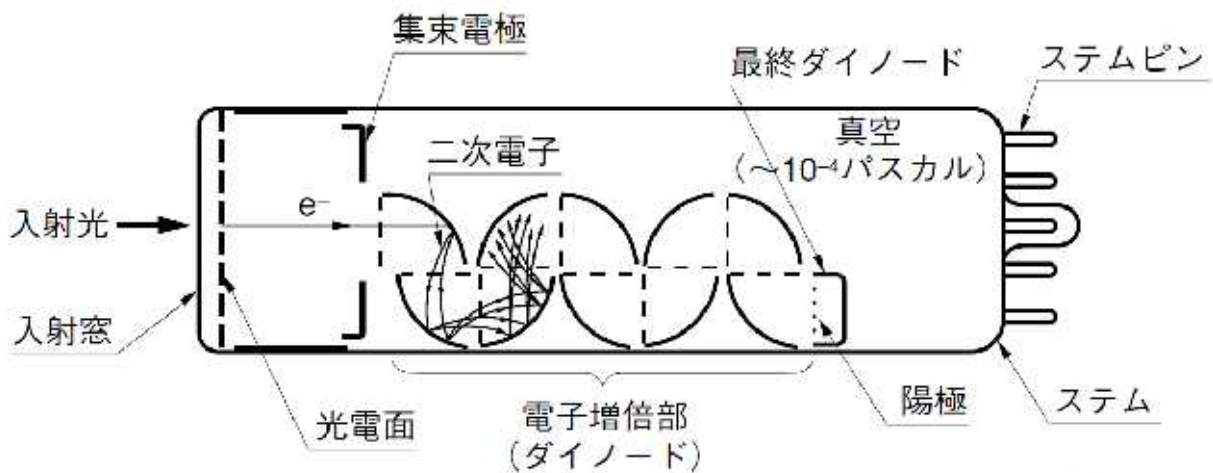


## - 概要 -

光電子増倍管(PMT: Photo Multiplier Tube)はガラス管に封じられた真空管で、入射窓、光電面、集束電極、電子増倍管、陽極から構成されている。PMTに入射した光は(1)ガラス窓を透過、(2)光電面内の電子を励起し光電子を放出、(3)光電子は集束電極で第一ダイノードに収束され、二次電子増倍された後、次々に各ダイノードで二次電子放出を繰り返す、(4)最終ダイノードで放出された二次電子群は陽極で取り出され信号出力される。光子検出法により単一光子領域での測定が可能である。高感度、高速動作、低ノイズなどが特徴的で、高エネルギー物理、天文学、医療診断(PET等)、血液分析、環境測定、バイオテクノロジー、その他の用途に広く使用されている。PMTの動作原理と特徴、LEDを用いた校正測定、性能評価測定について説明する。

## 1. 光電子増倍管



THBV3 0201JA

図1. 光電子増倍管の構造

光電子増倍管(以降 PMT)は入射窓、光電面、ダイノードから構成されて、内部を真空管で密封している(図1)。本測定で評価する PMT は浜松ホトニクス株式会社が開発した H11611 である。これは有効感度面積直径 2 インチ(約 50 mm)、バイアルカリで構成された光電面、そしてラインフォーカス型ダイノードを持つ型番 R329 を読み出し回路と磁気シールドを装備したアッセンブリである。入射窓はクォーツを材料に使用しており、可視光領域の透過性は良いが、紫外線領域(300 nm 以下)は吸収され透過性は悪い。バイアルカリの光電面はおもに 300 ~ 600 nm に感度を持ち、量子効率が最大 25% である(図2)。ラインフォーカス型ダイノードはヘッドオン型光電子増倍管に用いられ、光電子の収集効率が良い。検出効率、出力の一様性とともにより優れ、時間応答特性が比較的早い(ns)。

R329 シリーズは高エネルギー素粒子・原子核物理学実験の分野で 80~90 年代に開発され、現在まで愛用されている。この業界では比較のための従来型 PMT としてこれを指す場合もある。

