Single Photoelectron LED System(SPL) Vol.02
装置概要

藤野屋 大樹　　飯嶋 晶子　　板谷 道隆

平成 13 年 6 月 19 日

1　目的

Photomultiplier Tube(PMT) の性能を評価する際に、Single Photon Peak を分離する事が可能かどうかどうかでその分解能を評価する場合が多い。今までは NaI や Fiber Reading により Plastic Scintillator からの Scintillation 光を用い、測定の度に異なった測定方法で PMT を評価してきた。しかし NaI を使用した場合には使用する線源に依存したエネルギー分布 (線源から放出される異なったエネルギーの放射線数や放射線の種類による) があり、単一エネルギー光源として使用するには減光などに困難な点があった。また Fiber Reading を利用した場合には Setup の再現が困難である点や Fiber が折れ易いなど Setup の信頼性等に問題があった。その他にも Dark Current が多い PMT の特性を測定しようとした場合に、Photoelectron による Event の Event Rate を調整できない点が問題となった。そのため複数回使用しても物理的に安定な光源と高い Event Rate を獲得する事を目的とし、LED を使用し PMT を定量的に評価する事ができる System の開発を目指した。

2　装置概要

2.1　使用部品

1. LED
   Blue LED × 1
   Green LED × 1
2. 抵抗
   100 [Ω] × 4
3. CABLE
   Lemo cable × 2

4. 光学 fiber
   エスカ (三菱レイヨン SH4001)

5. 減光材
   Nikon filter　ND8 × 2
   プリンター用紙 × 4∼5 (後に削除)

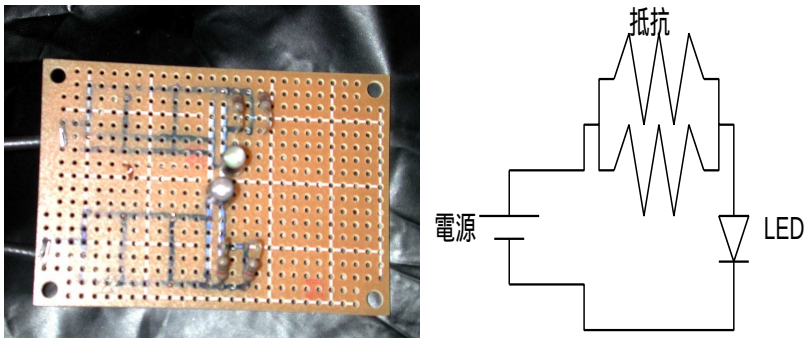

図 1: 基盤と LED
基盤中央に二種類の LED を設置し、CLOCK GENELATOR からの TTL 信号によって LED が発光している。

2.2　構成

Lemo cable から入力した TTL 信号により LED を周期的に発光させ、青色もしくは緑色の光を発生させる。LED から発せられた光子をプリンター用紙 4∼5 枚とカメラ用光学 filter を用いて適度に減光し、読み出し用 fiber の端から fiber に光子を入射させる (プリンター用紙は後に撤去した)。読み出し用 fiber の他端を PMT の入射窓へ取り付け、光子を光電面へ入射させる事により Single Photoelectron Peak の測定を行う。

PMT の分光感度は 300[nm]∼650[nm] の領域で高い値が得られる。実際の測定における Scintillation 光の波長領域と Wavelength Shifter の波長領域 (480[nm]∼550[nm]) から Blue と Green の二つの LED を選択できるようにした (図 1、2)。また PMT 毎に fiber の取り付け誤差を少なくする為、今回に限り PMT 磁気シールドの直径と同じ径のプラスチック製ジグを使用し、このジグの中心に fiber を通し固定した。さらに PMT へ入射する光子の量を稼ぐ為、fiber の端面を焼き入れによって処理した。

