

A班 光速の測定

1班 石崎貢平
福重雄大
芝原隆善

2班 西岡秀樹
湯澤佑介
瀬口拓也

光速の測定

実験の概要・測定原理
装置・セットアップの説明

西岡 秀樹

○概要

目的:光の速度を測定したい

方法:決めた距離を光がどのくらいの時間で
通り過ぎるかを測定(後で詳しく)

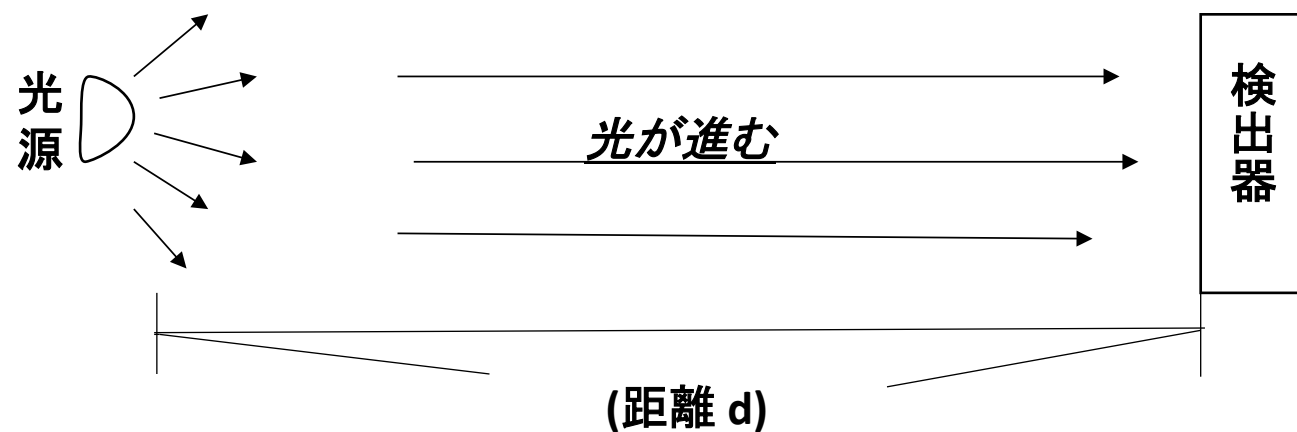
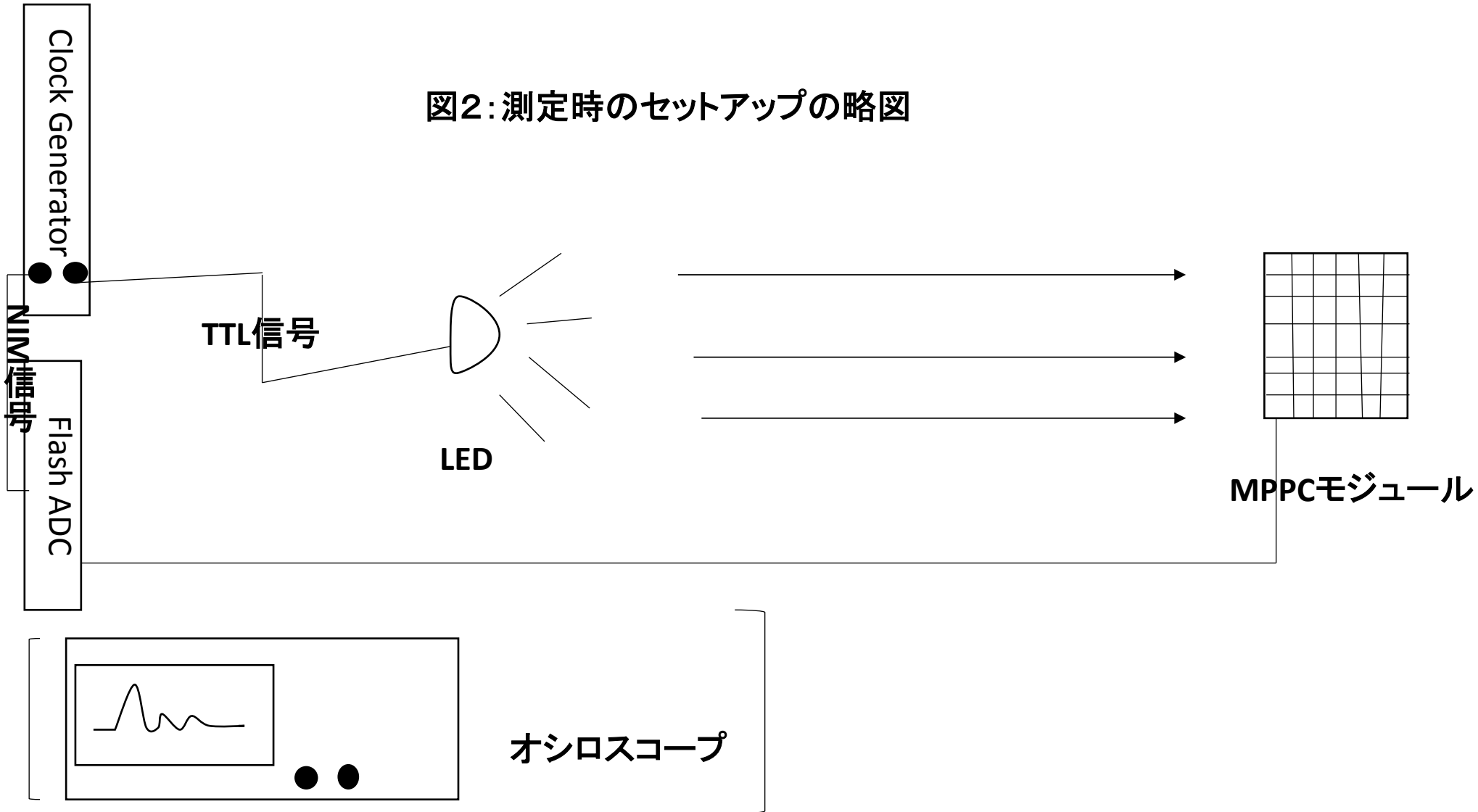


図1:測定イメージ

装置・セットアップについて

図2:測定時のセットアップの略図



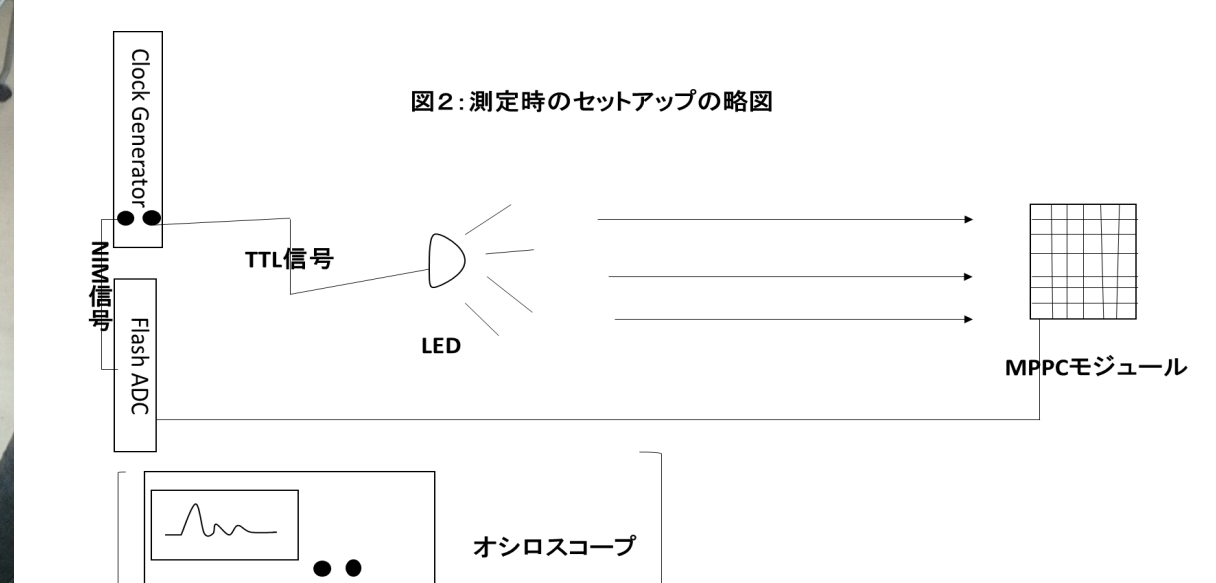
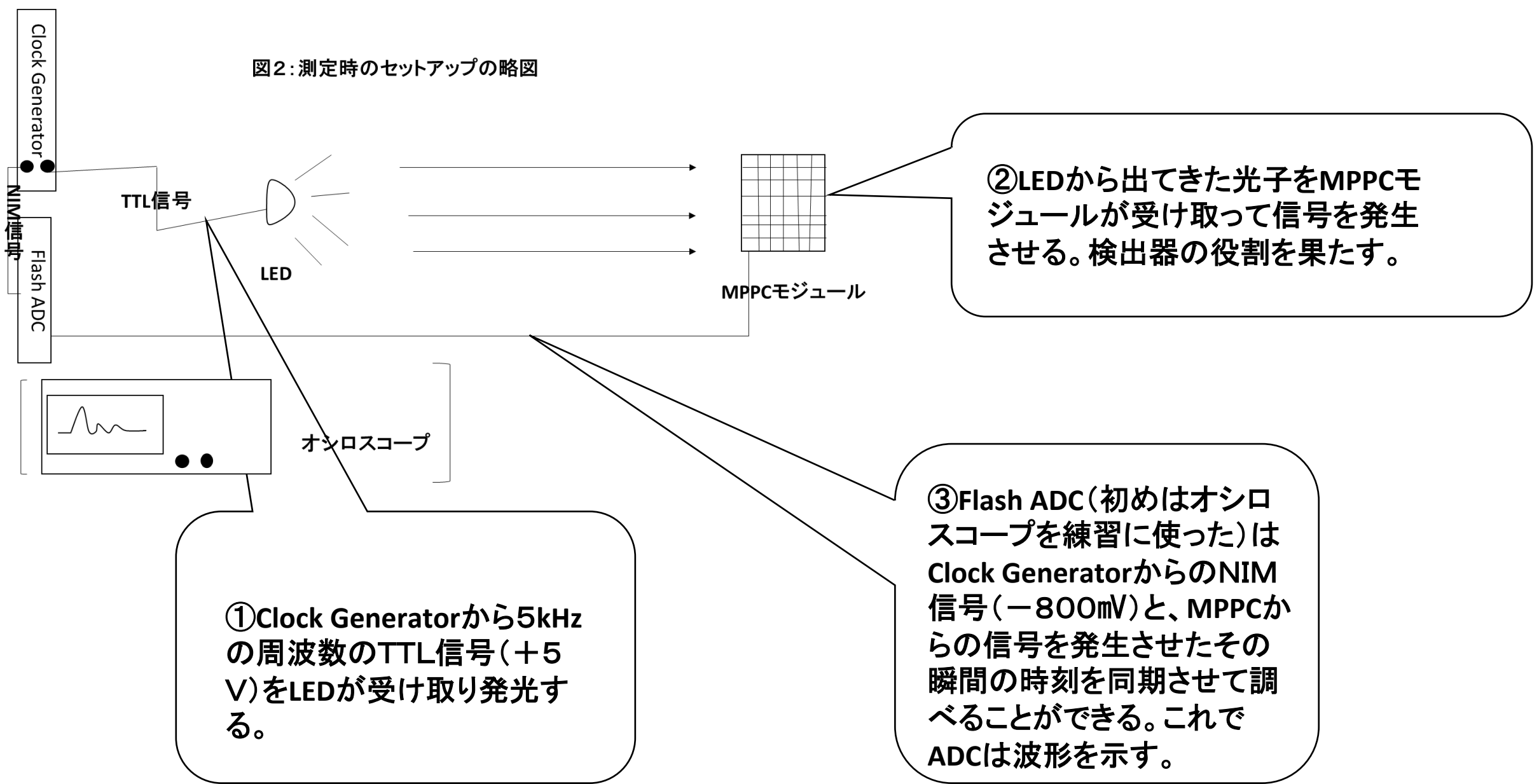


図3: 実際の測定の写真



図2:測定時のセットアップの略図



○装置の説明

Clock Generator: LEDに対して(+5Vの)TTL信号を送り、LEDに光れと命令する。
Flash ADCに対しては(-800mVの)NIM信号を送ってFlash ADCにLEDの光るタイミングを教える。
今回は5kHzで運用した。

図2: 測定時のセットアップの略図

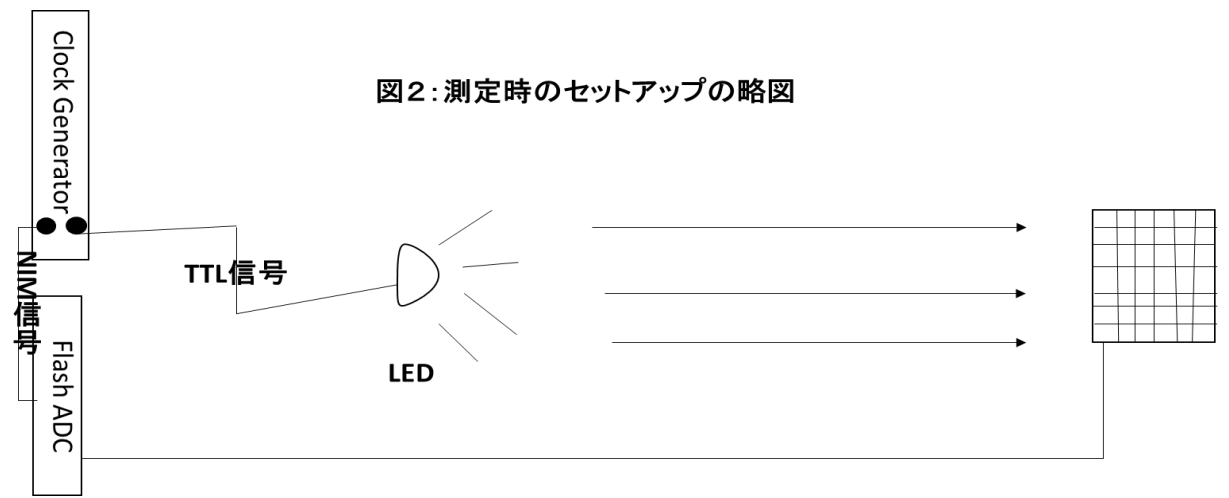


図4: Clock Generatorの写真



Clock Generator

LED: Clock GeneratorからTTL信号を受け取る。LEDはこれに応じて点滅して光をMPPCに送る。

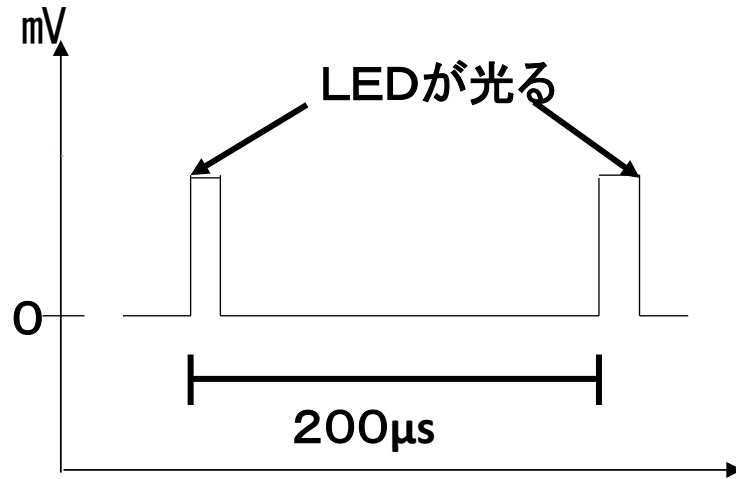
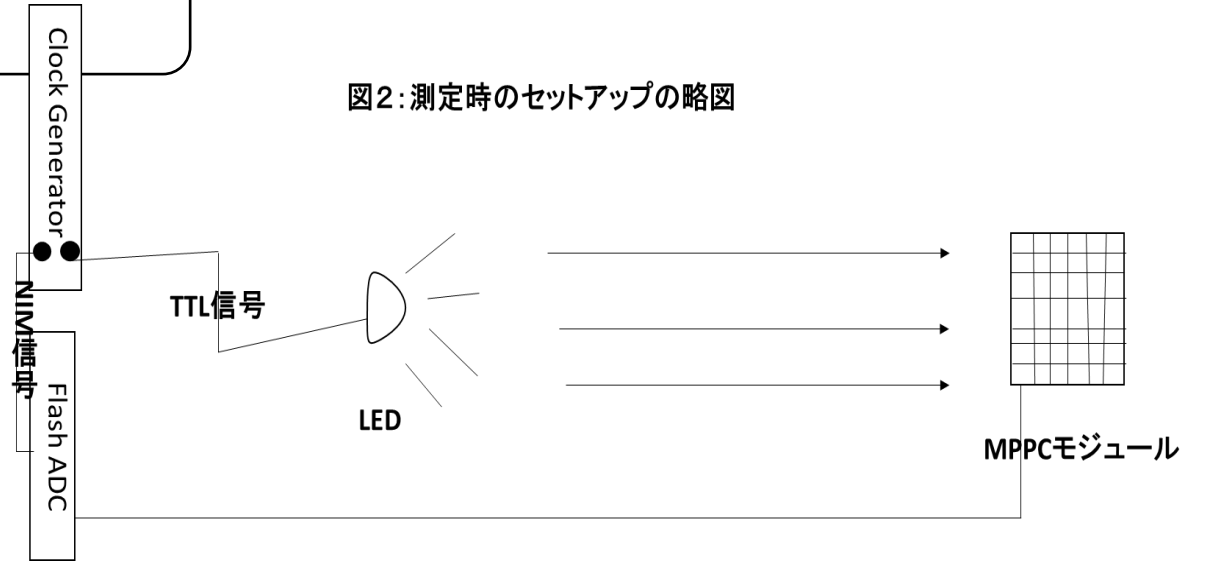


図5:ADCの信号パターン

図2:測定時のセットアップの略図



・今回の実験でClock Generatorから5kHzの信号がLEDに送られ、発光する。ゆえに図5の波形パターンは200μs間隔で生じる。典型的な例では、これを20秒間繰り返すことで、10万event取得した。

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)

: LEDからの光を受け取りMPPC内で電流が発生して、それをFlash ADCに信号として送る。
これでMPPCの配置する距離を変えていきながら届いた時間の差を調べる。

図7: 光源と検出器の配置図

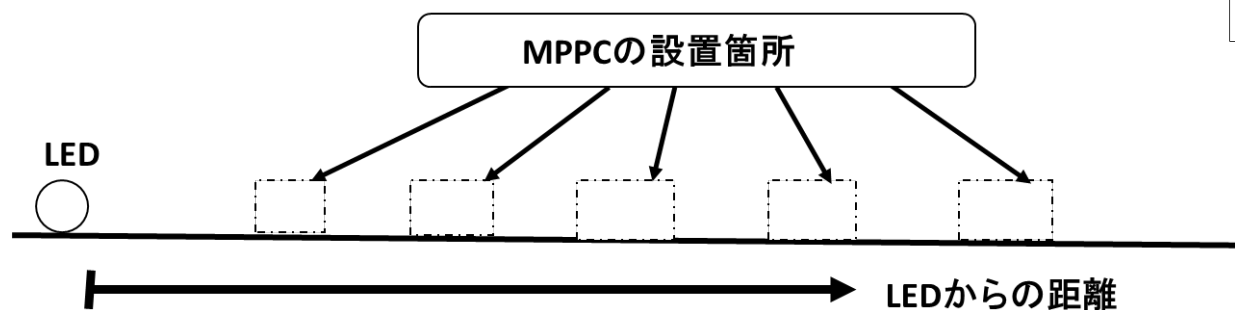
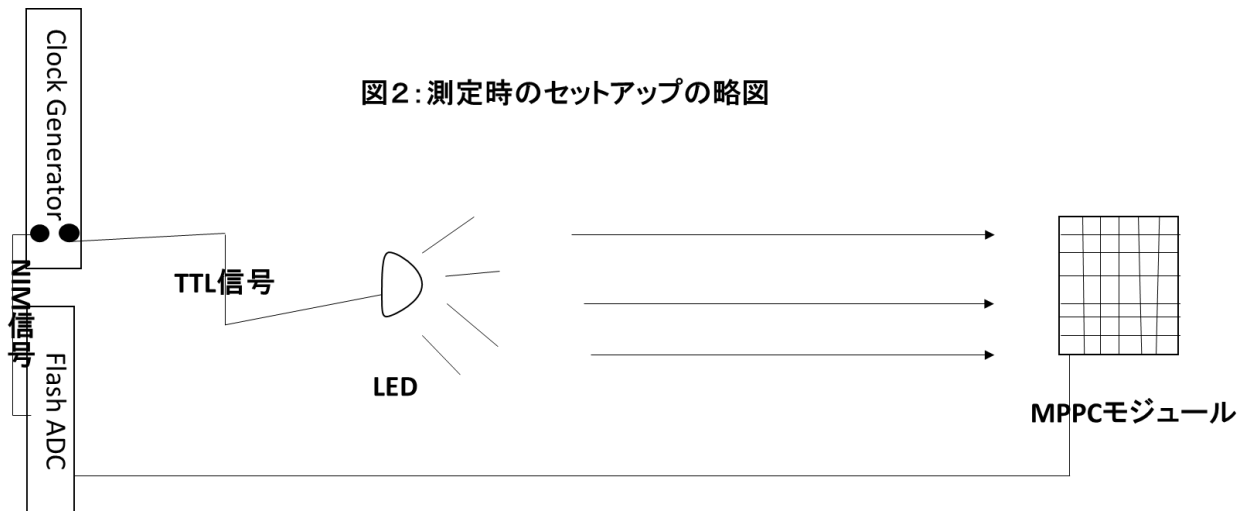


