側の先端につけられた光電子増倍管のみで検出されるようになっている場合でも、シンチレータの全長にわたって均一な発光量が得られるようになっていることが重要である。

プラスチックシンチレータの外装としては、塩素法化チタンがコーティングされている。これは、宇宙線が通過した時に発するシンチレーション光を逃さないようにするためである。



## 2.2 光電子増倍管 (PMT)

光が金属に衝突すると、表面から電子が放出される。これを光電効果と呼び、この電子のことを光電子と呼ぶ。

入射窓から入射光(光子)のエネルギー ( $h\nu$ ) は光陰極から光電子を叩き出し、その光電子は集束電極により効率よく導かれるとともに、加速電圧によりエネルギーを与えられて電子増倍部の第1ダイノードに衝突する。その結果、1個の光電子は数個の二次電子を叩き出し、それらは第2ダイノードに入ってさらに増倍される。このように、二次電子は隣り合うダイノード間の電位差により加速されながら電子増倍部を通過する間に次々と増倍され、最終的には数十万倍から一千万倍以上になって陽極に到達する。

この電子が最終的に陽極(アノード)に集められて、電気信号になる。

(例えば、二次電子放出比が5のダイノードが10個ある場合、総合的なゲインは5の10乗(約1000万)に達する。)

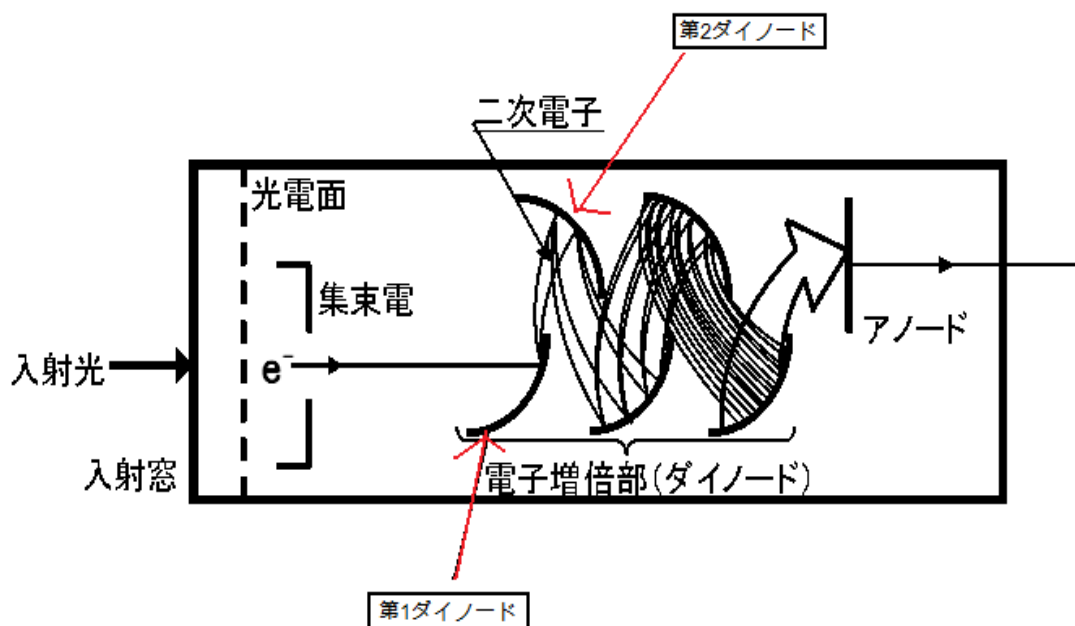


図1 光電子増倍管(PMT)の仕組み



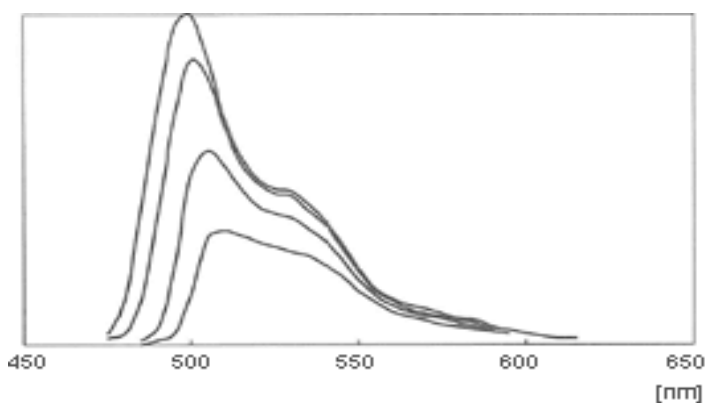
## 2.3 波長変換ファイバー

宇宙線通過によるシンチレータからの発光は光電子増倍管の感度が低い紫外線が多い。よって、シンチレーション光がファイバーに入りやすく、かつファイバーから出にくくする為に波長変換して光電子増倍管に入射させなければならない。そのため微弱な光でも容易に測定可能な波長変換ファイバーを使用する。