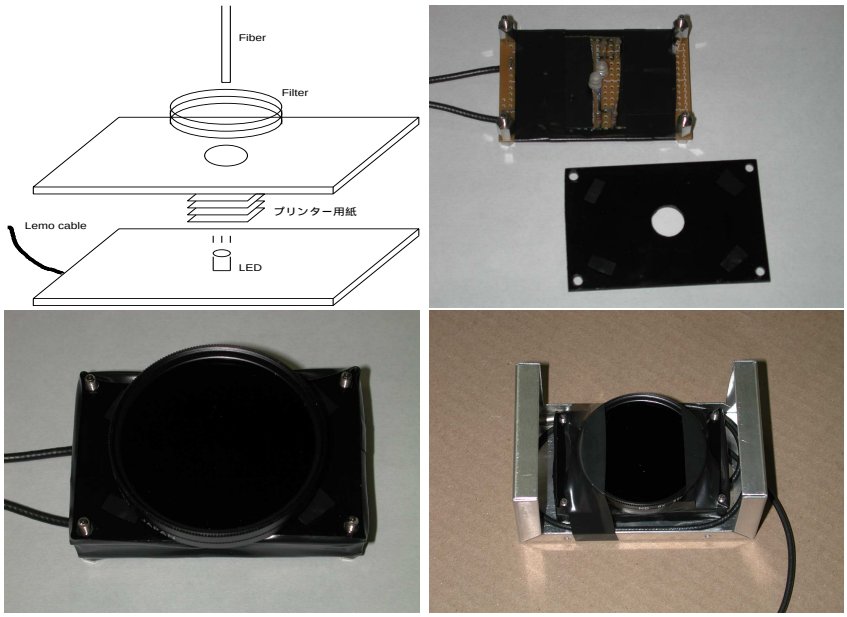

図 2: 装置構成

2.3 使用方法

Blue LED と Green LED には別々の Lemo cable がつながっている。測定に使用したい色の LED につながっている Lemo cable に適当な周期、Width の TTL 信号を入力し、読み出し用 fiber から得られる光子のスペクトルを測定する。

TTL 信号の周期を決定する場合には、

1. q-vt や camac など使用する Data-taking で許される範囲を超えない。

ように値を選択しなくてはならない。また Width では、

1. Gate 幅よりも発光時間を短くする。
2. LED の発光時間特性による影響を少なくする。

為にできるだけ短く (数十ナノ程度に) しなくてはならない。

3 光量の検証

3.1 測定方法

光電面に LED から発せられた光子を入射さた時にどの程度の光量が得られるかをテストする為、 2 種類の PMT(H1161、R392EGPX) に Blue LED

からの青い光を入射し同条件で測定を行った。最初に Single Photoelectron Peak を分離可能である事が事前に確認されている H1161 を使用し、光電面から放出される Photoelectron 数が 1 個前後となるように光量を調子した。次に E391a 実験 FDC(Front Barrel) に使用が予定されている R392EGPX でも同様の測定を行った。

3.2 測定結果

以下に H1161 と R392EGPX に同量の光を入射させたヒストグラム (図 3) を示す。同じ光量を与えた場合でも量子効率の違いによって得られる Photo-

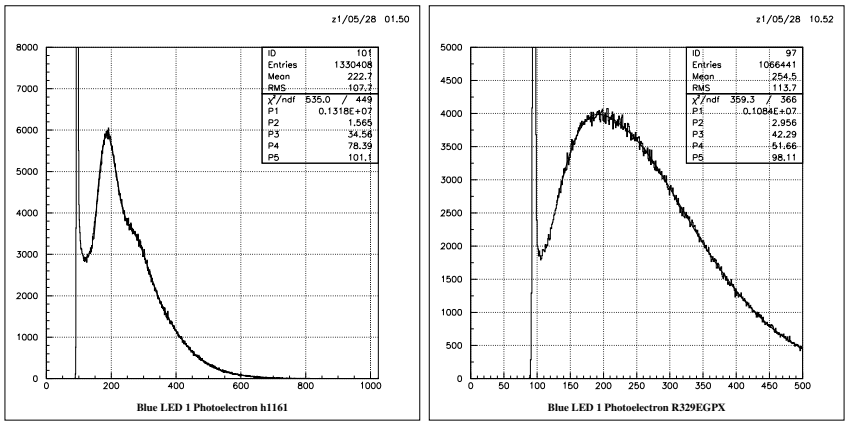

図 3: ヒストグラム 1
プリンター用紙 4 枚 Logic1

electron 数に違いがあることが分かる。R392EGPX では平均光電子数 3 個程度の光量を得られたので減光材のプリンター用紙を更に一枚増やし、同じ印加電圧で測定を行った (図 4)。プリンター用紙を増やした結果、平均光電子数は 1.5 個程度と Single Photoelectron Peak を特定するのに適度な値へ下げる事ができた。(プリンター用紙によって入射する光量を調整したが、Attenuator によって光量を調整する事が可能である。)