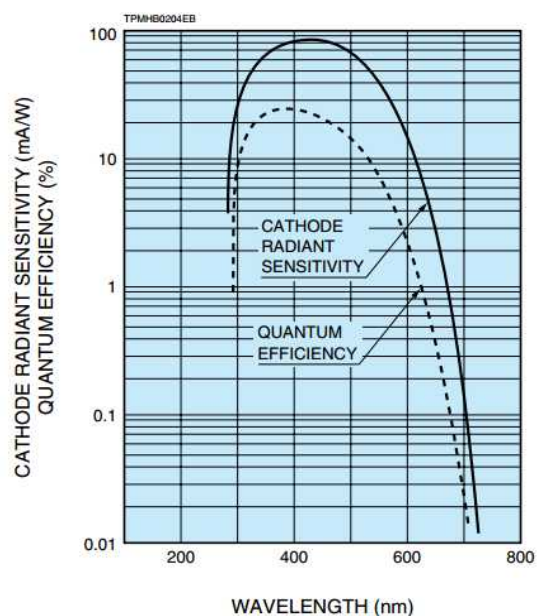


図2. R329 の量子効率

## 2. 増幅率

二次電子放出比  $\delta$  はダイノード間の電圧  $E$  の関数であり、次の式で表される。

$$\delta = \alpha E^k \quad (1)$$

ここで  $\alpha$  は定数、 $k$  は電極の構造・材質で決まり、 $0.7 \sim 0.8$  の値をとる。光電面から放出された光電子流  $I_k$  は、

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \quad (2)$$

第一ダイノードに入射して二次電子流  $I_{d1}$  を放出する。この時の第一ダイノードにおける二次電子放出比  $\delta_1$  は次の式で表せる。

さらに電子は第2、第3ダイノードへとカスケード的に増幅される。以降第  $n$  段目の二次電子放出比  $\delta_n$  は

$$\delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}} \quad (3)$$

とあらわせる。光電子増倍管の第ノードの数を  $n$  とすると、等分割デバイダの場合、ゲイン  $\mu$  の印可電圧  $V$  に対する変化は次式になる。

$$\begin{aligned} \mu &= (\alpha \times E^k)^n \\ &= \alpha^n \times \left( \frac{V}{n+1} \right)^{kn} \\ &= A \times V^{kn} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし  $A = \alpha^n / (n+1)^{kn}$  とする、この式から、ゲイン  $\mu$  は印可電圧  $V$  の  $kn$  乗に比例することがわかる。一般に印可電圧をあげるとゲインは高くなる。

## 3. LED による光電子増倍管の校正測定と性能評価測定

### 3.1. セットアップ

本測定のためのセットアップを図3に示す。PMT は HV Supply から電圧供給され、アノードからアナログ信号を出力する。Funcion Generator から幅 40 ns、可変電圧のパルス波を LED に送信し発光させる。Func. Gene. はパルス波と同時に sync から TTL 規格のデジタル信号を出力する。TTL-NIM で規格を変換した後、Discriminator で ADC GATE 幅を 50 ns に調整する。この ADC Gate 内に PMT の信号が存在するように Delay でタイミングを調節する。それぞれの信号を CAMAC ADC の適性のコネクタに入力する。このときの ADC GATE がデータ収集のトリガーとなり、これで得られたデータは LED が光った時の PMT の応答を意味する。ADC は CAMAC のクレートのバックヤードで CRATE CONTROLLOR とつながっており、PC で制御される。

