

# Zenith Angle Dependence of Cosmic Ray

Daisuke KINOSHITA

*Department of Physics, University of Tohoku  
Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-77*

*29th January 1997*

## Abstract

A sequential observation of cosmic ray was carried out from 22 to 29 January 1997 with the scintillation counter developed at the Bubble Chamber Photo Analysis Center, University of Tohoku. We measured the flux of cosmic ray. The measured flux was  $0.011070720 \text{ count strad}^{-1}\text{sec}^{-1}\text{cm}^{-2}$  at  $Z = 0^\circ$ , and  $0.000366290 \text{ count strad}^{-1}\text{sec}^{-1}\text{cm}^{-2}$  at  $Z = 90^\circ$ . We detected zenith angle dependence of cosmic ray, and its relationship was  $F = 0.011003 \times \cos^{1.95868}(\theta + \Delta\theta)$ . We report on preliminary results of an analysis of this phenomenon, and discuss some characteristics in this paper.

## 1 Introduction

### 1.1 Cosmic Ray

The high energy protons, atomic nuclei and electrons are exist in cosmic space. These particles coming into the atmosphere of the Earth is called the primary cosmic ray. primary cosmic ray collides with atoms and create  $\pi$  mesons. These high energy  $\pi$  mesons collide with other atoms and create  $\pi$  mesons again. These reactions are continued till the energy of the particles become low enough, and many particles are created. These particles are called secondary cosmic ray. This is also called cosmic ray shower. The nucleons (protons and neutrons),  $\pi$  mesons, electrons and positrons in the shower are easy to interact with the atoms in the atmosphere and difficult to reach to the surface of the Earth. However, muons created by the decay of the  $\pi$  mesons rarely interact with other particles. 75 % of the particles reach to the surface of the Earth is muons.

The number of the particles reach to the surface of the Earth is  $1 \text{ count cm}^{-1}\text{min}^{-1}$  including muons.

### 1.2 宇宙線

宇宙空間には高エネルギーの陽子、原子核、電子などが存在している。地球の大気に突入してくるこれらの粒子は一次宇宙線と呼ばれている。一次宇宙線は大気中の原子と衝突して原子核を破壊したり、 $\pi$ 中間子を生み出す。高エネルギーの $\pi$ 中間子はさらに他の原子と衝突し粒子を発生させる。粒子のエネルギーが十分に低くなるまでこのような反応が繰り返され、多数の粒子が生じる。これらの粒子が二次宇宙線である。この多数の二次宇宙線は宇宙線シャワーと呼ばれている。シャワー中の核子(陽子、中性子)、 $\pi$ 中間子、電子、陽電子は大気中の原子と反応しやすいため地表までたどり着く確率は小さい。これに対して $\pi$ 中間子の崩壊で生じる $\mu$ 粒子は物質の貫通力が大きいため、地表に達する確率が比較的大きい。地表面に達する粒子の75%が $\mu$ 粒子である。この $\mu$ 粒子を含め、地表には $1\text{cm}^2$ あたり毎分1個の粒子が降りそそいでいる。

### 1.3 宇宙線の計測

宇宙線がシンチレーターを通過するとシンチレーター中の分子の軌道電子が励起される。この電子が低いエネルギーレベルに落ちるときに出す光をシンチレーション光という。このシンチレーション光を光電子増倍管で電子に変え、 $10^6$ 倍程度増幅した電気信号として出力する。この信号を同軸ケーブルで遅延回路に送る。遅延回路では信号のタイミング調整を行なう。次に、ノイズによる小さな信号を取り除き、アナログ信号をデジタル信号に変換するため、ディスクリミネーターで基準電圧より大きい信号が入力された場合のみ決まったパルス高の矩形波を出力する。これだけでは基準電圧よ

り大きなノイズを拾ってしまうため同時計測(コインシデンス)法を利用する。コインシデンス回路は複数の信号が同時に入力された場合のみ信号を出力する。コインシデンス回路を通過してきた信号の数をスケーラーで数えれば、宇宙線だけを測定していることになる。

## 2 Preparation for the Observation

### 2.1 シンクロスコープの使い方と伝送線の特徴

#### 2.1.1 Calibration of Amplitude and Time

Amplitude 及び時間の Calibration のため矩形波のスケッチをとった。図 1 に示す。

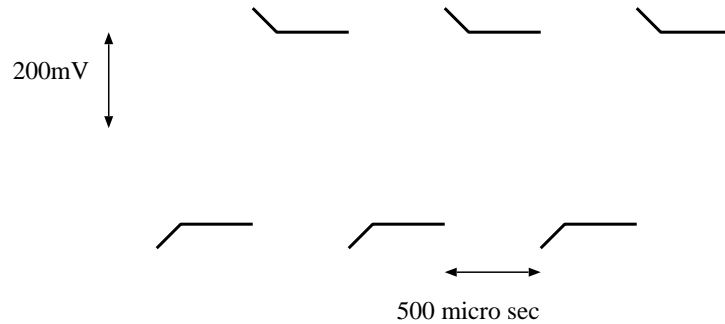


Figure 1: Calibration of amplitude and time

#### 2.1.2 Trigger Level

Slope を (+) にして Level を (-) から (+) に変化させると波形は左に移動した。逆に、Slope を (-) にして同様のことを行なうと波形は右に移動した。

異なるトリガー条件での波形を図 2 に示す。

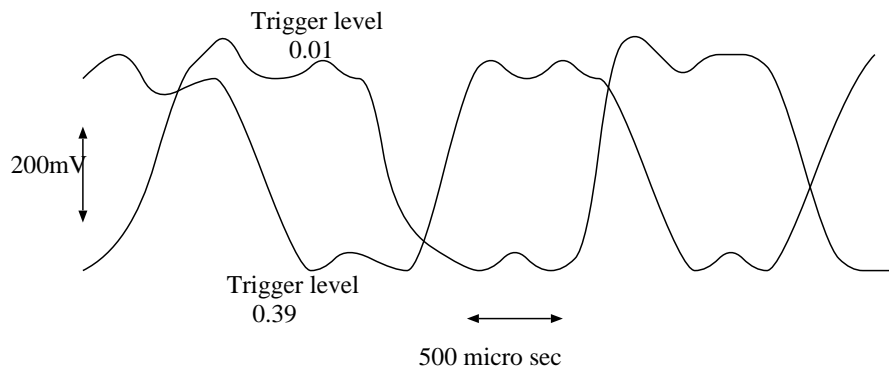


Figure 2: Trigger Level

Trigger Slope (+) では信号波形の電圧が上昇中に、Trigger Slope (-) では信号波形の電圧が下降中に、Trigger Level で決められた電圧になるとブラウン管に表示される。

#### 2.1.3 矩形波の Rise Time の測定

矩形波の Rise Time (立ち上がり時間)  $t_r$  の測定を行なった。立ち上がり時間とは波高値の 10% から 90% までの時間である。測定された立ち上がり時間  $t_r$  は

$$t_r = 44ns$$

だった。

### 2.1.4 Pulse Generator

Pulse Generator で +1V, 10kHz, 幅 1  $\mu$ sec の pulse を発生させる。この pulse の Rise Time は

$$t_r = 4ns$$

だった。

### 2.1.5 外部 Trigger

Pulse Generator の Trigger のソースは CH1 に入れ、Trigger-Out の信号を CH2 に入れたときの CH1 と CH2 の波形は図 3 のようになった。

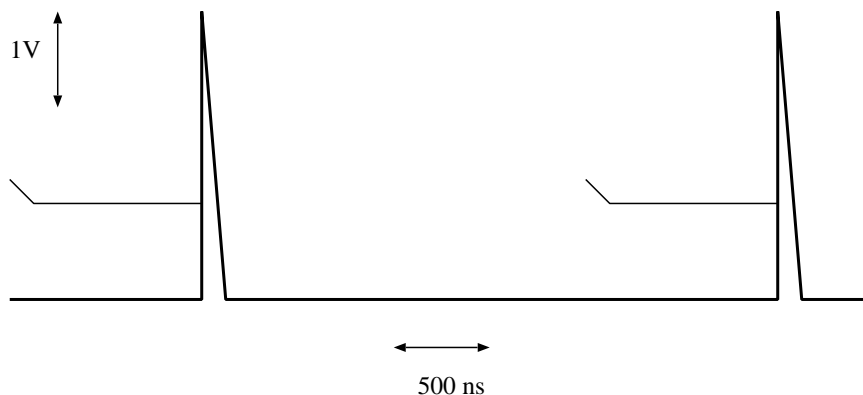


Figure 3: Trigger-OUT

また、Trigger Level を (-) 一杯から (+) 一杯に変えたときの波形を図 4 に示す。

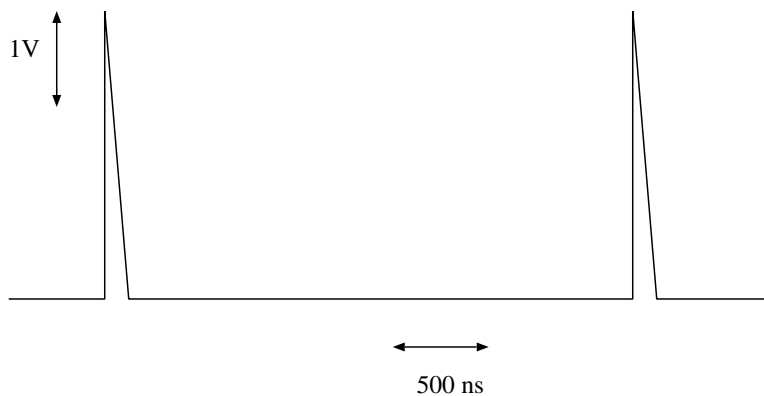


Figure 4: Trigger Level (-)  $\rightarrow$  (+)