図2: 測定時のセットアップの略図



MPPCのセンサー
:ここで光を受け取る。
有効受光面サイズは
1×1mmである。

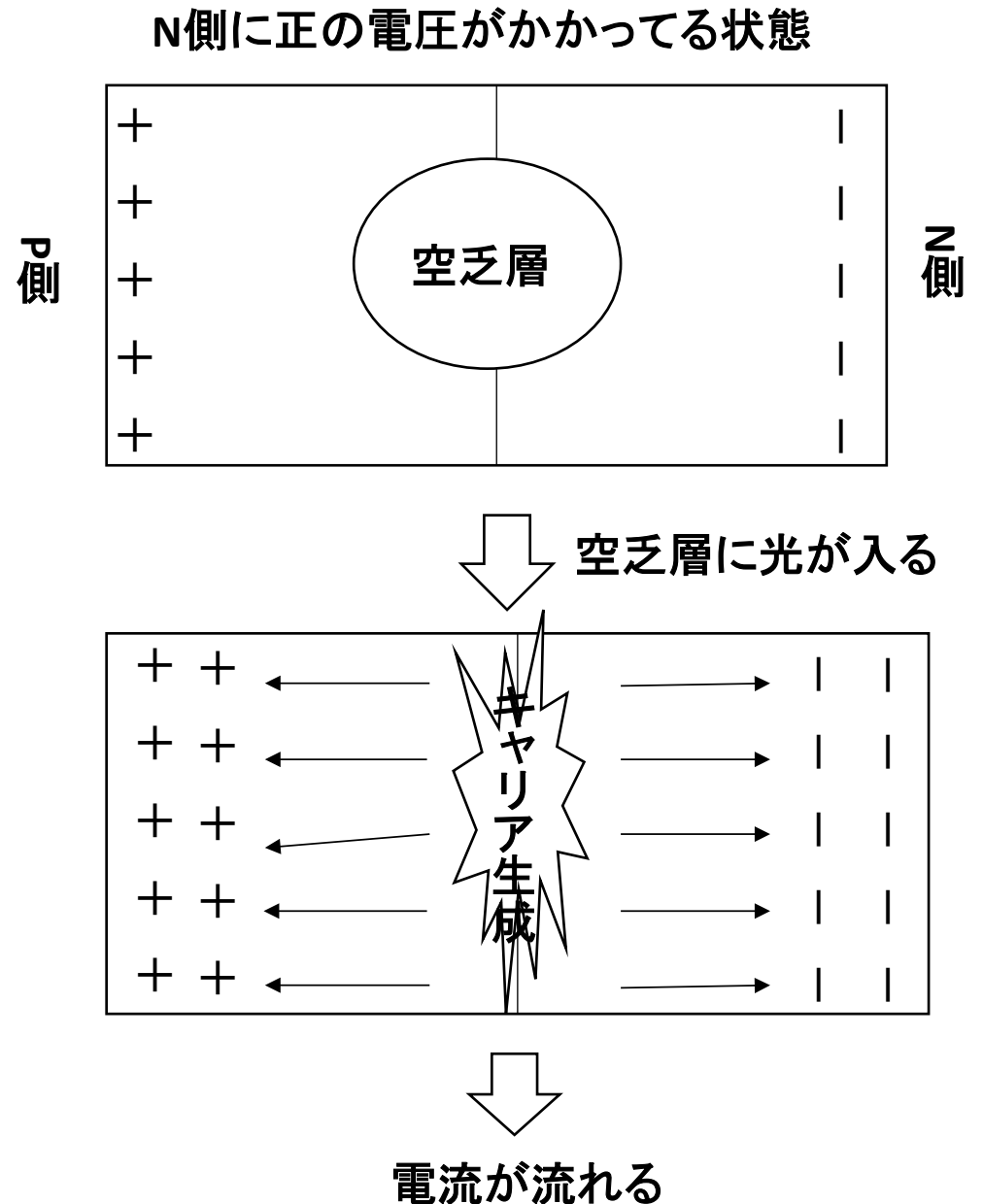
図8: MPPCの上面と前面の写真

MPPCの原理

実はMPPCはLEDと装置の原理は基本的に同じでLEDの光を発生させるのとは逆の光を吸収するのがMPPCの役割である。

MPPCはAPD (Avalanche Photo Diode)のピクセルを集めたもので、このAPDはN側に正の電圧をかけることで境界面から粒子が離れ空乏層という正負の粒子が極端に減少した領域ができる。この空乏層に光が入るとキャリア(正孔・電子)が生成される。このとき正の粒子はp側に負の粒子はN側に移動して電流が流れる。また発生した電子は加速されAPD内の電子と衝突して新たなキャリアをつくりその電子が加速され・・・と雪崩式 (Avalanche)に電流が流れ弱い光が入ってもその信号を増幅してくれる。

図6：APDの電流が流れる原理



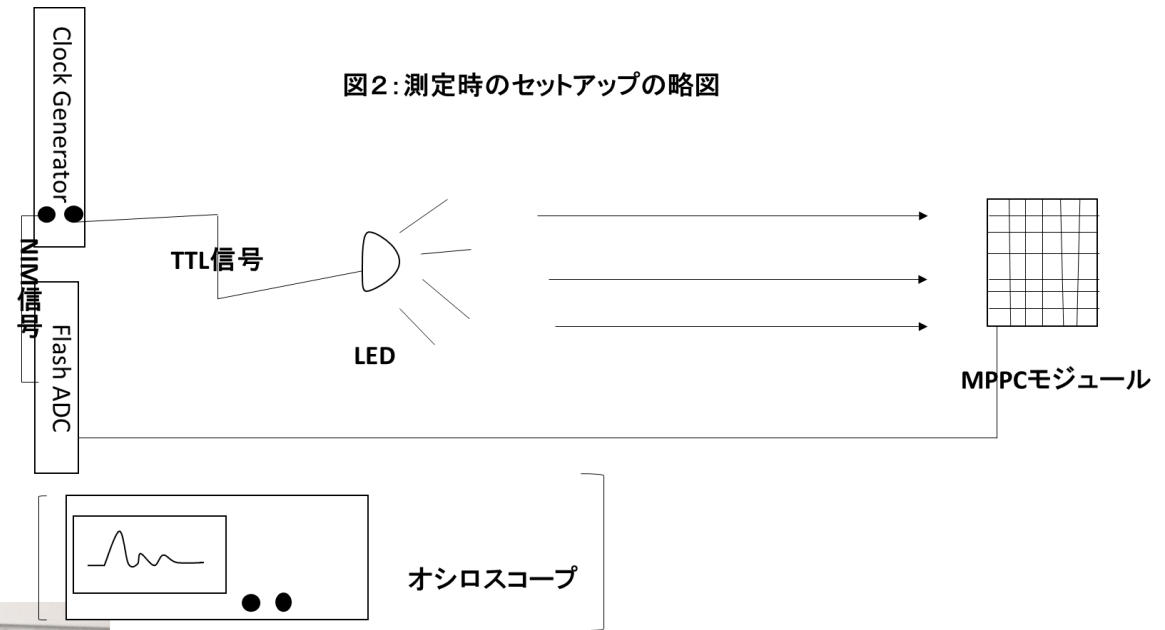
オシロスコープ

: Clock Generatorからの信号とMPPCからの信号をオシロスコープに表示することで目視で時間を調べて光速の値を算出できる。今回の実験でADCを使う前にまずオシロスコープで波形の様子などを観察した。

図10:オシロへの信号の受け取り画面



図2:測定時のセットアップの略図



Flash ADC (Analog-to-digital converter)
 : "LEDの光るタイミング"となるClock Generatorからの
 NIM信号をもらい、MPPCからの信号を受けて波形の
 形・面積を記録する。

図11: Flash ADCの信号波形

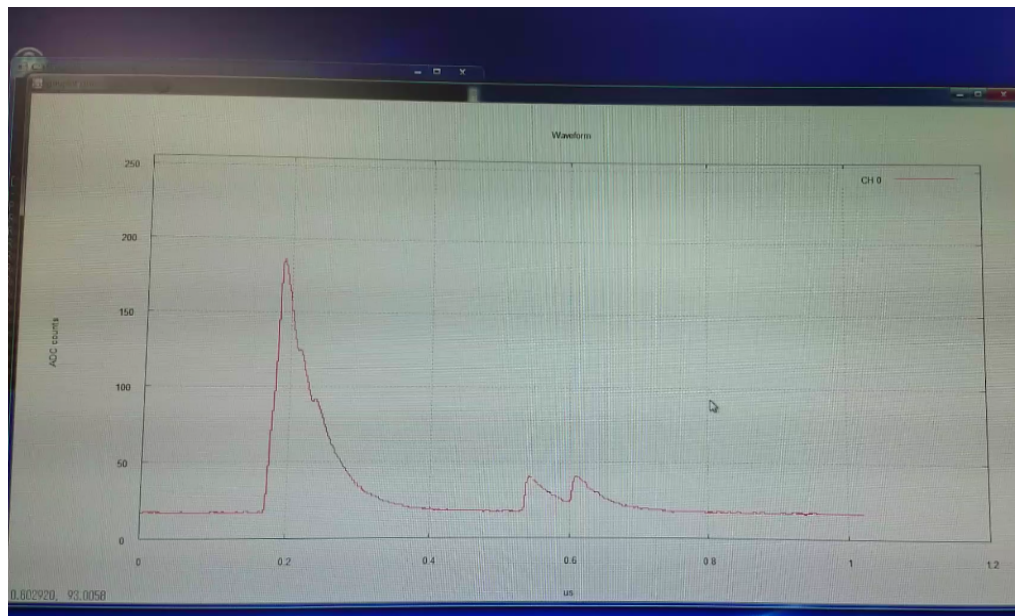


図2: 測定時のセットアップの略図

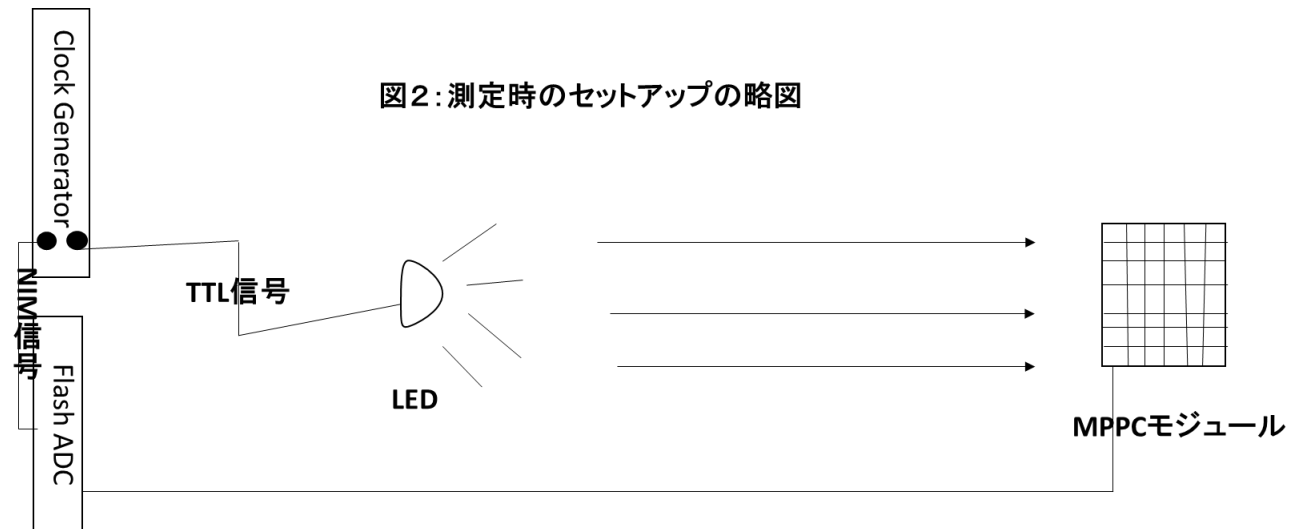


図12: Flash ADCの設置

まとめ

光を出すLEDとその光を検出するMPPCとの5ヶ所の距離において通過する時間を測定して光速を求める実験であった。

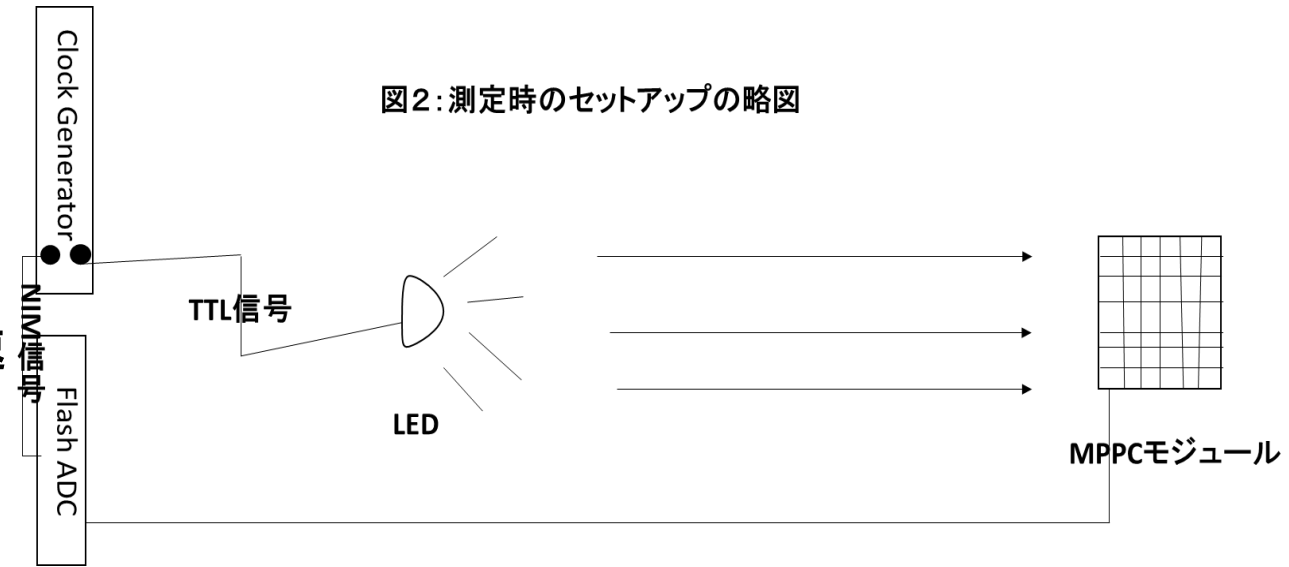
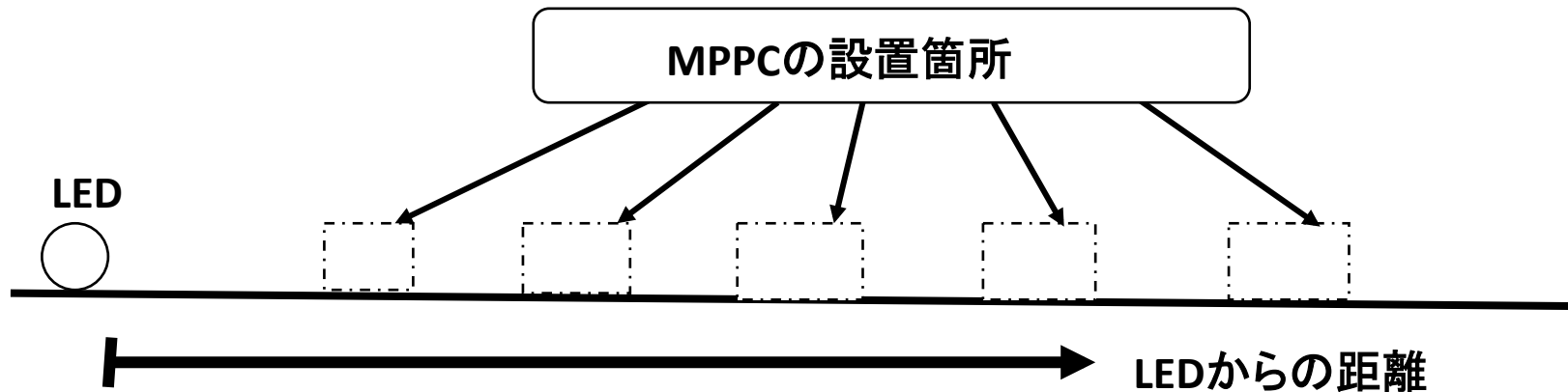


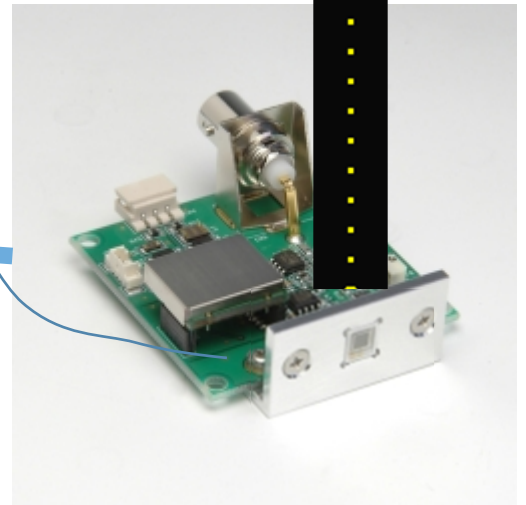
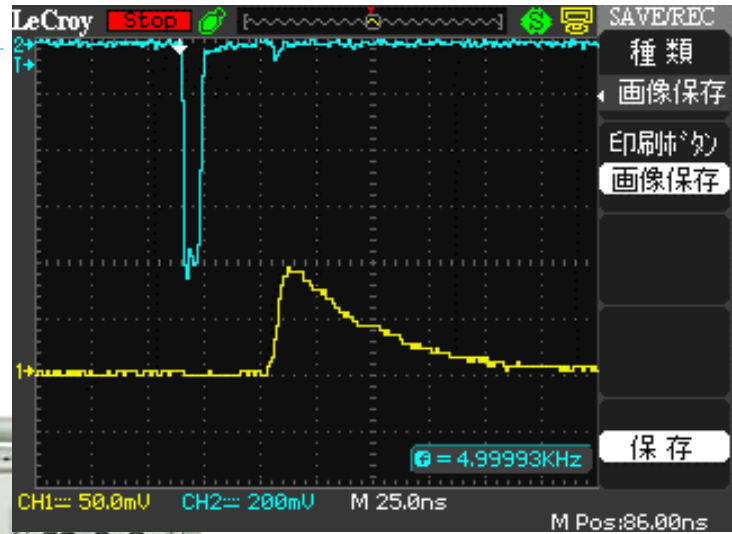
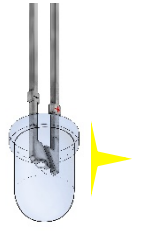
図7: 光源と検出器の配置図