今回使用した波長変換ファイバーは Y-11(200)M である。クラレ社製の緑色広域に発光波長をも波長変換ファイバーで現在最も用いられている。

MはMultiCladdingという形状はファイバー軸中心でウェーブレンクスシフター(波長変換材)によりシンチレーション光を吸収・発行した場合、全反射しやすく、ファイバー表面からできるだけ、ファイバー軸方向に伝達することを考えて使用されている。1度ファイバー内で全反射した光は、外へ逃げることなくファイバーの両端へ向かう。

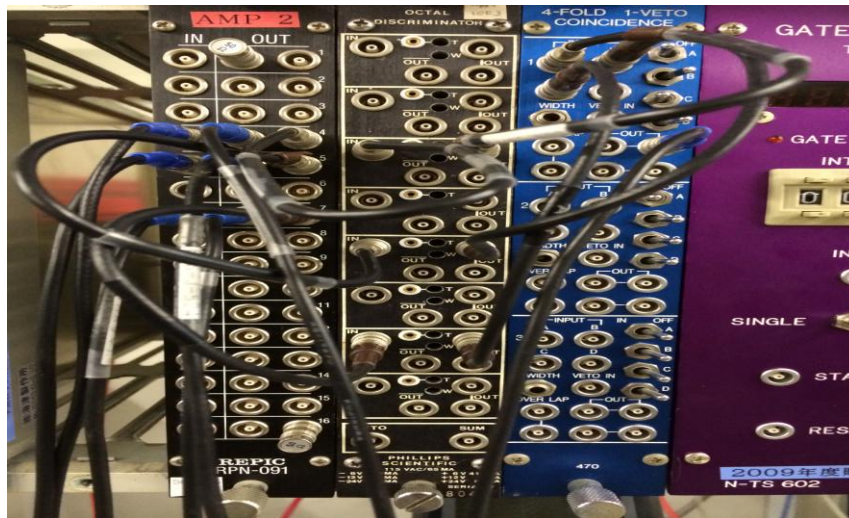
| Description          | Emission |           |                          | Att. Leng. <sup>2)</sup><br>[m] | Characteristics                     |
|----------------------|----------|-----------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
|                      | Color    | Peak [nm] | Spectra                  |                                 |                                     |
| Y-11(200),Y-11(200)M | green    | 476       | See the following figure | >3.5                            | Green Shifter<br>(K-27 formulation) |



Exiting Wavelength: 430nm

## 2.4 モジュール

次の装置は本実験で使用したモジュールである。

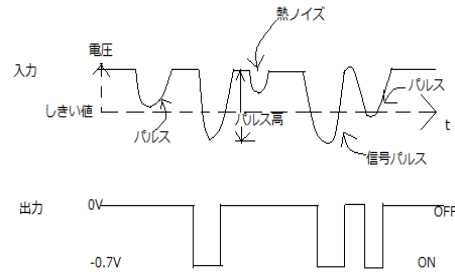


写真の左は、アンプ 真ん中は、ディスクリミネーター 右は、コインシデンスである。

①アンプ(Amplifier、増幅器)・モジュール

信号の振幅を増幅する回路である。 本実験で使用するアンプ・モジュールでは、信号の振幅を 10 倍に増幅する。

②ディスクリミネーター(Discriminator、波高選別回路)・モジュール



ディスクリミネーターの入力信号と出力信号。  
しきい値を超えたアナログ入力信号があるときに、off-onの矩形の出力信号が出る。

上図のようにパルス高が連続的に変化することアナログ信号がディスクリミネーターに

## 10

入力されると、あるしきい値(Threshold level)よりも負の大きい信号が入ったときにのみ on 信号(標準で約-0.7V、接続の仕方によって約-1.4V になる)が出力され、それ以外の時は off 信号(0V)が出力される。つまり、ディスクリミネーターではアナログ信号が on-off の矩形波信号に変換される。

出力パルスの幅はモジュール前面の”WIDTH”と書かれたダイヤルを回す事により任意の値に設定できる。

### ③コインシデンス(Coincidence、同時数計数回路)・モジュール

二つ以上の入力端子があり、それらに同時に on 信号が入力された時のみ出力電圧を一定時間だけ off から on の状態に変える回路である。ここでは、右端に並んでいる切り替えスイッチを IN にすることにより、コインシデンス入力端子の数を 1 から 4 まで変えることができる。