CH1 に -1 Volt を入力したときは、パルスは下向きになるはずである。

### 2.1.6 伝送線中での信号伝播速度の測定

外部 Trigger を用いて伝送線中での信号伝播速度を測定した。結果を次の表に示す。

伝送線の長さ L(m)	時間差 $\Delta t$ (ns)
1.6	8
1	5
5	25

伝送線中での信号伝播速度

求めた伝送線の中での信号伝播速度  $v$  は

$$v = 2 \times 10^8 \text{ m sec}^{-1}$$

である。

## 2.2 伝送線の終端での反射及びその応用

### 2.2.1 伝送線の終端の影響

図 5 のような回路を組み、 $z$  を短絡 ( $0\Omega$ )、開放 ( $\infty\Omega$ )、 $50\Omega$ 、 $100\Omega$  及び  $1k\Omega$  にしたときの波形をスケッチした。

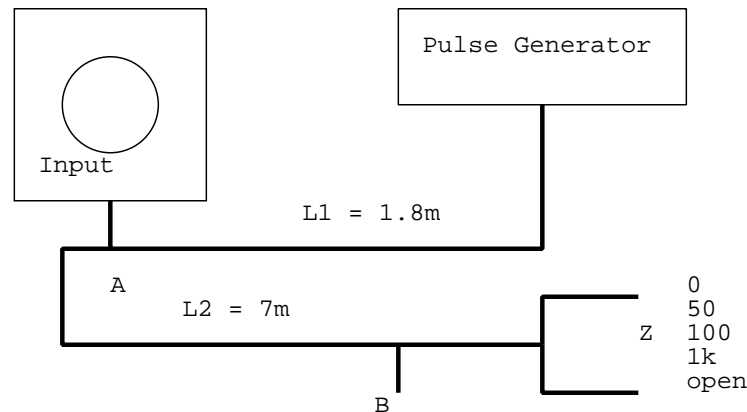


Figure 5: 伝送線の終端の影響

スケッチを図 6 から図 10 に示す。

$Z_L = 0\Omega$  では伝送線の終端で 100 % の反射が逆位相で起こり、重ね合わさった波が打ち消しあっている。

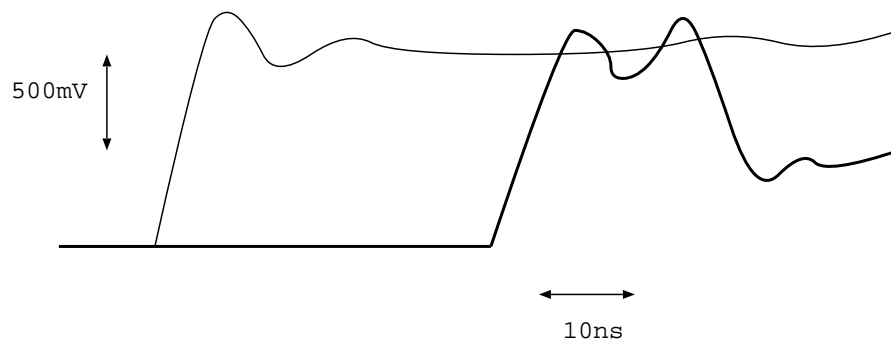


Figure 6: 短絡での終端の影響

$Z_L = 50\Omega$  では伝送線のインピーダンスと一致するので、伝送線が無限に長い場合と同じであり、入射波形が保存されている。

$Z_L = 100\Omega$  では終端で同位相の反射が起こっている。重なり合った波のせいで波高が高くなっている。

$Z_L = 1k\Omega$  では  $100\Omega$  より波高が高くなっている。反射が 100 % に近づいているためである。

$Z_L = \infty\Omega$  では 100 % 同位相で反射される。

### 2.2.2 Discriminator 回路

図 11 のようなディスクリミネーター回路を組む。

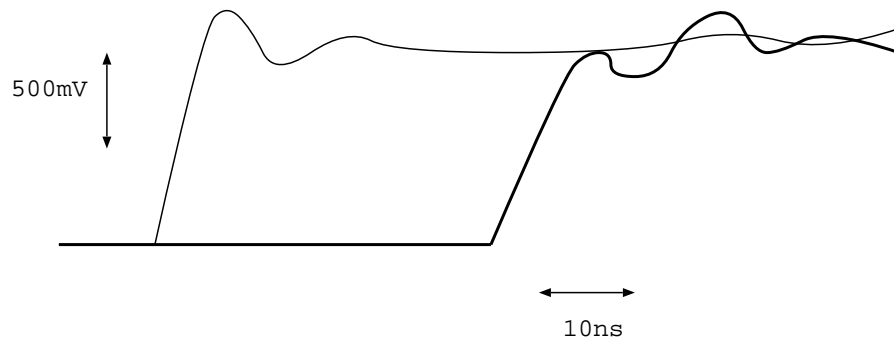


Figure 7: 50Ωでの終端の影響

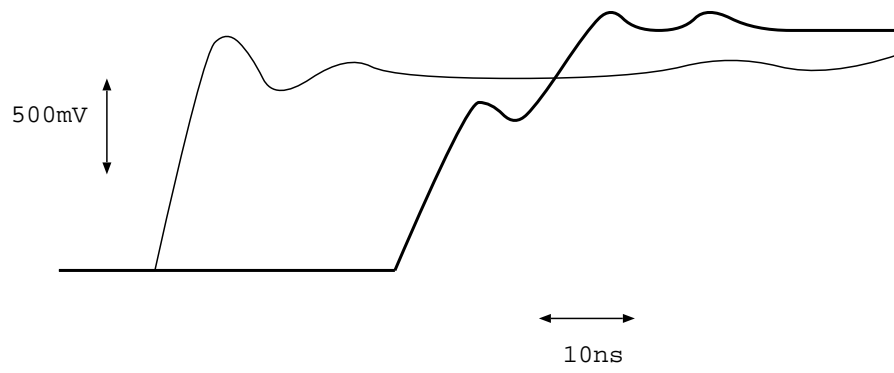


Figure 8: 100Ωでの終端の影響

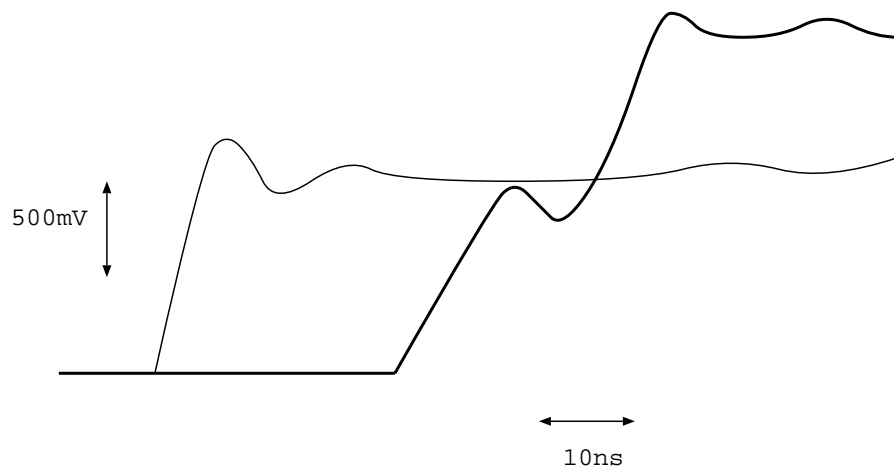


Figure 9: 1kΩでの終端の影響

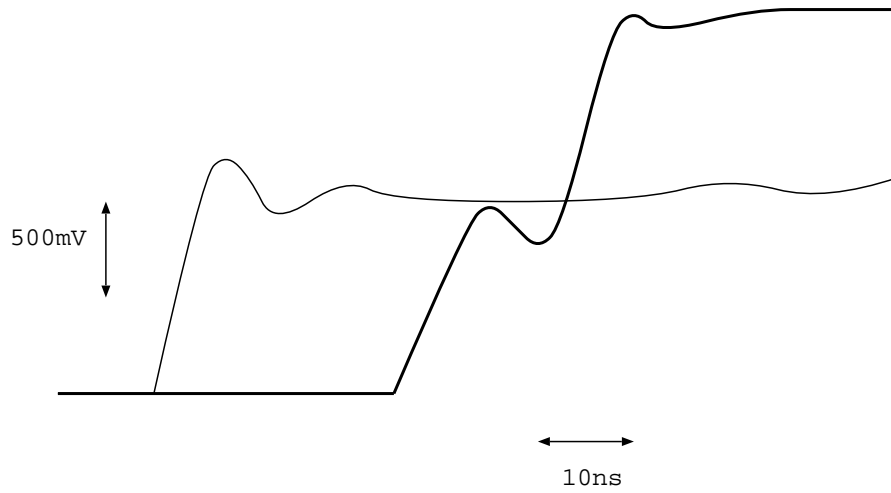


Figure 10: 開放での終端の影響

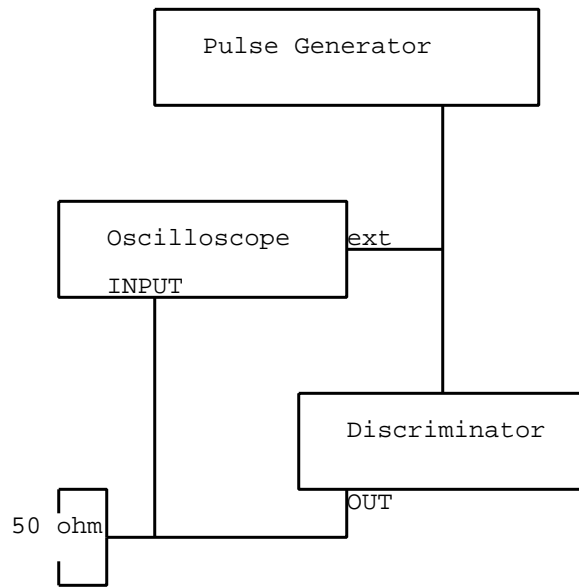


Figure 11: Discriminator回路

WIDTH 調整のポテンシオメータを回転させると、出力パルス幅が広がることが確認された。シキイ値を上げていくとあるところで出力が消えることが確認された。また、ポテンシオメータを最高レベルに設定したとき、シキイ値は 700 mV だった。