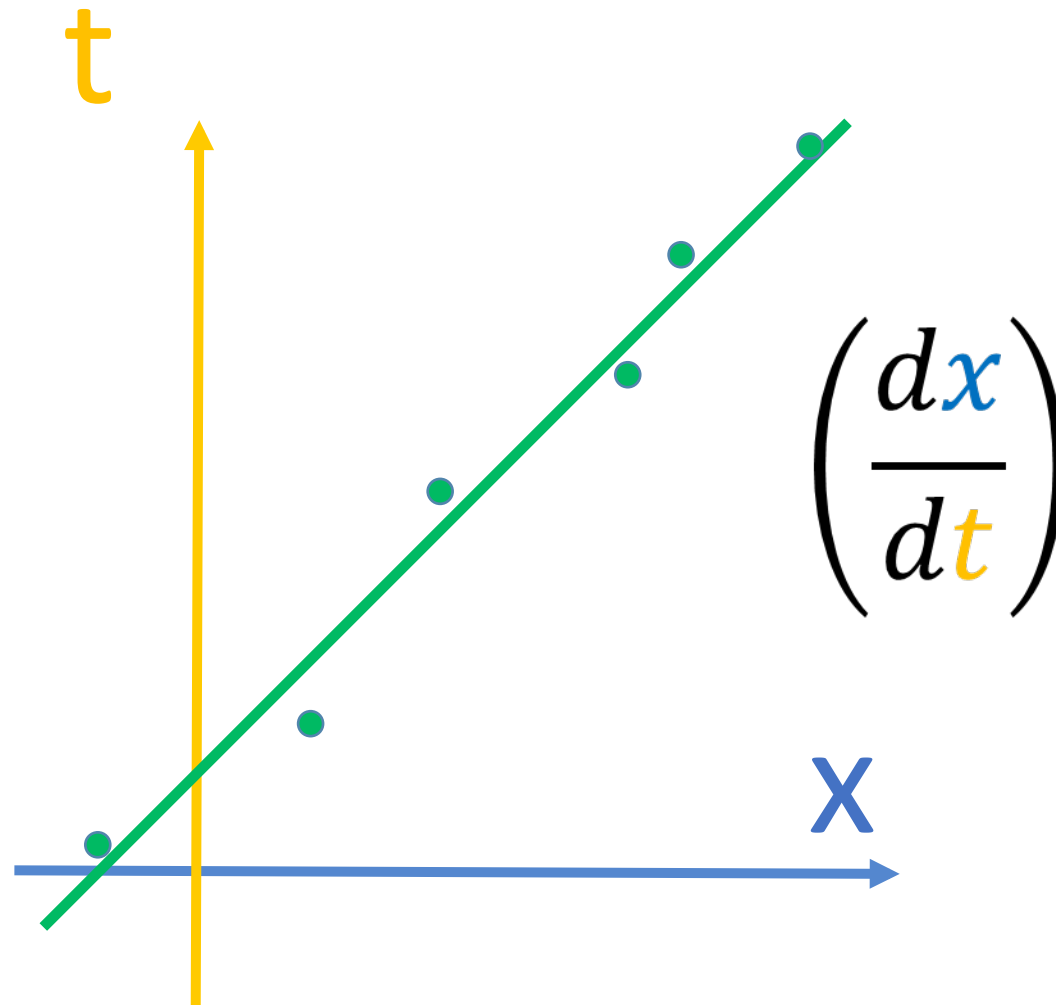
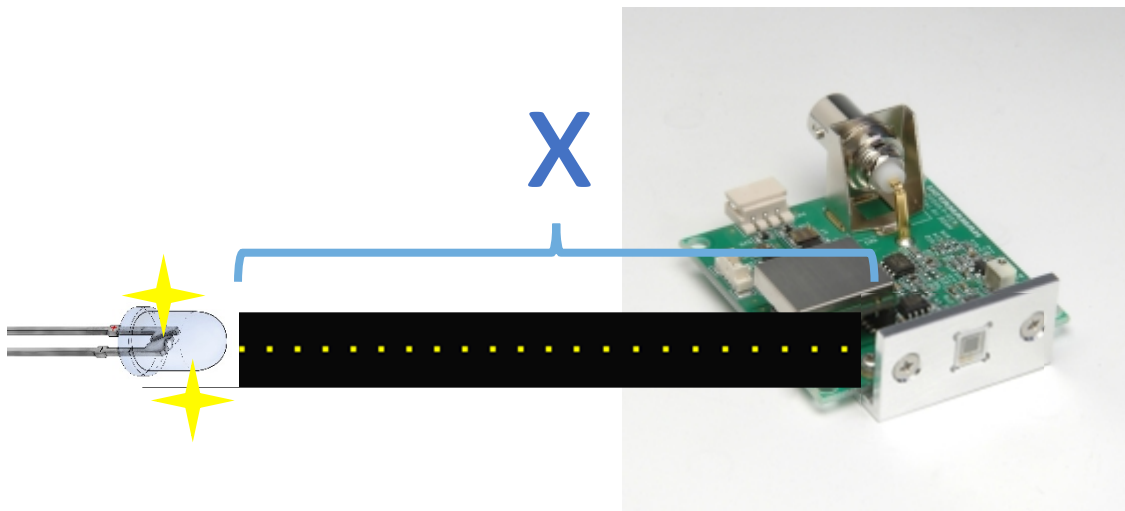
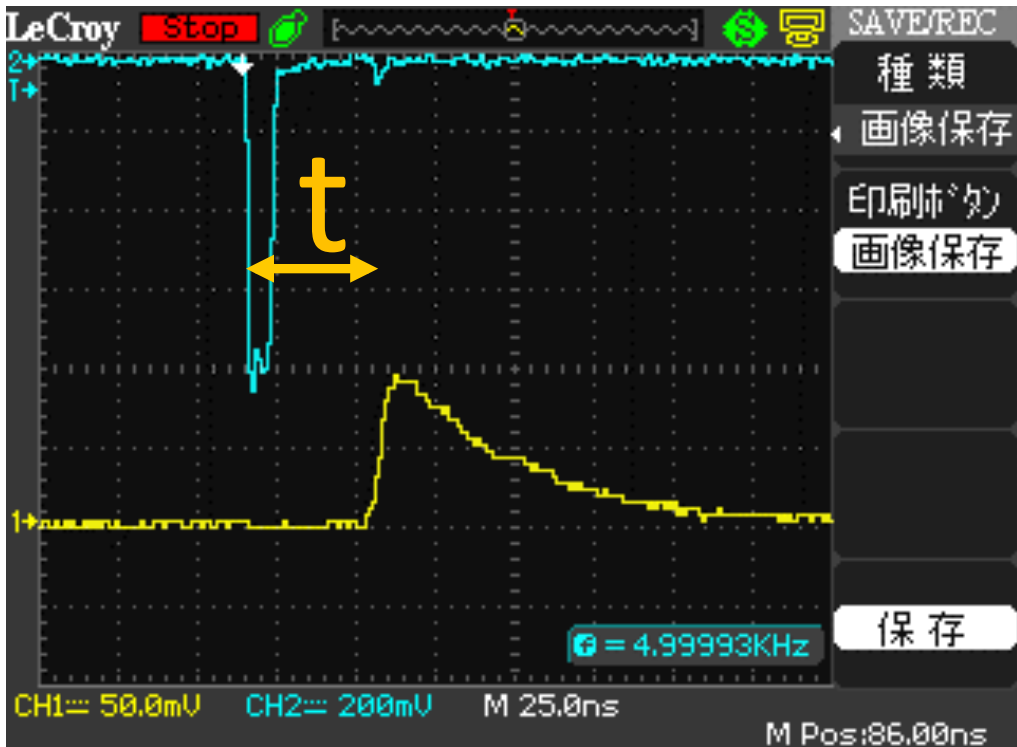


データ取得方法

A-1班 芝原 隆善

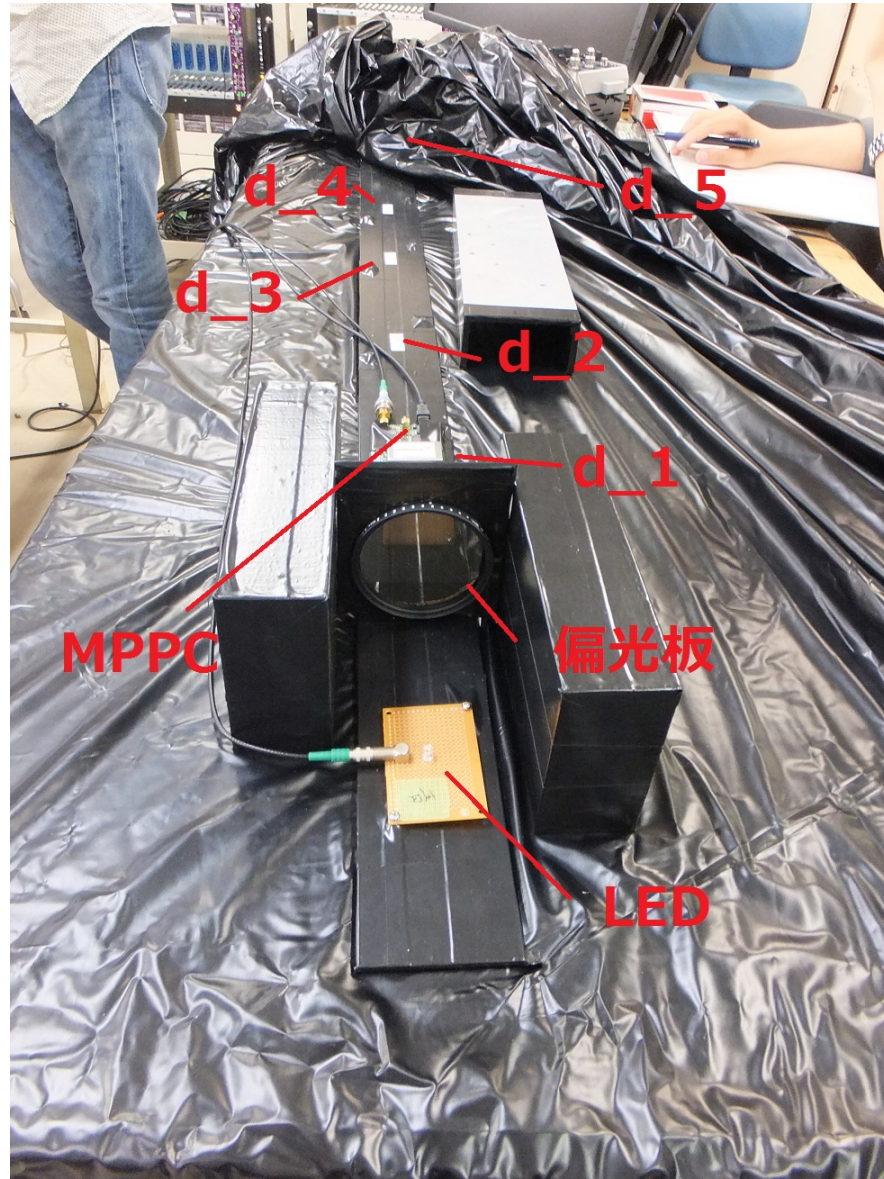
時間の測り方—電子制御





地点	d1	d2	d3	d4	d5
距離(mm)	0	200	400	559	800

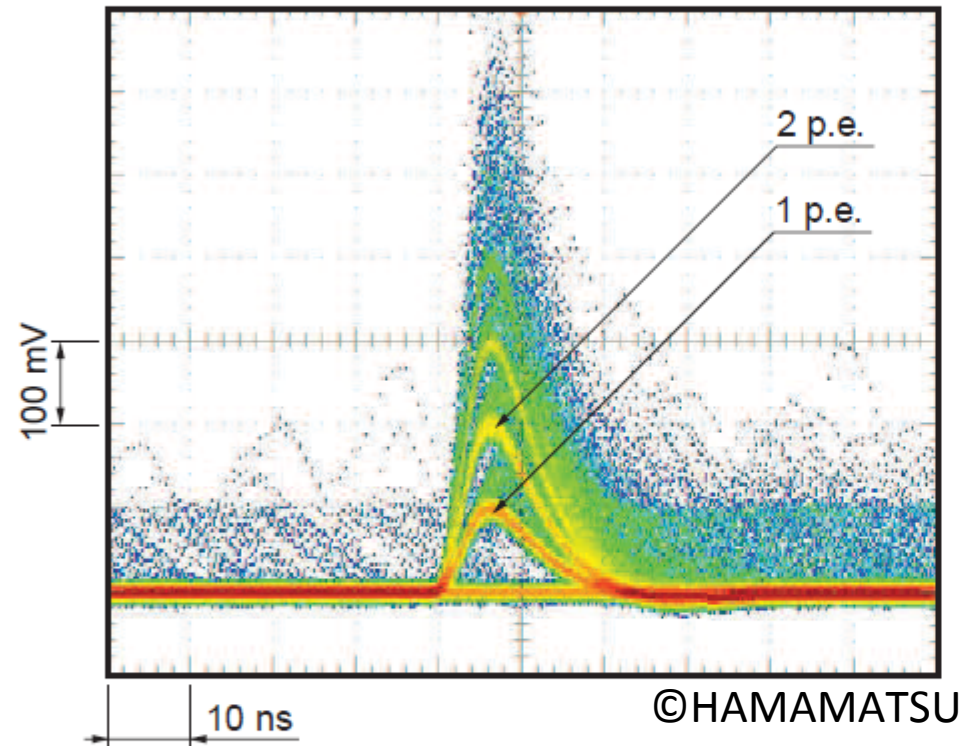
実際の実験では(写真)



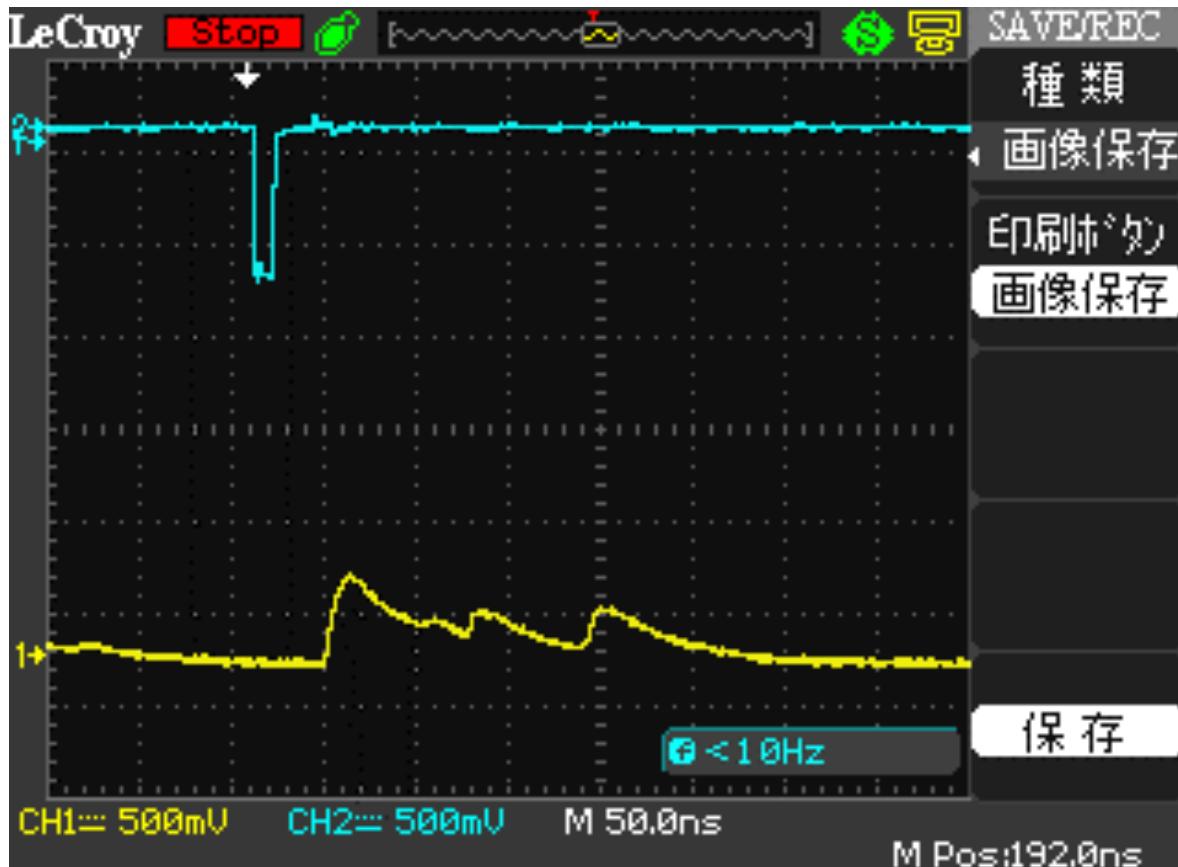
地点	d1	d2	d3	d4	d5
距離(mm)	0	200	400	559	800