3.3 考察

LED の発光量を調整する事かできれば、Single Photoelectorn を安定して発生させる装置を作る事が可能である事が分かった。また測定結果から同じ量の光を入射させた場合でも PMT によって得られる Photoelectron 数に違いが出る事が分かった。これは光電面素材や形状によって量子効率が異なる事を表していると考えられる。したがってこの装置を使用する場合には、PMT

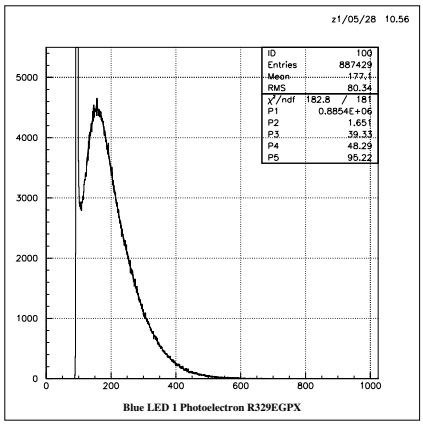

図 4: ヒストグラム 2
プリンター用紙 5 枚 Logic2

の光電面特性に合わせ光量を調整する必要がある。今後この装置を改善するには filter やプリンター用紙によって光量を調整するのではなく、外部から電気的に光量を調整する事ができるようにすると使用範囲が広がると思われる。(後に Attenuator を使用する事によってこの問題を解決する事が可能である事が分かり、7 節に Attenuator の減衰率を示す。)

4 回路の実用性

次に実際測定を行った二つの Logic を示す。Logic1 は一番始めに使用した Logic であるが、いくつかの問題点があり、最悪な場合 PMT を破壊しかねない Logic で実用的ではなかった。そこで Logic1 の問題点を改善するため新たに Logic2 を作り、より詳しい測定を行った。

4.1 Logic1(使用不可)

LED System を制作した当初、LED から得られる Photoelectron 数が適当であるかを確認する為に作った Logic(図 5) である。Clock Generator Fixed Output TTL 出力を LED への入力とし、Trigeer には同 Clock Generator から出力される同周期の NIM 信号を Gate に用いた構成である。(Fixed Output からの信号は Width が固定されている為変更はできず、マニュアルなどの記載により確認する事ができなかった。) また Logic1 の段階では fiber から入射する光子数を減らす為にプリンター用紙を用いていた。

この Logic1 では Fixed Output を使用していた為

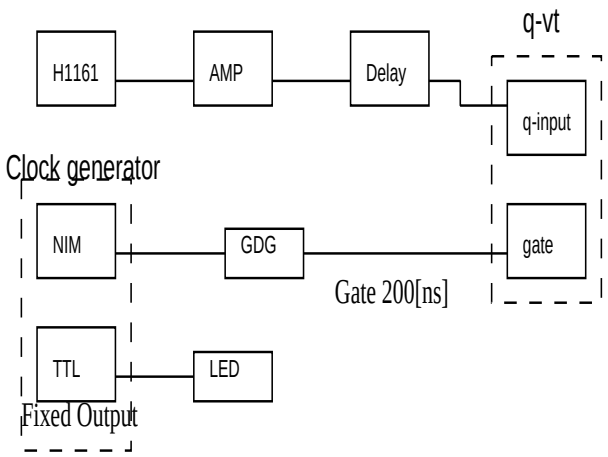

図 5: Logic 1

Clock Generator からの TTL 信号を LED に入力し、NIM 信号を Gate として Single Photoelectron の測定を行った。

1. Fixed Output から出力されるパルスの Width が非常に大きい為 LED の発光時間が長く、LED が常に発光しているのと変わらない状態であった。
2. Fixed Output の Width に対し Gate 幅が小さい為 LED が発光している間のわずかな時間だけ Gate が開くといった状態となり、LED が発している光の一部分だけを測定している状態であった。
3. LED の発光量が異常に多くなった場合、PMT を流れる Current が増加し最悪な場合 PMT 自体が使用できなくなってしまう可能性があった。