### 2.2.3 Coincidence 回路

図 12 のようなコインシデンス回路を組む。パルスは -0.7 から -1.0 Volt、幅 100ns にする。

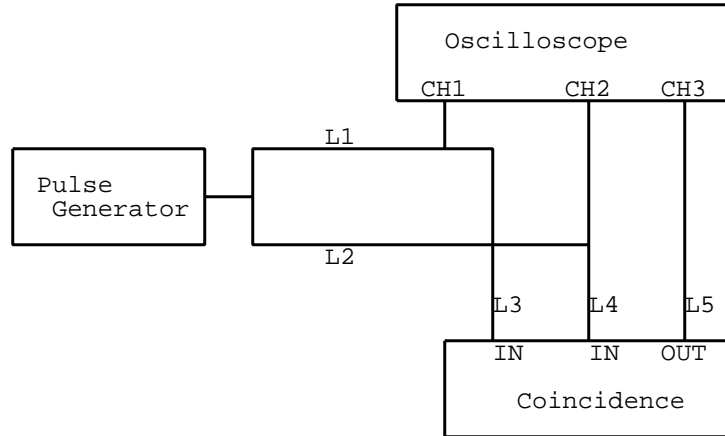


Figure 12: Coincidence回路

まず、 $L_1 = 1m$  ,  $L_2 = 5m$  ,  $L_3 = L_4 = L_5 = 1m$  としたときの波形を図 13 から図 15 に示す。

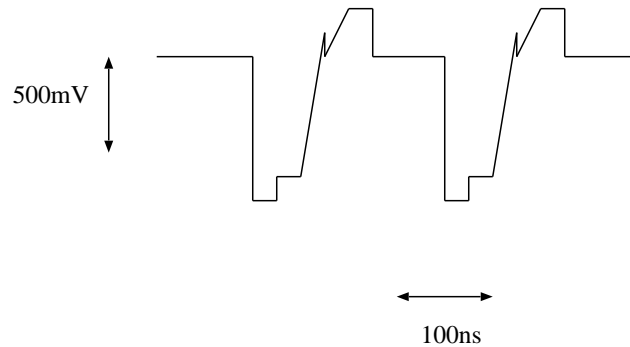


Figure 13: CH1

CH1 と CH2 を比べると伝送線の長さの差は 4m で時間差は 20ns である。また、CH2 と CH3 を比べると伝送線の長さの差は 2m で時間差は 20ns である。これより伝送線中でのパルスの伝播速度は  $2 \times 10^8 msec^{-1}$  で、パルスがコインシデンス回路を通過するのに要する時間(propagation time)は 10ns である。

次に、 $L_1 = 1m$  ,  $L_2 = 10m$  ,  $L_3 = L_4 = L_5 = 1m$  としたときの波形を図 16 から図 18 に示す。

CH1 と CH2 を比べると伝送線の長さの差は 9m で時間差は 45ns である。また、CH2 と CH3 を比べると伝送線の長さの差は 2m で時間差は 20ns である。これより伝送線中でのパルスの伝播速度は  $2 \times 10^8 msec^{-1}$  で、propagation time は 10ns である。

## 2.3 Making of Scintillation Counter

### 2.3.1 Scintillator の加工

Scintillator を適当な大きさに切断し、紙ヤスリと「ピカール金属磨」で磨く。

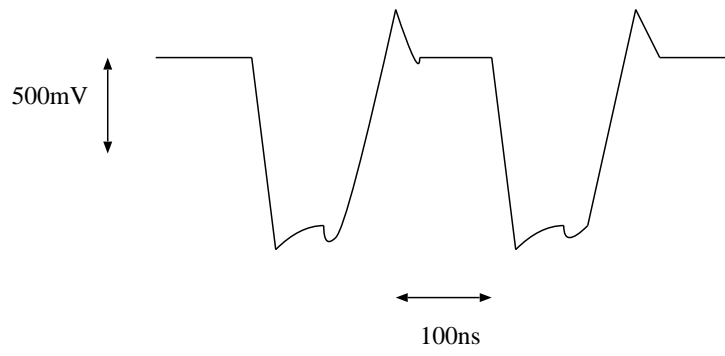


Figure 14: CH2

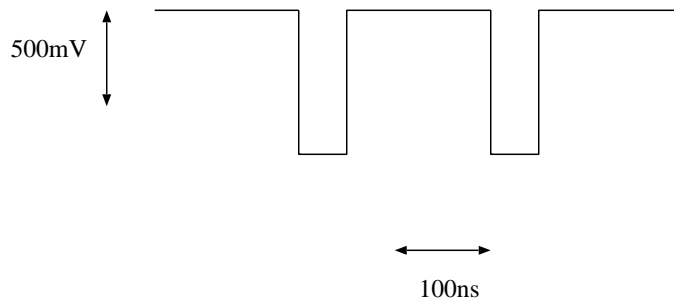


Figure 15: CH3

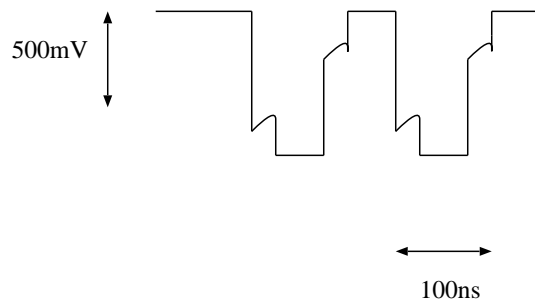


Figure 16: CH1

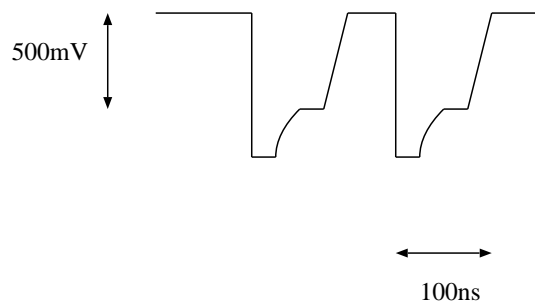


Figure 17: CH2



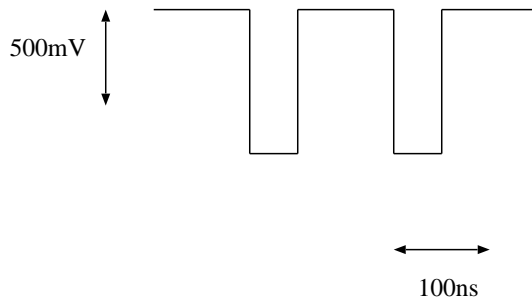


Figure 18: CH3

### 2.3.2 Photomultiplier Tube との接続

Scintillator をアルミホイルと黒のビニールテープで遮光した上で、Photomultiplier Tube と接続する。

## 2.4 Test of Scintillation Counter

### 2.4.1 遅延時間の決定

可変遅延線を用い遅延時間を変えながら2つのカウンターを突き抜ける宇宙線を使い単位時間あたりの同時計数値を測定し、計数値の中心を決定し遅延時間を設定する。横軸に遅延時間、縦軸に一定時間あたりの計数値をプロットする。その結果を図 19 から図 21 に示す。

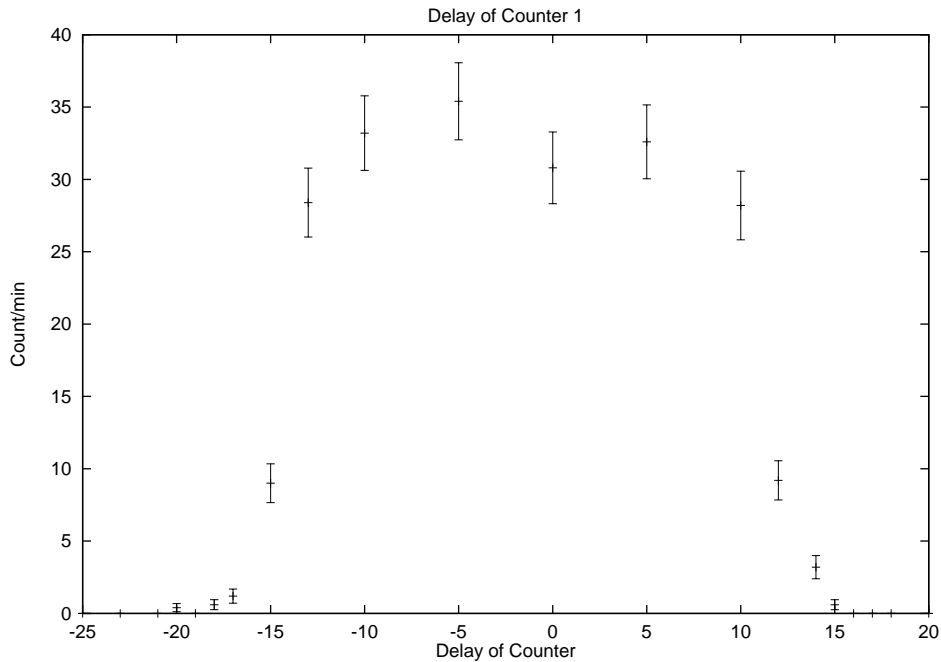


Figure 19: Delay Curve of Counter 1

グラフよりそれぞれのカウンターの遅延時間はすべて -2 ns とした。

### 2.4.2 高電圧の決定

次に、電圧を変えながら2つのカウンターを突き抜ける宇宙線を使い単位時間あたりの同時計数値を測定し、計数の plateau を決定する。横軸に電圧を、縦軸に同時計数をプロットする。結果を図 22 から図 24 に示す。また、単独計数を図 25 から図 27 に示す。測定時間はすべて 300 sec である。

