

0v $\beta\beta$ 崩壊探索実験AXELのための検 出器開発

京都大学
柳田 沙織~~里~~
緒

2016/2/29 @ICEPPシンポジウム

Outline

- AXEL実験
- 大光量かつ回復時間より長いパルスに対するMPPCの評価
- 多チャンネル化に向けて読み出し系の変更
- まとめ

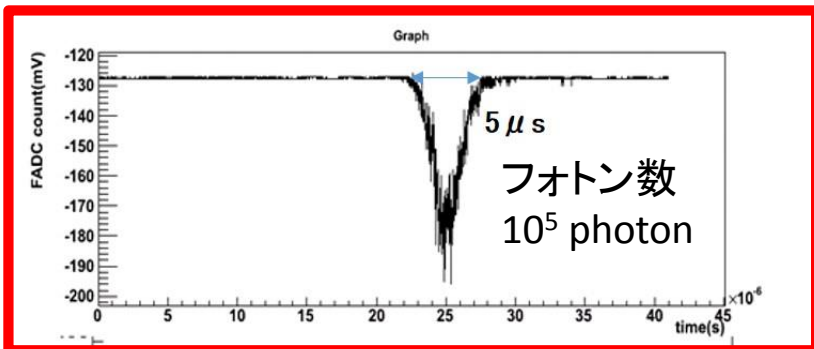
AXEL実験

- $0\nu\beta\beta$ 探索のための実験

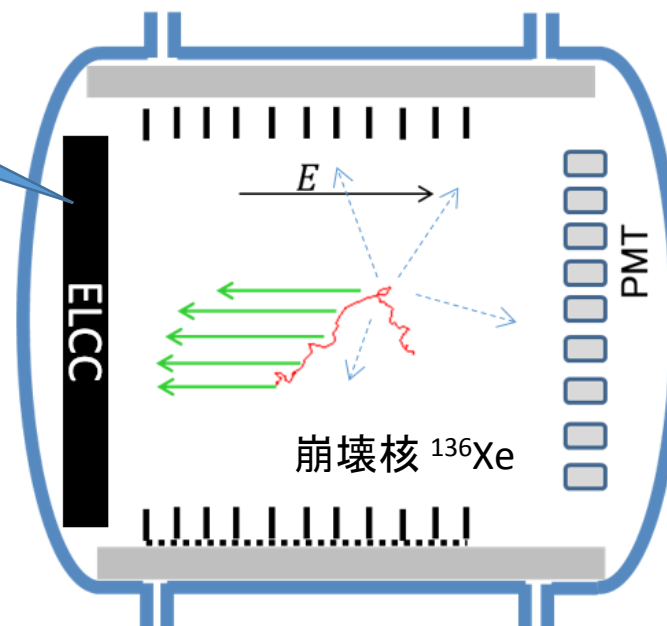
大質量・高エネルギー分解能・低バックグラウンド化が必要

⇒ 高圧XeガスTPCを製作中(目標0.5% @ Q値)

ELCC内の
MPPCでエネルギーを測定



ELCCに対して平行に飛んだ時の
MPPC一つでみたEL光の波形例

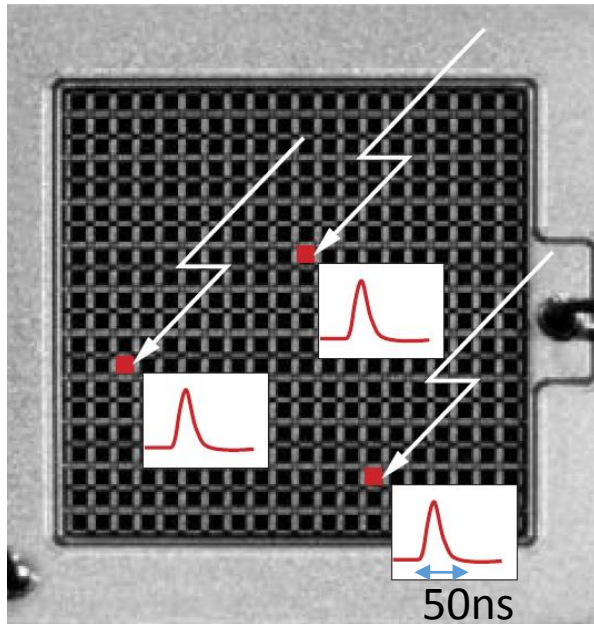


Outline

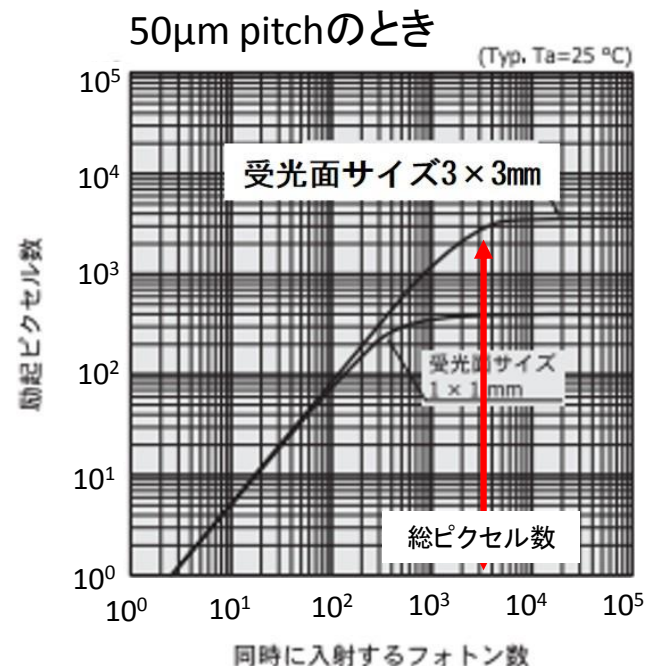
- AXEL実験
- 大光量かつ回復時間より長いパルスに対するMPPCの評価
- 将来に向けて読み出し系の変更
- まとめ