など様々な問題があった。測定を行った際、Gate が開いた時に PMT へ入る光量は一定だったようで、Single Photoelectron Peak は見る事ができた。しかしこれらの問題点を改善する為新たに次に示す Logic2 を作った。

4.2 Logic2

駄目 Logic1 の問題点を改善し、実際の使用目的へ向けて作り直した Logic である。Logic1 との大きな変更点は LED へ入力する TTL 信号の Width を調整可能にした点と、光量を調整する為 Attenuator を使用しプリンター用紙を排除した点である。

先に上げた Logic1 では TTL 信号の Width が一定であるため

1. LED の発光時間と Event Rate を調整できない。
2. LED への入力信号の Width(LED の発光時間) が Gate 幅より広い。

3. 電気的性質を変えずに Dark current を測定する事ができない。

など実用性には乏しく、更に PMT を破壊しかねない危険性があった。そこで板谷 道隆氏が R392EGPX の基本性能を確認する為の測定を行った際に使用した Logic の概略を図 6 に示す。この Logic2 では LED に入力する TTL 信号の Width を、GDG(4) からの出力される信号の Width を変える事によって変化させる事ができる。Width を変化させる事によって LED の発光時間を任意に調整する事が可能となり、平均光電子数を光電面特性などに合わせて自由に調整する事ができるようになった。また Logic1 では光量の調整にプリンター用紙を使用していたが、LED へ入力する TTL 信号を Ateneter によって減衰させる事により減光させる事が可能となった。したがって初めての測定の場合は GDG の Width を 20[ns](最低値) にし、Attenuator の値を数 [dB] かけた上で徐々に光量を上げる様に測定する方法が良いと思われる。

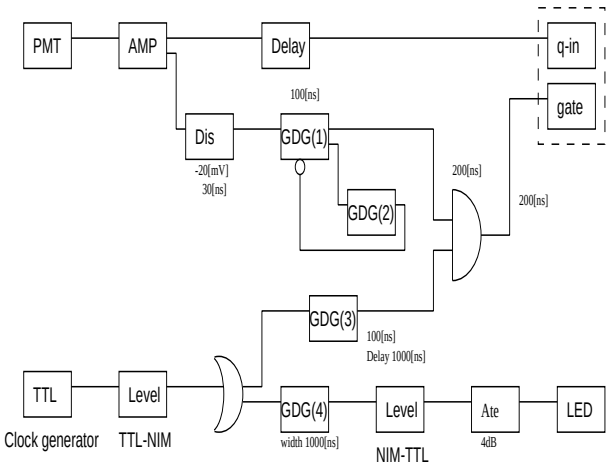

図 6: Logic 2
板谷氏が R392EGPX を調査する際に使用した Logic

Coincidence により LED Event、Dark Current、LED Event+Dark Current、Pedestal の 4 条件をそれぞれ選択して測定可能となっている。

5 Width

先に述べた様に LED に入力する信号の Width を GDG で調整する事により、得られる平均光子数はある程度調整する事ができる。そこで Width を 20[ns](最低値) から 35[ns] まで変化させた場合のヒストグラムを以下 (図 7、8) に示す。比較の為 20[ns] では光が測定されない程度にそれぞれ Blue-LED では 5[dB]、Green-LED では 2[dB] の Attenuator をかけた。