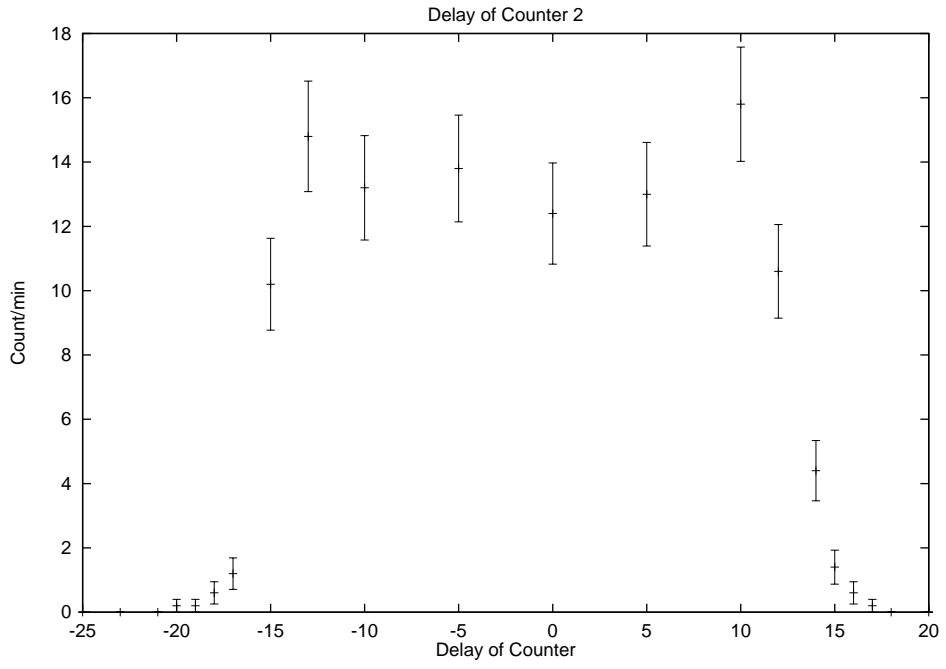


Figure 20: Delay Curve of Counter 2

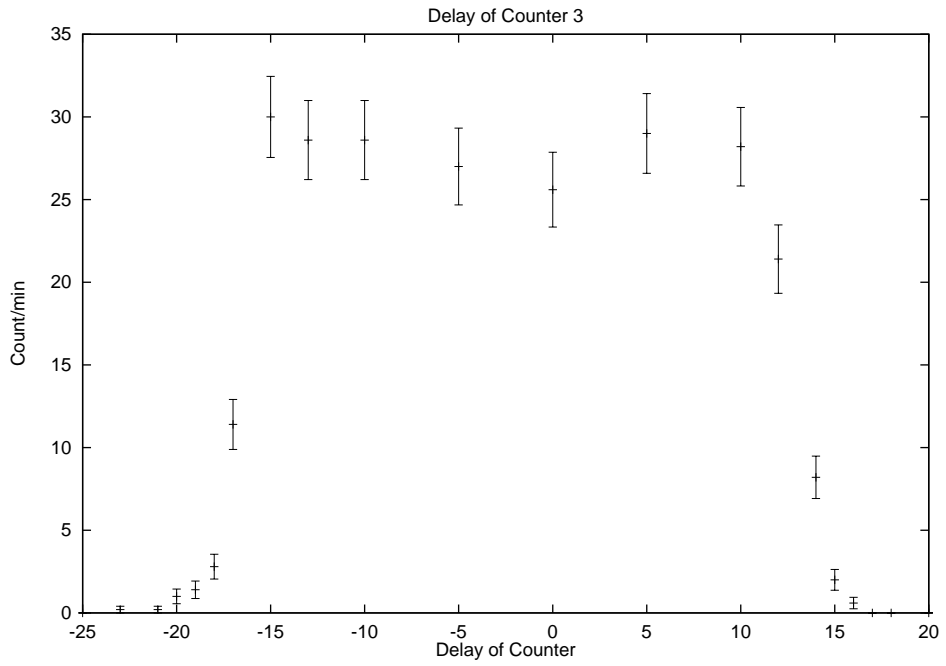


Figure 21: Delay Curve of Counter 3

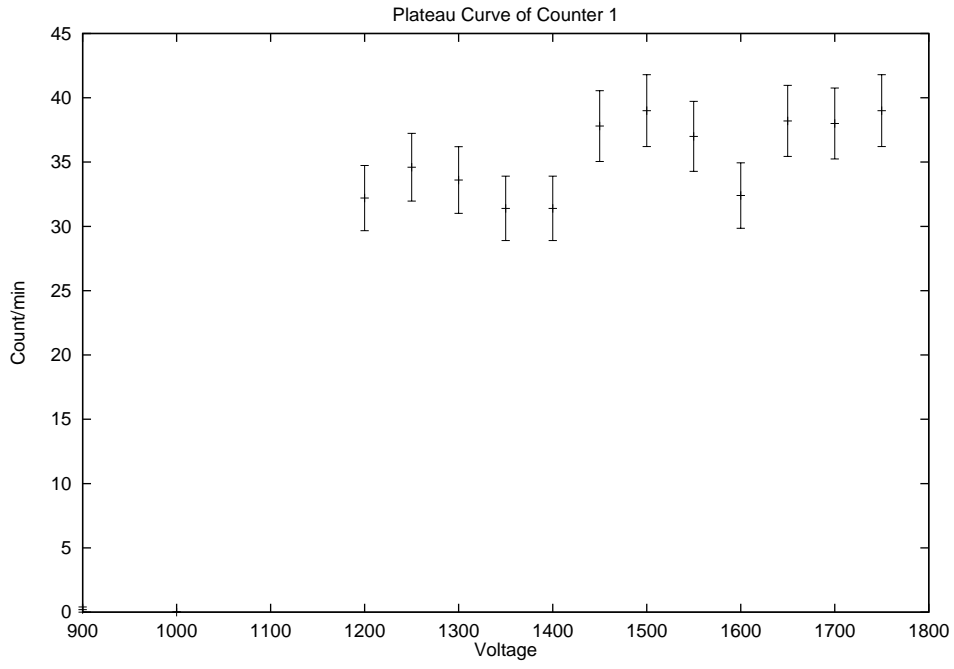


Figure 22: Plateau Curve of Counter 1

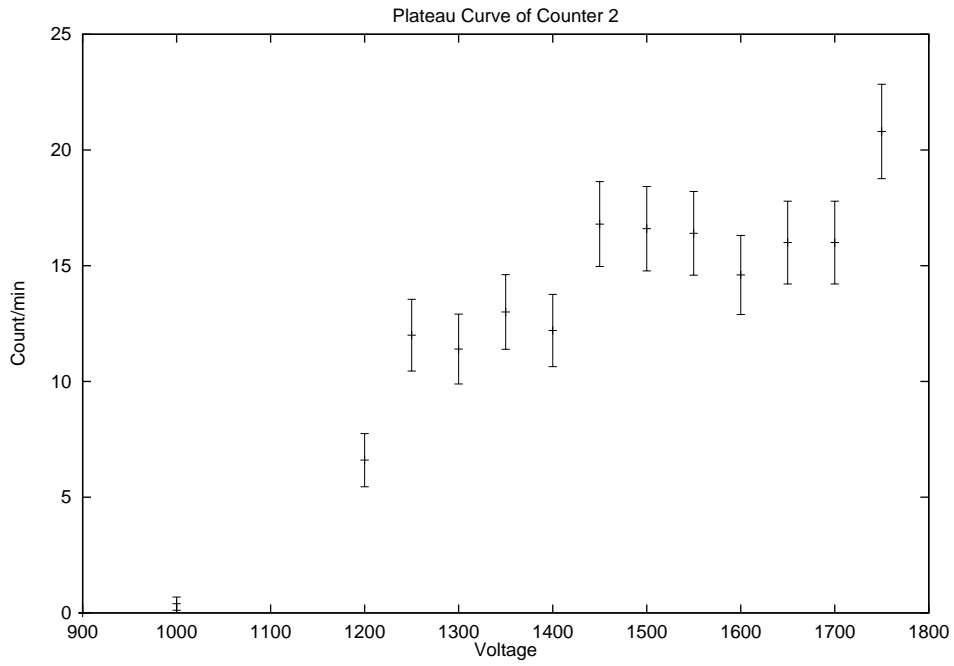


Figure 23: Plateau Curve of Counter 2

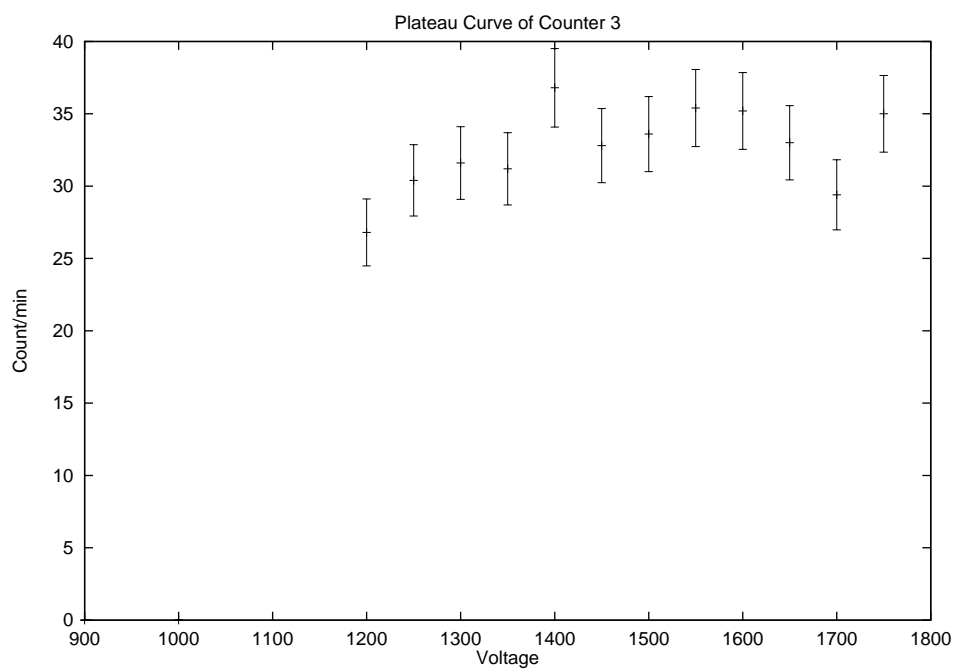


Figure 24: Plateau Curve of Counter 3

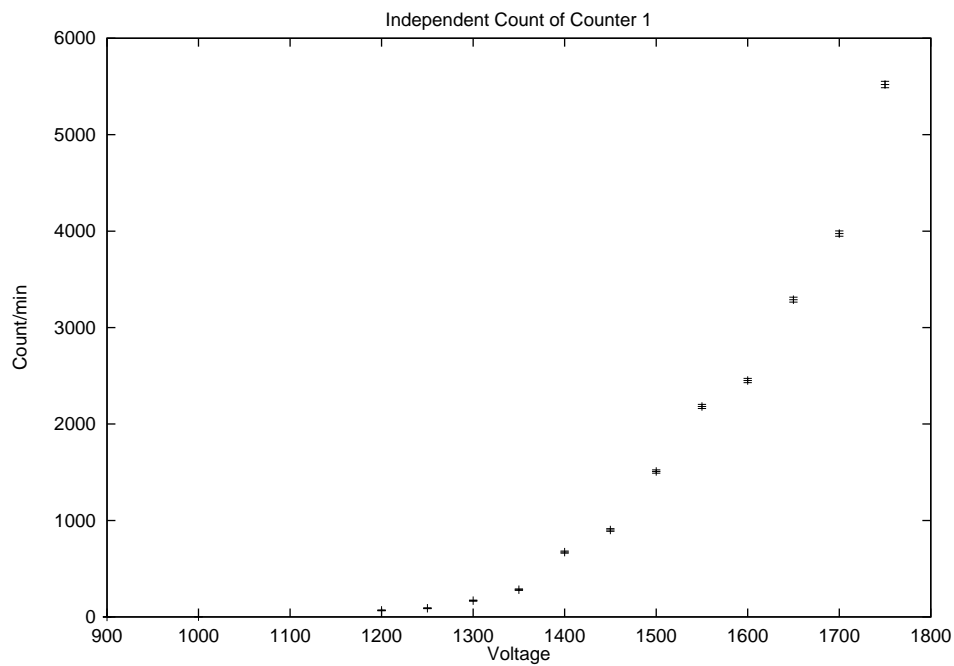


Figure 25: カウンター1の単独計数

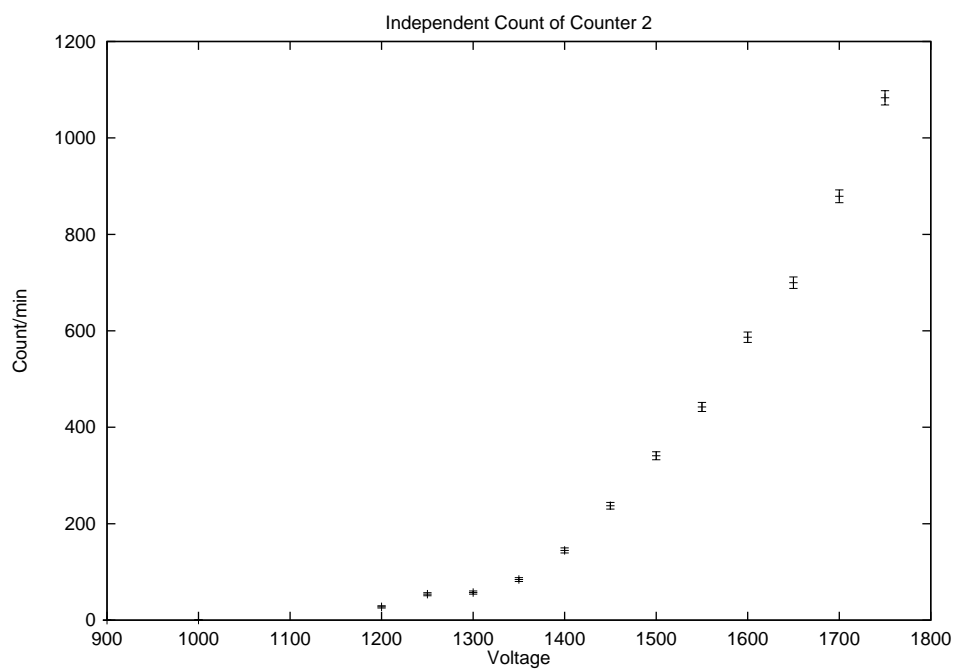


Figure 26: カウンター2の単独計数

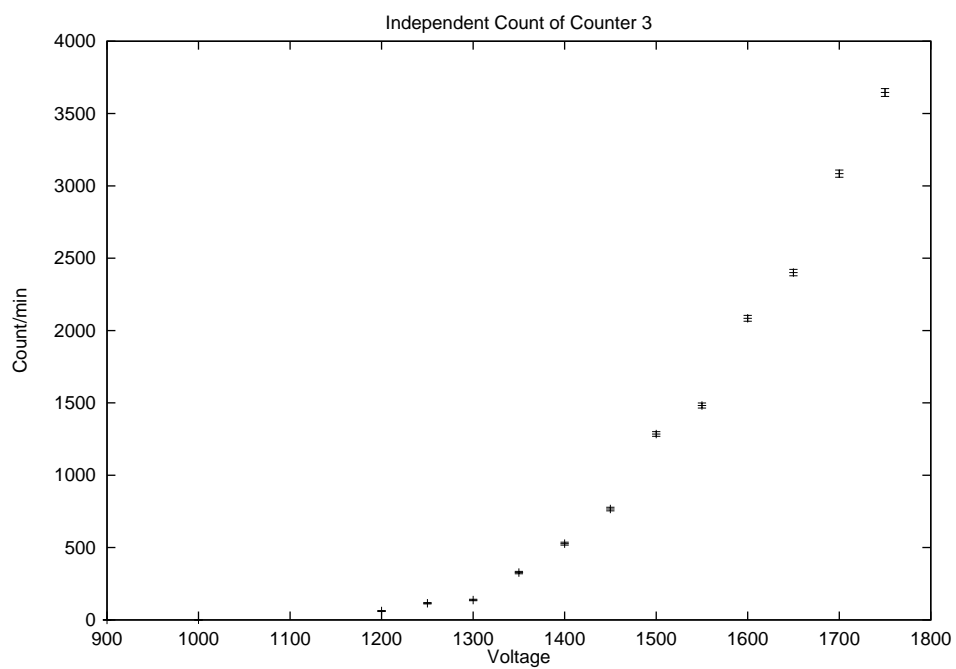


Figure 27: カウンター3の単独計数

グラフよりプラトーの中心はいずれのカウンターも 1600 V とする。

### 2.4.3 同時計数と偶発同時計数の測定

単位時間あたりの偶発同時計数  $N$  は、同時計数の時間幅を  $\tau$ 、2つのカウンターの単位時間あたりの単独計数をそれぞれ  $N_1, N_2$  とすると

$$N = N_1 N_2 \tau$$

与えられる。1600 V でのカウンター 1,2,3 それぞれの偶発同時計数を計算する。  
カウンター1は

$$\begin{aligned} N &= \frac{34515}{600} \times \frac{5529}{600} \times 25 \times 10^{-9} \\ &= 1.3252 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