MPPC -Multi Pixel Photon Counter-

・フォトンカウンティング能力: 光子数分足し合わせた信号を出す

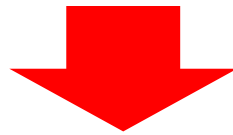


- ・同じピクセルに複数の光子が入射しても1光子としてカウント
- ・瞬間的な入射光量が多くなる
→非線形に。



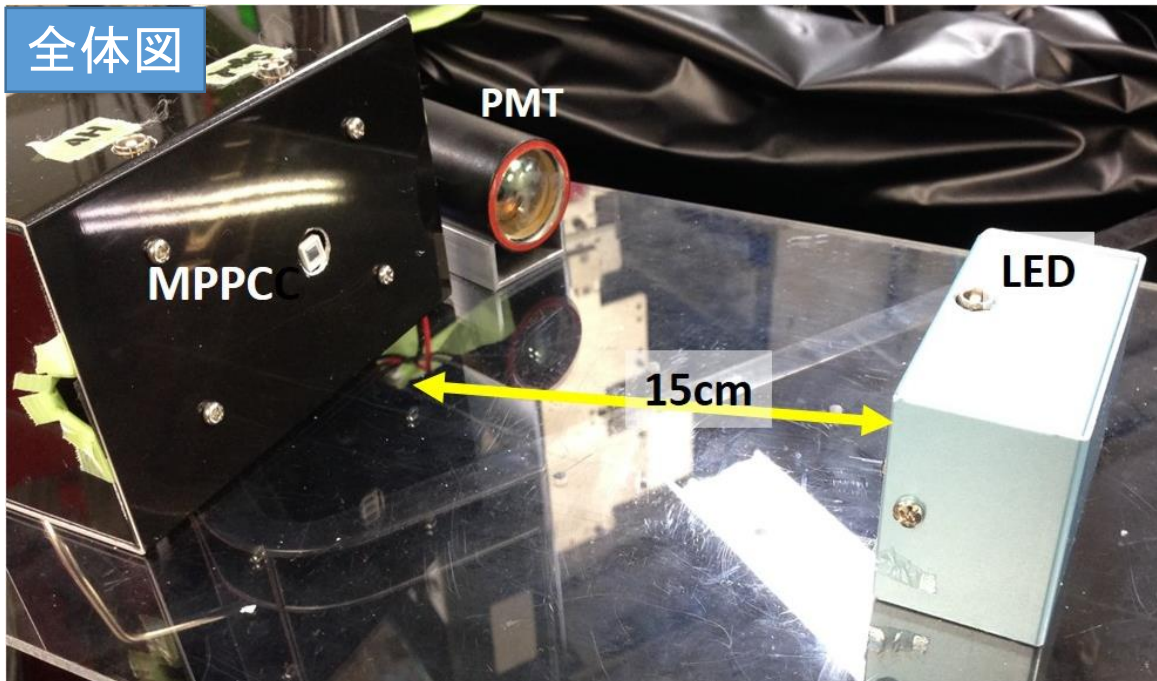
MPPCの問題点

- ・MPPCが非線形だとエネルギー分解能を悪化させる恐れがある
- ・本実験として予想される最も厳しい光量の条件
1つのMPPCに対して EL光の最大光量 10^5 フォトン/ $5\mu\text{s}$
- ・ピクセルは数 10ns 経つと回復

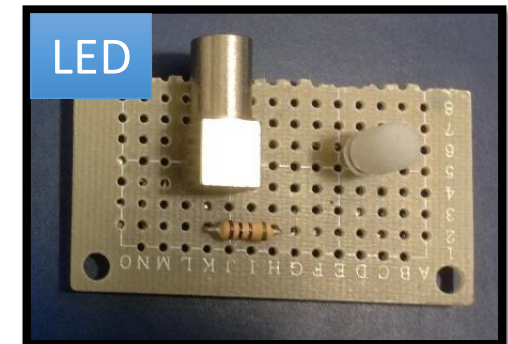
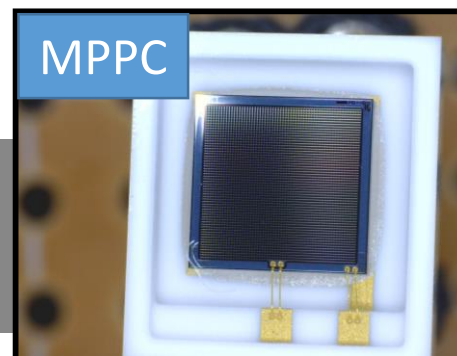


- ・ $5\mu\text{s}$ の間に 10^5 フォトン入るときを実際に測定した

セットアップ



3mm角で
可視光用25,50 μ m pitch
紫外光用(VUV)50 μ m pitch

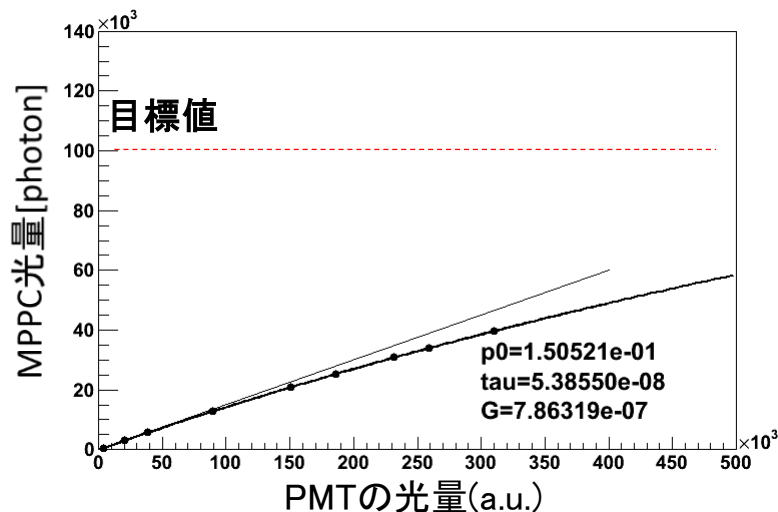
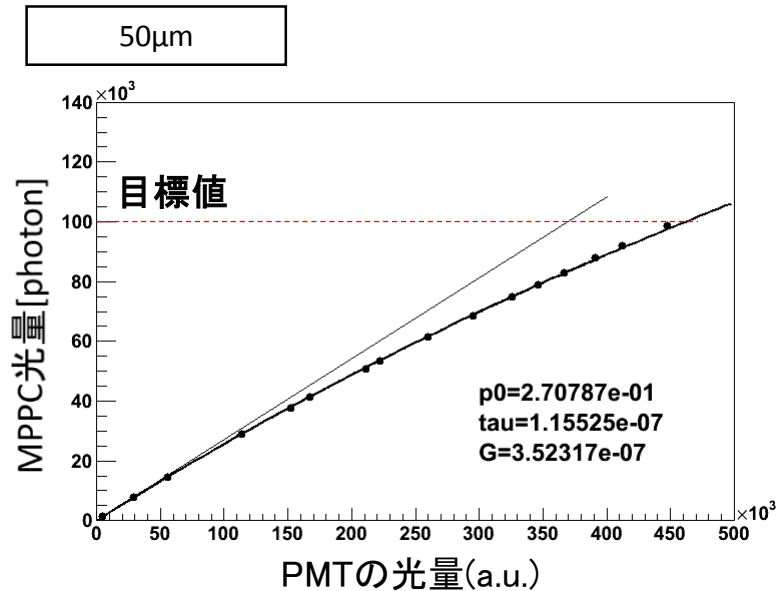
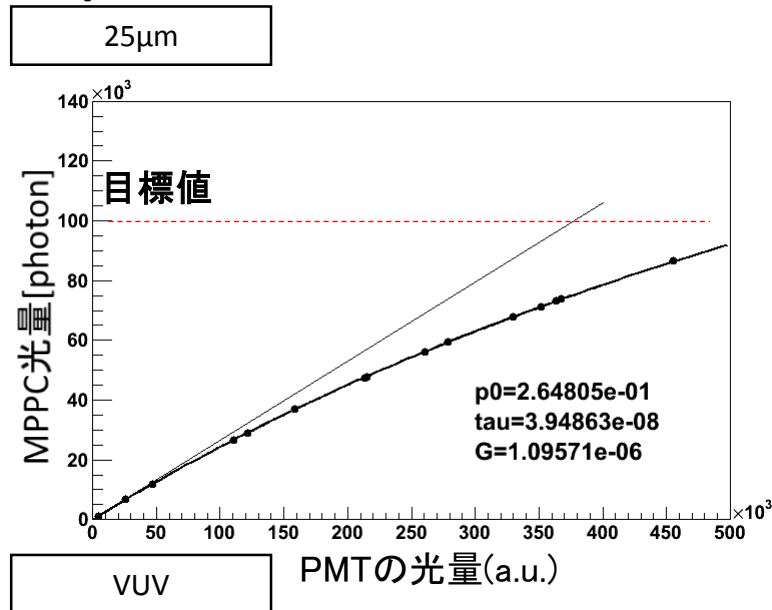