なぜ光量を調節するか

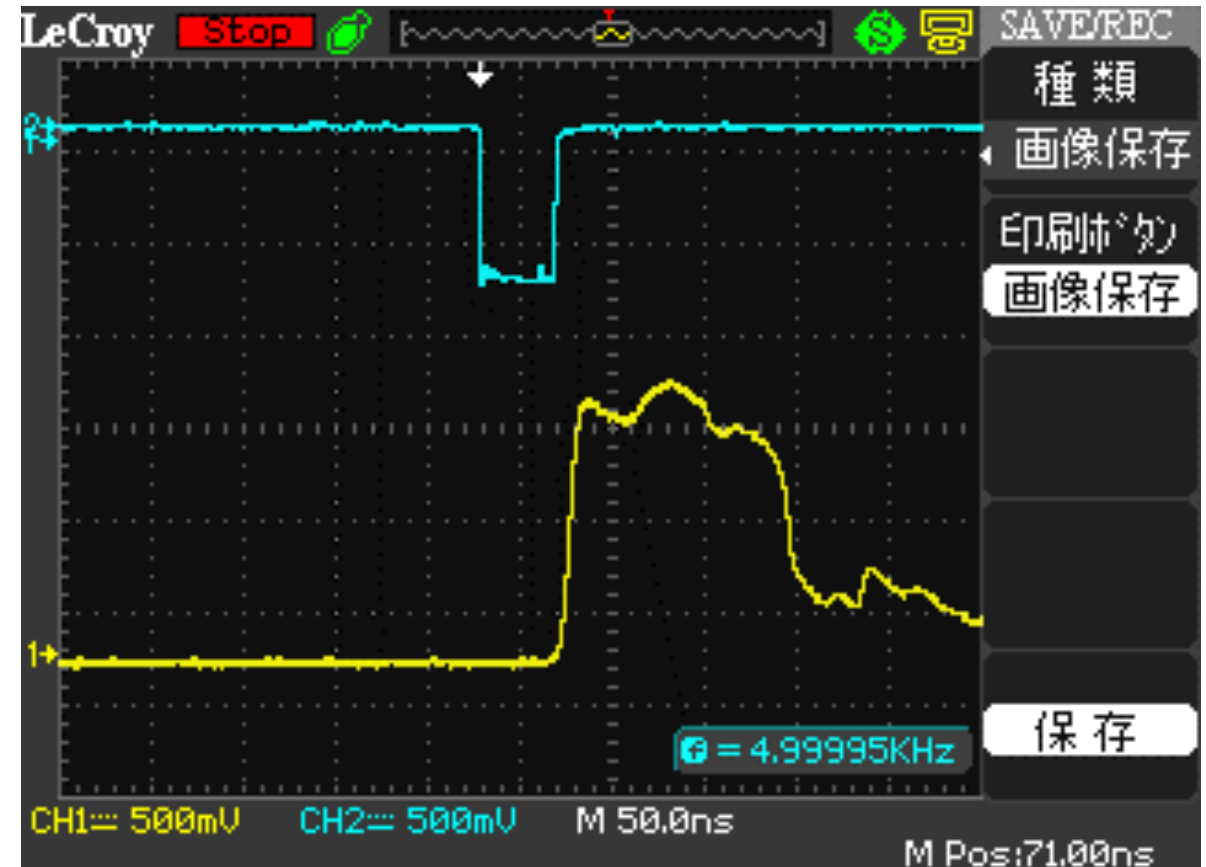
- 光子の数によって波形が変わってしまう



- 光子の数が増えると変な形が出やすくなる

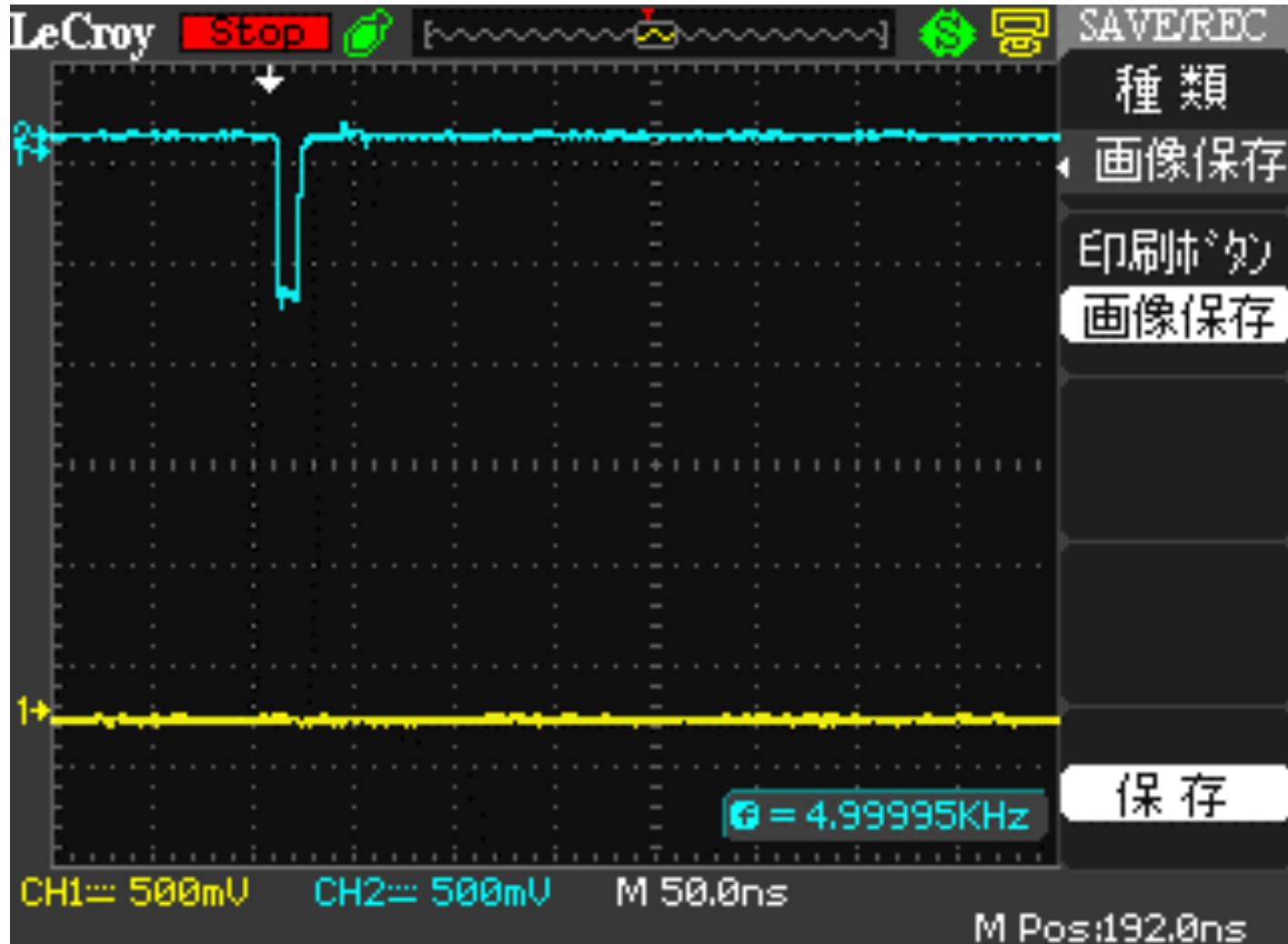


ピークが複数現れる



MPPCの能力を超える

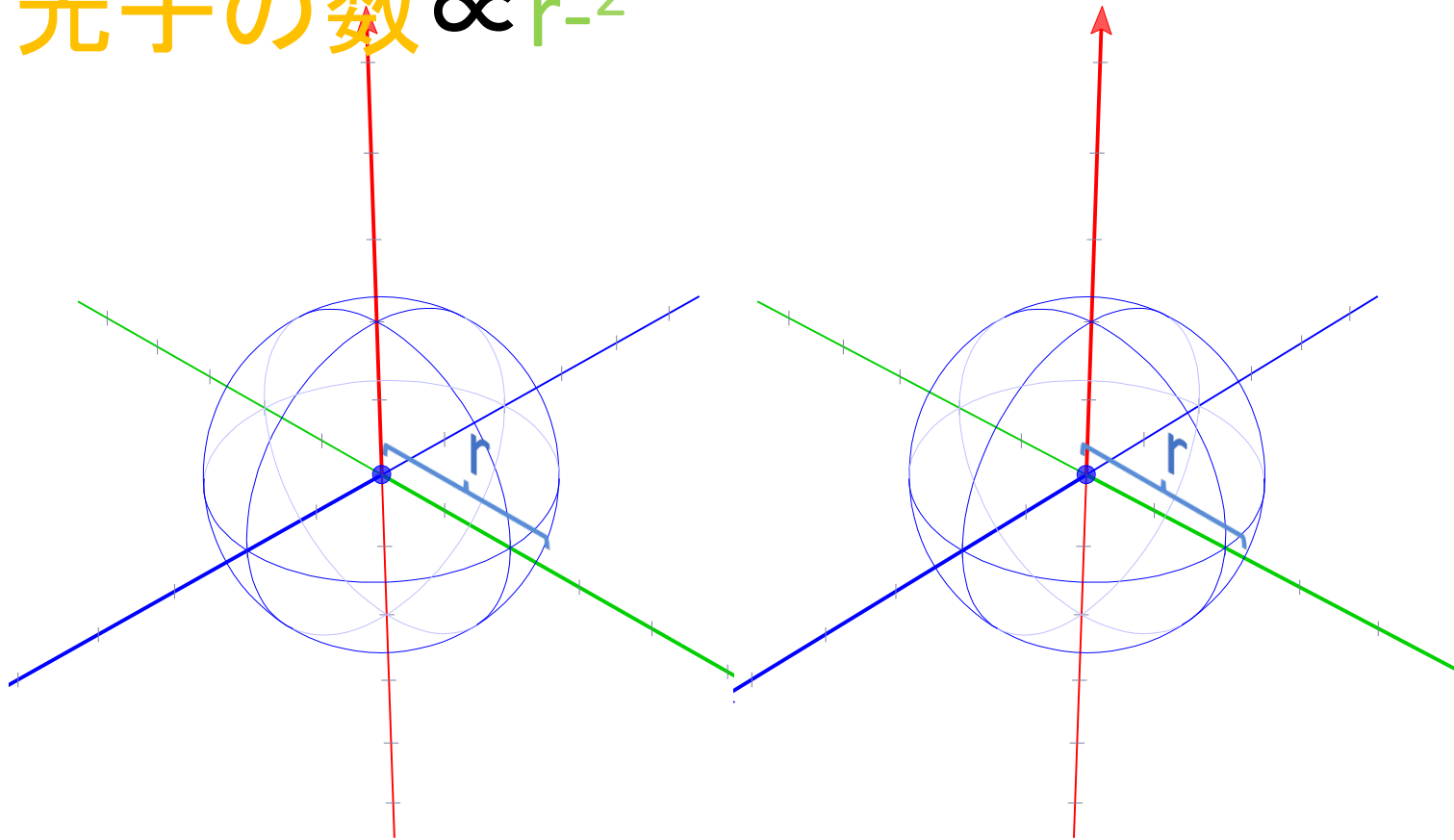
- 光子の数が減りすぎると全く検出されなくなる



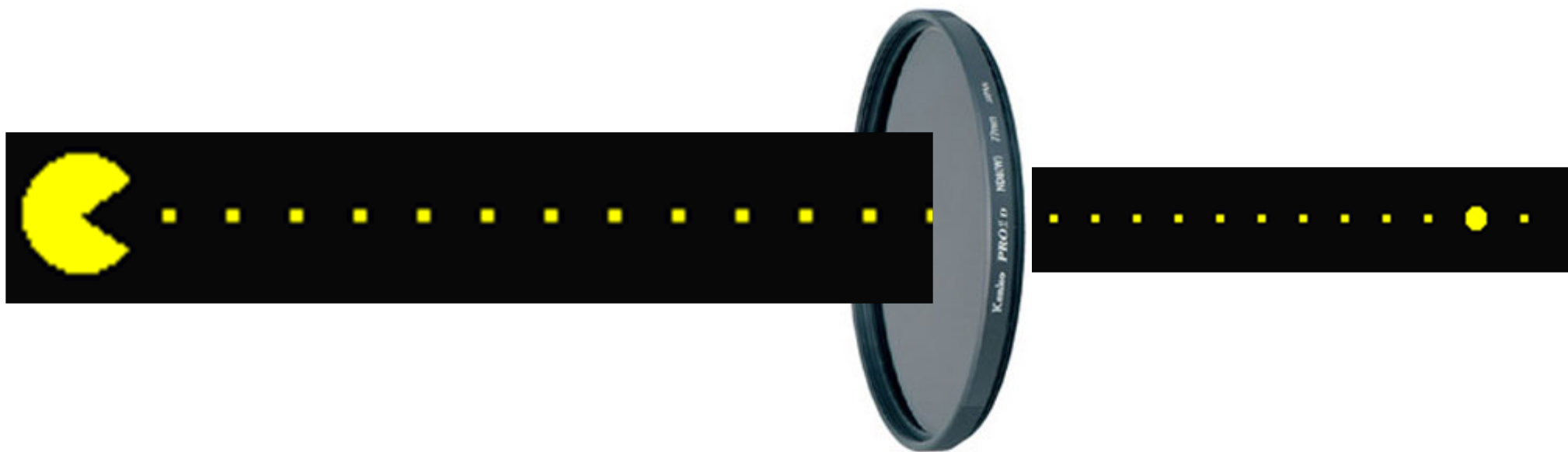
光の強さと距離

単位面あたりの光子の数 $\times 4\pi r^2 = \text{一定}$

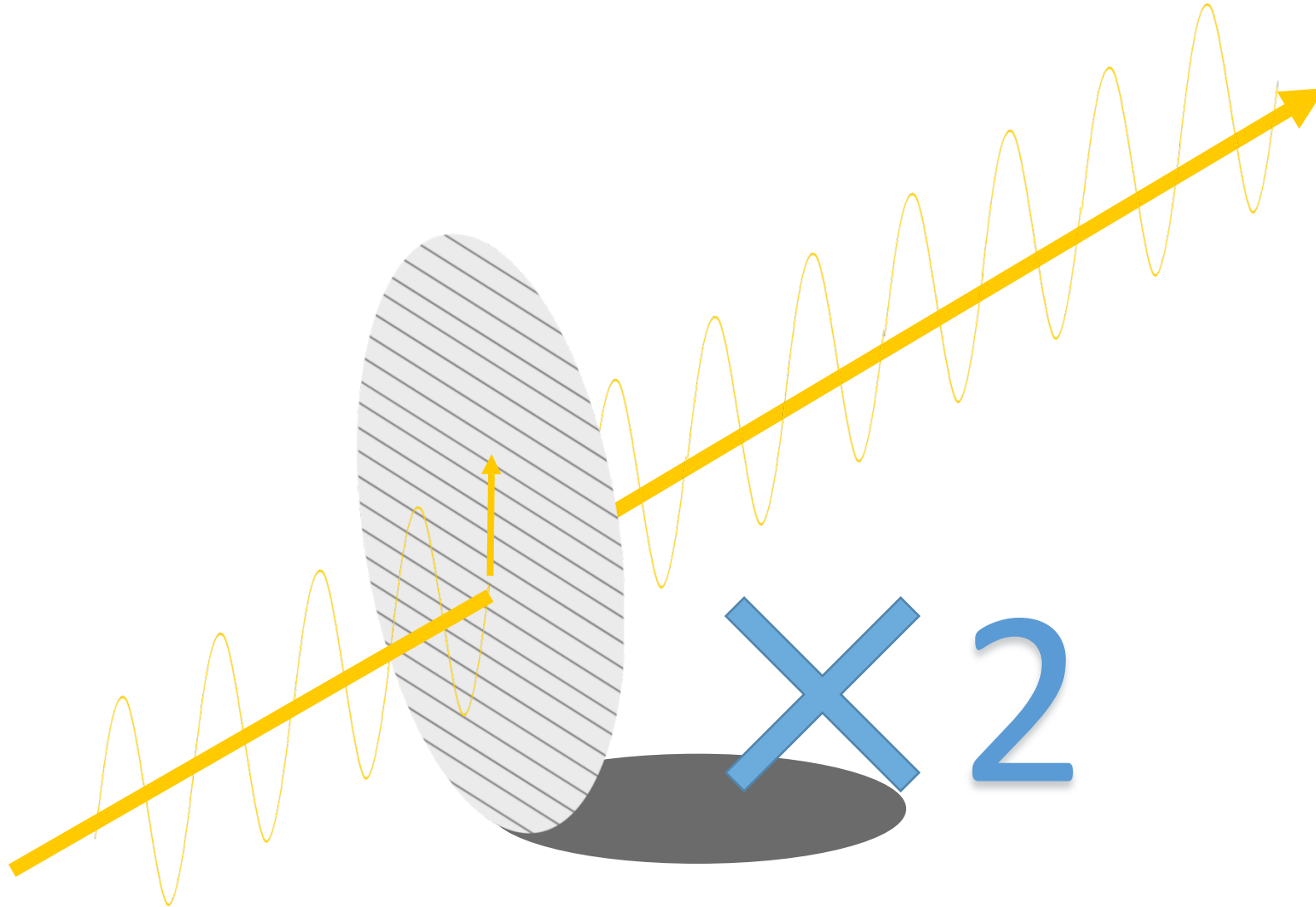
\therefore 光子の数 $\propto r^{-2}$



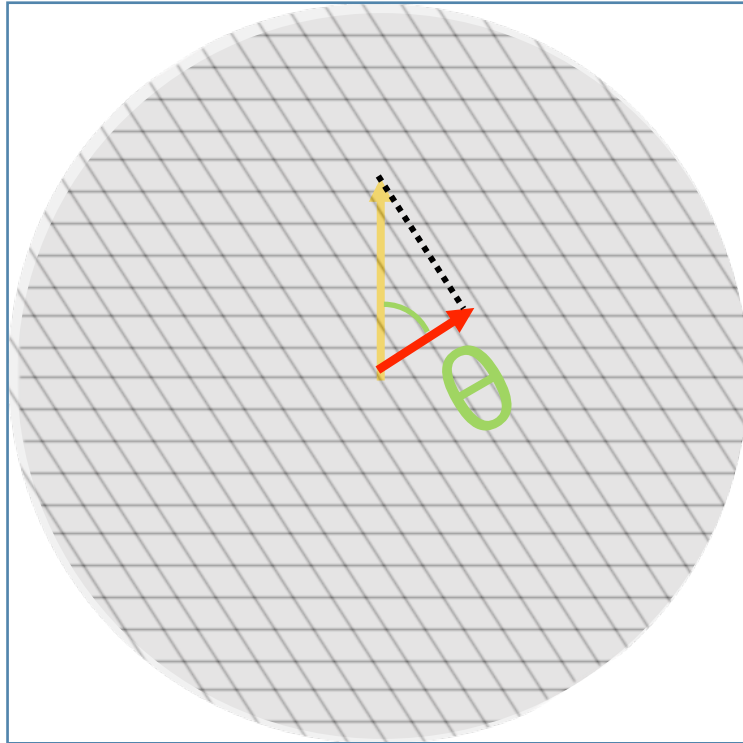
偏光板による光量の調整



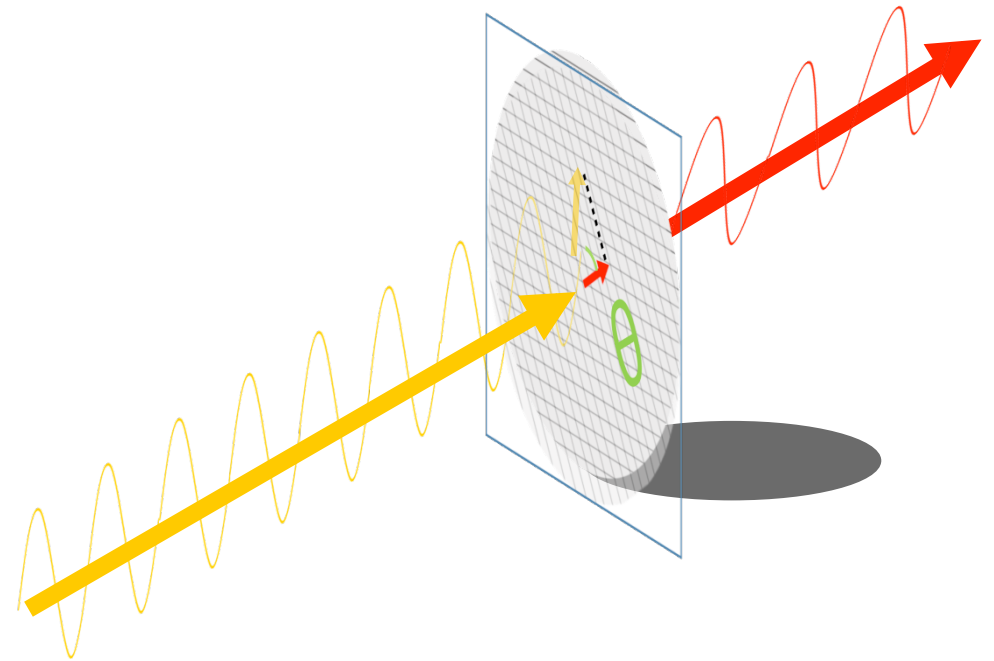
偏光板の仕組みと光量



偏光板の仕組みと光量その2



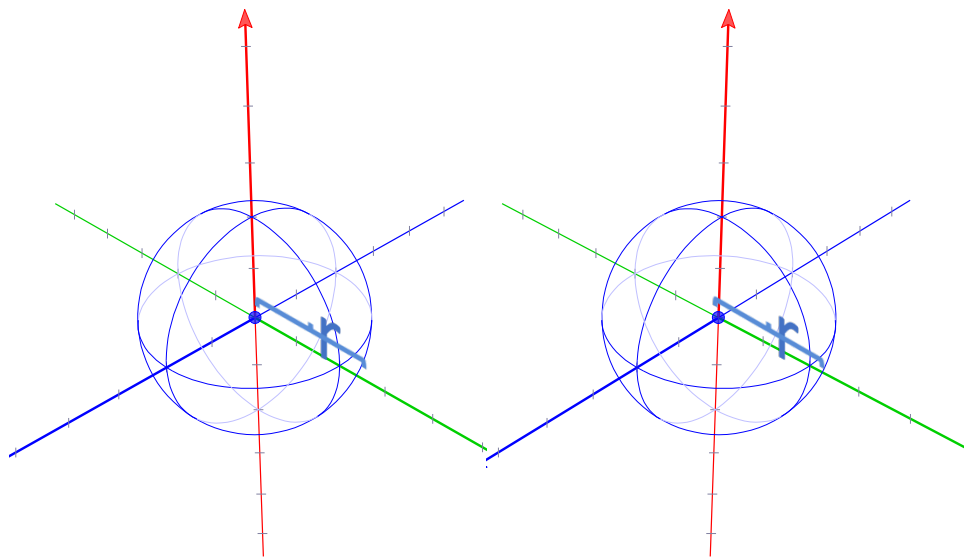
通過後
= 通過前 $\times \cos\theta$



光の強さと距離

単位面あたりの光子の数 $\times 4\pi r^2 = \text{一定}$

\therefore 光子の数 $\propto r^{-2}$



で影響を打ち消そう！

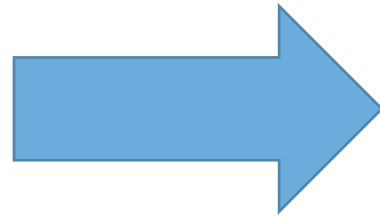
ちょっとサンスウ

光子の数 $\propto r^{-2}$

かつ

通過後

= 通過前 $\times \cos\theta$

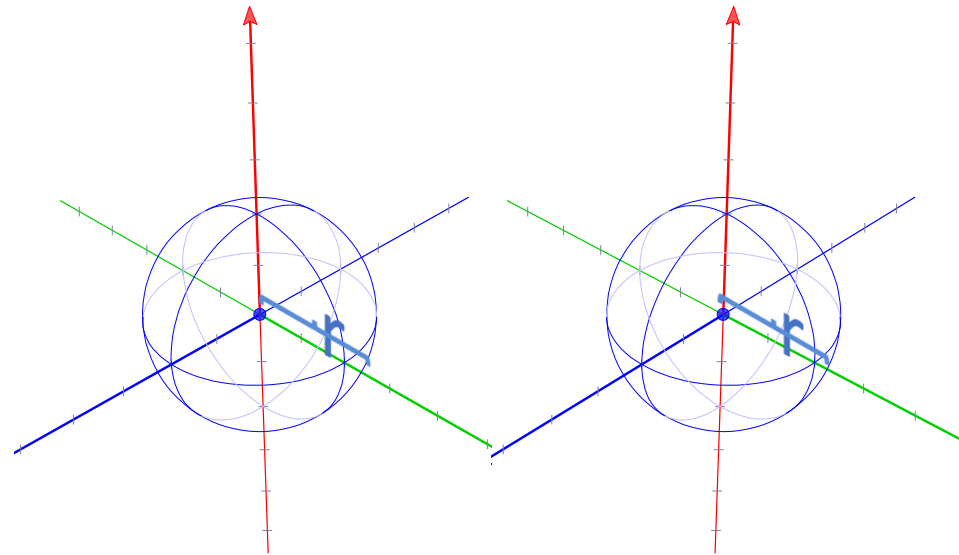
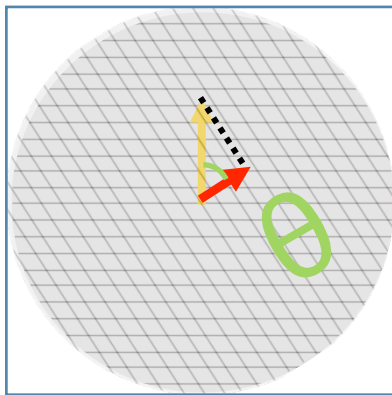


通過後

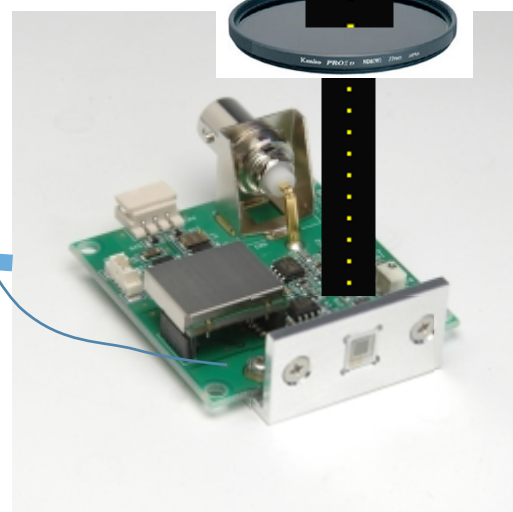
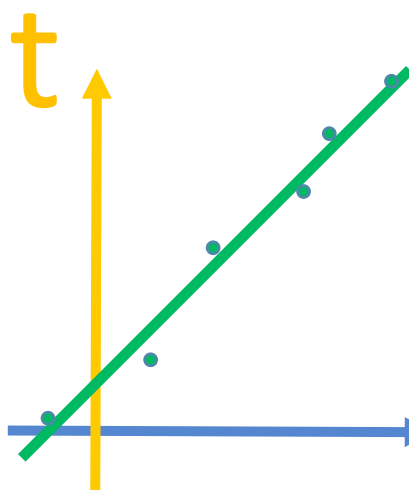
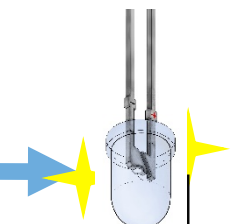
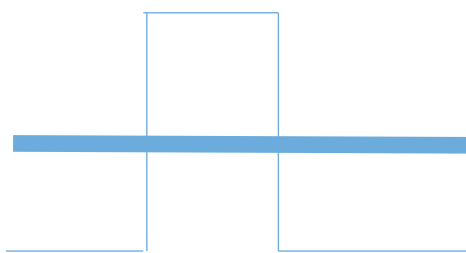
= 通過前 $\times \cos\theta$