Blue と Green の LED では基盤への取り付け位置が若干異なる為、fiber へ

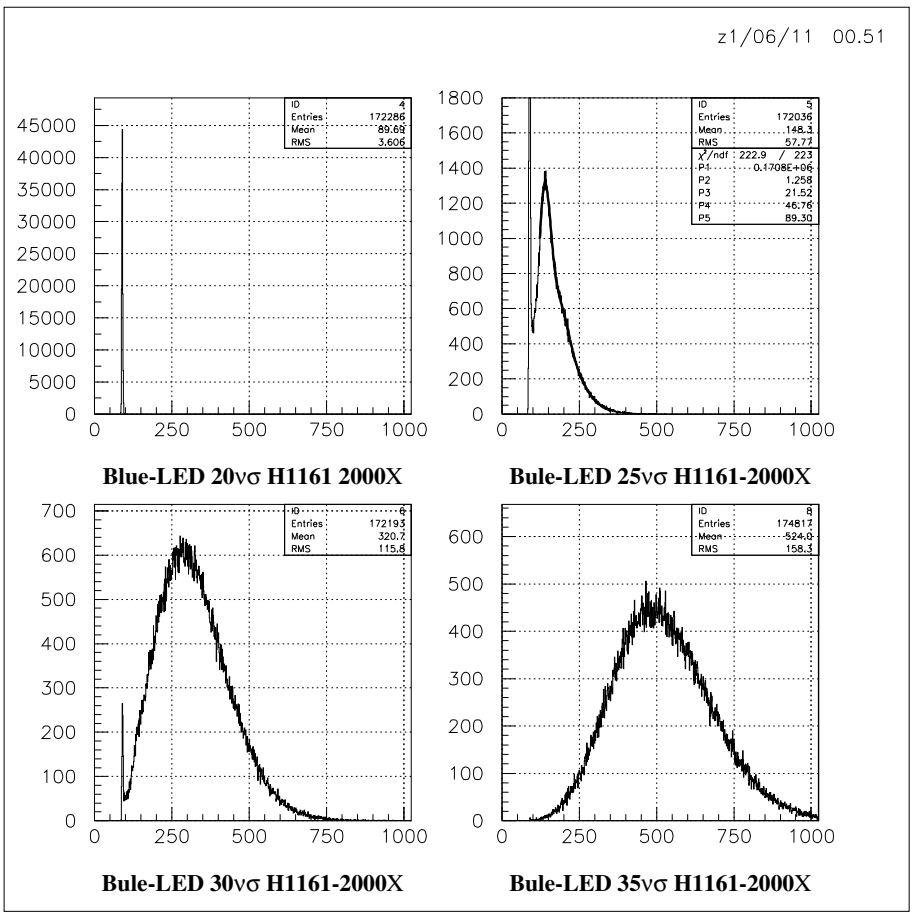

図 7: Bule LED
Blue LED への入力信号の Width による平均光電子数の比較

入射する光子数を比較することはではない。また光子の波長により量子効率に明らかな違いがあるため、Attenuator の値と平均光電子数の関係を簡単に比較する事ができない。

以上の結果から今回使用した setup と LED の回路では「LED へ入力する TTL 信号の Width が変化するにしたがって平均光電子数が大きく変化する」事が分かった。ヒストグラムと Poisson Distribution より得られる確率から判断し、Width 5[ns] の変化に対して Blue LED では平均光電子数の変化が約 4 個、Green LED では約 3 個の平均光電子数の変化を大まかに見積もる事ができた。同時に 25[ns] では Poisson Distribution の統計が強く見られたが、35[ns] ではより Gauss Disribution に近い統計が見られた。これは Poisson Distribution において母平均の変化に対する統計の変化が顕著に現れている証拠である。