光を拡散するための
カバーを装着
5 μ s, ~10⁵photonまで
電圧で制御



飽和防止用の
3mm角
カバーを装着

5 μ sの矩形波に対する線形性



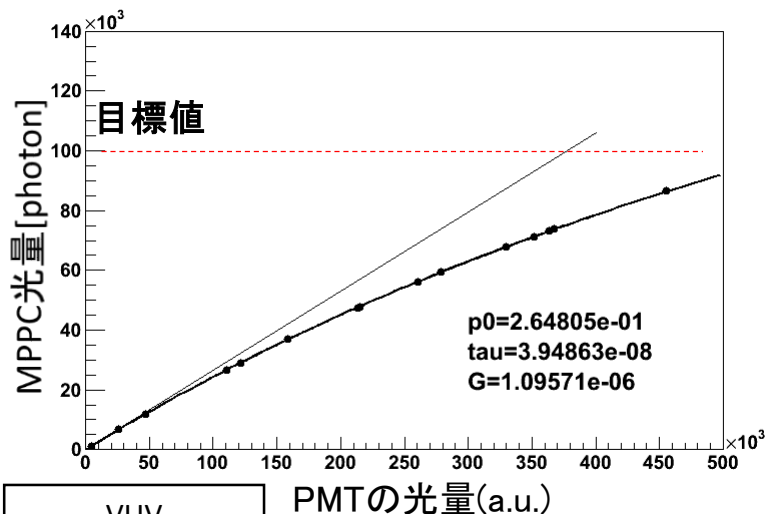
- ・目標値まで線形を保たない
 →①ピクセルが回復しきる前に次のphotonが入射してくる(回復時間)
 ②入射光量に応じてバイアス電圧が低下

$$N_{obs} = \frac{p_0 N_{pmt}}{1 + k\tau + G p_0 N_{pmt}} \quad \text{でフィッティング}$$

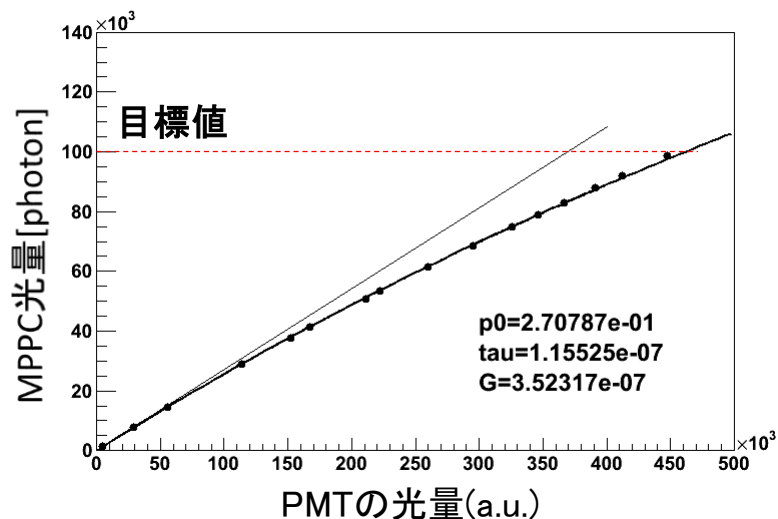
(τ , p_0 はパラメーター)

回復時間

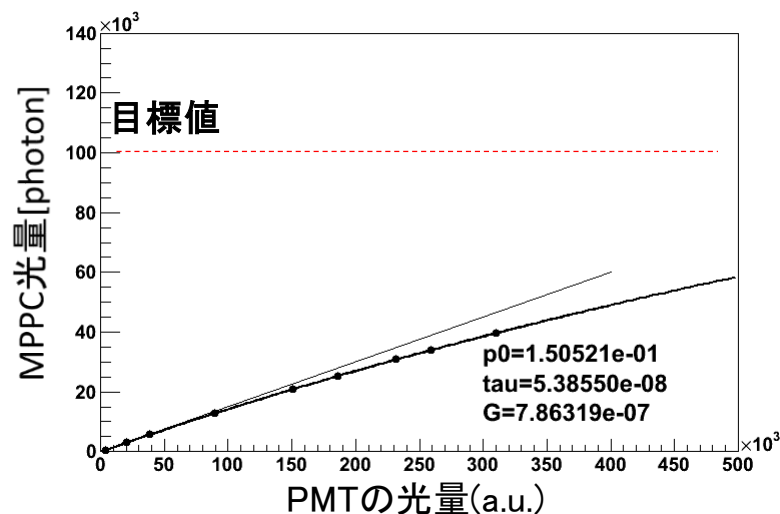
50μm



25μm



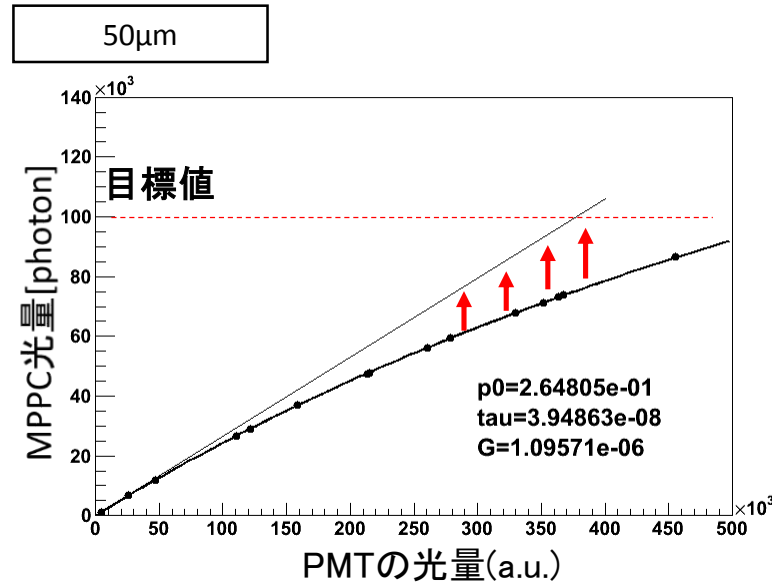
VUV



$$N_{obs} = \frac{p_0 N_{pmt}}{1 + k\tau + G p_0 N_{pmt}} \quad (\tau, p_0 \text{ はパラメーター})$$