カウンター2は

$$\begin{aligned} N &= \frac{5942}{600} \times \frac{5529}{600} \times 27 \times 10^{-9} \\ &= 2.4640 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

カウンター3は

$$\begin{aligned} N &= \frac{20534}{600} \times \frac{5529}{600} \times 28 \times 10^{-9} \\ &= 8.8303 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

となった。

### 2.4.4 電圧設定の必要性

光電子増倍管は電圧が上がると感度が上がるがノイズも増えるため適切な電圧で使用することが必要である。

### 2.4.5 複数のカウンターで電圧設定を行なう理由

ノイズを拾わずに宇宙線のカウントだけを見るために複数のカウンターを使用する。

### 2.4.6 両カウンターを突き抜ける宇宙線を用いる理由

2つのカウンターを同時に通過した信号はほぼ確実に宇宙線によるものだと考えることができる。したがって、ノイズをほぼ完全に取り除くことができる。

### 2.4.7 誤差

宇宙線の計数値は Poisson 分布になると考えられる。したがって、計数  $N$  の誤差は  $\pm\sqrt{N}$  である。

直接観測量を  $X, Y, Z, \dots$ 、目的量を  $R = f(X, Y, Z, \dots)$ 、各観測量の誤差を  $\delta X, \delta Y, \delta Z, \dots$  とすると、 $R$  の誤差  $\delta R$  は

$$\delta R = \frac{\partial f}{\partial X} \delta X + \frac{\partial f}{\partial Y} \delta Y + \frac{\partial f}{\partial Z} \delta Z \dots$$