下の写真は、高電圧電源である。



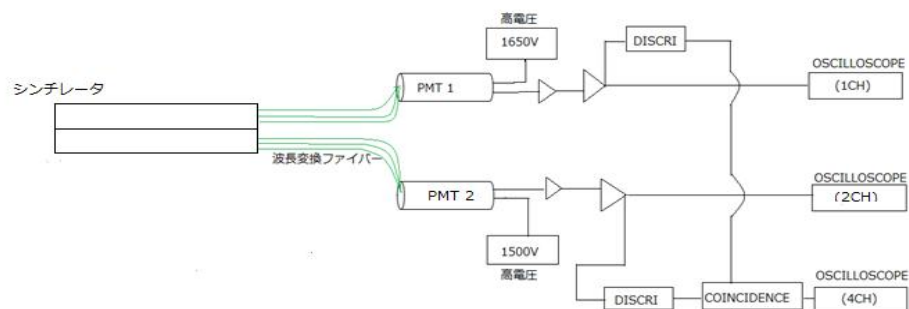
### 高電圧電源(High voltage power supply)・モジュール

光電子増倍管に高電圧供給するモジュール。高電圧を供給するにはまずグレートの電源を ON にする。次に高電圧電源の POWER を ON にする。この電源は 4 チャンネル入っているので SELECT ボタンにより希望のチャンネルにセットし数字の表示が VOLT になっているのを確認する。次にそのチャンネルのスイッチを ON にし、ダイヤルをゆっくり回して所定の電圧にセットする。

## 第 3 章 基礎実験

### 3.1 実験装置

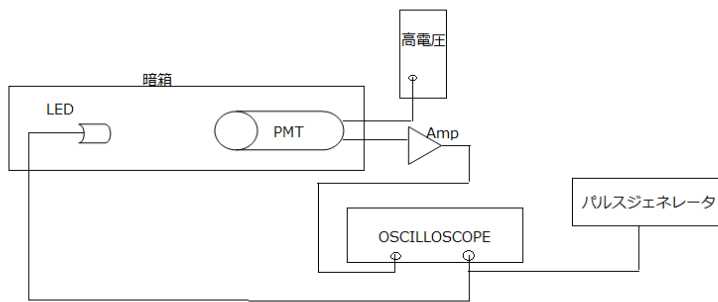
図.実験装置：シンチレーションカウンター検出器



上図は、本研究で実験したシンチレーションの図である。

2枚のシンチレータを上下に重ねて置き、宇宙線通過時にシンチレータ内で発生するシンチレーション光を感知すると光電子増倍管で信号を増幅して捉える。宇宙線が上から通過すると、まず1枚目(上)のシンチレータが光を発生し光電子増倍管が信号を発する。続いて宇宙線が2枚目(下)のシンチレータを通過すると、少し遅れて2枚目のシンチレータからも信号発する。宇宙線の通過は一瞬であるため、上下のシンチレータは同時に信号を発するといえる。このようにして2つの信号が同時に出る回数を測定することによって、上下のシンチレータを通過した宇宙線の個数を観測することが出来る。

### 3.2 光電子増倍管を用いて 1p.e.の測定



図： 1p.e.の測定の為の装置図

1p.e.(photon・electron)とは、1光子当たりの電荷量を示す。  
 この測定では、宇宙線の信号ではなく、LEDの信号を測定する。これは、1光子が何p.e.に相当するかと光電子増倍管のゲインを測定するためである。

この時に、光電子増倍管にかけた電圧は、

PMT 1CH: 1650V    PMT 2CH: 1500V

である。

本研究で使用した光電子増倍管は

| 光電子増倍管 | 型名                      | 陽極-陰極間印加電圧<br>(V) | ゲイン<br>Typ.       |
|--------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| 1CH    | H6410 No. RD2609 '04,05 | -2000             | $3.0 \times 10^6$ |
| 2CH    | H6410 No. RD3169 '05,04 | -2000             | $3.0 \times 10^6$ |