MPPC	回復時間	カタログ値
可視光-25μm pitch MPPC	115ns	20ns
可視光-50μm pitch MPPC	40ns	50ns
VUV-50μm pitch MPPC	53ns	50ns

補正



非線形から線形に補正をする
正確な光量との誤差を見積もった
* $N_{pix} = 3600, \Delta t = 5\mu s$ のとき

$$\Delta N_{cor}/N = 0.11\% \quad \text{目標値}0.5\% \text{に比べて十分小さい}$$



揺らぎが小さいため補正しても問題ない

Outline

- AXEL実験
- 大光量かつ回復時間より長いパルスに対するMPPCの評価
- 将来に向けて読み出し系の変更
- まとめ

AFTERチップ

本実験で50000ch読み出すのに安くしたい!

候補 ASIC(AFTERチップ) 約1000円/ch

- ・サンプリング数が少ない(511サンプリング)
→長い信号を読み出すために、1MHz読み出し

安い!
今使っているFADCは
20000円/ch

- ・サンプリング周波数のタイミングによって積分値が揺らぐ
→ローパスフィルタで波形をなまらせる
時定数が大きすぎると時間情報が失われる

→シミュレーションで最適なサンプリング周波数とフィルタの時定数を調べる

AFTERチップ

本実験で50000ch読み出すのに安くしたい!

候補 ASIC(AFTERチップ) 約1000円/ch

- ・サンプリング数が少ない(511サンプリング/ch)

→長い信号を読み出すために、1MHz読み出し

- ・サンプリング周波数のタイミングによって積分値が揺らぐ

→ローパスフィルタで波形をなまらせる

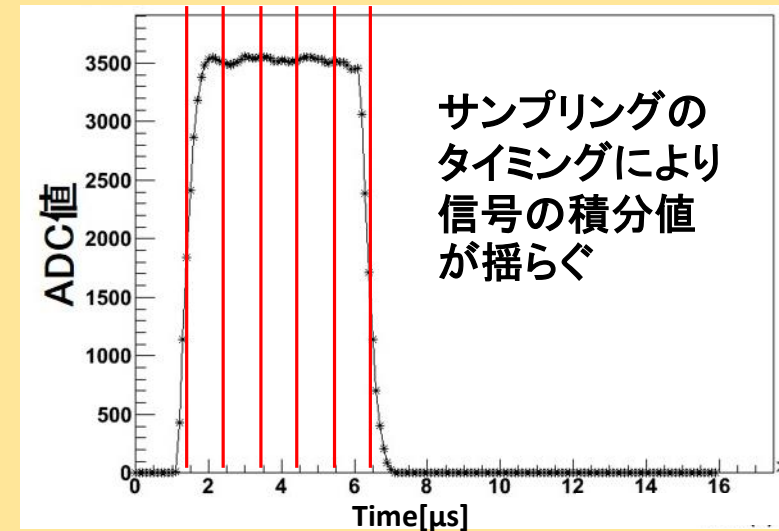
時定数が大きすぎると時間情報が失われる

→シミュレーションで最適なサンプリング周波数とフィルタの時定数を調べる

AFTERチップ

本実験で50000ch読み出すの
候補 ASIC(AFTER

- ・サンプリング数が少ない(511)
→長い信号を読み出すために



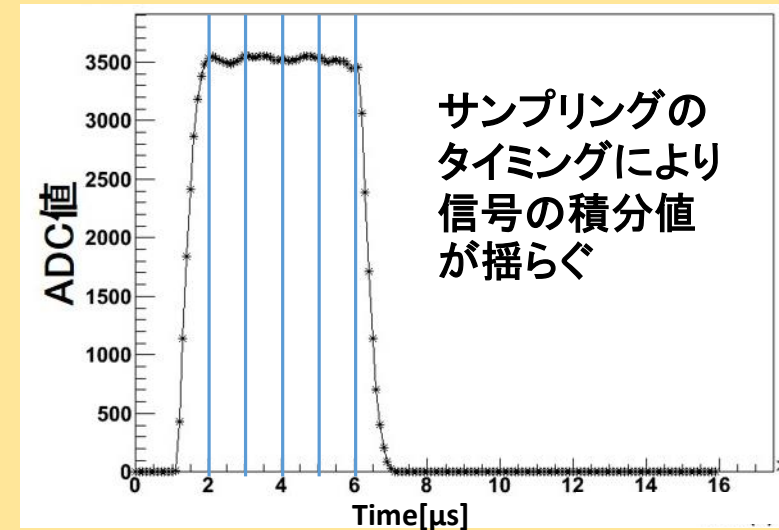
- ・サンプリング周波数のタイミングによって積分値が揺らぐ
→ローパスフィルタで波形をなまらせる
時定数が大きすぎると時間情報が失われる

→シミュレーションで最適なサンプリング周波数とフィルタの時定数を調べる

AFTERチップ

本実験で50000ch読み出すの
候補 ASIC(AFTER

- ・サンプリング数が少ない(511)
→長い信号を読み出すために



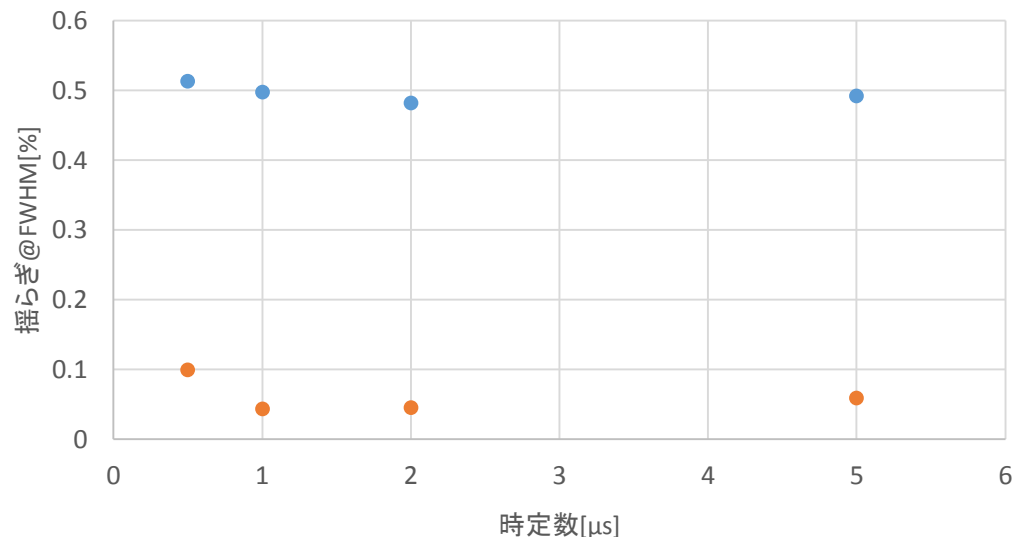
- ・サンプリング周波数のタイミングによって積分値が揺らぐ
→ローパスフィルタで波形をなまらせる
時定数が大きすぎると時間情報が失われる