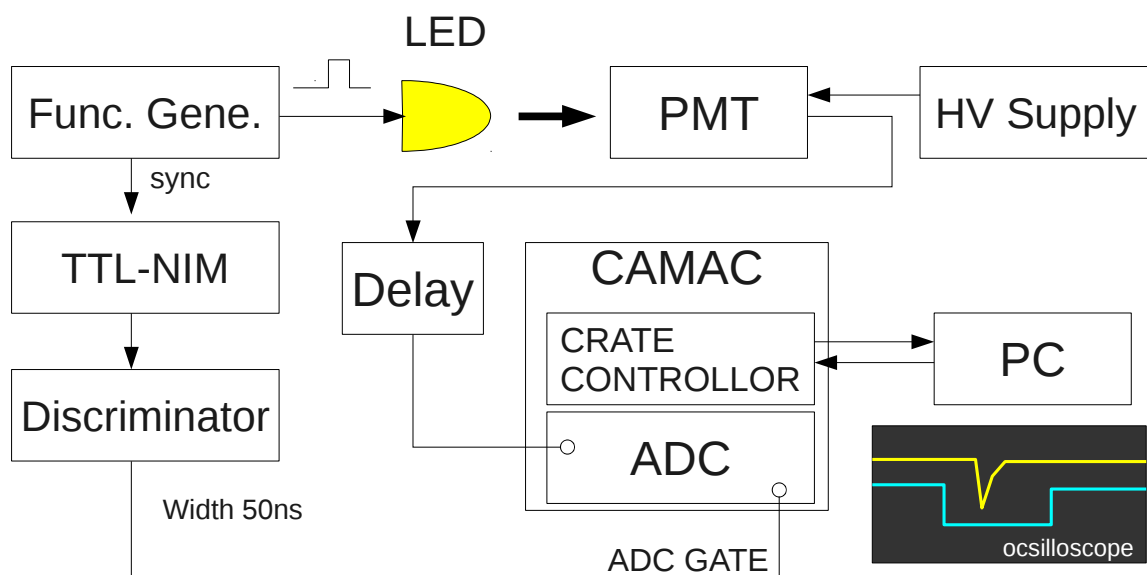


図3. PMT キャリブレーション測定の回路セットアップ

### 3.2. 単一光子領域

PMTにLEDからの光を当て、その時の応答をCAMAC ADCで波形積分してデジタル化する。光量を増やすと出力の平均値が大きくなるが、光量を減らしていくとある領域でペDESTAL事象(光を感じない事象)が確認できる。これはPMT光電面での量子効果が現れてくるためである。この領域を単一光子領域という(図4)。単一光子領域での光量変化は離散的にピークが見えてくる。ペDESTALのすぐ隣のピークを単一光子ピークといい、1 p.e.に相当する。ペDESTALと単一光子ピークの差が増幅率に対応する。式(4)から増幅率 $\mu$ は供給電圧 $V$ の増加に従って増加傾向である。電圧 $V$ を固定したときADC分布のペDESTAL平均値 $M_{ped}$ と単一光子ピーク平均値 $M_{peak}$ を用いて増幅率 $\mu(V)$ は

$$\mu(V) = \frac{(M_{peak} - M_{ped})C_{ADC}}{|e|} \quad (5)$$

と表せる。ここで使用したCAMAC ADCは豊伸電子C009 S/N 9127で、変換係数は $C_{ADC} = 0.282 \pm 0.001$  pC/ADCである。 $e$ は素電荷 $1.6 \times 10^{-19}$  Cである。増幅率の誤差 $\sigma$ は統計誤差 $\sigma_{stat}$ と系統誤差 $\sigma_{sys}$ の2つから導く。0 p.e.と1 p.e.のピークをフィッティングしたガウス関数のそれぞれの標準偏差を $s_{ped}$ と $s$ とする。全イベント数を $N$ とすると、統計誤差は

$$\sigma_{stat} = \frac{s + s_{ped}}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

と評価できる。図4に示すように単一光子領域で、3種類の光量変化は1 p.e. ピークの平均値に多少ゆらぎが存在する。この標準偏差 $s_{LED}$ を系統誤差として評価する。光量変化数を $n_{LED}$ とすると系統誤差は

$$\sigma_{sys} = \frac{s_{LED}}{\sqrt{n_{LED} - 1}} \quad (7)$$

と評価できる。したがって、最大誤差は統計および系統の伝播で表されるので、

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{stat}^2 + \sigma_{sys}^2} \quad (8)$$