である。したがって、独立の観測量  $A, B$  の誤差を  $dA, dB$  とすると、 $A + B$  の誤差は

$$d(A + B) = dA + dB$$

である。 $A - B$  の誤差は

$$d(A - B) = dA - dB$$

である。  $A \times B$  の誤差は

$$d(AB) = BdA + AdB$$

である。  $\frac{A}{B}$  の誤差は

$$d\left(\frac{A}{B}\right) = \frac{1}{B}dA - \frac{A}{B^2}dB$$

である。

### 2.4.8 偶発同時計数の意味

偶発同時計数は、2つのカウンターがノイズを偶然同時に拾ってしまった数である。

## 3 Observation

さまざまな天頂角での宇宙線をシンチレーションカウンターにより測定した。使用したシンチレーターはプラスチックのなかに有機溶媒を溶かしこんだ固溶体であるプラスチックシンチレーターで、その大きさは  $12.5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  である。宇宙線によってシンチレーター内で発生した蛍光を光電子増倍管によって電気信号に変え増幅し、遅延回路でタイミングの調整を行ない、ディスクリミネーターに通しデジタル信号にし、コインシデンス回路で複数のシンチレーターからの信号で同時に来たもののみを取り出す。この信号のみをスケーラーでカウントする。

得られたデータを表 28 に示す。

天頂角 (deg)	測定時間 (hr)	1の 単独計数	2の 単独計数	3の 単独計数	1,2,3の 同時計数	1,3の 同時計数	1,2の 同時計数
0	2	251266	78295	246702	324	387	1212
5	1	57663	39694	128616	156	195	609
10	1	57174	39552	123828	154	187	638
15	1	72047	39228	120222	140	176	541
20	1	57215	39265	126007	160	191	584
25	1	69999	39129	120797	138	173	513
30	1	81712	40622	125409	124	159	494
35	2	116246	82037	262682	212	279	824
40	2	159662	82509	236125	190	241	790
45	2	138284	88121	254617	143	200	599
50	3	67409	43136	123101	199	286	870
55	4	420655	175139	483247	223	327	996
60	4	288632	173958	493561	155	265	783
65	6	399899	267022	772119	197	352	1023
70	12	856127	528921	1574878	274	561	1584
75	12	773698	517996	1480086	176	533	1292
80	18	1034413	805843	2409802	137	596	1672
85	19	1075492	863310	2677130	120	586	1601
90	25	1478465	1102317	3463594	134	755	2042

Figure 28: 宇宙線の天頂角分布

すべての測定は 10 % の精度を目標に積分時間を設定した。

## 4 Analysis

まず、シンチレーションカウンターの視野を計算する。ひとつのシンチレーターの大きさをゼロと近似して立体角を計算する。シンチレーター 1,2,3 すべてを使用した場合の立体角  $\Omega_{1,2,3}$  は

$$\begin{aligned}\Omega_{1,2,3} &= \frac{12.5 \times 5}{31^2} \\ &= 6.50 \times 10^{-2} \text{strad}\end{aligned}$$

シンチレーター 1,3 を使用した場合の立体角  $\Omega_{1,3}$  は

$$\begin{aligned}\Omega_{1,3} &= \frac{12.5 \times 5}{31^2} \\ &= 6.50 \times 10^{-2} \text{strad}\end{aligned}$$

シンチレーター 1,2 を使用した場合の立体角  $\Omega_{1,2}$  は

$$\begin{aligned}\Omega_{1,2} &= \frac{12.5 \times 5}{15^2} \\ &= 2.78 \times 10^{-1} \text{strad}\end{aligned}$$

である。立体角にシンチレーターの面積をかけたものが有効面積だから

$$\begin{aligned}S_{eff1,2,3} &= \Omega_{1,2,3} \times S_{scintillator} \\ &= 4.06 \text{strad} \cdot \text{cm}^2 \\ S_{eff1,3} &= \Omega_{1,3} \times S_{scintillator} \\ &= 4.06 \text{strad} \cdot \text{cm}^2 \\ S_{eff1,2} &= \Omega_{1,2} \times S_{scintillator} \\ &= 1.74 \times 10^1 \text{strad} \cdot \text{cm}^2\end{aligned}$$

である。

観測で得られたそれぞれの天頂角  $Z$  での宇宙線の計数を線量  $\text{count} \cdot \text{strad}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  に直したものが表 29 である。

宇宙線の線量の天頂角分布は  $\alpha \cos^n Z$  と表すことができるから、線量を  $\cos Z$  に対してプロットする。そのグラフが図 30 から図 32 に示されたものである。

## 5 Discussion

グラフ 30、グラフ 31、グラフ 32 はいずれも天頂角  $Z$  の小さなところでは理論曲線とのよい一致を見せるが、天頂角  $Z$  の大きなところでは明かにずれている。この理由を考えてみる。

宇宙線の線量の天頂角依存は大気の吸収によるものである(R.W. Clay and G.J. Thornton, 1980)。

大気量は地球表面が平らだと近似すると  $\sec Z$  に比例する(図 33 参照)。この近似は天頂角  $Z$  の小さなところではよいが、天頂角  $Z$  の大きなところでは大きくずれてしまうことが明らかである。

ここで大気量(Air Mass)  $X$  を導入する(Hardie, 1962)。

$$X = \sec Z - 0.0018167(\sec Z - 1) - 0.002875(\sec Z - 1)^2 - 0.0008083(\sec Z - 1)^3$$

大気の吸収係数を  $\alpha$ 、観測された宇宙線の線量を  $F_{obs}$ 、大気によって吸収される前の宇宙線の線量を  $F$  とすれば

$$F_{obs} = F e^{-\alpha X}$$

と書ける。両辺の対数をとると



天頂角 (deg)	シンチ1,2,3による線量 $countstrad^{-1}sec^{-1}cm^{-2}$	シンチ1,3による線量 $countstrad^{-1}sec^{-1}cm^{-2}$	シンチ1,2による線量 $countstrad^{-1}sec^{-1}cm^{-2}$
0	0.011070720	0.013223360	0.009696000
5	0.010660693	0.013325867	0.009744000
10	0.010524018	0.012779164	0.010208000
15	0.009567289	0.012027449	0.008656000
20	0.010934044	0.013052516	0.009344000
25	0.009430613	0.011822436	0.008208000
30	0.008473884	0.010865707	0.007904000
35	0.007243804	0.009533120	0.006592000
40	0.006492089	0.008234702	0.006320000
45	0.004886151	0.006833778	0.004792000
50	0.004533073	0.006514868	0.004640000
55	0.003809831	0.005586613	0.003984000
60	0.002648089	0.004527378	0.003132000
65	0.002243757	0.004009150	0.002728000
70	0.001560379	0.003194791	0.002112000
75	0.001002287	0.003035336	0.001722667
80	0.000520126	0.002262740	0.001486222
85	0.000431607	0.002107681	0.001348211
90	0.000366290	0.002063801	0.001306880