→シミュレーションで最適なサンプリング周波数とフィルタの時定数を調べる

シミュレーションによる評価

矩形波で $5\mu\text{s}$ の間に約 10^5 フォトン発生するイベントの信号の積分値から揺らぎを見積もった

- 電離電子数、ELによる光子変換、MPPCの増幅、サンプリングのタイミングの揺らぎを考慮
- サンプリングのタイミングの揺らぎのみ考慮



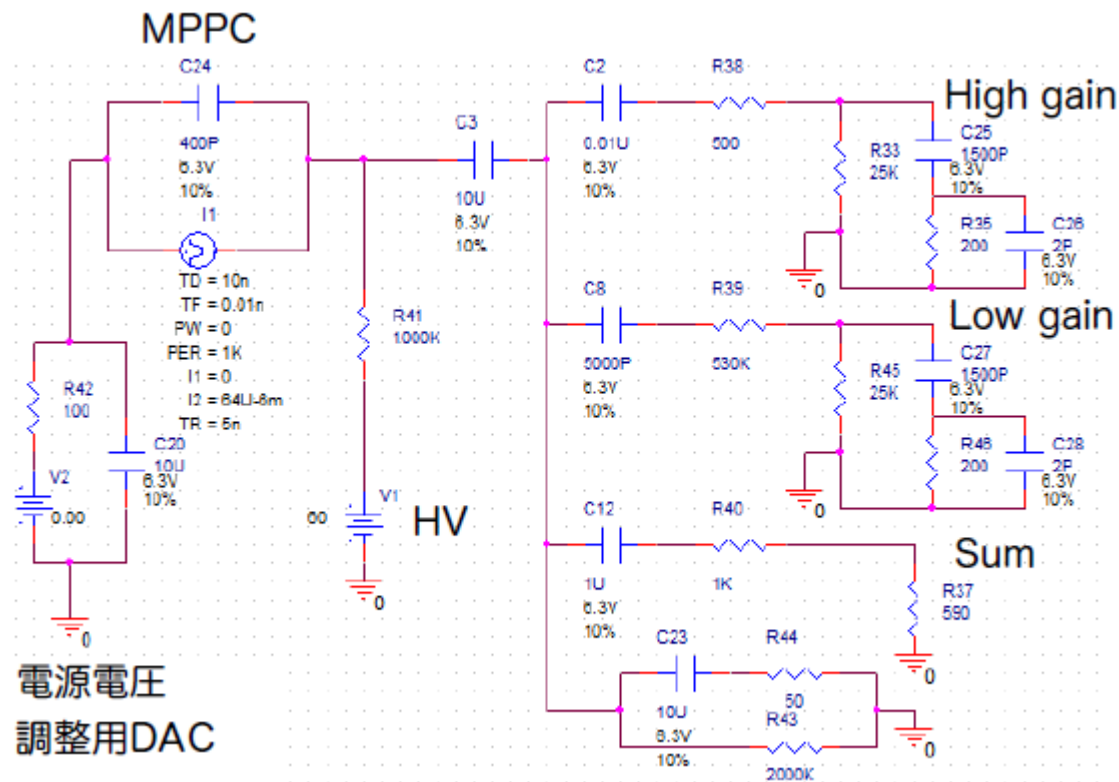
総光量 10^6 photon
この光量をMPPC 10個で読み出す
実際の分解能は $1/\sqrt{10}$ になる

1MHzサンプリングのときの各時定数での揺らぎ

時定数 $1\mu\text{s}$ 以上になると揺らぎの大きさは変化しない
サンプリング周波数1MHz, 時定数 $1\mu\text{s}$ でサンプリングのタイミングによる揺らぎは他の揺らぎに比べ十分小さい

AFTERチップでの今後の課題

- ダイナミックレンジが足りない!
→高いゲイン、低いゲインに分けて読み出す(田中)



まとめ

- AXEL実験

- 0v $\beta\beta$ 探索のために高圧Xeガスを用いた高エネルギー分解能TPCを開発中

- 大光量かつ回復時間より長いパルスに対するMPPCの応答

- 目標 10^5 フォトン/ $5\mu\text{s}$ に対して線形性からのずれを測定

- 回復時間を算出して補正を行うことで十分な精度を保てることを確認

- 多チャンネル化の読み出し

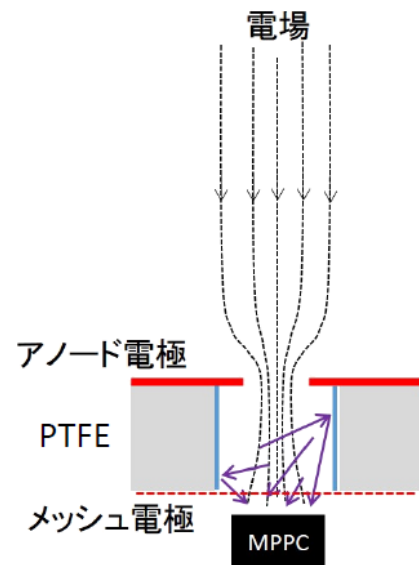
- サンプリング周波数が1MHz、時定数が $1\mu\text{s}$ が最も良い

- ダイナミックレンジを確保するためにボード開発中

- 今後

UVMPPC、ピッチの最適化、大型化(数1000ch化)などなど

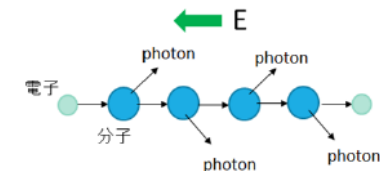
ELCC -Electroluminescence Light Collection Cell-