と評価する。

#### H1161: ADC Distribution

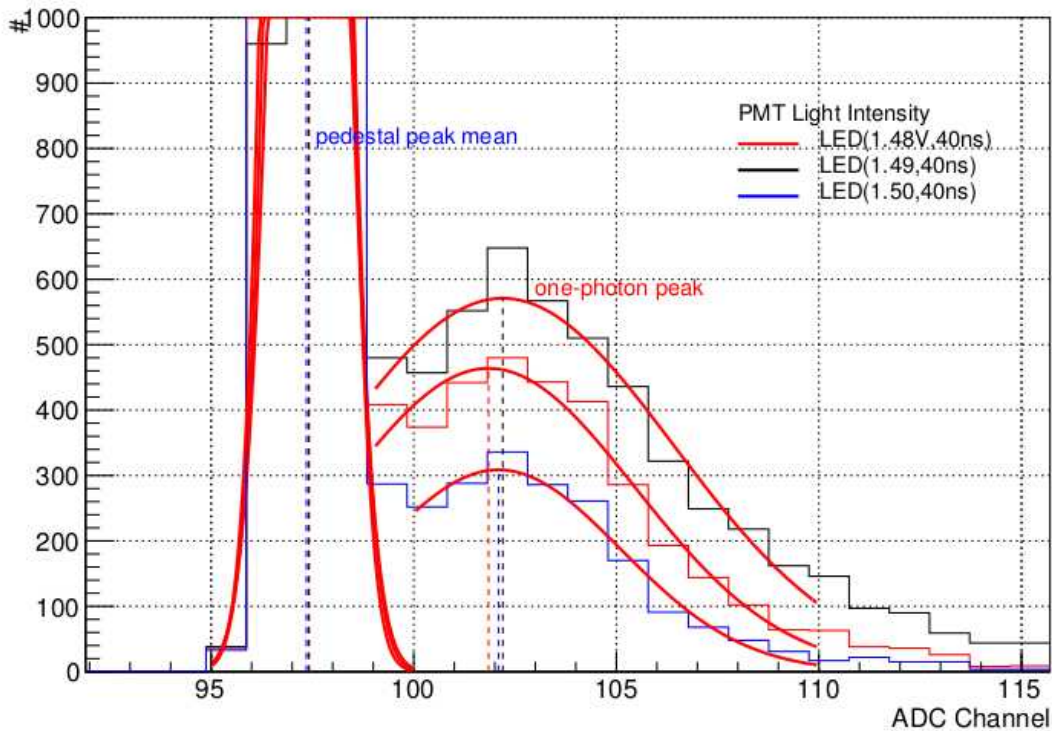


図4. PMTの単一光子領域におけるADC分布:3種類の光量におけるPMT H1161 RA6601のHV1800Vの応答。

### 3.2. ノイズ頻度とノイズ比

ADC 分布から p.e. 分布に座標変換することで必要としていた物理量が見えてくる。これには、事前に ADC のペDESTAL 平均値  $M_{ped}$  と PMT の増幅率  $\mu(V)$  は測定されているとする。このときの PMT 出力値  $M$  は光電子数

$$N_{p.e.} = \frac{(M - M_{ped})C_{ADC}}{\mu(V)|e|}$$

に相当する。一般に光を検出する／しないは 0.5 p.e. をしきい値で決定される。

光電子増倍管は光検出器のなかでも熱雑音が比較的少ない(ランダムで数 kHz 程度)。この頻度をノイズ頻度という。電圧を供給した直後は雑音が多く、PMT の出力ピーク電圧値 -25 mV しきい値でノイズ頻度は 1 - 10kHz が確認され、数十分すると徐々に 100 - 300 Hz へ落ち着く。普通実験では、PMT は粒子反応事象と同期される。そのタイミング(幅 50 - 200 ns の間)に検出された熱雑音の割合をノイズ比という。ノイズ比は光源が発光していない全事象における PMT の誤認識事象の割合で測定される。

$$\text{ノイズ比}[\%] = \text{誤認識事象} \div \text{全事象数}.$$

また、ノイズ頻度とノイズ比の関係は以下に示すことができる。

$$\text{ノイズ頻度}[\text{Hz}] = \text{ノイズ比} \div \text{積分幅}[\text{s}].$$

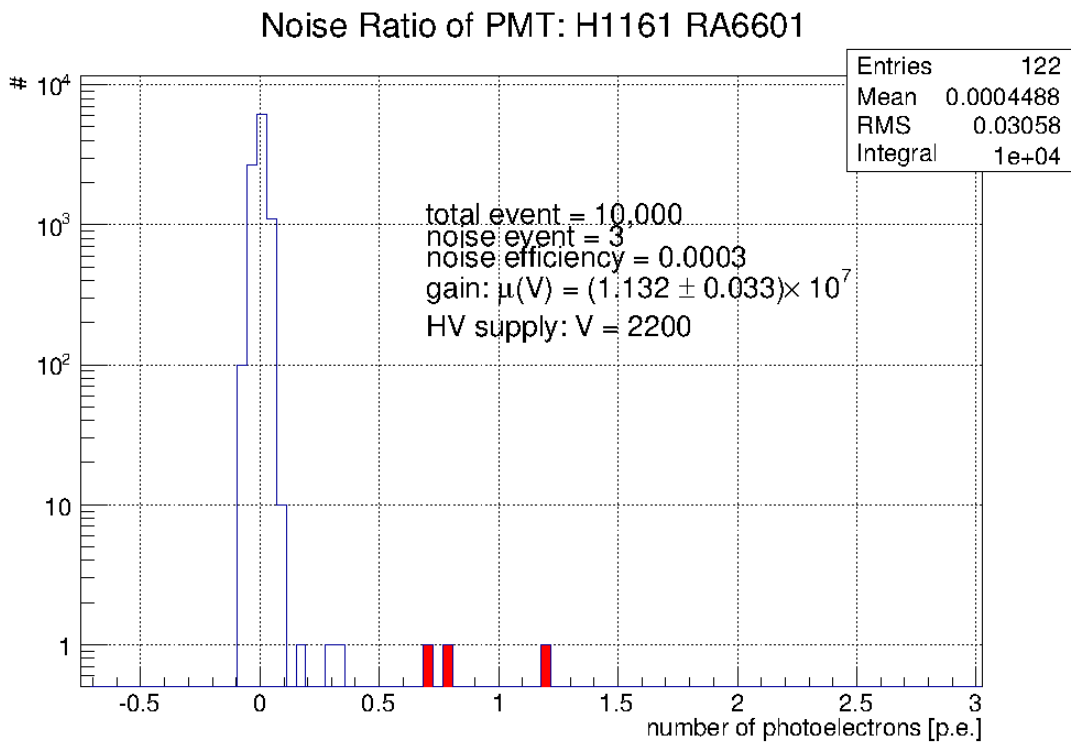


図5. LED 消灯したときの PMT の応答。LED 光源以外からのしきい値 0.5 p.e. を超える信号を雑音としてみなし、全事象数における雑音事象数の比をノイズ比という。HV2200 V におけるノイズ比は 0.03% と評価できる。ノイズ頻度は ADC GATE の時間幅 50 ns の商なので 6 kHz である。全事象数 1 万では雑音の評価するには統計数が足りていないことを言及しておく。