$\propto r^{-2} \times \cos\theta$ = 一定には

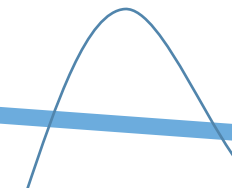
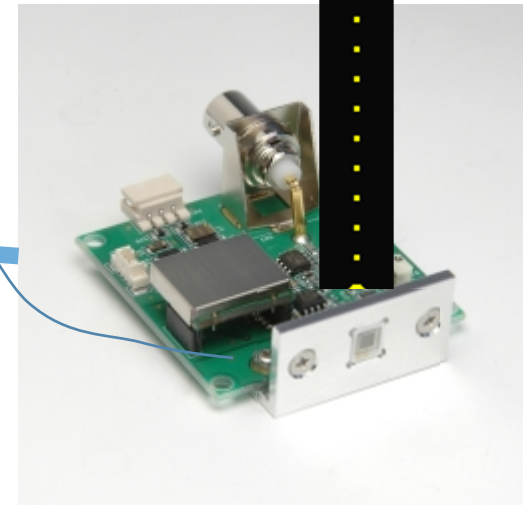
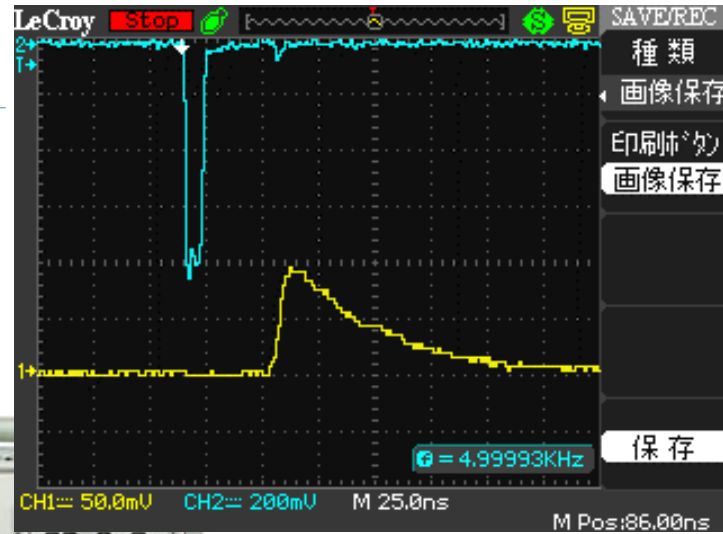
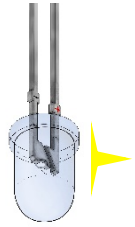
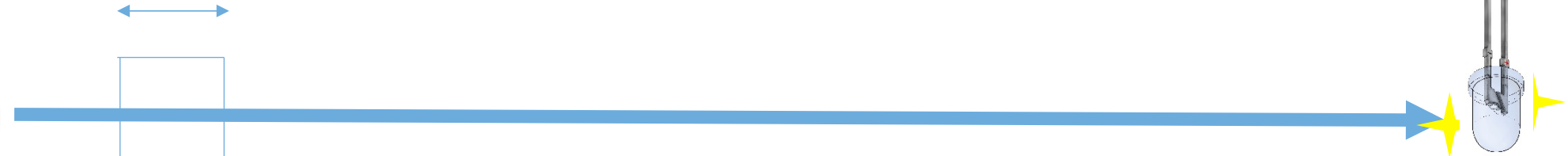
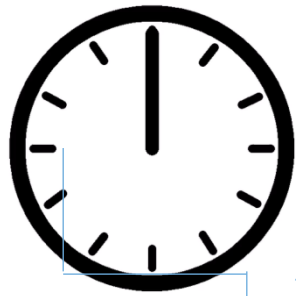
$\rightarrow \cos\theta \propto r^2$ とすればよい



他の改善点



時間の測り方—電子制御



3B SCIENTIFIC
www.3bs.jp

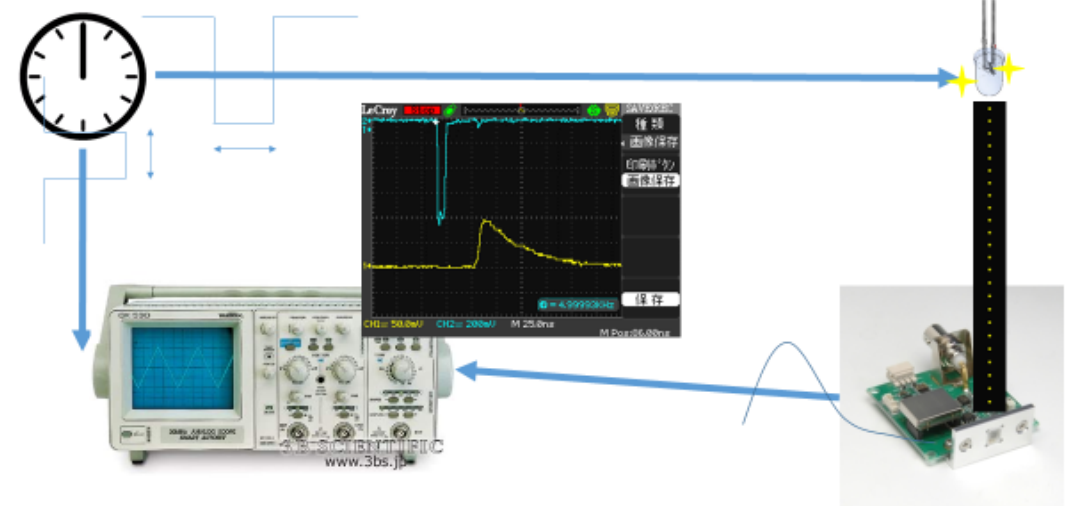
LED点灯時間の影響

LED点灯時間が変わる

→MPPDからの信号が変化する

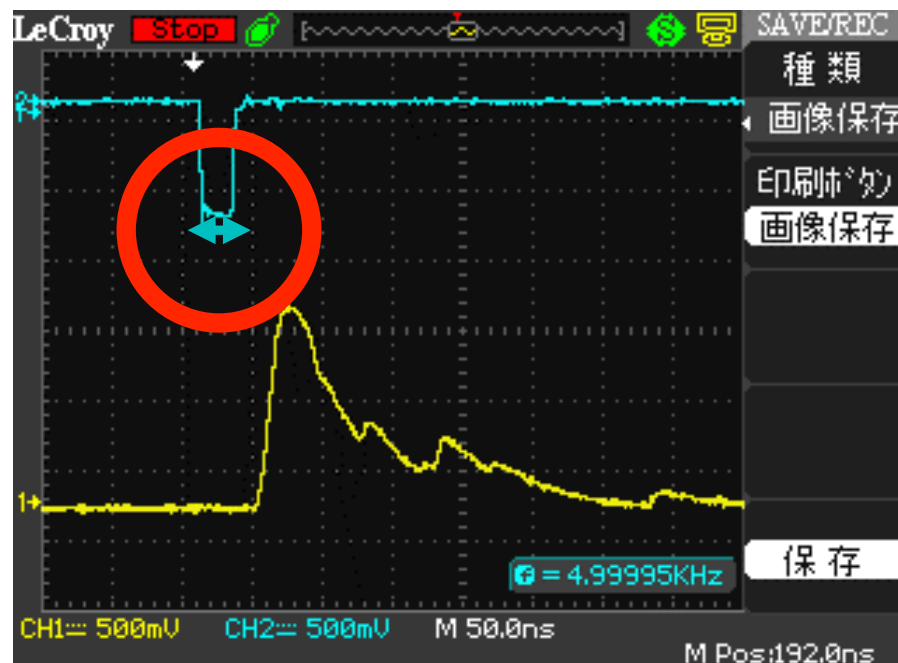
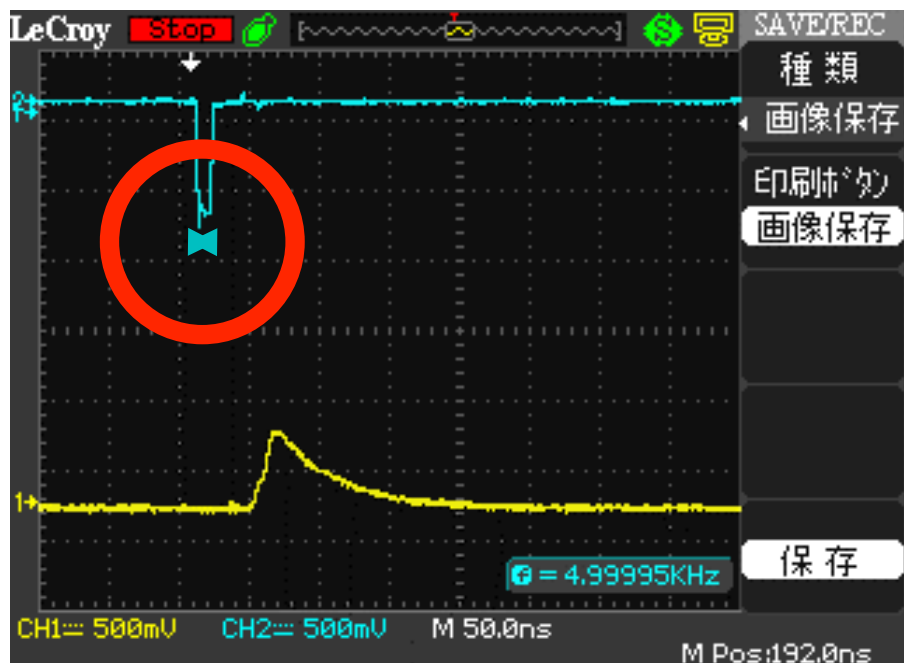
→その影響は？

時間の測り方—電子制御

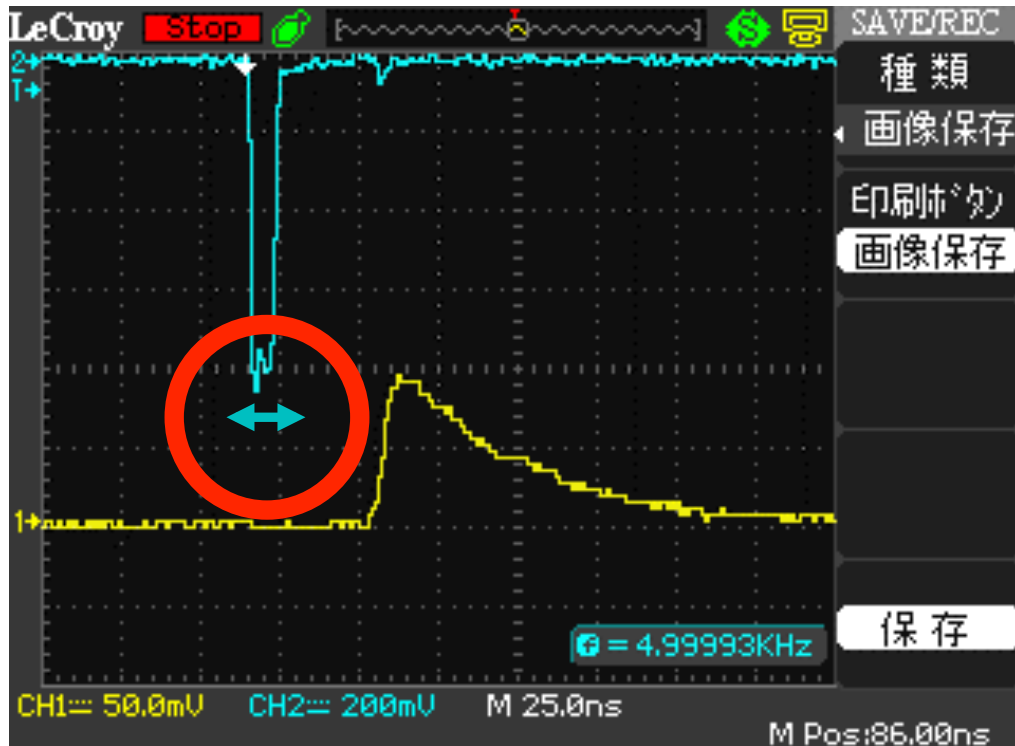


点灯時間を長くすると？

- MPPCに入ってくる量子数が増える(反射もある)



LED点灯時間の変更(比較実験)



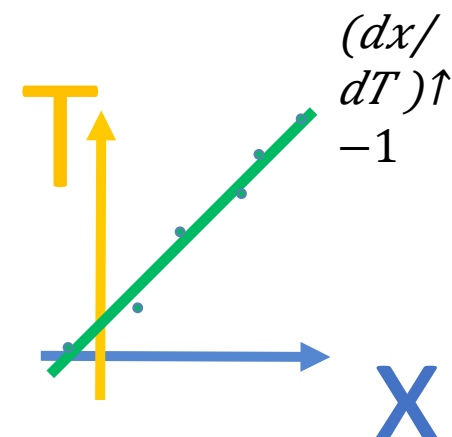
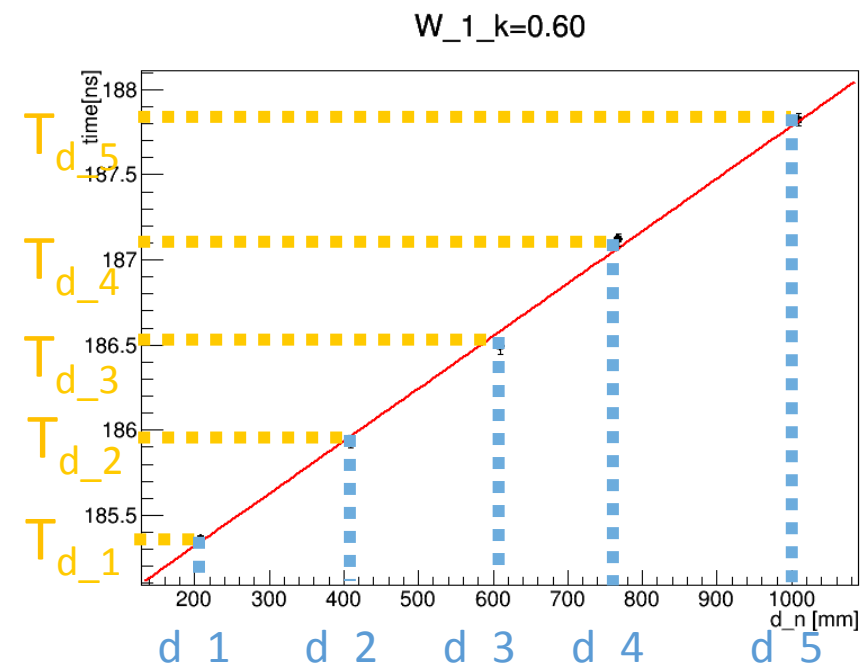
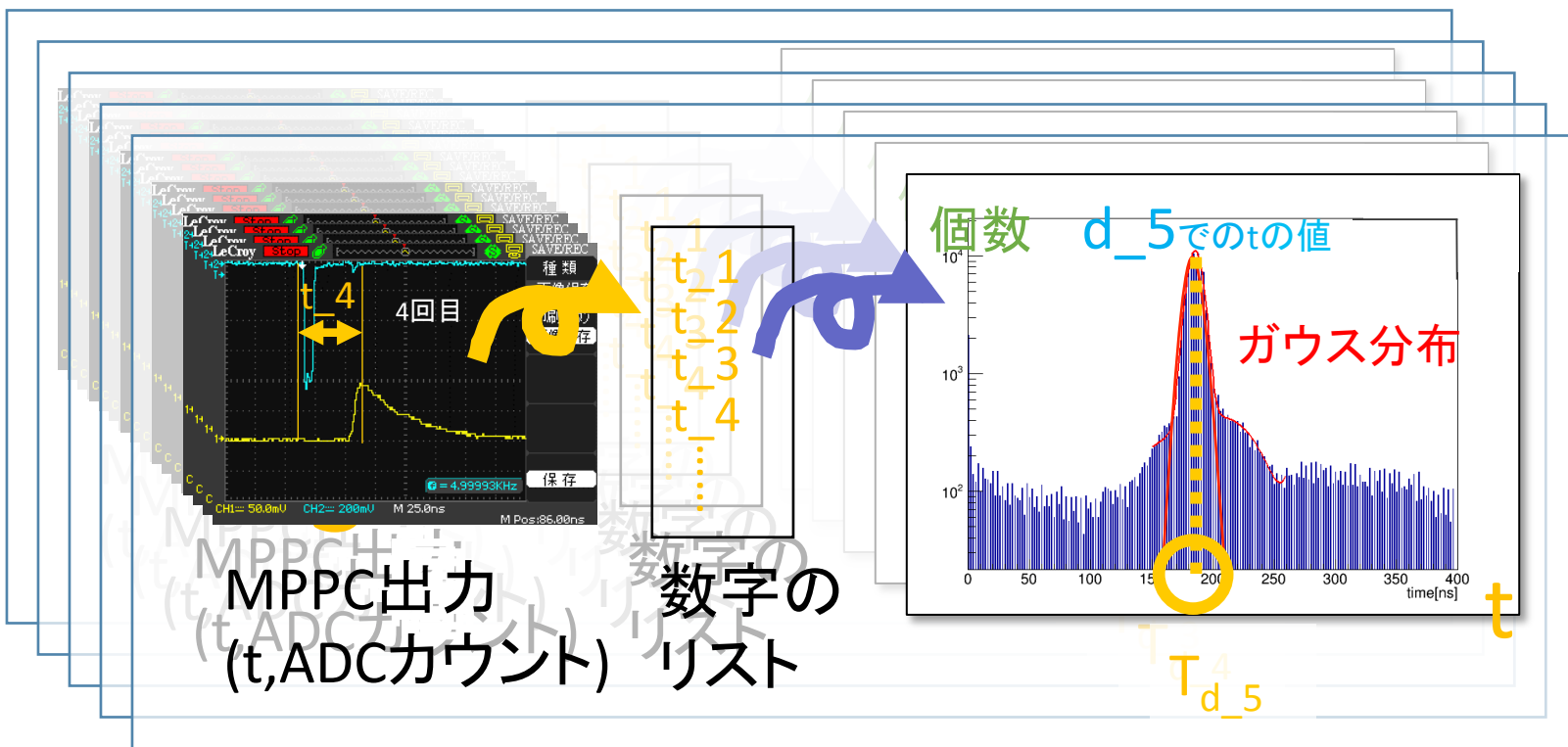
○ の部分の大きさ
(LEDを点灯時間)を変更

1回目: 16.0ns

2回目: 30.0ns

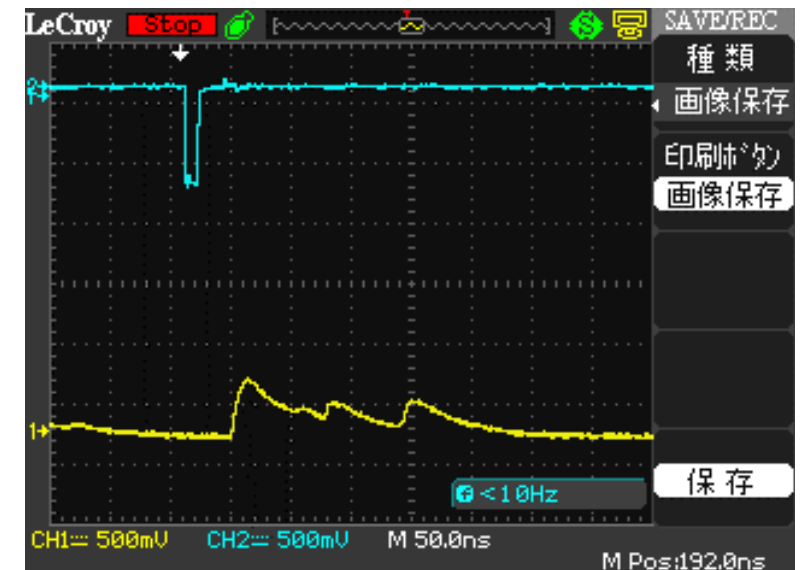
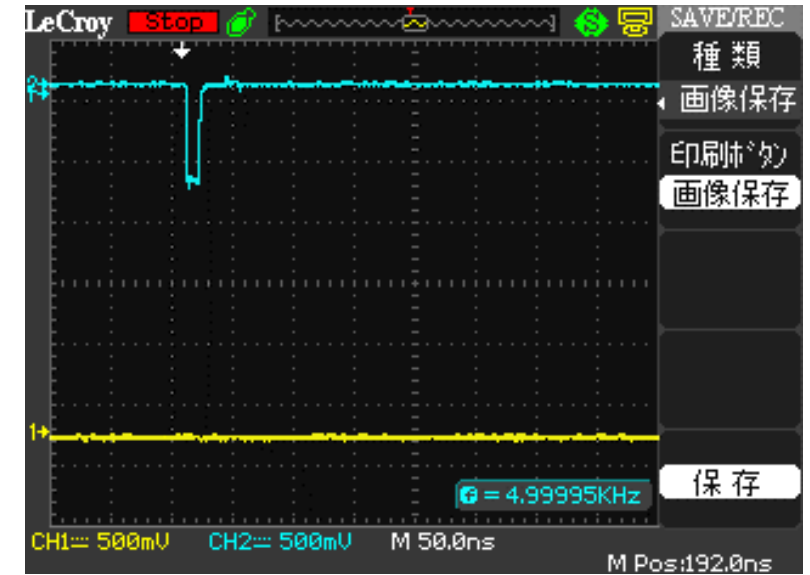
解析