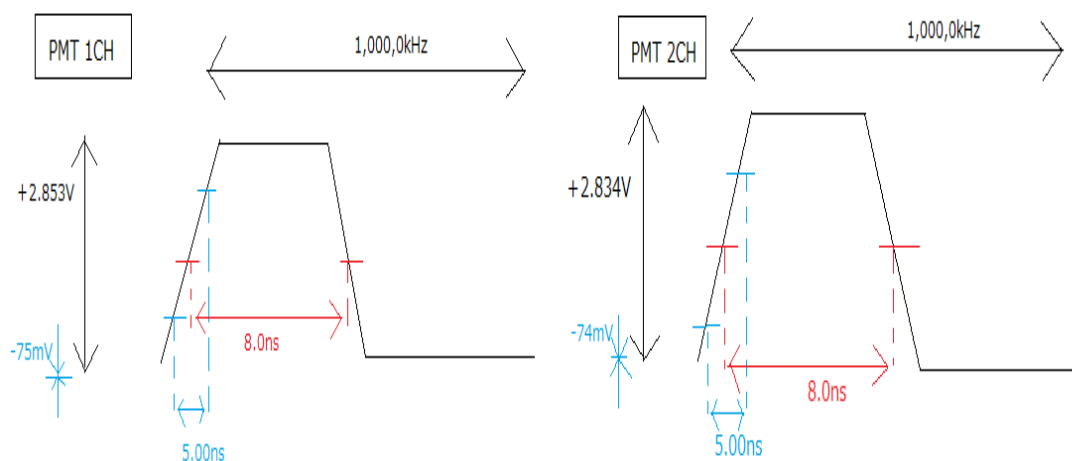
である。

<測定手順>

- ① 図のような回路を組む。

- ② パルスジェネレータからの信号で LED をほんの少し光らせ、PMT で 1 光子のみ感知するように設定する。
- ③ OSCILLOSCOPE で Run/Stop を繰り返し、反応を見る。
- ④ パルスジェネレータを調節する。OSCILLOSCOPE に 10 回に 1 つ PMT からの信号が見られるように設定する。(10 回に 1 つの信号を見られるようにすれば、1 光子のみを PMT で感知できていると判断できる。)
- ⑤ ④ で設定したパルス信号で測定
- ⑥ 各 PMT で測定

<1p.e.測定時のパルス設定>



<測定結果>

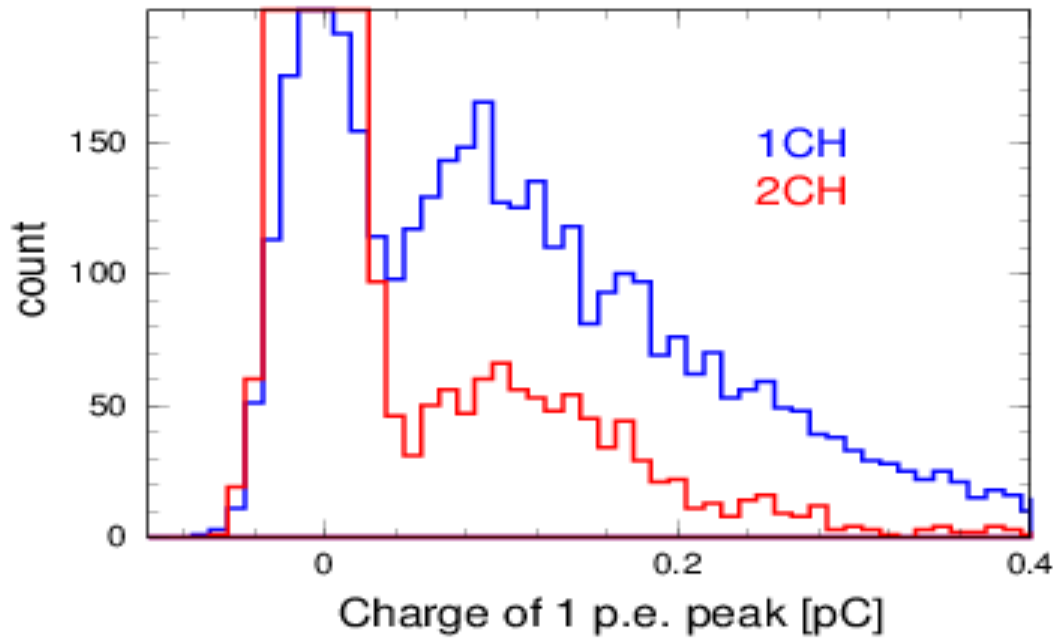


図 1 : 光電子増倍管の PMT 1CH と PMT 2CH の 1p.e.の実験データ(アンプなし)

測定結果の図 1 を見ると、左側に頻度の高い信号部分が見られるが、これはノイズである。このノイズの過ぎた後に、もう一度頻度の高くなっている信号部分がある。この部分のピーク値が求めたい値である。