### 3.3. 結果

#### (1) 増幅率のHV依存性

PMT1: H1161 RA6601

HV	Gain	error_stat	error_sys	error
1800	8.20E+06	8.70E+04	2.29E+05	2.45E+05
1900	1.41E+07	1.03E+05	2.60E+05	2.80E+05
2000	2.18E+07	1.25E+05	6.14E+05	6.27E+05
2100	3.07E+07	1.91E+05	2.48E+06	2.48E+06
2200	4.25E+07	2.76E+05	1.22E+06	1.26E+06
2300	5.98E+07	3.51E+05	2.39E+06	2.42E+06
2400	8.02E+07	4.30E+05	1.82E+06	1.87E+06

PMT3: H1161 RA6862

HV	Gain	error_stat	error_sys	error
1800	1.73E+07	1.10E+05	4.26E+05	4.40E+05
1900	2.67E+07	1.48E+05	6.70E+05	6.86E+05
2000	4.03E+07	2.12E+05	1.36E+06	1.38E+06
2100	5.86E+07	2.56E+05	1.17E+06	1.20E+06
2200	8.06E+07	3.71E+05	1.03E+06	1.10E+06

PMT2: H1161 RA7279

HV	Gain	error_stat	error_sys	error
2000	4.90E+06	5.00E+04	2.90E+05	2.94E+05
2100	7.51E+06	5.40E+04	3.50E+05	6.50E+04
2200	1.08E+07	6.30E+04	1.06E+05	1.23E+05
2300	1.44E+07	7.60E+04	2.86E+05	2.96E+05
2400	1.92E+07	9.10E+04	1.82E+05	2.03E+05
2500	2.45E+07	1.02E+05	4.73E+05	4.84E+05

PMT4: H1161 RA6786

HV	Gain	error_stat	error_sys	error
2300	9.86E+06	7.30E+04	2.26E+05	2.37E+05
2400	1.21E+07	9.60E+04	3.90E+05	4.01E+05
2500	1.64E+07	1.05E+05	3.41E+05	3.57E+05

#### (2) 二次電子放出比の定数 $\alpha$ , k

	H1161シリアル				
PMT1	RA6601	$\alpha$	0.16	$\pm$	0.16
		k	0.64	$\pm$	0.01
PMT2	RA7279	$\alpha$	0.20	$\pm$	0.19
		k	0.58	$\pm$	0.01
PMT3	RA6862	$\alpha$	0.17	$\pm$	0.18
		k	0.64	$\pm$	0.02
PMT4	RA6786	$\alpha$	0.13	$\pm$	0.14
		k	0.51	$\pm$	0.01

#### (2) 雑音比・雑音頻度

PMT1 H1161 RA6601			PMT3 H1161 RA6862		
HV	雑音比	雑音頻度[kHz]	HV	雑音比	雑音頻度[kHz]
1800	0.13%	26	1800	0.00%	0
1900	0.00%	0	1900	0.00%	0
2000	0.00%	0	2000	0.00%	0
2100	0.00%	0	2100	0.00%	0
2200	0.03%	6	2200	0.01%	2
2300	0.00%	0			
2400	0.05%	10			
PMT2 H1161 RA7279			PMT4 H1161 RA6786		
HV	雑音比	雑音頻度[kHz]	HV	雑音比	雑音頻度[kHz]
2000	12.49%	2498	2300	0.03%	6
2100	0.05%	10	2400	0.00%	0
2200	0.00%	0	2500	0.00%	0
2300	0.01%	2			
2400	0.05%	10			
2500	0.01%	2			

### 考察:

HV-Gainの結果から実験で使用するために増幅率を揃える。だいたい $5 \times 10^6$ になるためにはPMT1, 2, 3, 4の適性電圧は2000, 2400, 1800, 2500 Vである。 $10^7$ に合わせるためには、PMT2, 4を他の良い性能のPMTに変更する必要がある。供給電圧1800 – 2200 Vの領域で増幅率が $10^7$ 程度の使えるPMTは二次放出比の定数kの値が0.6 ~ 0.7にある。良い性能のPMTとして評価する条件として定数kの範囲を設定することも考慮すべきである。