解析の流れ



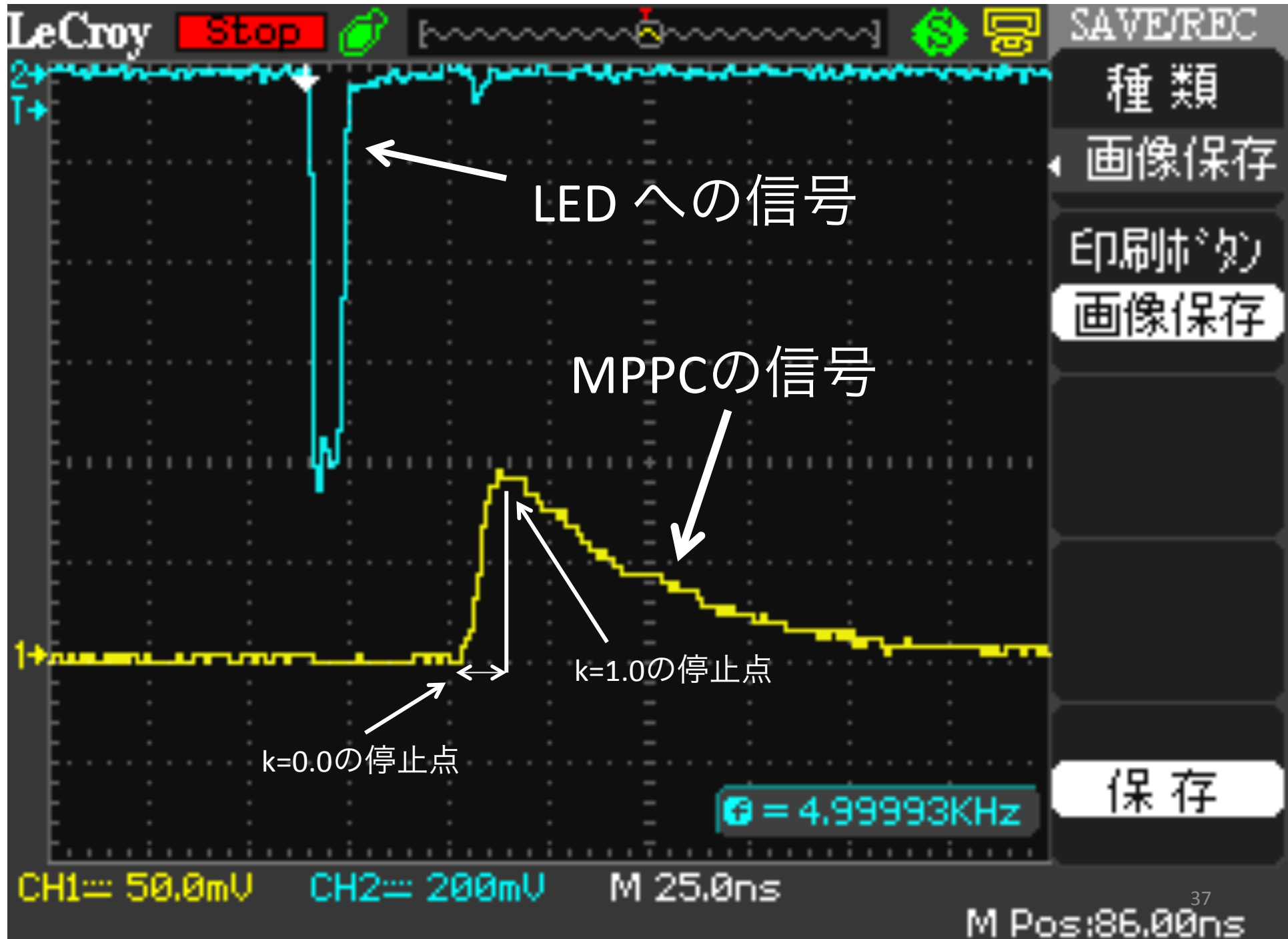
解析流れーイベント選択

- 変なデータが出てきてしまう
- 単純に全イベントの平均×
- 悪いイベントを排除



光速度の測定に関して 実験データの解析結果

A-1
石崎貢平



解析のpoint

- 停止点の設定によって5点プロットの直線からのずれが大きくなる
 - 停止点の選び方による直線フィットの不定性が存在する

2つの解析手法

- MPPCで検出する粒子の個数について

- 1, フォトンの個数にかかわらず解析する

- 2, 特定の個数の光子に限定して解析する

- 1Photonは誤差の原因となるゴミデータが多すぎる

- 3Photon以上はエントリーが少ない

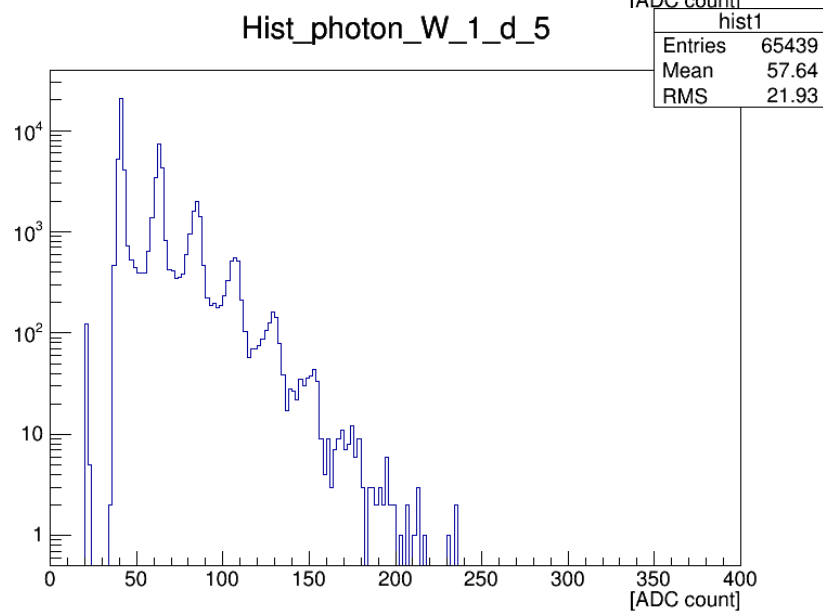
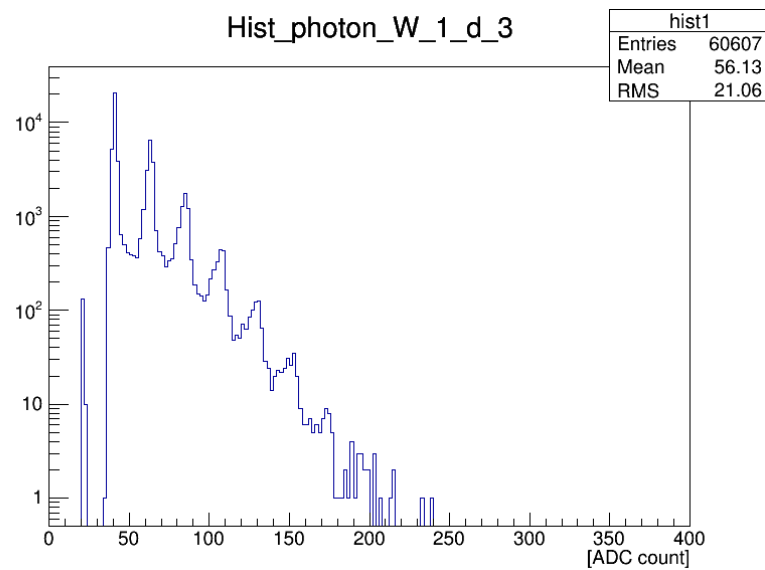
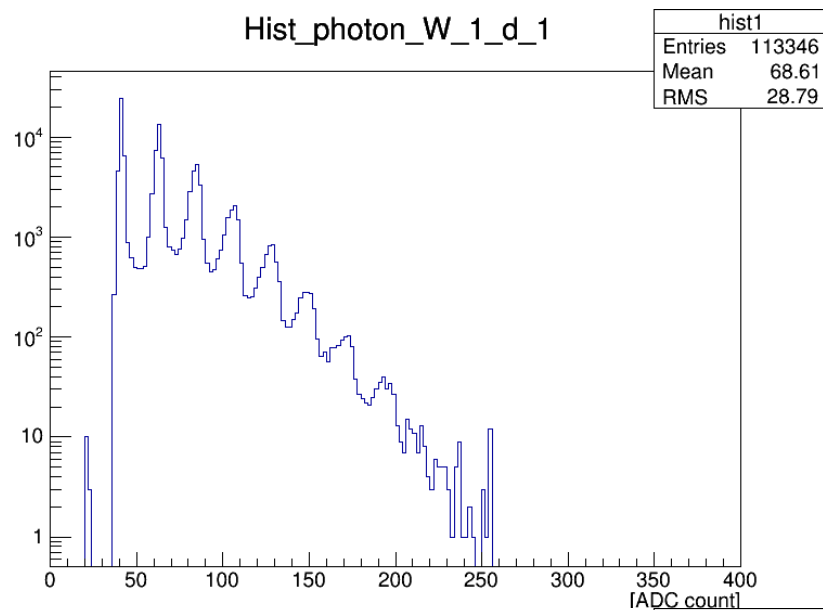
→2Photonのデータだけを取り出すと解析の精度が上がるか？

解析に使用する言語

- 『ROOT』
 - CERNで開発された解析ソフト
 - 高エネルギー物理学の研究が目的
 - C++がベースになっている



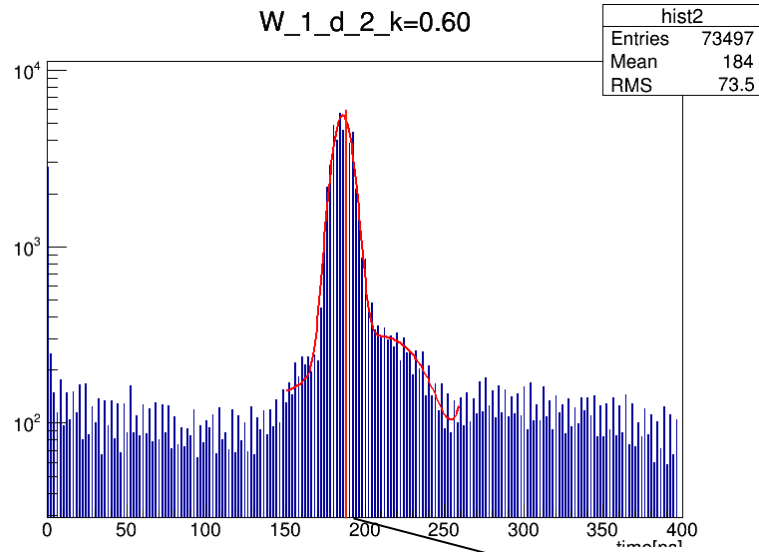
フォトンの検出個数について



d_n	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
Mean	68.61	59.04	56.13	58.41	57.64

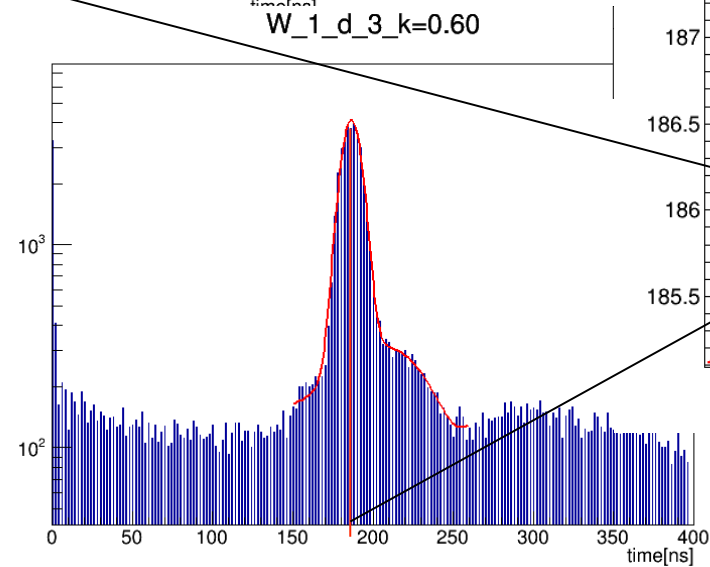
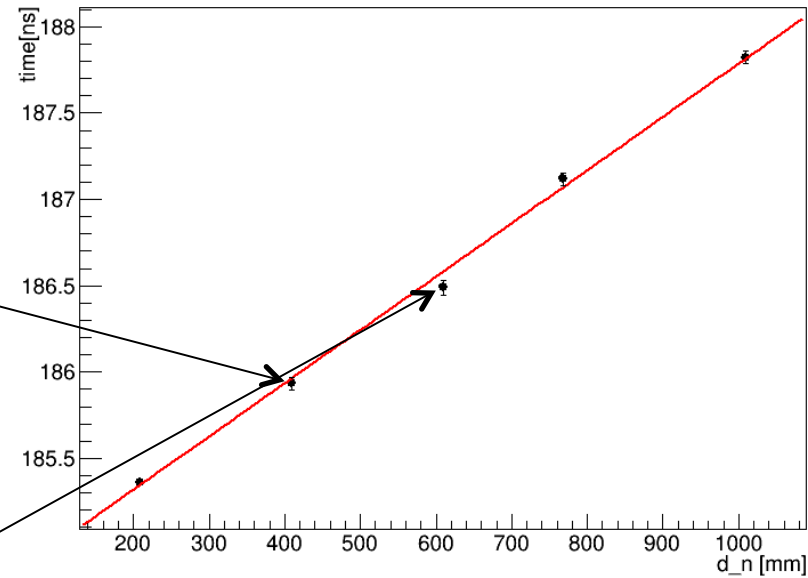
まず、はじめにすべての
時間データを元に作った
ヒストグラムを見てみましょう