したがって、光電子増倍管の 1p.e.は

$$\text{PMT 1CH: } 1\text{p.e.}=0.09[\text{pC}]$$

$$\text{PMT 2CH: } 1\text{p.e.}=0.1[\text{pC}]$$

と求められた。

また、この結果から光電子増倍管のゲインは



PMT 1CH: ゲイン= $5.62 \times 10^5$

PMT 1CH: ゲイン= $6.25 \times 10^5$

と分かった。

また、PMT 2CH はアンプに繋いだ時も測定した。その実験データが下の図 2 である。

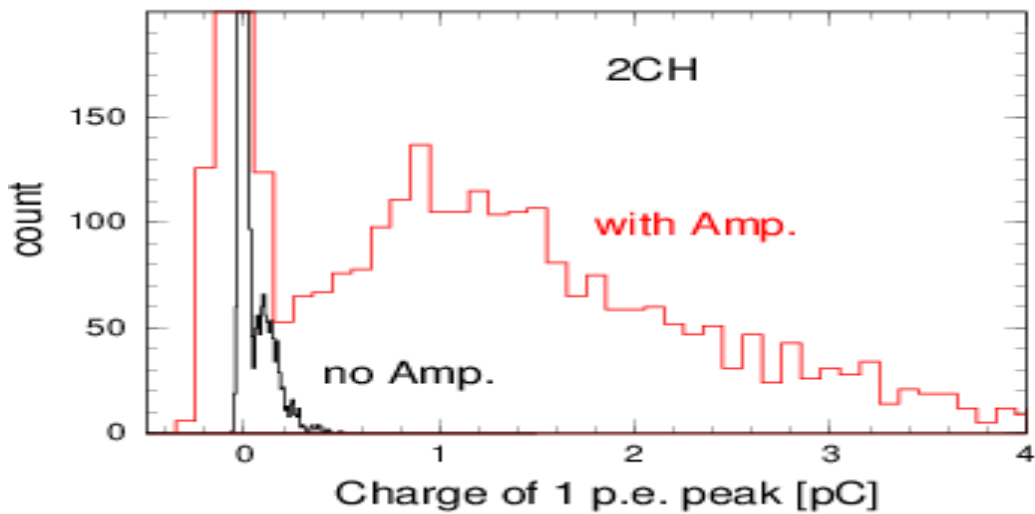


図 2, 光電子増倍管: 1.p.e. の 1 光子の信号の大きさ (with Amp.: PMT と OSCILLOSCOPE の間にアンプを通す、no Amp.: アンプなし)

測定結果の図 2 を見る。先ほどと同じでノイズの過ぎた後の、もう一度高くなっている信号を見ると、光電子増倍管の 1p.e. は

$$\text{PMT: } 1\text{p.e.} = 0.9[\text{pC}]$$

と求められた。

また、この結果から光電子増倍管のゲインは

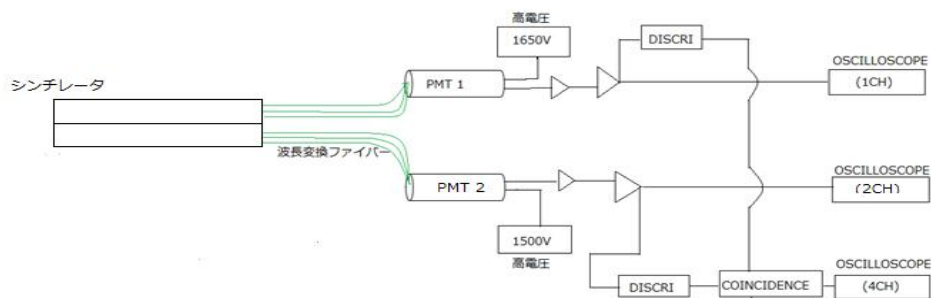
$$\text{PMT 1CH: ゲイン} = 5.625 \times 10^6$$

と分かった。

PMT 2CH の 1p.e.を見比べるとアンプなしが 0.1[pc]でアンプありが 0.9[pc]ということが分かり、ゲインも見比べるとアンプなしが  $6.25 \times 10^5$ 、アンプありが  $5.625 \times 10^6$  となった。

この結果からアンプを通すと信号を約 10 倍していることが分かった。

### 3.3 宇宙線 1 粒子当たりの 1p.e.の測定



この測定では、両方の PMT のコインシデンスのスイッチを ON にし、PMT(1)と PMT(2)が同時に信号を感知した時の信号を測定する。また、PMT(1)のコインシデンスを OFF にし、PMT(2)のコインシデンスを ON にする。ここで信号を測定するのは PMT(1)である。

#### <測定手順>

- ① 回路を組む。
- ② 高電圧の電圧をかける。(この実験では、PMT(1)にかける電圧は 1650V で PMT(2)にかける電圧は 1500V である)
- ③ コインシデンスの切り替えスイッチを ON にする。
- ④ オシロスコープで Run/Stop を繰り返す。
- ⑤ オシロスコープで信号がきていることが確認できたら、オシロスコープに PC を接続し 3000 イベント測定する。
- ⑥ ⑤が終了すれば、次はコインシデンスのスイッチを A を OFF にして B を ON にする。
- ⑦ オシロスコープで Run/Stop を繰り返す。
- ⑧ 信号が確認できたら、PC に接続し 3000 イベント測定する。