Figure 29: 宇宙線の線量の天頂角分布

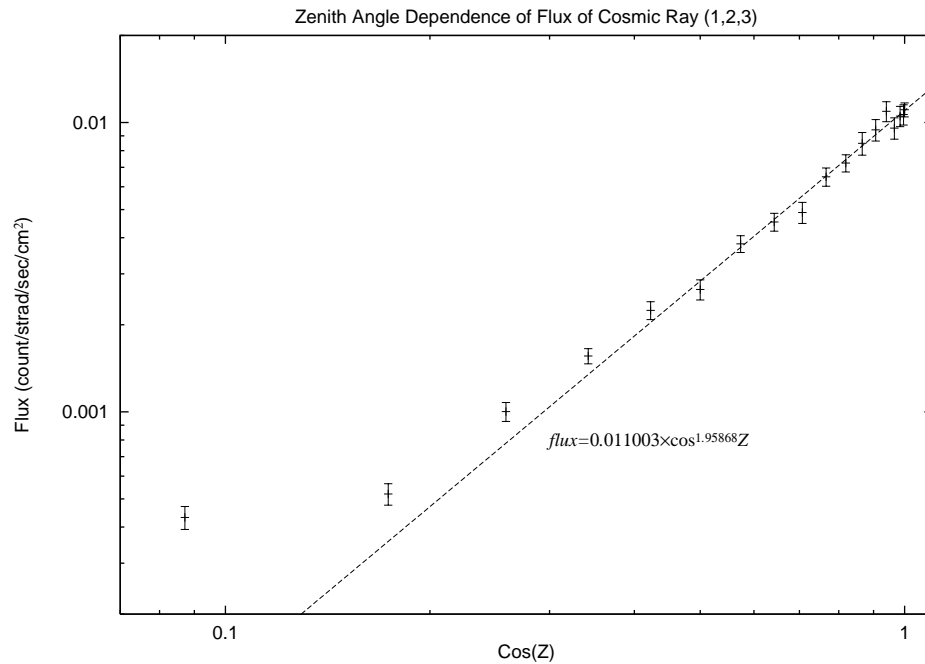


Figure 30: カウンター1,2,3により測定された宇宙線の線量

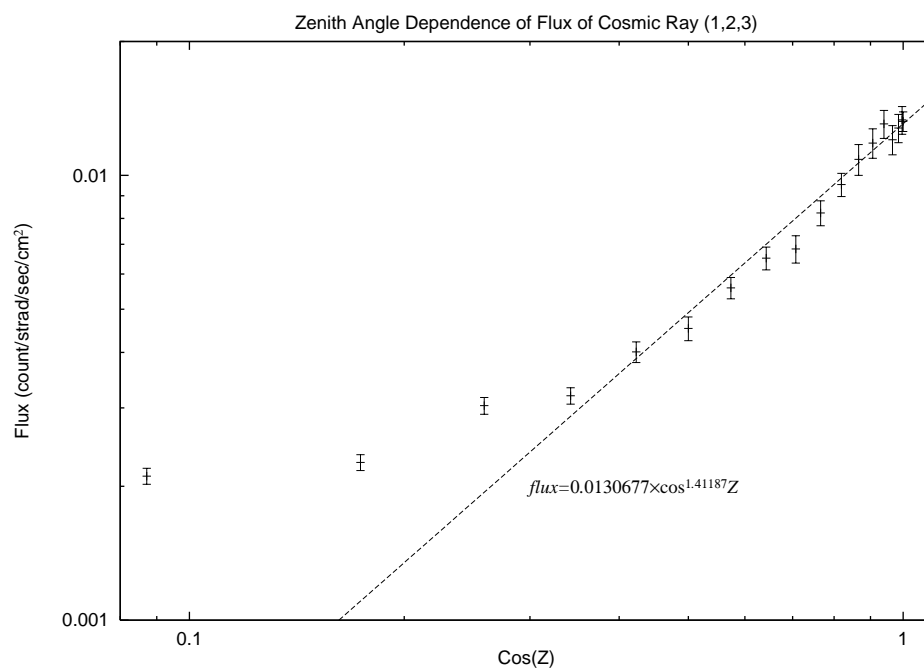


Figure 31: カウンター1,3により測定された宇宙線の線量

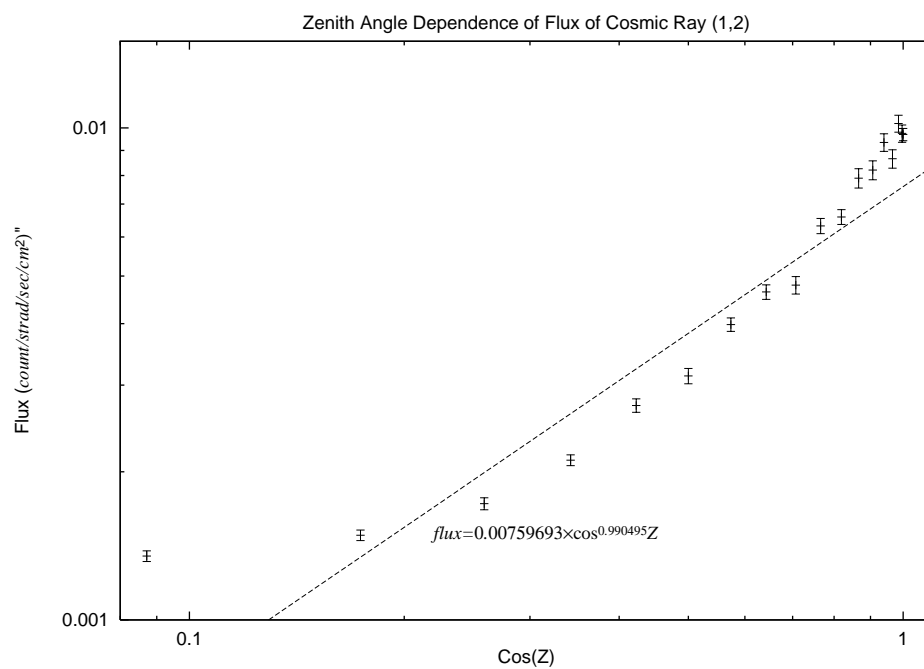


Figure 32: カウンター1,2により測定された宇宙線の線量

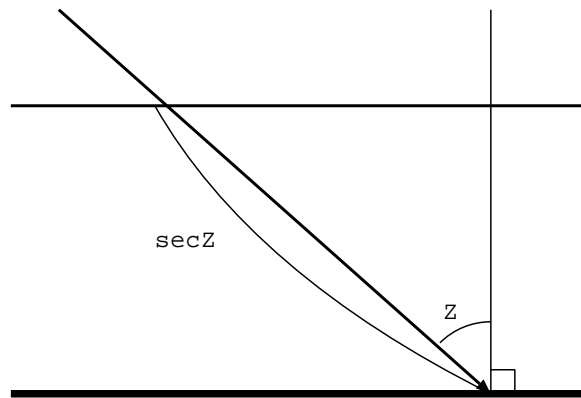


Figure 33: 大気量の天頂角依存

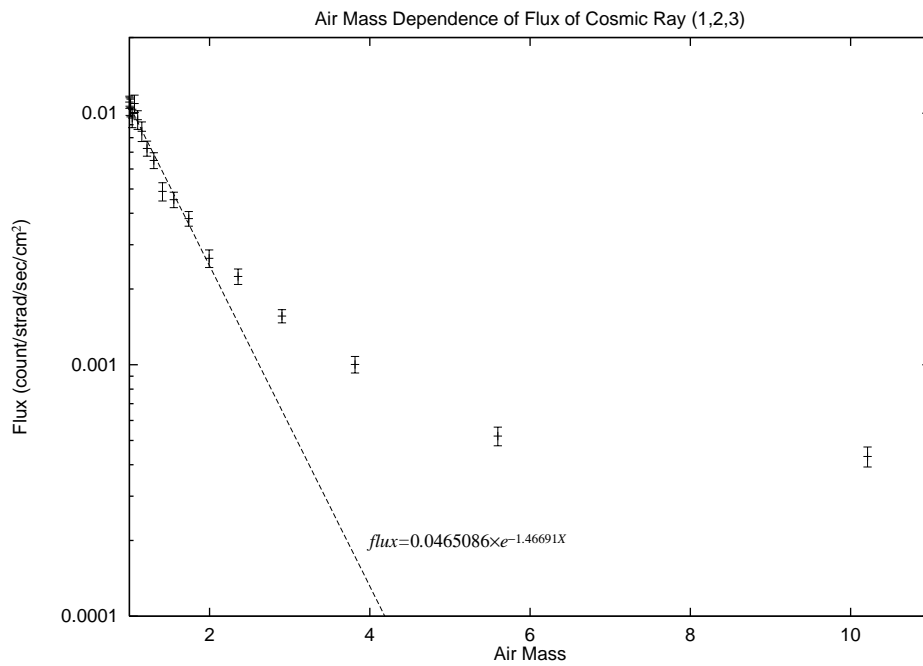


Figure 34: 宇宙線の線量の大气量依存(カウンター1,2,3)

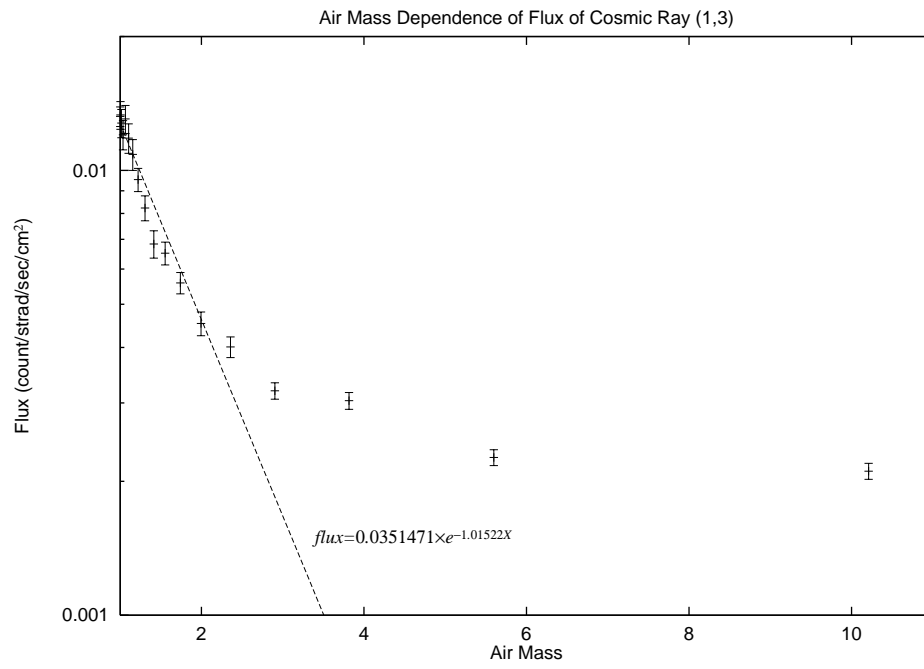


Figure 35: 宇宙線の線量の空気量依存(カウンター1,3)

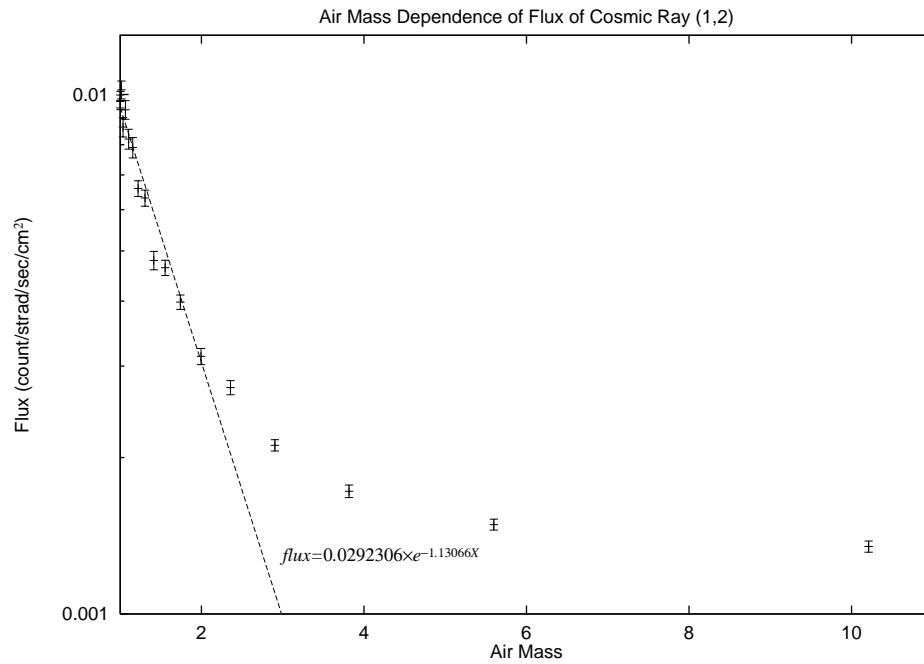


Figure 36: 宇宙線の線量の空気量依存(カウンター1,2)

$$\log F_{obs} = \log F - \alpha X$$

となり、横軸に大気量  $X$ 、縦軸に観測された宇宙線の線量  $F_{obs}$  を対数でプロットすれば直線になるはずである。その傾きが大気の吸収係数  $\alpha$  である。実際にプロットしたものが図 34 から図 36 に示す。