ヒストグラムについて

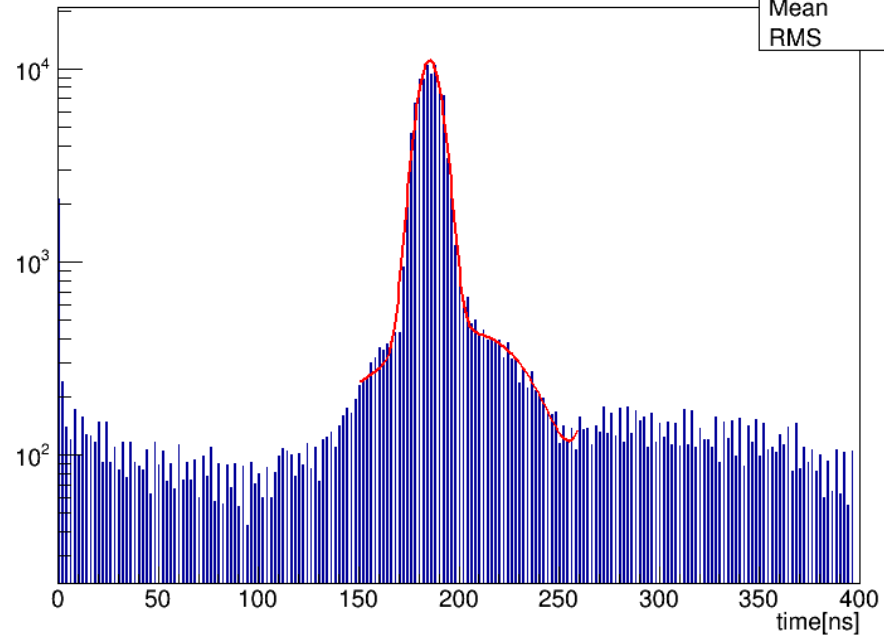


ヒストグラムはガウシアン+多項式でフィットされている

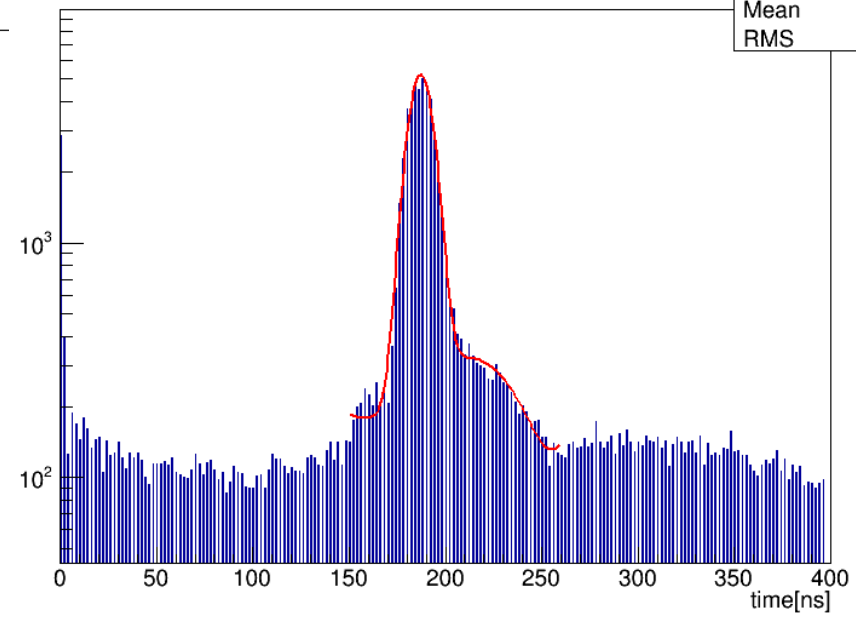
W_1_k=0.60



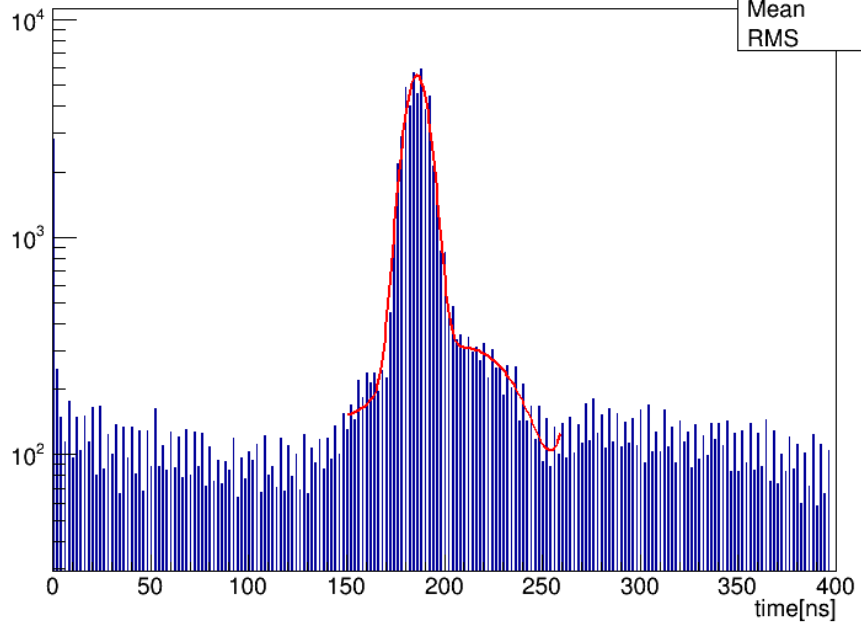
W_1_d_1_k=0.60



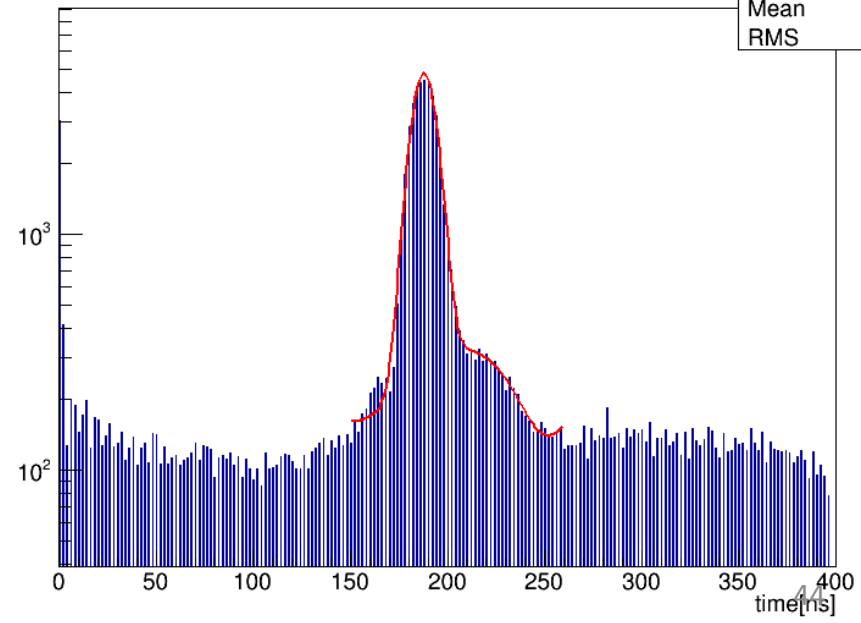
W_1_d_4_k=0.60

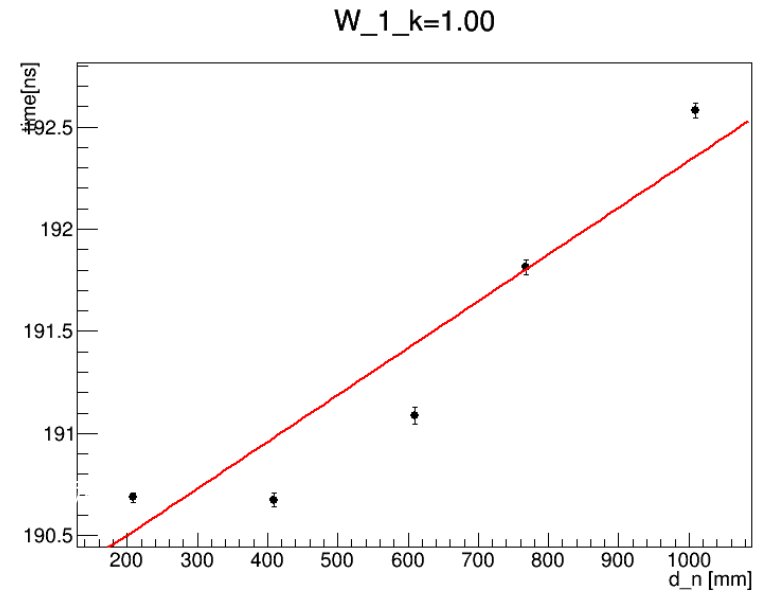
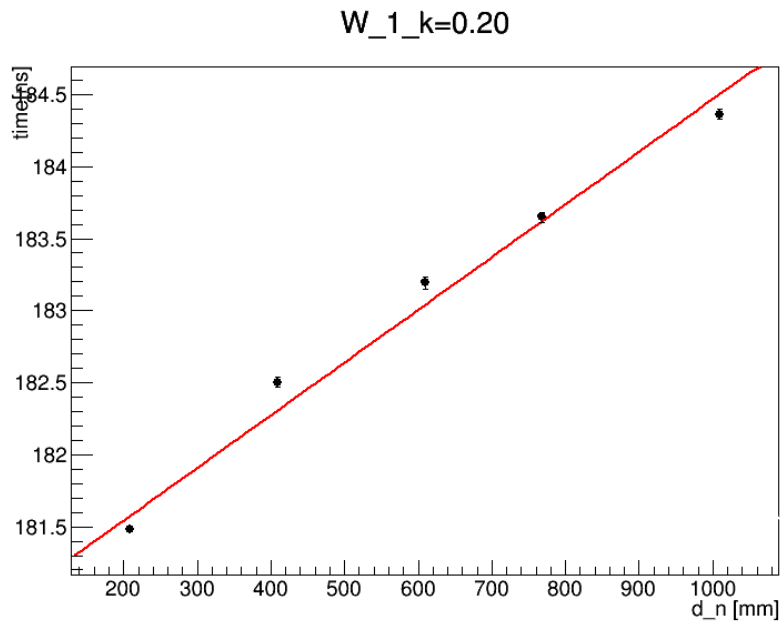
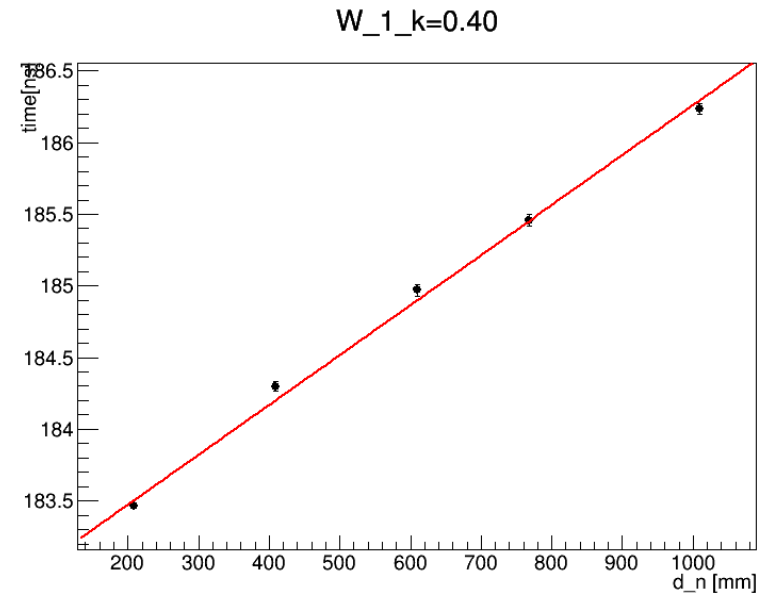
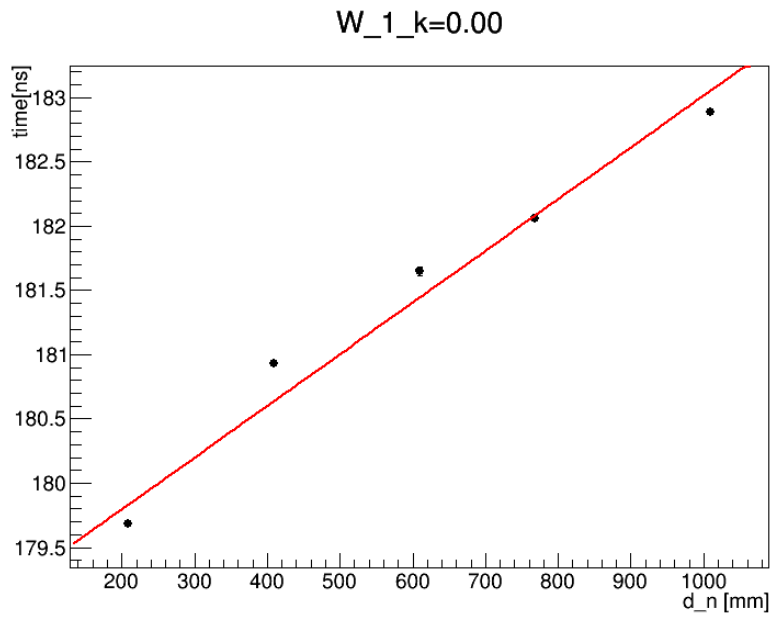


W_1_d_2_k=0.60



W_1_d_5_k=0.60

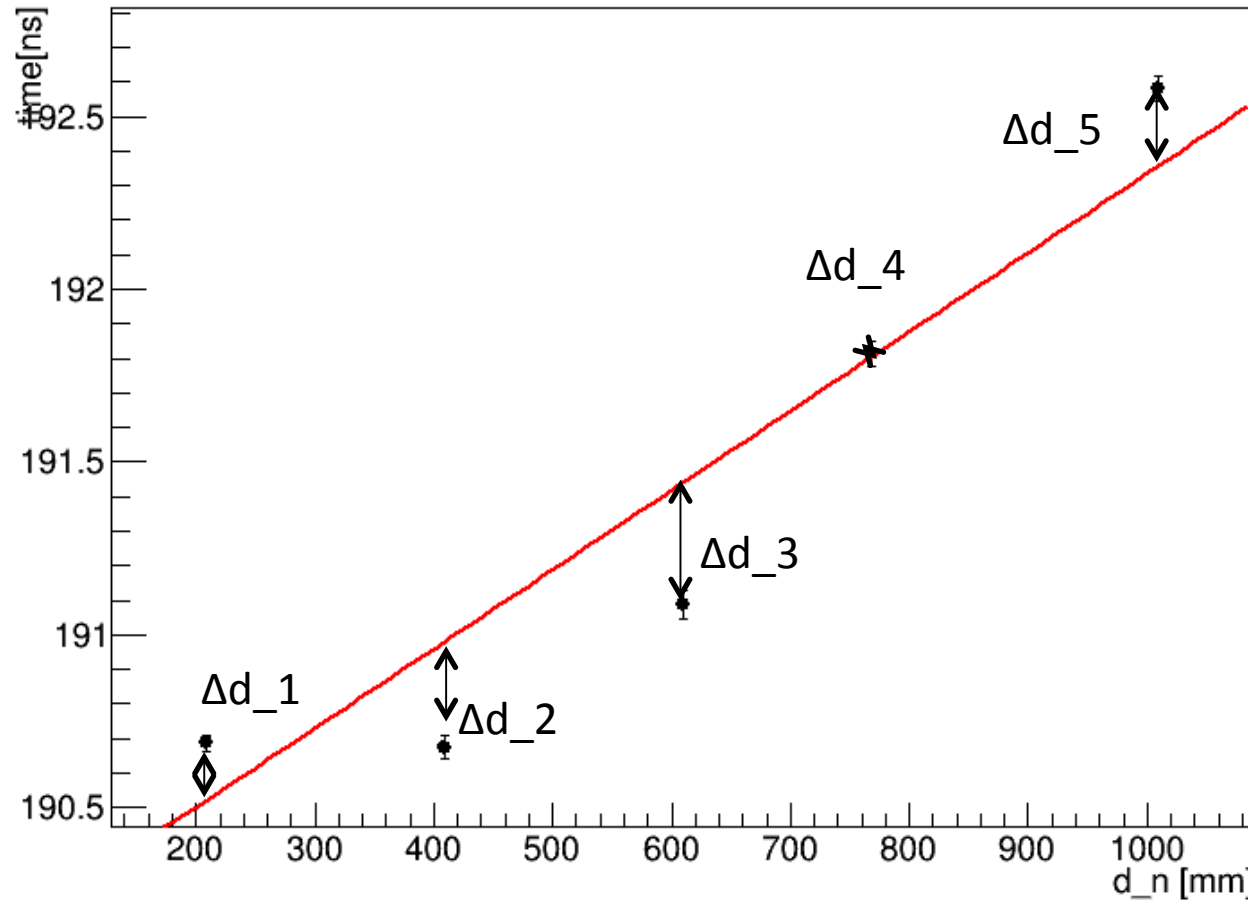




k	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
c [10 ⁸ m/sec]	2.485	2.733	2.867	3.242	3.512	4.362

直線でよく近似できる停止点の探索

W_1_k=1.00

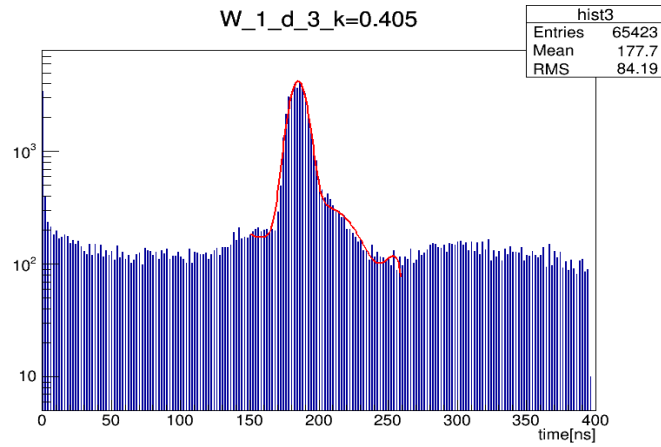
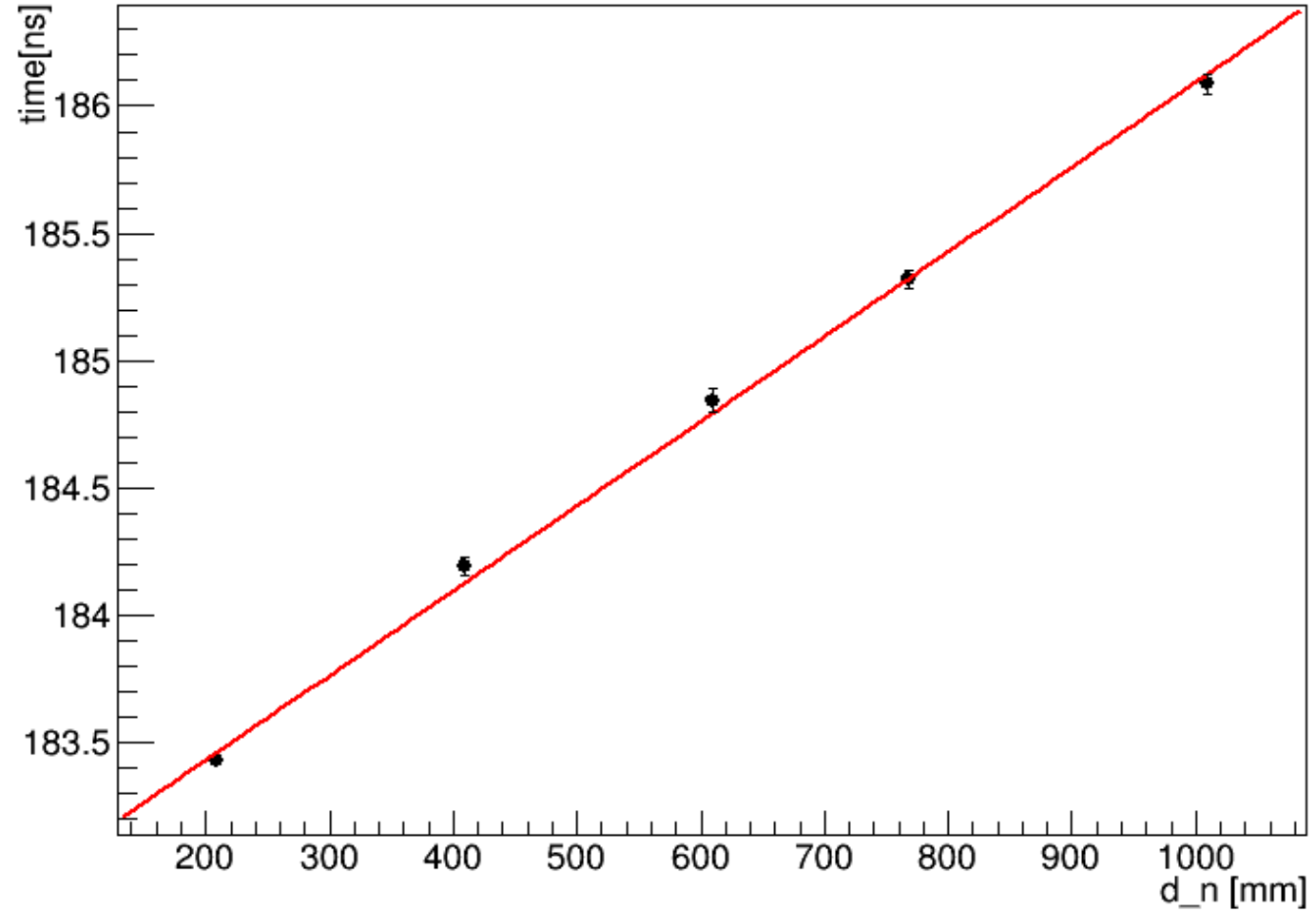


kを0.001刻みで変化させる



$(\Delta d_1)^2 + \dots + (\Delta d_5)^2$
が最小となるkを探索する

W_1_k=0.405

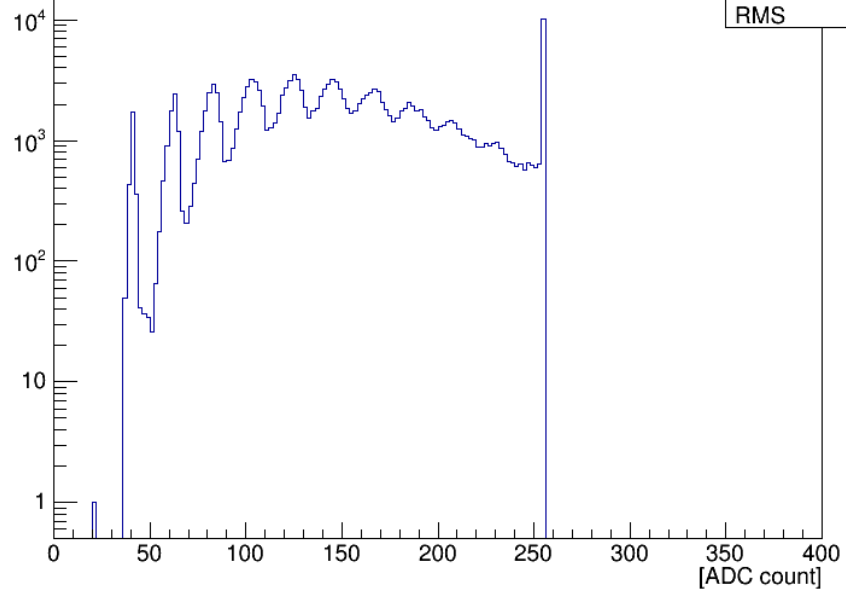


- $k=0.405$ にて
- 光速の測定値

➤ $(3.001 \pm 0.0458) \times 10^8 \text{ m/sec}$ ⁴⁷

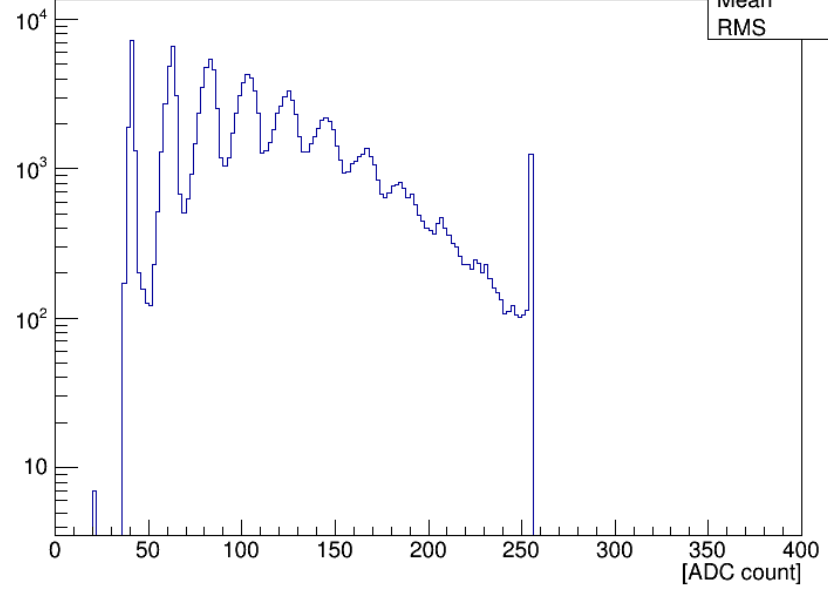
2回目 Width=30.0nsでの測定

Hist_photon_W_2_d_1



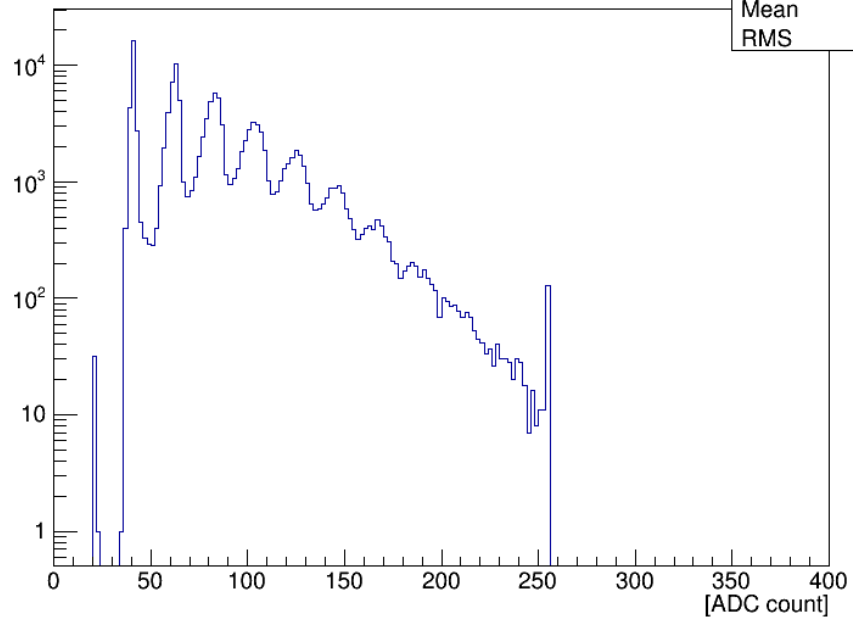
hist1	
Entries	174412
Mean	150.7
RMS	54.2

Hist_photon_W_2_d_4



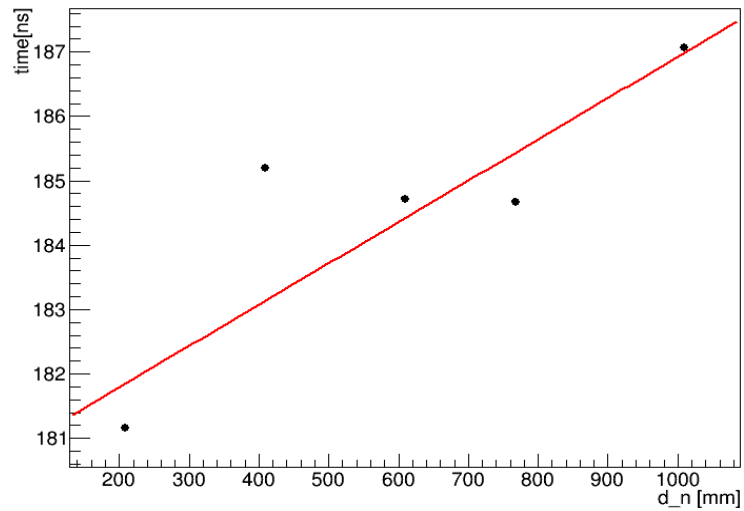
hist1	
Entries	155280
Mean	111.1
RMS	46.42