今回の測定では供給電圧を100V毎に変えていったデジタル回路の値は誤差として $\pm 1$ の精度(1%)に対して増幅率の誤差(約5 – 10%)が大きい。20V毎に変えて測定すれば(精度5%)、詳細にHV-Gainの関係性が見え、二次放出比の定数 $\alpha$ とkを精度よく導けるだろう

供給電圧が大きい時にペDESTALと1 p.e.の間にテイルを引いた領域が存在している。これらはペDESTALからのテイルと考えられる。しかし、LED消灯時には、雑音としては観測されなかった。これらを考えると、おそらく、光電子が発生したが第1ダイノードで増幅しきれなかった事象ではないかと考えられる。第1ダイノードでの二次放出比はカソードからの光電子の運動エネルギーまたは、光電子のとび出す方向に依存するはずである。ガウス分布に指数関数が組み合わさったような関数が考えられることで、3つの分布をガウス+指数関数でフィッティングした結果を図6に示す。それぞれの指数関数は $A \exp(-(x-\mu)/\lambda)$ の肩 $\lambda$ は、(1) 9.32, (2) 11.44, (3) 16.69で光量増加に従って傾きが緩やかになる。これは、光量が2 p.e., 3 p.e.における増幅しきれなかった事象が現れてくる。

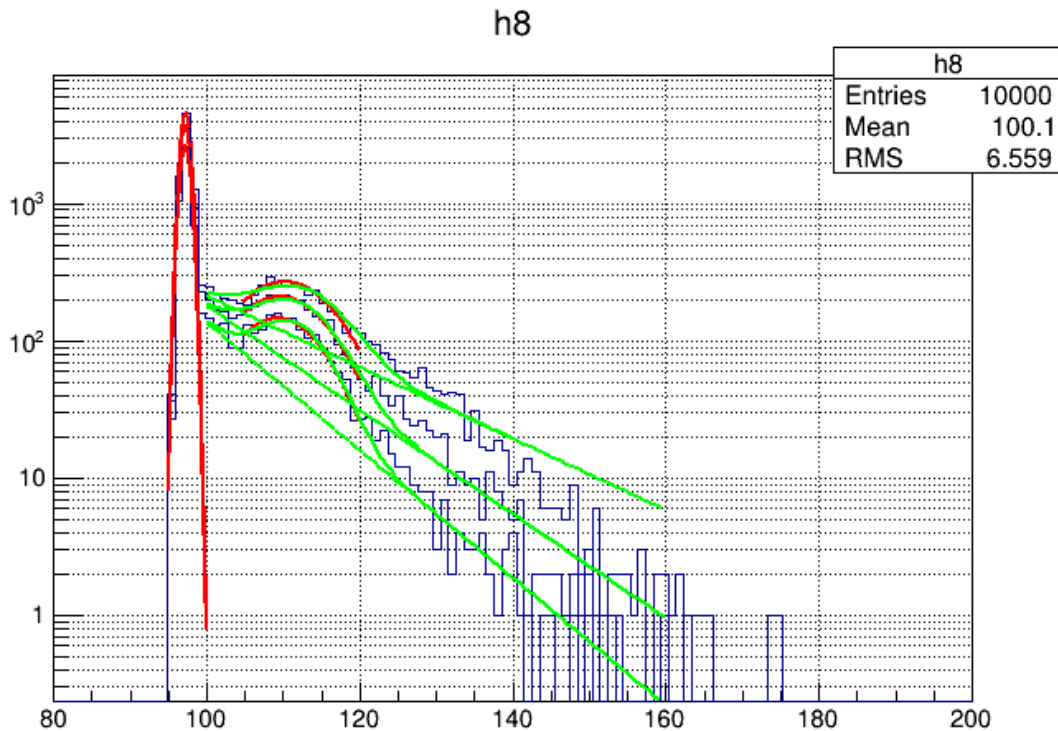


図6. LED光量増加におけるPMTの供給電圧が大きい時のADC分布。ペDESTALの後方にテイルを引いている。

### 結論:

H1161シリーズのPMTを4台校正測定した。正常には動作したが、2台は1800 ~ 2400Vの供給電圧で増幅率 $(0.5 \sim 1.0) \times 10^7$ の良い性能をもち、もう2台は増幅率が低く、 $10^6$ 程度であった。LED消灯時での雑音測定では統計数が足らなかったが、雑音比0.1%未満、雑音頻度はkHz程度であった。二次放出比定数であるkが4台中良いものと、悪いものを区別できる一つの指標ではないかと考えられる。PMTには第1ダイノードで正常に増幅しきれない事象がいくつか存在することがわかった。これは指数関数的な確率で存在していることがフィッティングの結果で予測できた。