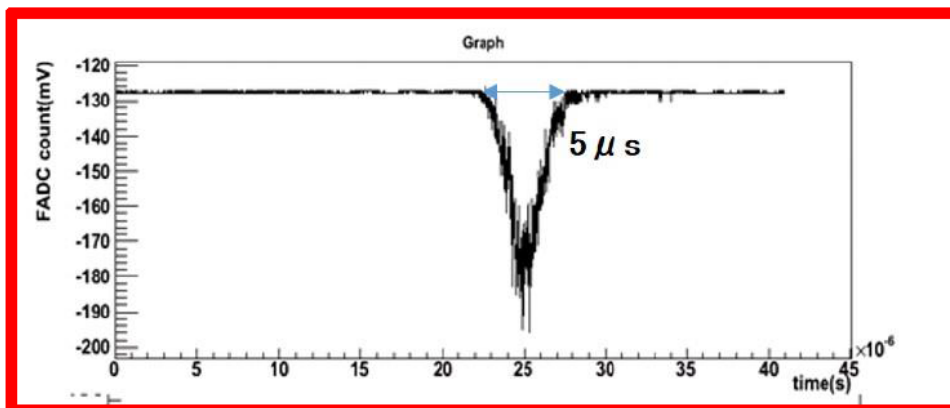
- ・ドリフト電場に沿って電子を穴に引き込む

- ・Electroluminescence増幅

- ・MPPCによる信号読み出し



電場に比例した増幅
→なだれ増幅より僧服揺らぎが小さい



EL光の波形の例

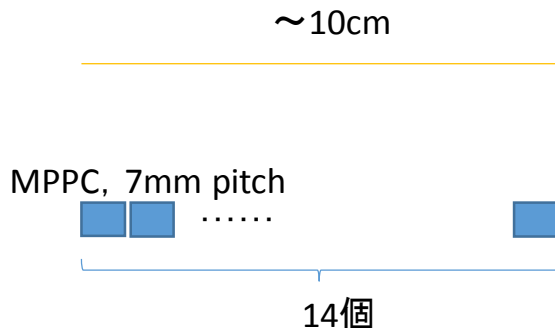
- ・大型化しやすい
- ・位置による揺らぎを抑えられる

本実験では、セル×約50000個
並べる予定

予想入射photon数

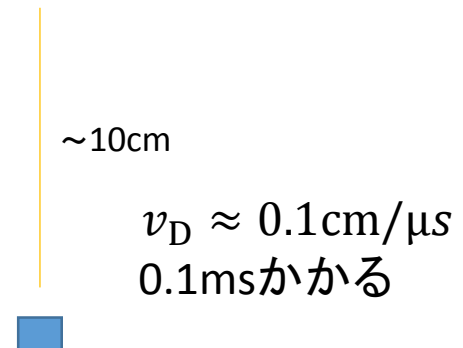
- $2.48\text{MeV}(\text{Q値})/21.5\text{eV}(\text{W値}) \approx 10^5$, ELで5倍だと総光量としては 1×10^6 photon
- 30 barだと飛跡が $\sim 10\text{cm}$.

- MPPC planeに平行に飛んだとき



50nsの間に1つのMPPCでは
 $1 \times 10^6 \text{ photon} / 14 \text{ 個} \approx 1 \times 10^5 \text{ photon}$

- MPPC planeに垂直に飛んだとき



50nsの間に1つのMPPCでは
0.1msで $1 \times 10^6 \text{ photon}$
50ns で $5 \times 10^4 \text{ photon}$

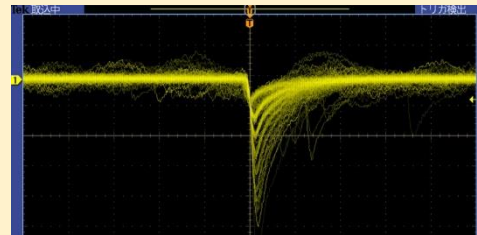
MPPC -Multi Pixel Photon Counter-

- ・フォトンカウンティング能力: 光子数に比例した信号を出す

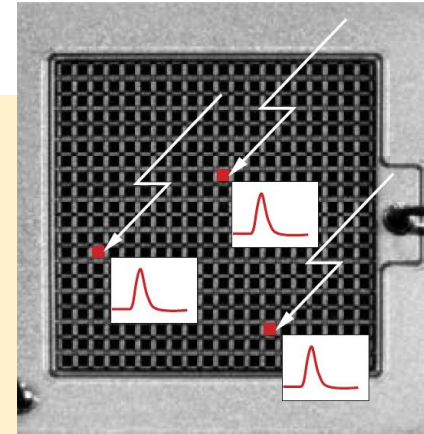
アフターパルス
捕獲された電子が
再放出することでもう一
つパルスをつくる



クロストーク
ガイガー放電時の
二次光子により
周囲のピクセルになる



これらが起こる確率を
クロストーク&アフターパルスレート(p)とよぶ



- ・増幅度が大きい
- ・増幅の揺らぎが小さい
- ・安価

MPPCの仕様

	Type No.	ピッチ	ピクセル数	回復時間 @浜松ホトニクス
可視光タイプ	S12572-025	25 μ m	14,000	20ns
可視光タイプ crosstalk sup.	3 × 3-50UM SAMPLE LCT4	50 μ m	3,600	50ns
紫外光タイプ (VUV,本番用)	S13370-4870	50 μ m	3,600	50ns

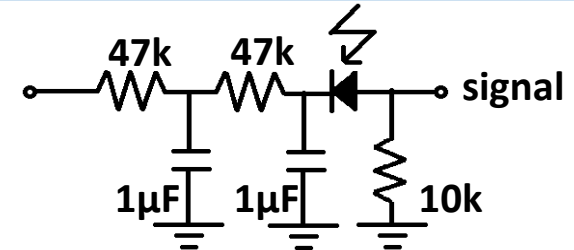
25 μ m pitch MPPCは50 μ m pitch MPPCよりピクセル数が多いので線形性を保つことが予想される。

読み出し回路

- MPPCのバイアス用ローパスフィルタ
電源からの高周波ノイズを落とす

大光量入射しても電圧降下しないようなキャパシタンスを使用

10^5 photonに対応する電荷量 $25.6\text{nC} \Leftrightarrow V_{\text{bias}}(58\text{V}) \times 1\mu\text{F} = 58\mu\text{C}$