#### <測定結果>

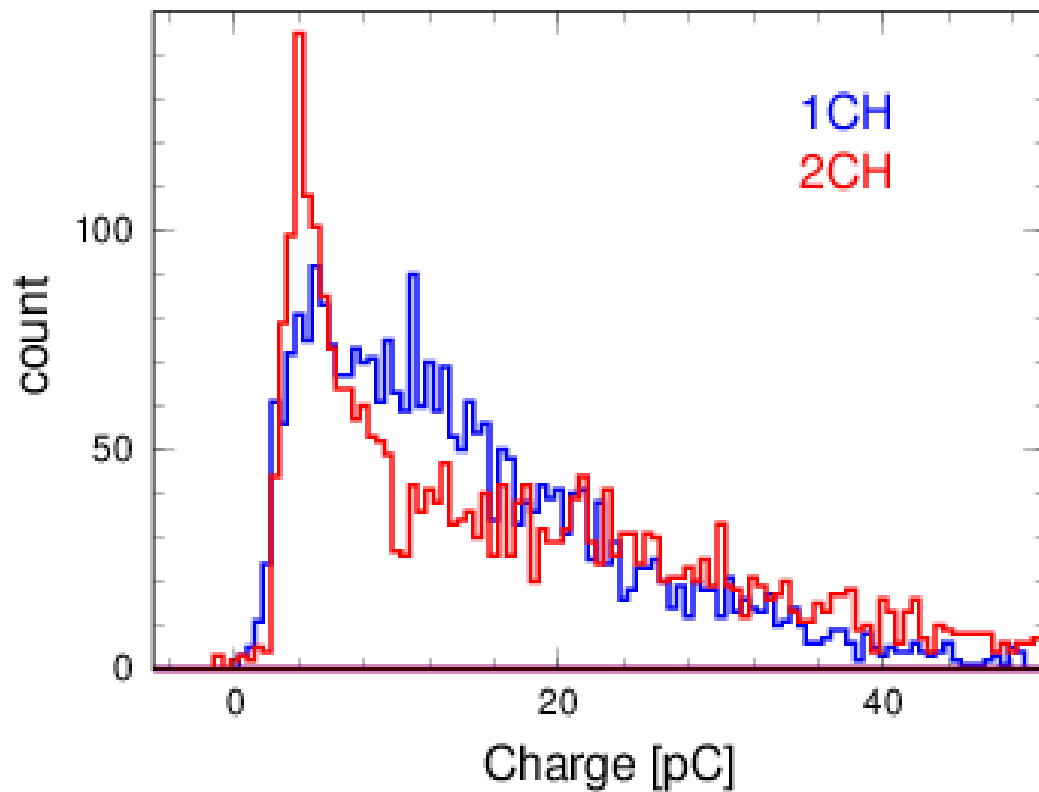


図 1： 宇宙線 1 粒子の信号の大きさ(コインシデンスのスイッチ A と B を ON)