付録: HV – Gain 曲線

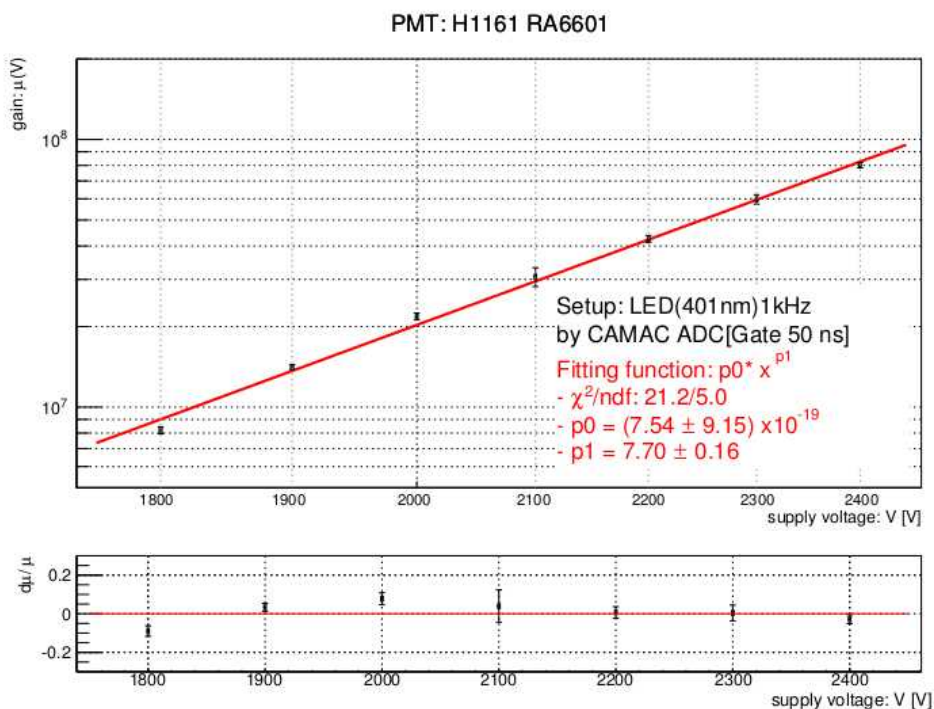


図 8. PMT 1 の HV-Gain 曲線

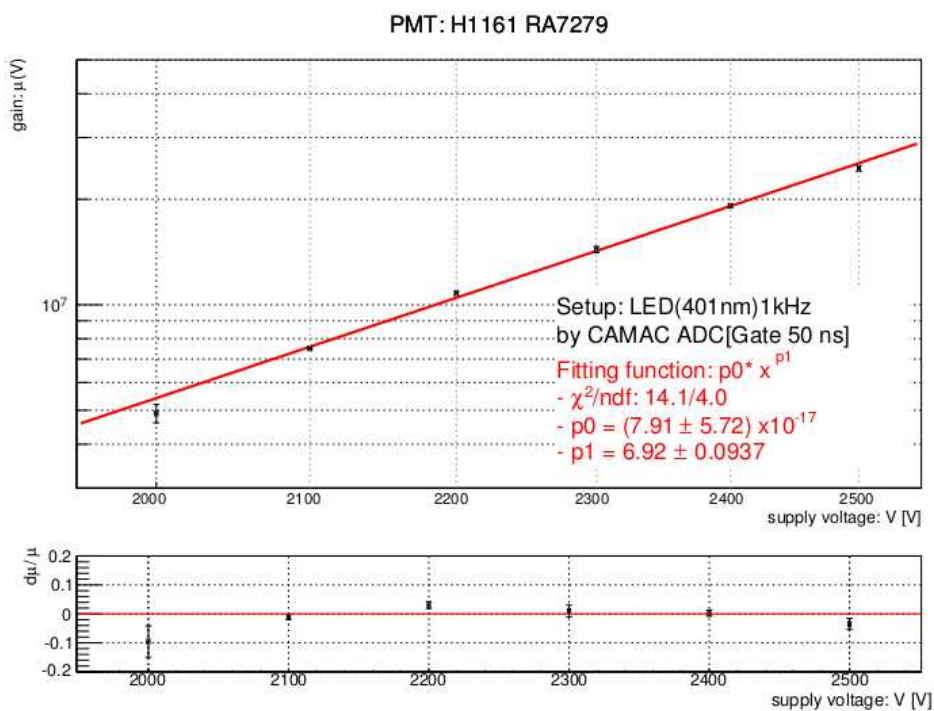


図 9. PMT2 の HV-Gain 曲線