- AMP

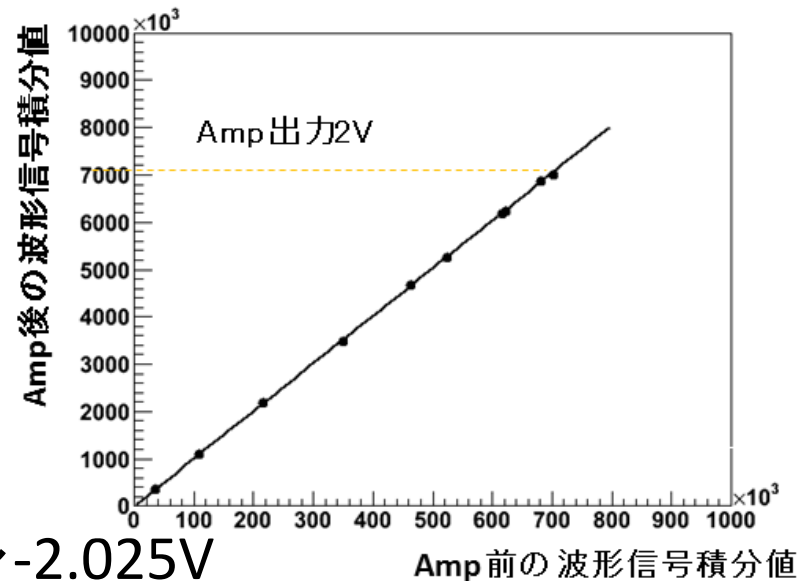
RPN-092、増幅率は10倍
出力は2Vまで

- FADC

V1724

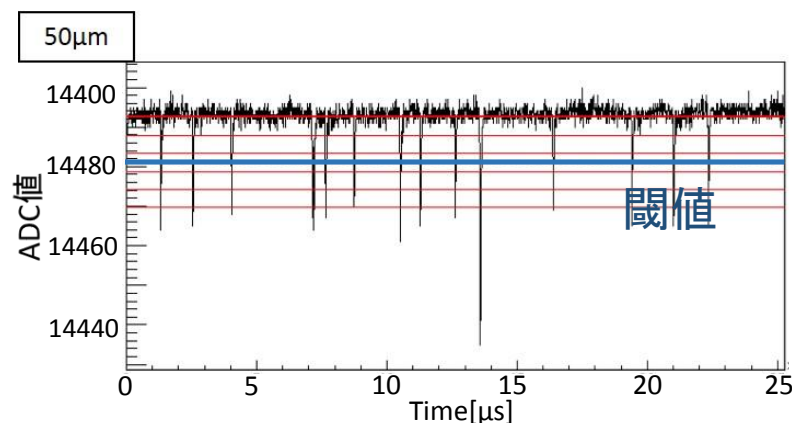
サンプリングレート 100MHz

ダイナミックレンジ +0.225~-2.025V

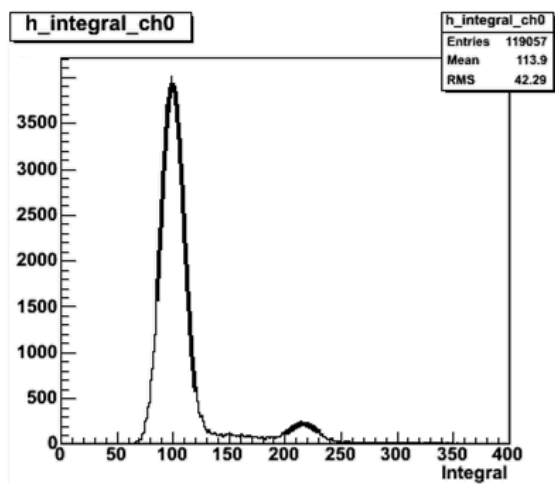


MPPCの光量の求め方

- ・MPPCの信号はクロストークとアフターパルスの影響で実際の光子数より観測光子数は大きくなる



まずは、クロストークとアフターパルスがどれくらいの確率で起こるか考えよう! (クロストーク&アフターパルスレート p)



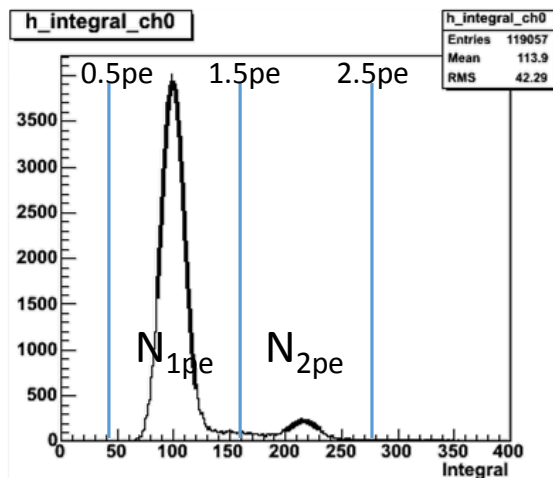
- ダークパルスの波形をもとに光量分布をつくる
- この光量分布はほぼ全て1peしか入っていないイベントと見なせる (ダークが重なる確率がとても低い!)
- つまり、2フォトン以上のイベントはクロストークとアフターパルスによるもの

MPPCの光量の求め方

- ・MPPCの信号はクロストークとアフターパルスの影響で実際の光子数より観測光子数は大きくなる

クロストーク&アフターパルスレートは次の式を用いて求めた

$$p = \frac{N_{2pe}}{N_{1pe}}$$



MPPC	クロストーク&アフターパルスレート p
可視光-25um pitch MPPC	28.5%
可視光-50um pitch MPPC	10.6%
VUV-50um pitch MPPC	13.4%

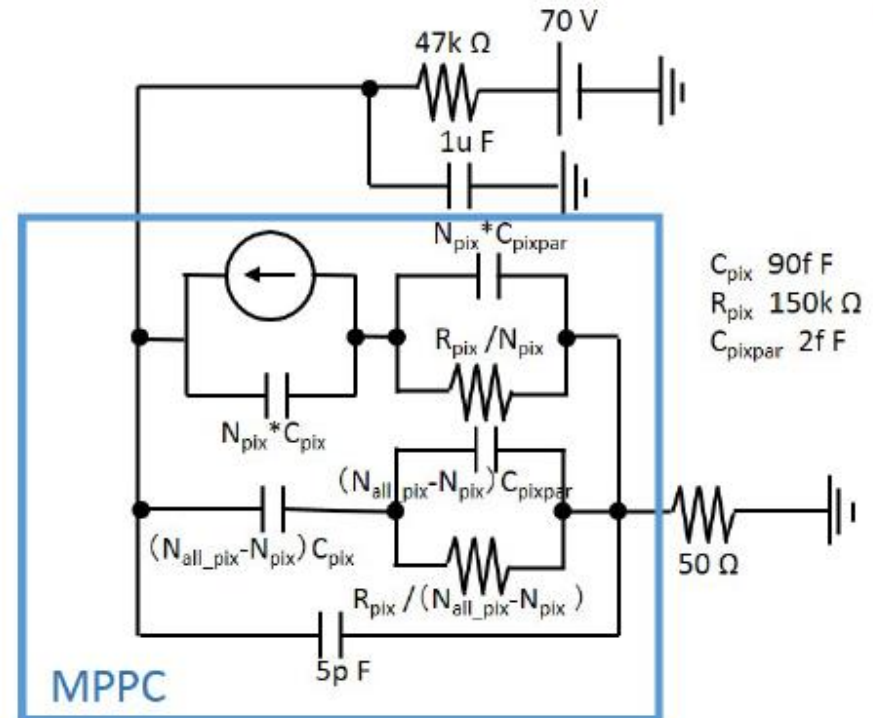
MPPCの信号の積分値をクロストークとアフターパルスを考慮したゲインで割って、光量を求めた

回復時間

励起したピクセル数を N_{pix} 、
ピクセルがもっている静電容量を C_{pix} 、
クエンチング抵抗を R_{pix} としたときに
ピクセルを回復するときの時定数は