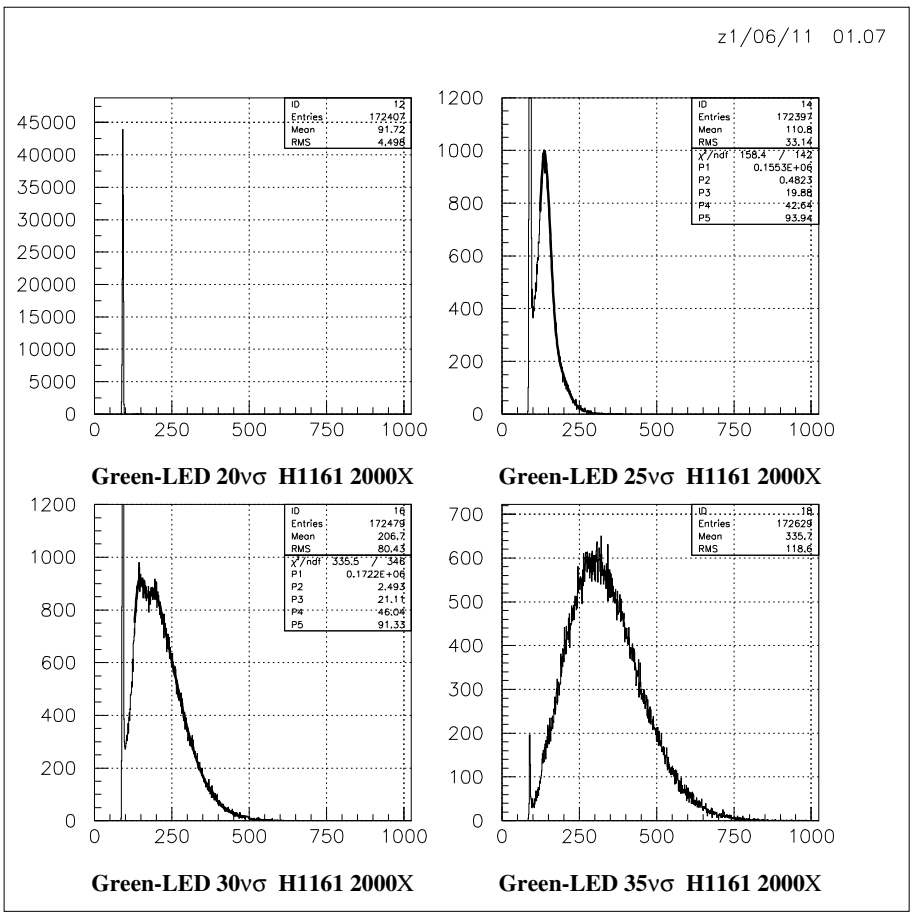

図 8: Green LED
Green LED への入力信号の Width による平均光電子数の比較

6 Fitting

6.1 Fittng Function

PMT の光電面から放出される Photoelectron n 個は平均光電子数 (m) を母平均とした Poisson Distribution
[Poisson Distribution]

$$p(n|m) \quad = \quad e^{-m}\frac{m^n}{n!} \qquad n = 0, 1, 2, \ldots \quad m > 0$$

m : 母平均

による確率で発生し、続いてそれぞれ Dynode で増倍される。n Photoelectron が Dynode で増倍される際には、Single Photoelectron の母分散 σ^2 を基準とした $\sigma_n^2 = n\sigma^2$ を母分散とする Gauss Distribution

[Gauss Distribution(n Photoelectron)]

$$f_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{n}\sigma} exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2n\sigma^2}\right\}$$

m : 母平均

σ_n^2 : 母分散

に基づいた分布の広がりを得る。したがって測定によって得られるヒストグラムはこれらの分布を満たすはずである。

Poisson Distribution は母平均 (m) が大きくなるにつれその分布は Gauss Disutribution に近づく。そのため十分高い光量を得る事ができる測定においては、Poisson Distribution より Gauss Distribution が広く用いられる。しかし光電面から放出される平均光電子数 (m) が $0 < m < 2$ の場合には Poisson Distribution による分布が見られ、Single Photoelectron Peak を分離する事が可能な場合には Poisson Distribution に基づいた Fitting Function

[Fitting function]

$$R(x\,|\bar{N}) = A\sum_{N=1}^{Nmax}\frac{1}{e^{\bar{N}}}\frac{\bar{N}^N}{N!}\frac{1}{\sqrt{2\pi N}\sigma} exp\left\{-\frac{(x-pN-q)^2}{2N\sigma^2}\right\}$$

x : $ADC\ Channel$

$A(p1)$: $NormalizationFactor$

$\bar{N}(p2)$: 平均光電子数

$\sigma(p3)$: $Sigma$

$p(p4)$: $Peak\ Interval$

$q(p5)$: $Pedestal\ Peak\ Channel$

によって Fitting を行う事ができる。この Fitting Function は各 Photoelectron Peak における Poisson Distribution と Gauss Distribution を個別に計算し、それを足し合わせる構造となっている。$Nmax$ は足し合わせる Photoelectron 数の範囲を表し、Nmax に応じた回数だけループ計算が行われる。

そこで以下に母平均 $m = 0.5 \sim 5$、$n = 0 \sim 8$ の範囲で Poisson Distribution から得られる確率 $p(x|m)$ を示す。それぞれの測定において平均光電子数を見積もる事ができれば、確率 $p(x|m)$ からヒストグラム全体に対して