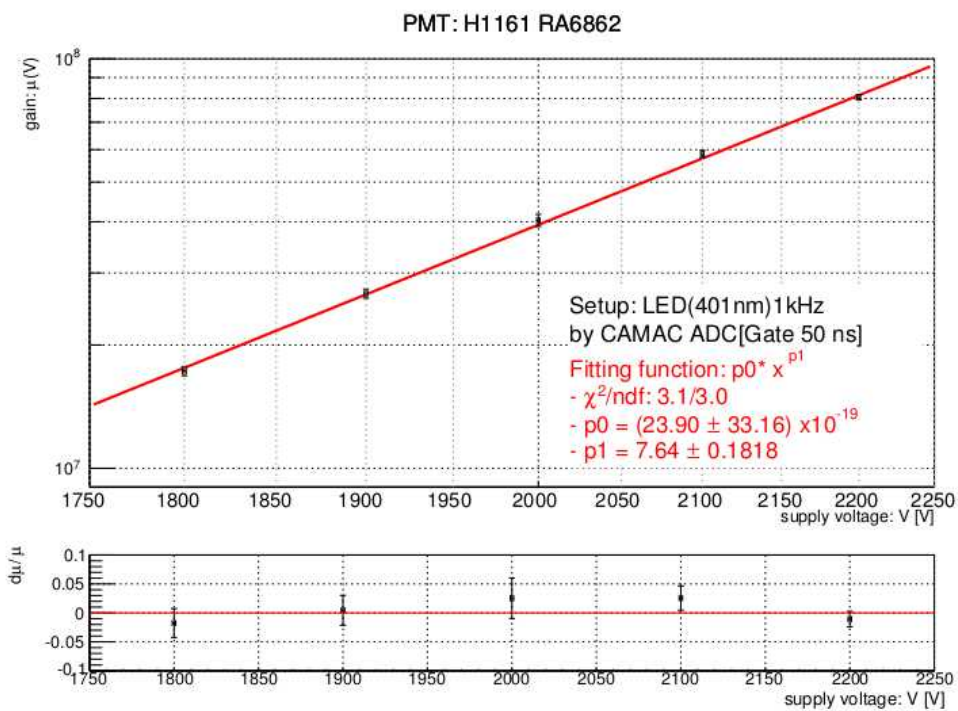


図 10. PMT3 の HV-Gain 曲線

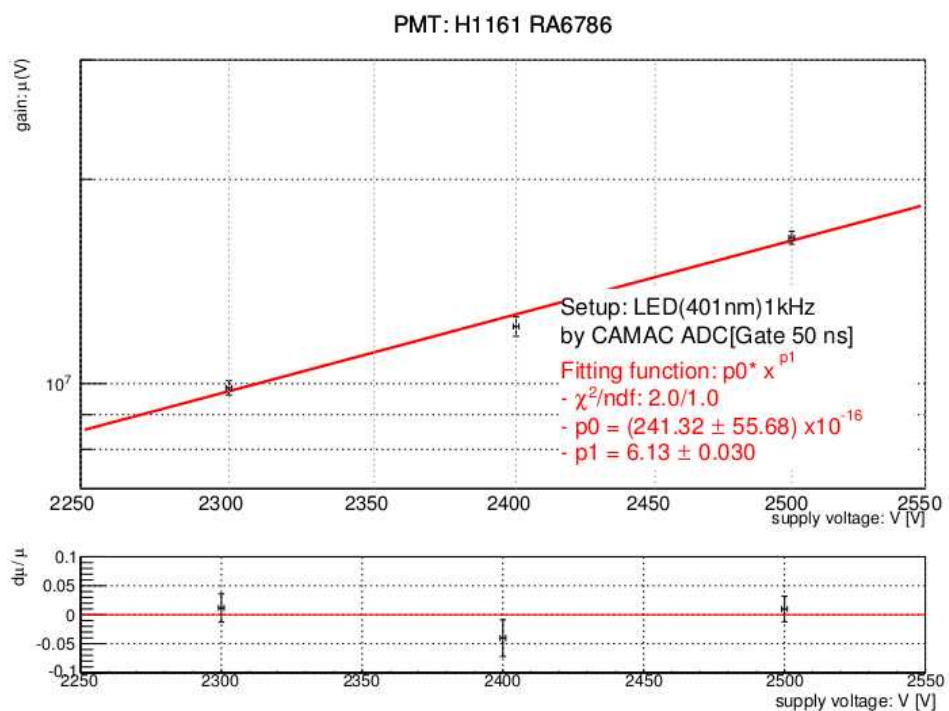


図 11. PMT4 の HV-Gain 曲線