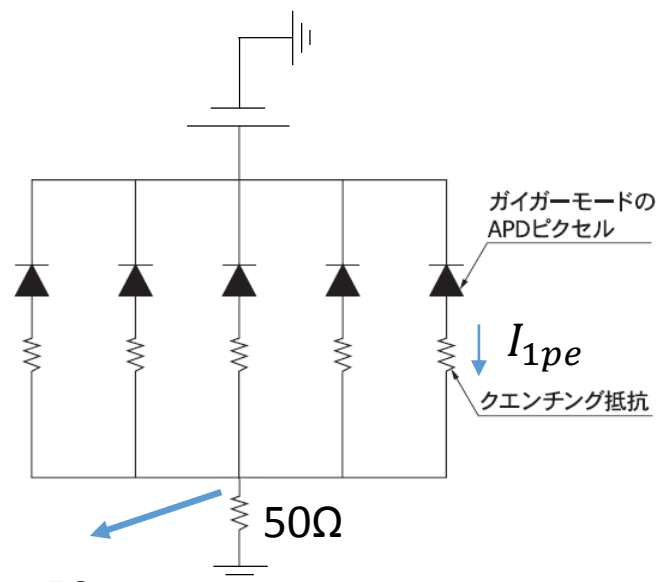
$$\frac{1}{\frac{1}{1\mu[F]} + \frac{1}{C_{pix}}} (50[\Omega] + R_{pix})$$

$$= N_{pix} * 90f(50 + 150k/N_{pix})$$



このモデルが正しいとすれば、
励起したピクセル数が多くなってくると回復時間は長くなる

回復時間についての考察



$$V = N_{ph} \times I_{1pe} \times 50$$

簡単のため簡略化したMPPC回路図

- 信号を出すピクセルの数(N_{ph})が増えると出力部の電位が高くなり、MPPCにかかる電圧が小さくなる
- 光量が多いほど信号を出すピクセル数が増えるので回復時間が長くなる
- カタログ値より回復時間が長いことは定性的には説明できる

PMTの線形性

- ・バイアス電圧が1.5kVのとき増幅率は 5×10^6 (測定値)
線形性は500nsあたり5,000photonまでは実験で確認

÷ 50



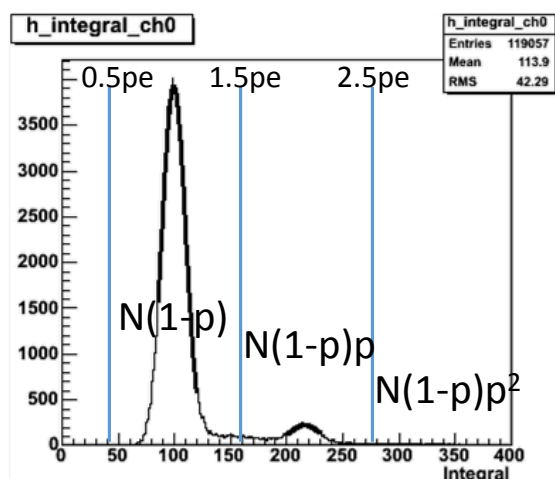
- ・バイアス電圧が0.9kVのとき増幅率は 10^5 (測定値)
なので500nsでは $5000 \times 50 = 2.5 \times 10^5$ photonまで保障
-->5 μ sだと 2.5×10^6 まで保障

MPPCとPMTで受光面サイズとPDEは同程度なので、
 $10^5 (< 2.5e6)$ photonなら余裕でPMTは線形性を保つ

クロストークアフターパルスレートの算出方法

- 定義

(2pe以上の個数)/(総イベント数)



図のように考えると

1peの個数 $N \cdot (1-p)$

2peの個数 $N \cdot (1-p) \cdot p$

3peの個数 $N \cdot (1-p) \cdot p^2$

総イベント数は $N_1 + N_1 \times p + N_1 \times p^2 + \dots$

2pe以上の個数は $N_1 \times p + N_1 \times p^2 + \dots$

定義式に当てはめると

(2pe以上の個数)/(総イベント数)

$= p$

となり、定義式で考えた場合と同じになる。

ダークパルスが重なる確率

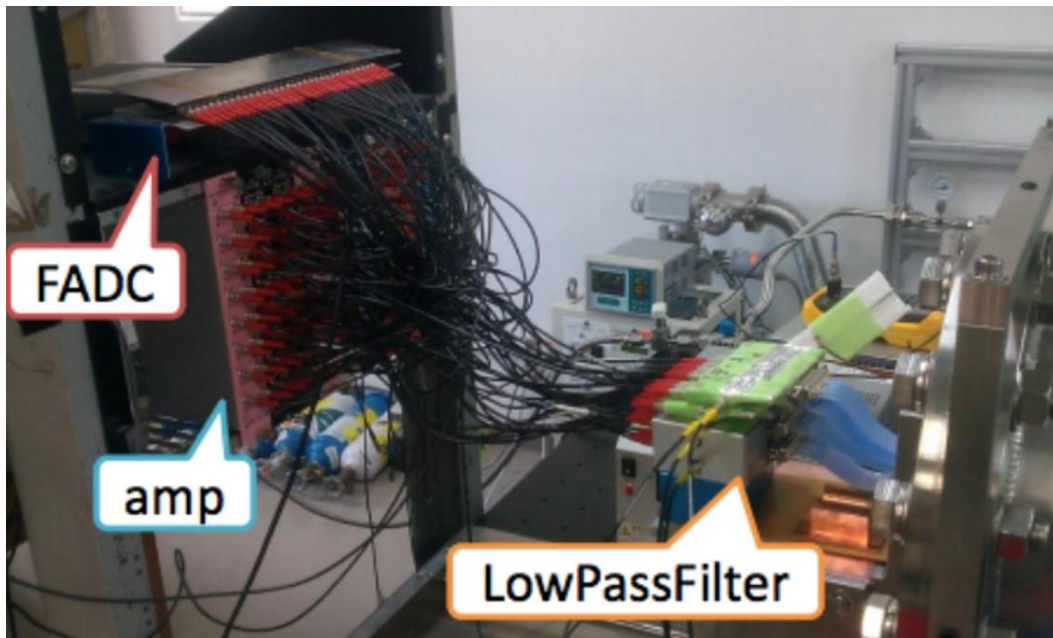
- ダークカウントレート約500kHz
- MPPCの波形長50ns × 2の中にダークパルスが2つ入る確率を求めればよい
- 100nsあたり平均0.1回パルスが入るので、平均0.1、確率2のポアソン分布より

$$P(2)=0.1^2 * e^{-0.1} / 2! \approx 0.1\%$$

つまり、ダークパルスが重なる確率は、0.1%。
クロストークアフターパルスレート(10%)に比べて十分小さい。

現在の読み出し系

- 現在、試作機として64チャンネルのものを作成して評価している。



FADCの仕様

型番	DT5740
サンプリングレート	62.5MHz
入力範囲	-1.0 ~ 1.0V
分解能	12bit
チャンネル数	32

- 本実験では約50000チャンネルになるため多チャンネル化に向けて読み出し系を考えなければいけない。

→多くのチャンネルを安価に大量に欲しい。 候補 AFTERチップ

フィルタ後の波形

時定数を変えたときのフィルタ後の波形(元の波形は矩形波)