n Photoelectron の占める割合を求めることができ、解析に必要とされる N max の値を容易に見積もる事ができる。

p(x | m)	x=0	1	2	3	4	5	6	7	8
m=0.5	0.607	0.303	0.076	0.013	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
1.0	0.368	0.368	0.184	0.061	0.015	0.003	0.001	0.000	0.000
1.5	0.223	0.335	0.251	0.126	0.047	0.014	0.004	0.001	0.000
2.0	0.135	0.271	0.271	0.180	0.090	0.036	0.012	0.003	0.001
2.5	0.082	0.205	0.257	0.214	0.134	0.067	0.028	0.010	0.003
3.0	0.050	0.149	0.224	0.224	0.168	0.101	0.050	0.022	0.008
3.5	0.030	0.106	0.185	0.216	0.189	0.132	0.077	0.039	0.017
4.0	0.018	0.073	0.147	0.195	0.195	0.156	0.104	0.060	0.030
4.5	0.011	0.050	0.112	0.169	0.190	0.171	0.128	0.082	0.046
5.0	0.007	0.034	0.084	0.140	0.175	0.175	0.146	0.104	0.065

6.2 Sigma

測定方法やPMTの持つ特性によって分解能は異なる。同様の測定を行った場合でもSigmaとPMTのGainの関係によりSingle Photoelectron Peakの分離の仕方は違って見えてくる。以下にPedestal Peak ChannelとPeak Interval、平均光電子数を同じ値にし、Sigmaが異なる場合のPoisson Distributionのシュミレーションの結果をヒストグラム (図 7) に示す。ヒストグラム左がSigma=40、右がSigma=80である。Peak Intervalに対しSigmaの値が大きい場合は各Photoelectron Peakの見え方が異なる事が分かる。

ヒストグラムを見ると分かるように、たとえ同じ光量が得られていたとしてもSigmaが大きい測定ではPeakを明確に区別する事ができない場合がある。このような場合はPMTに印加する電圧をあげるなどしてPMTのGainを上げるか、AMPを使用してシグナルを増幅させるなどするとPeak Intervalが大きくなり各Peakの分離を見やすくする事が可能である。

7 Attenuator

LEDの発光量を落とす為に使用した、シグナルを減衰させるモジュールである。Attenuatorは次の式にしたがって対数的にシグナルを減衰させる。

$$R = 20log_{10}\frac{P_2}{P_1}[dB]$$

P_1 : 基準の数値

P_2 : 比較しようする数値

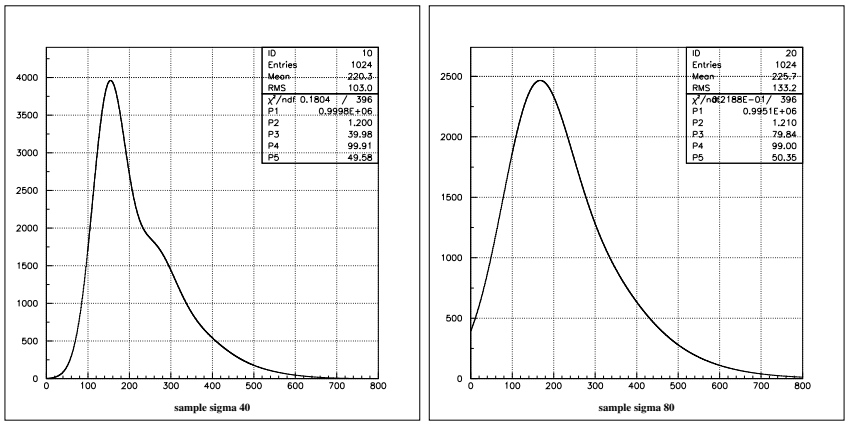

図 9: Poisson & Gauss Distribution
Pedsta Peak Channel=50
Peak Interval=100
平均光電子数=1.2

したがって、モジュールで A[dB] 対応したスイッチを ON にすると、入力 v_1 に対して得られる出力 V_2 は

$$V_2 = 10^{-A/20} V_1$$

となる。また複数 $(b_1[dB], b_2[dB])$ のスイッチを同時に ON にした場合、対数の性質に従い減衰値 B[dB] は

$$B = b_1 + b_2$$

と簡単に求める事ができる。

[参考]

デシベル	倍数値	デシベル	倍数値	デシベル	倍数値	デシベル	倍数値
1	0.891	6	0.501	11	0.282	16	0.158
2	0.794	7	0.447	12	0.251	17	0.141
3	0.708	8	0.398	13	0.224	18	0.126
4	0.631	9	0.355	14	0.200	19	0.112
5	0.562	10	0.316	15	0.178	20	0.100