図 1 の結果より、2CH の左側の大きい信号はノイズである。次のプラトーのような場所の信号の平均的な場所を見る。

2CH の 1 粒子の信号の大きさは

$$2CH=16.0[\text{pC}]$$

と分かった。

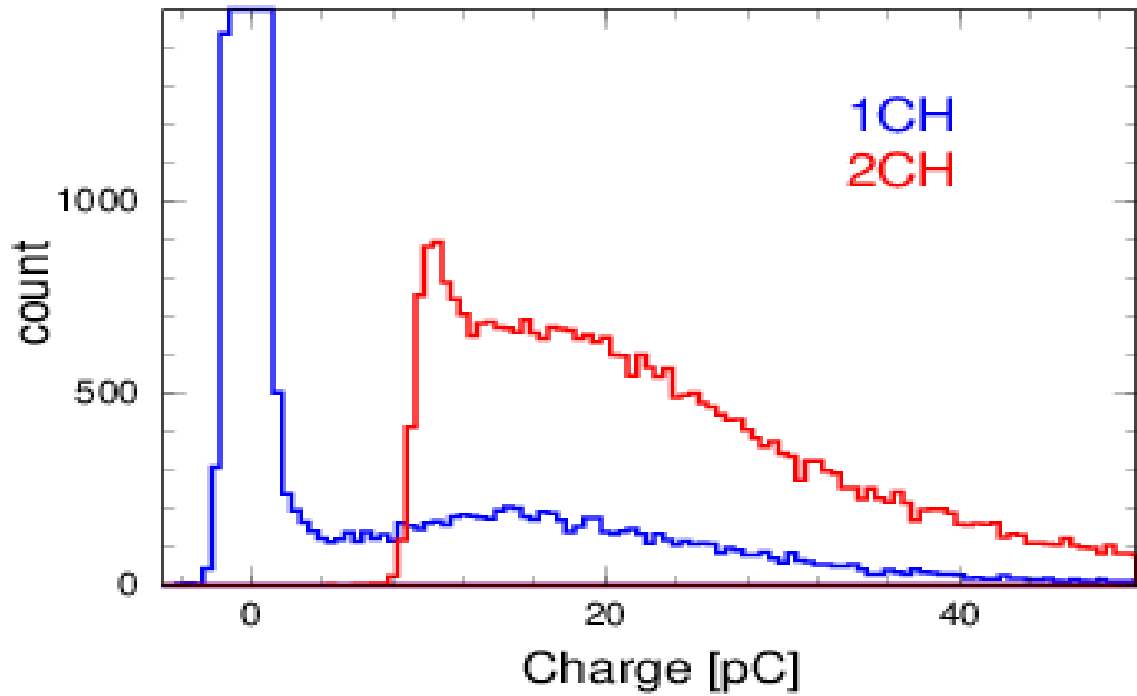


図 2： 宇宙線 1 粒子の信号の大きさ(コインシデンスのスイッチを A を OFF , B を ON)

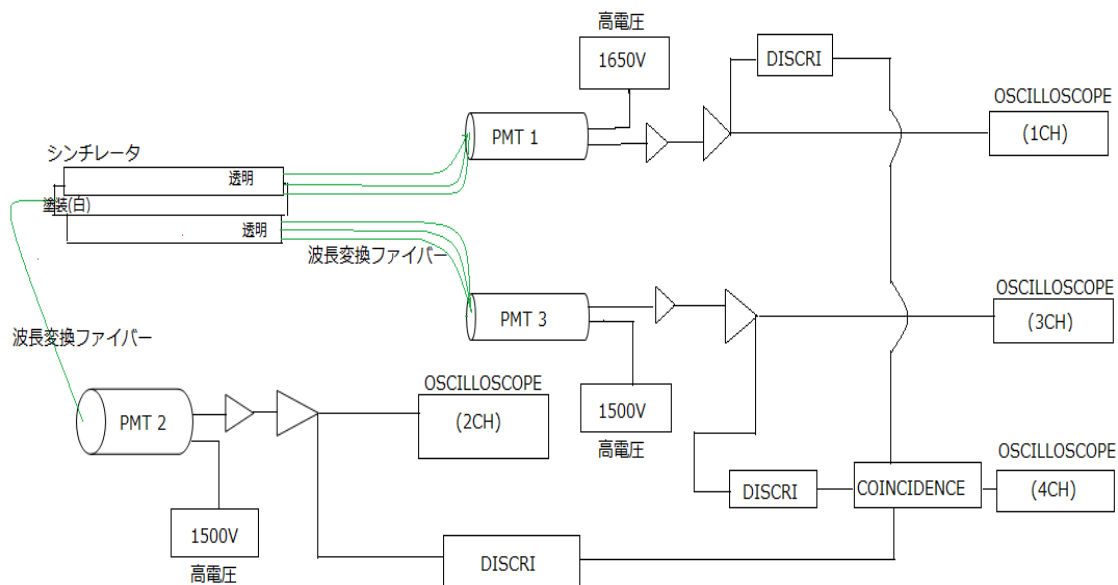
図 2 の結果より、1CH の左側の大きい信号はノイズである。次のプラトーのような場所の信号の平均的な場所を見る。

1CH の 1 粒子の信号の大きさは

$$1CH=14.0[pC]$$

と分かった。

### 3.4 宇宙線 1 粒子当たりの 1p.e.の測定(塗装したシンチレータのみ)



この実験は、大道との共同実験である。

この測定では、真ん中の白色のシンチレータの 1 粒子の信号の大きさを見たい。

PMT(1)と PMT(3)のコインシデンスのスイッチを ON にし、PMT(2)のコインシデンスのスイッチは OFF にする。ここで信号を測定するのは PMT(2)である。

#### <測定手順>

- ① 回路を組む。
- ② 高電圧の電圧をかける。(この実験では、PMT(1)にかける電圧は 1650V で PMT(2)にかける電圧は 1500V で PMT(3)にかける電圧は 1500V である)
- ③ コインシデンスのスイッチ(ここでは A と C)を ON にする。
- ④ オシロスコープで Run/Stop を繰り返す。
- ⑤ オシロスコープで信号がきていることが確認できたら、オシロスコープに PC を接続し 3000 イベント測定する。