が、予想に反して Air Mass の大きなところでずれが見られる。直線上によくのっているのはおよそ  $Z = 60^\circ$  までである。

別の原因を考えなければならないようである。ある天頂角  $Z$  からの宇宙線を観測しているのだが、実際にはある幅  $\Delta Z$  があり  $Z \pm \Delta Z$  からの宇宙線を拾ってしまっている。これは  $Z$  が大きいところで影響が大きく効いてくるのかもしれない。

## 6 Conclusion

東北大学理学部泡箱写真解析施設にて宇宙線の線量の測定を行なった。測定は 1997年1月22日から29日まで、シンチレーションカウンターを使って行なわれた。求められた宇宙線の線量は天頂角  $Z = 0^\circ$  では  $0.011070720 \text{ count strad}^{-1}\text{sec}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 、 $Z = 90^\circ$  では  $0.000366290 \text{ count strad}^{-1}\text{sec}^{-1}\text{cm}^{-2}$  だった。宇宙線の線量には天頂角依存がみられた。その関係は  $F = 0.011003 \times \cos^{1.95868} Z$  であった。ただし、 $Z > 60^\circ$  ではその関係からのずれが見られた。原因はよく分からず、その説明は今後の課題である。

## References

- [1] 一瀬正巳誤差論培風館 1953
- [2] Clay R. W., Thornton G. J. 1980, Aust. J. Phys, 33, 607
- [3] Williams T., Kelley C. GNUPLOT An Interactive Plotting Program, 1993
- [4] Wall L., Shwartz R. 1993, Programming Perl
- [5] 奥村晴彦, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X入門, 1994
- [6] 素粒子実験グループ, 3年素粒子実験解説書 1995年度版
- [7] Shwartz R. L. 1995, Learning Perl
- [8] Kinoshita D., Fukushima H., Watanabe J., Yamamoto N. 1996, Publ. Astron. Soc. Japan, 48, L83
- [9] 山賀正人 gnuplot-3.6+の拡張機能の使い方 1996

## 7 宿題

### 7.1 矩形波の平均電圧

平均的な DC 電圧は

$$\frac{(1.0 - 0.5)\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} = \frac{0.5\tau_1}{\tau_1 + \tau_2}$$

である。

### 7.2 アンブランキング・ゲート

アンブランキングゲートは電子ビームが左から右に走るときに開くようになっている。これが開いたままだと、ブラウン管上には電子ビームが往復するのが見えることになる。

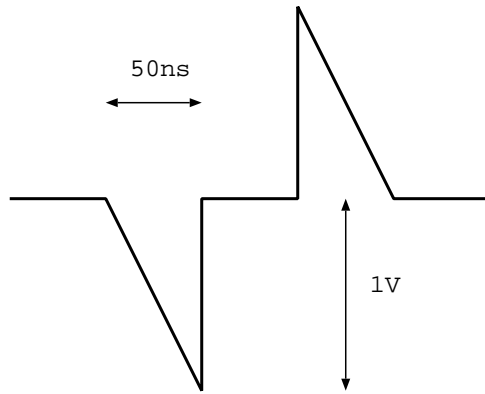


Figure 37:  $Z_L = 0\Omega$

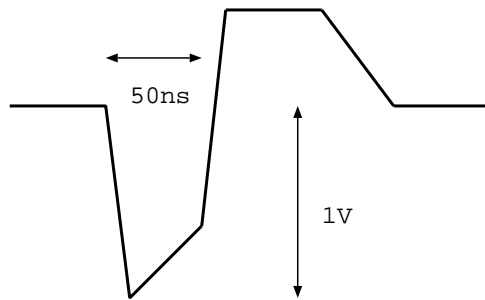


Figure 38:  $Z_L = 0\Omega$

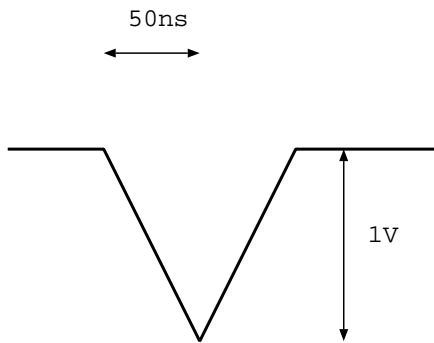


Figure 39:  $Z_L = 50\Omega$

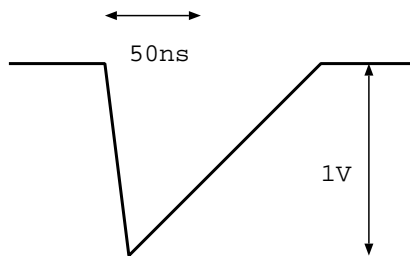


Figure 40:  $Z_L = 50\Omega$

### 7.3 パルス

パルスは5m伝わるのに50nsかかる。また  $Z_L = 0$  のとき反射は逆位相である。だからパルスはのように観測される。 $Z_L = 50\Omega$  のとき波形は元のままである。 $Z_L = \infty$  では同位相で反射される。パルスは次のようになる。

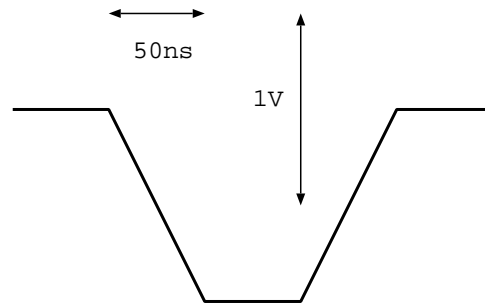


Figure 41:  $Z_L = \infty\Omega$

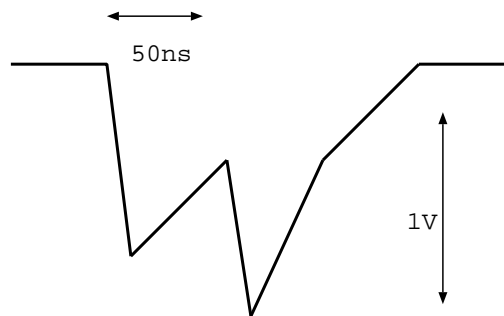


Figure 42:  $Z_L = 0\Omega$

### 7.4 パルス分割器

回路はターミネートされているから、無限に長いケーブルと考えていい。したがって、

$$R = \frac{50}{3} = 16.67\Omega$$

である。

### 7.5 パルスの電圧

### 7.6 出力パルスの波高値

大きい順に D, C, B, A である。

### 7.7 同時計数

A はふたつめのシンチレーターを通過していないので同時計数されない。B はノイズより大きな信号だが、ふたつめのシンチレーターを通過する際に端を通過しているので計数されないと考えられる。よって、同時計数されるのは C のみである。

## 7.8 HV Supply の電圧

電圧を上げていくと 1.85kV あたりから B も同時計数されるようになる。B がギリギリでカウントされるくらいがいいから、この辺が適切な電圧である。これ以上上げてても同時計数は増えない。しかも、ノイズレベルがしきい値を上回るため偶然同時計数が増加してしまう。1.75kV 以下だと B のような宇宙線は全くカウントされないの、C のように中央付近を通過するものしかカウントされず同時計数は非常に少なくなる。したがって、1.75 から 1.85 kV がプラトーである。

## 7.9 偶然同時計数の見積もり

偶然同時計数率  $N$  は

$$N = N_1 N_2 \tau$$

と書ける。ここで  $\tau$  は同時計数の時間幅で、この場合ディスクリミネーターの出力パルス幅  $\tau'$  が 10 ns なので

$$\tau = \tau' \times 2$$

である。したがって、偶然同時計数率  $N$  は

$$\begin{aligned} N &= 5 \times 10^5 \times 10^5 \times 20 \times 10^{-9} \\ &= 10^3 \text{sec}^{-1} \end{aligned}$$

となる。

## 7.10 偶然同時計数の補正

偶然同時計数  $N$  はカウンター 1,2 の単独計数をそれぞれ  $N_1, N_2$  とし、同時計数の時間幅を  $\tau$  とすると

$$N = N_1 N_2 \tau$$

なので、delay curve から  $\tau$  を見積もり、それぞれのカウンターの単位時間あたりの計数を測定すれば、偶然同時計数を計算することができる。真の同時計数は、測定された同時計数から偶然同時計数を引いたものである。

## 7.11 カウンターの数と偶然同時計数

カウンターを3個使った場合、カウンター1と2の偶然同時計数  $N'$  は

$$N' = N_1 N_2 (\tau + \tau)$$

なので3つのカウンターの偶然同時計数  $N$  は

$$\begin{aligned} N &= N' N_3 (\tau + \tau) \\ &= N_1 N_2 N_3 (\tau + \tau)^2 \\ &= 2 \end{aligned}$$

である。