<測定結果>

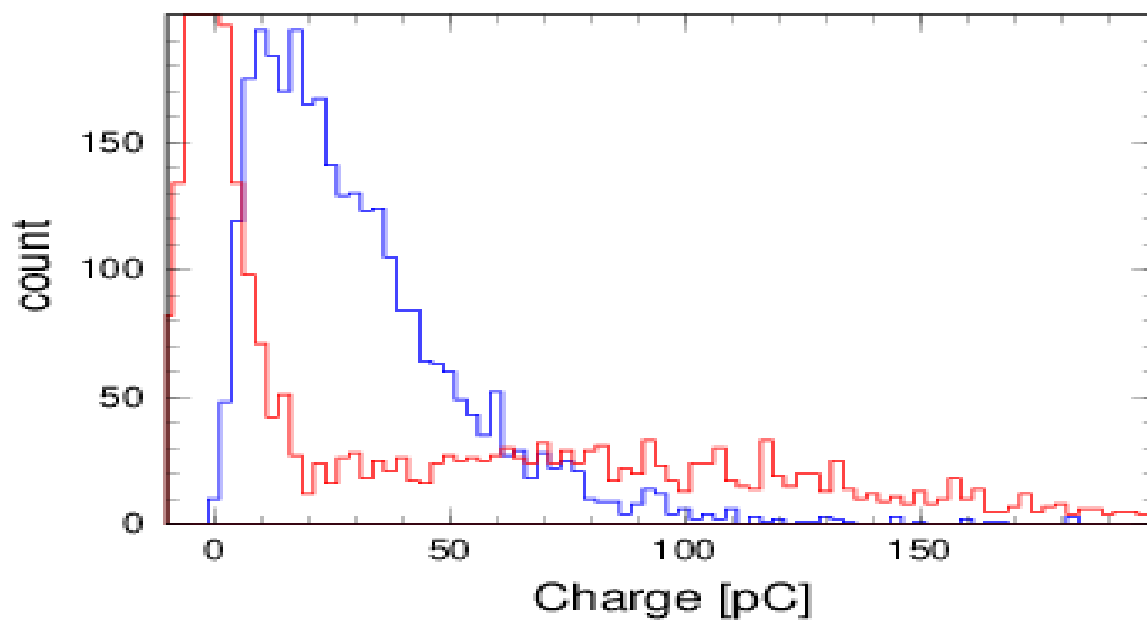


図1： 宇宙線1粒子の信号の大きさ  
(1CH:青色 2CH:赤色)

図1の結果より、1CHの左側の大きい信号はノイズである。次のプラトーのような場所の信号の平均的な場所を見る。

1CHの1粒子の信号の大きさは、

$$2CH=90[pC]$$

と分かった。

## 第4章 まとめ

### 4.1 結果

本研究の結果として、第3章で書いた測定結果から宇宙線1粒子当たりの1p.e.は

$$\text{PMT(1):宇宙線 1 粒子}=15.56[\text{p.e.}]$$

$$\text{PMT(2):宇宙線 1 粒子}=17.78[\text{p.e.}]$$

に相当するシンチレーション光による光電子数を観測することが出来た。

また、大道との共同実験の塗装したシンチレータの宇宙線1粒子当たりの1p.e.は

$$\text{PMT:宇宙線 1 粒子}=100[\text{p.e.}]$$

に相当するシンチレーション光による光電子数を観測することが出来た。

今回制作したシンチレーション検出器の簡易版は、シンチレータ2本でも宇宙線( $\mu$ 粒子、たまに電子)を高精度とまではいかないが観測できることが分かった。

より高精度に観測するには、シンチレータの数を増やすことや、しっかりと遮光すること、また波長変換ファイバーが光電子増倍管にしっかりとくっついてるかということも大事である。

### 4.2 今後の課題

- ・シンチレータの数を増やし、2本のシンチレータに比べて、どれだけの光電子数がきているか確認する。

- ・宇宙線断層撮像装置の開発のために、よりシンチレーション検出器の精度を上げ、実用化を目指す。

以上が今後の課題である。



## 参考文献

- 甲南大学工学部物理学科宇宙粒子研究室 大道 玄礼  
「2013 年度卒業論文 宇宙線断層撮像装置の開発(2)」
- クラレトレーディング株式会社 : Plastic Scintillating Fibers Plastic Imaging Fibers
- CHEER news No.4 – 東京大学地震研究所
- KEK 高エネルギー加速器研究機構
- 宇宙線 著書 : 小田 稔

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導頂いた指導教員の梶野文義教授並びに山本常夏准教授に感謝致します。特に、私の研究において色々と厳しく優しくもご指導して頂いた山本常夏准教授には本当に感謝致します。また、同期の研究室の皆様や院生の方にもアドバイスをいただきまして感謝いたします。改めて、協力していただいた、皆様へ心からの感謝の気持ちを御礼としまして、謝辞にかえさせていただきます。