Hist_photon_W_2_d_2

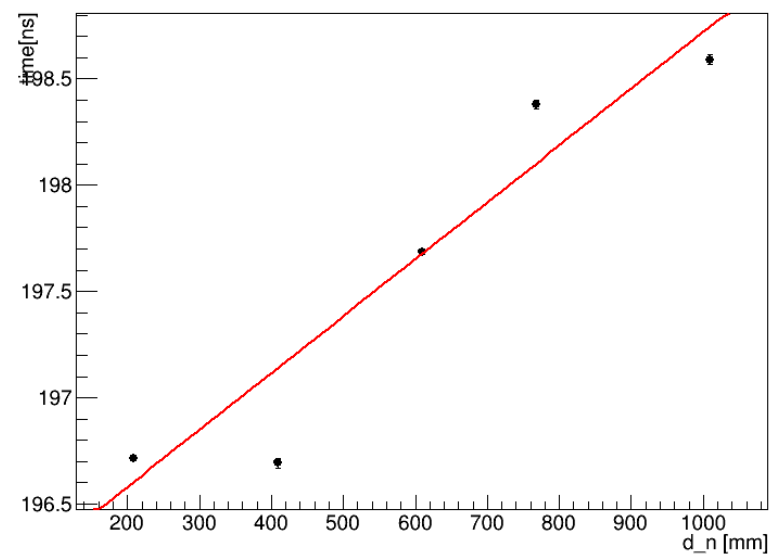


hist1	
Entries	135933
Mean	85.02
RMS	37.2

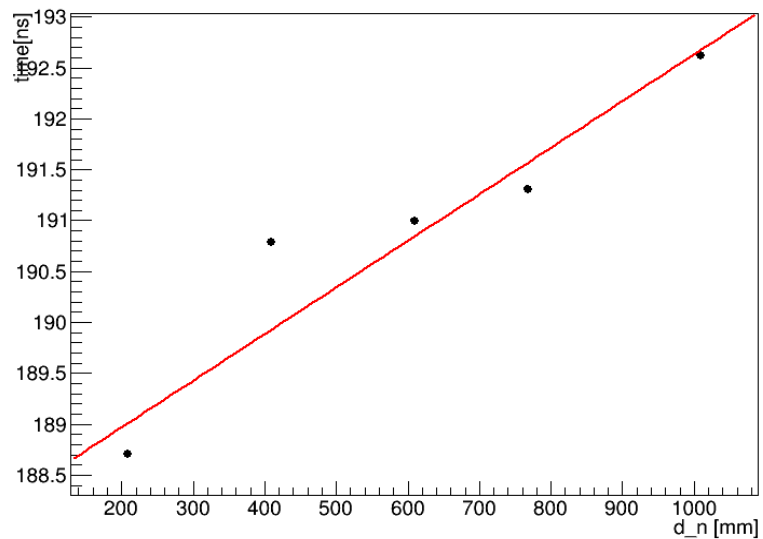
W_2_k=0.00



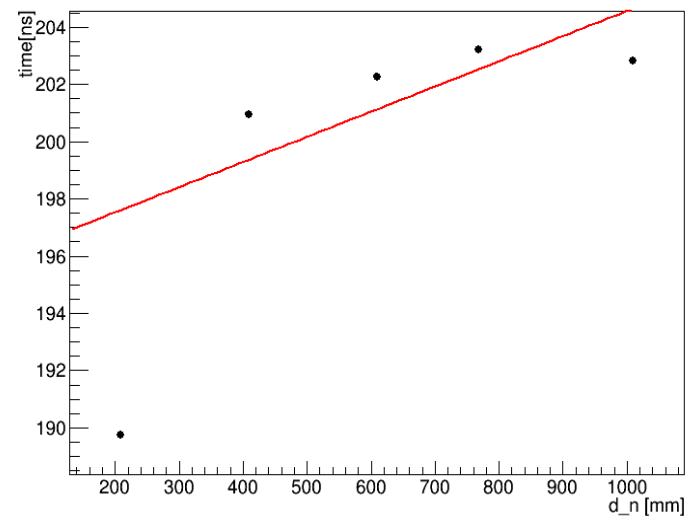
W_2_k=0.80



W_2_k=0.40

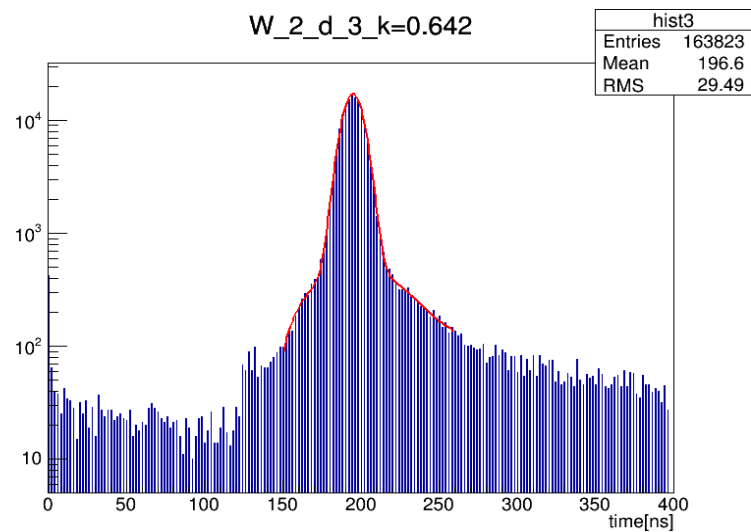
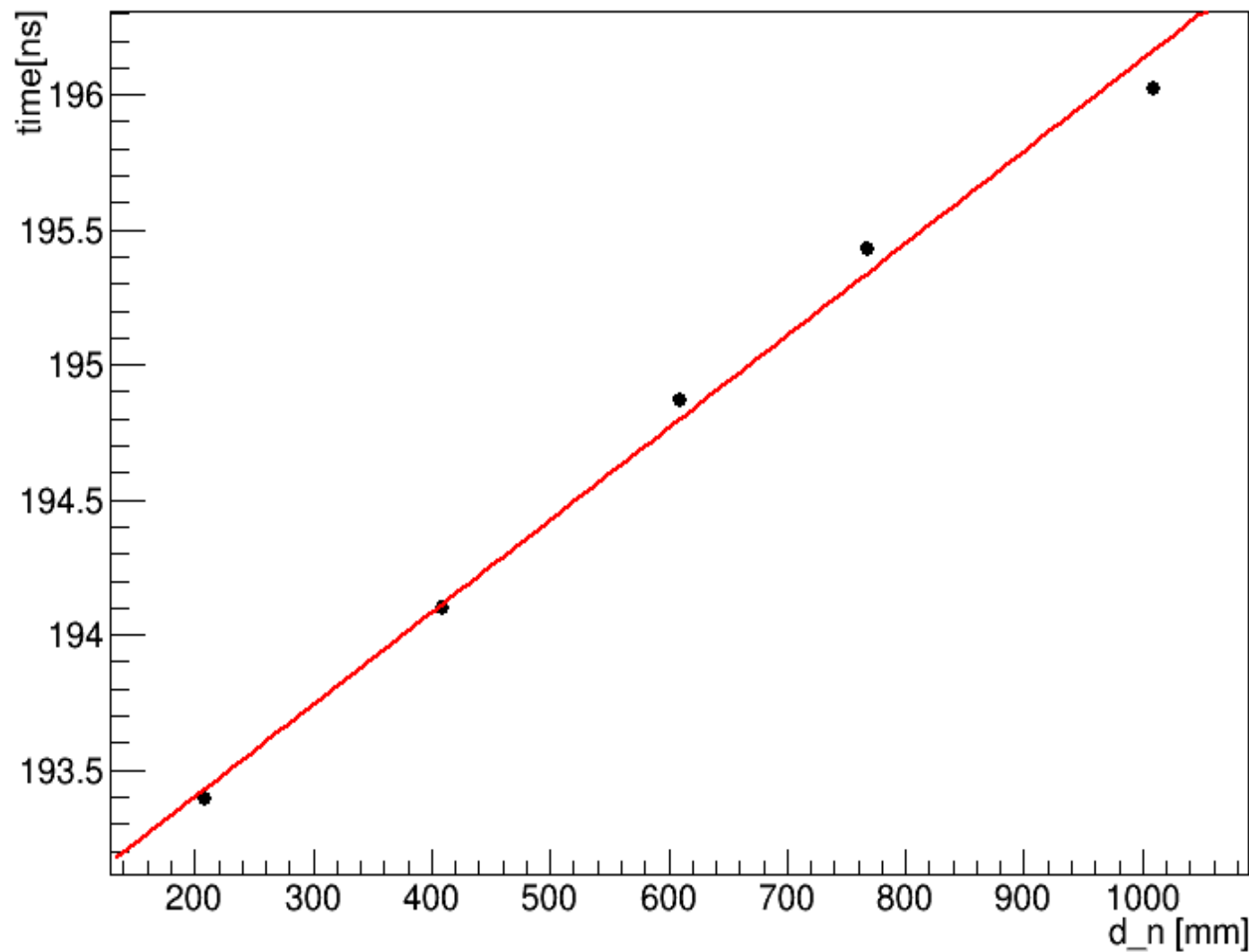


W_2_k=1.00



k	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
c [10 ⁸ m/sec]	1.559	1.778	2.183	2.751	3.735	1.137

W_2_k=0.642



2回目 (width=30.0ns) 結果

- k=0.642にて
- 光速の測定値
 - $(2.927 \pm 0.0274) \times 10^8 \text{ m/sec}$

2つの解析手法

- MPPCで検出する粒子の個数について

1, フォトンの個数にかかわらず解析する

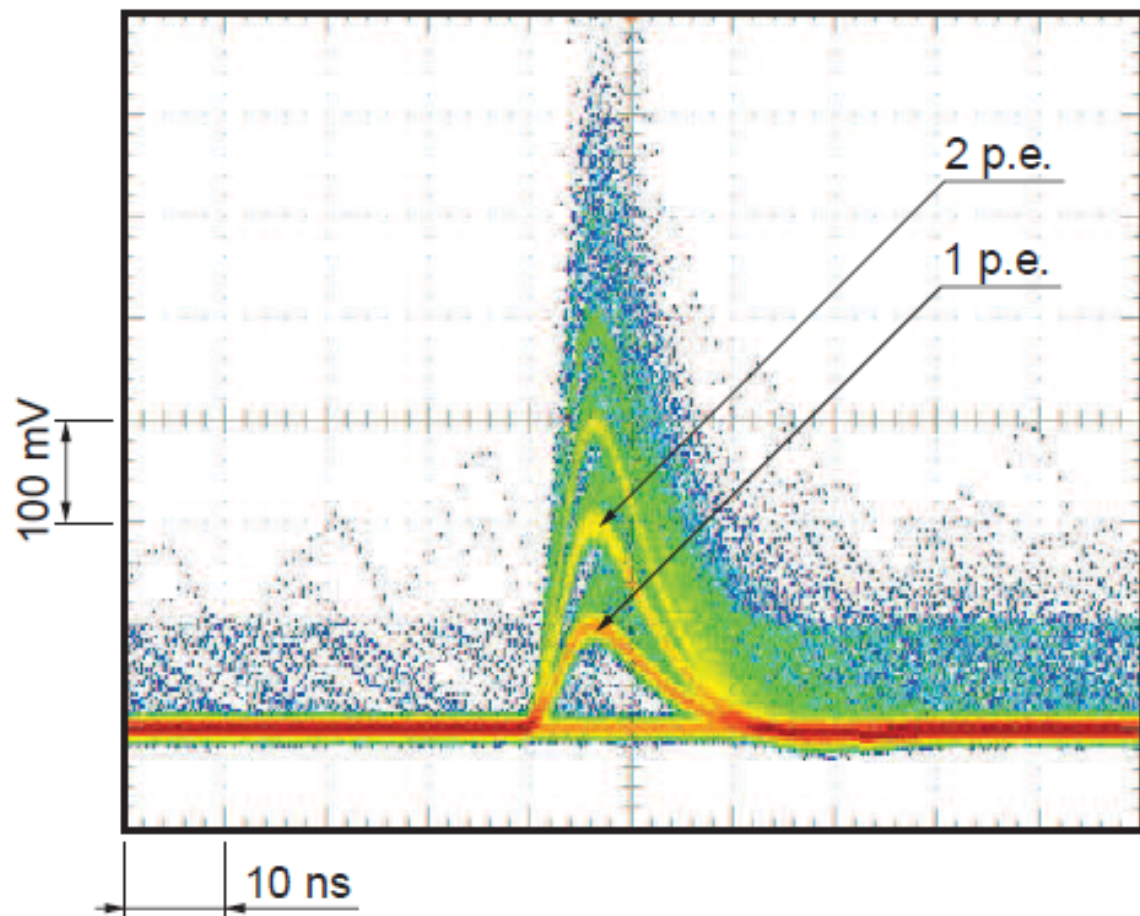
2, 特定の個数のフォトンに限定して解析する

- 1Photonは誤差の原因となるゴミデータが多すぎる

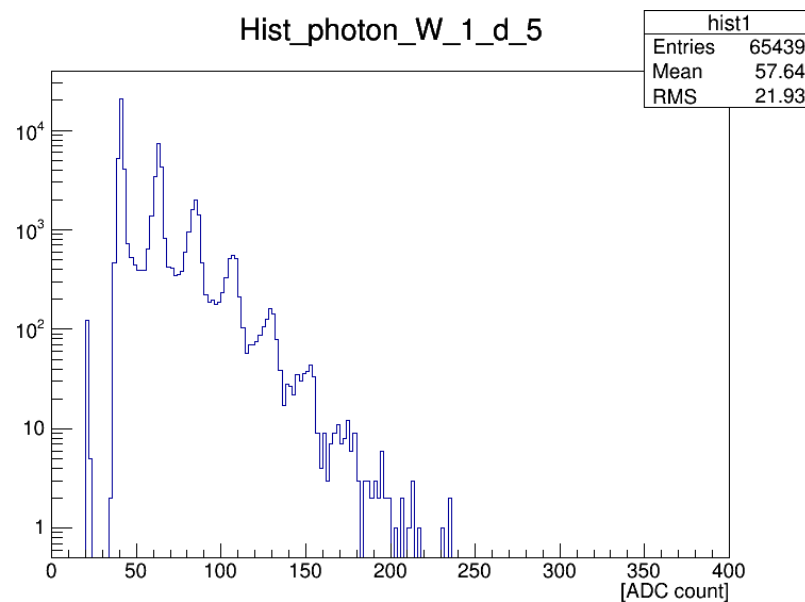
- 3Photon以上はエントリーが少ない

→2Photonのデータだけを取り出すと解析の精度が上がるか？

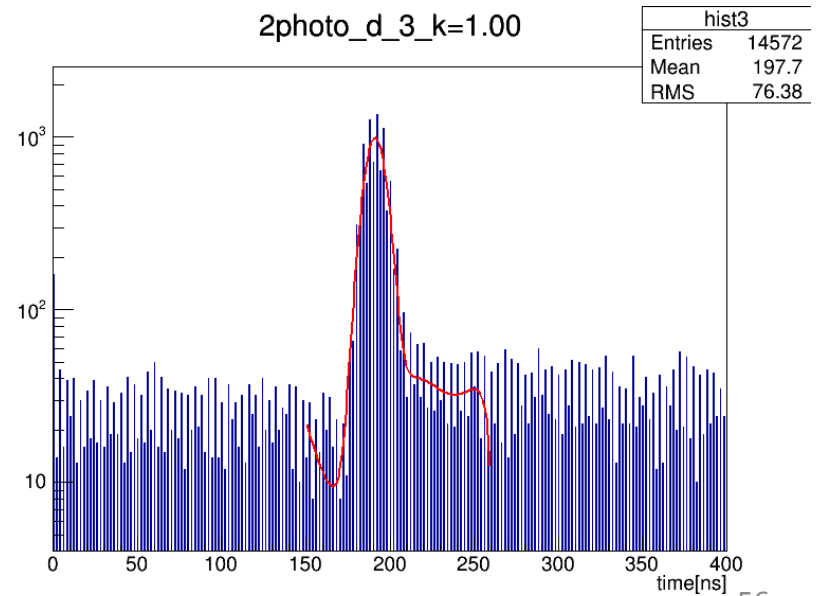
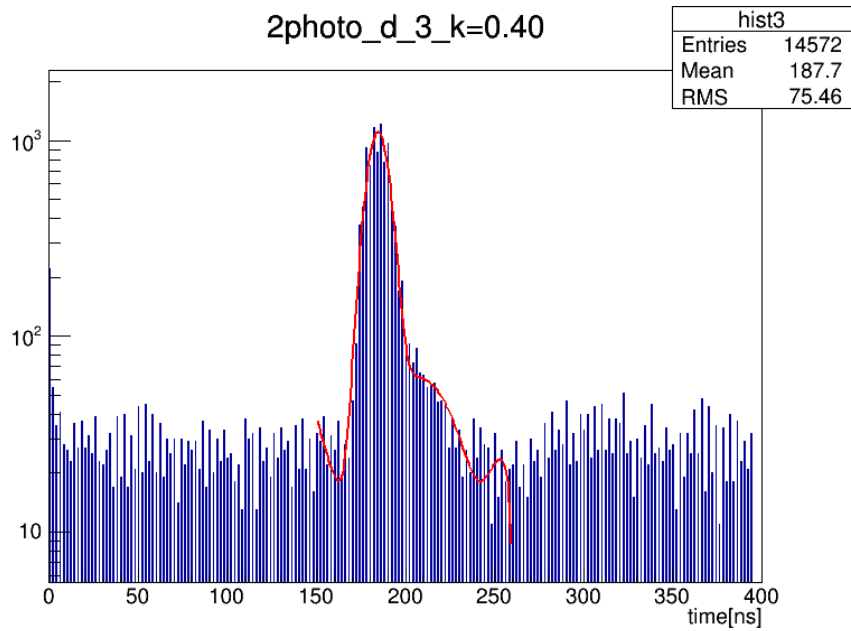
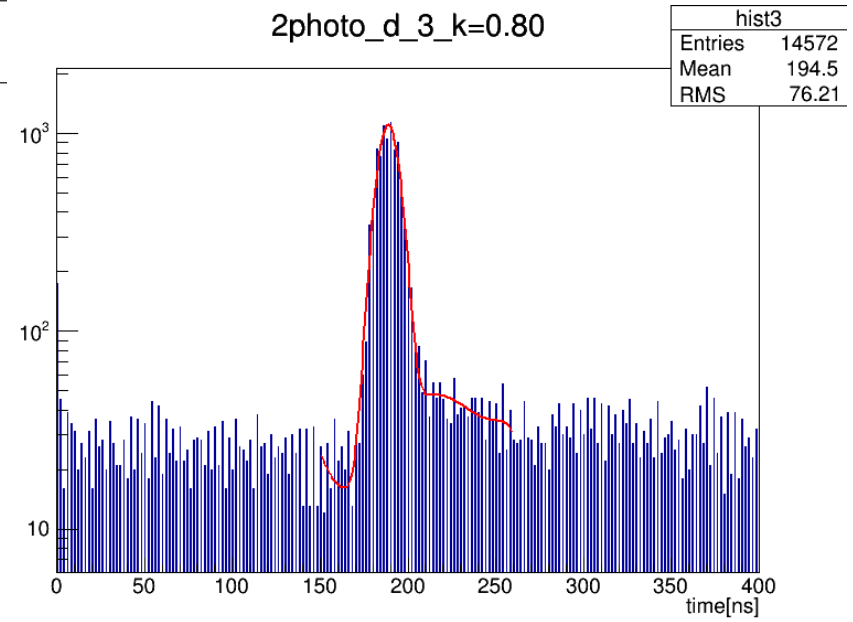
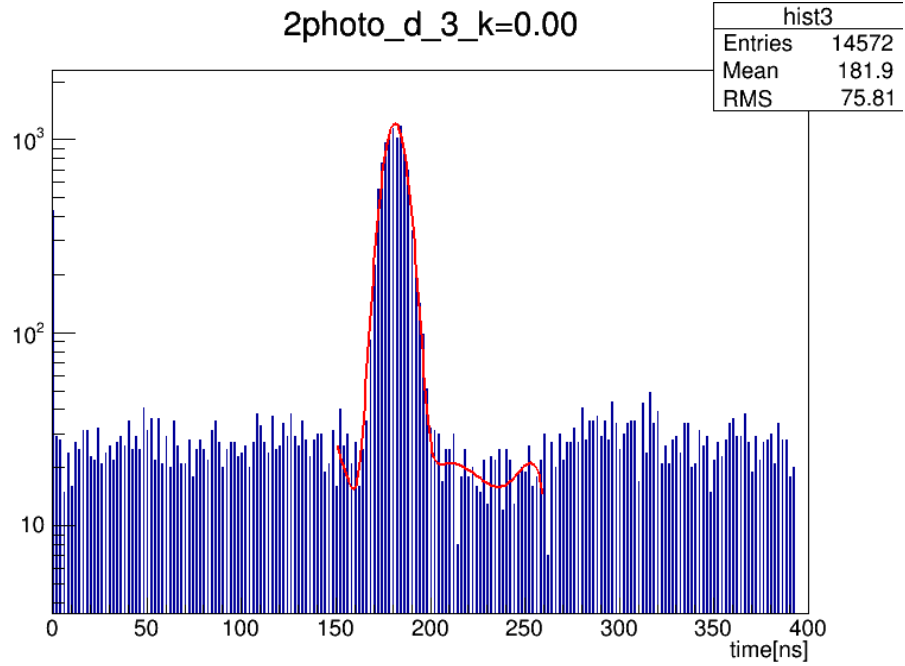
フォトンの同時検出個数について



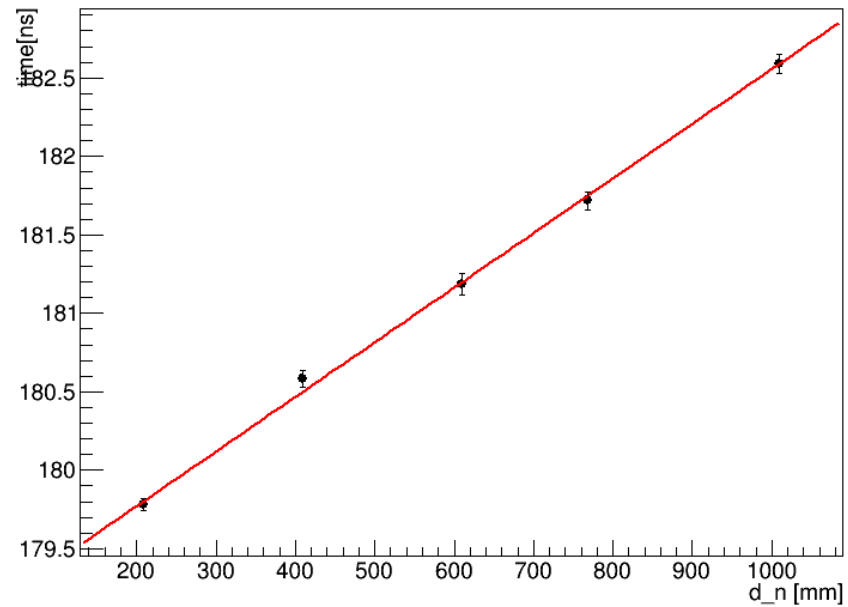
光子数	ADC count
1	40 - 45
2	59-65
3	80-90
4	103-110



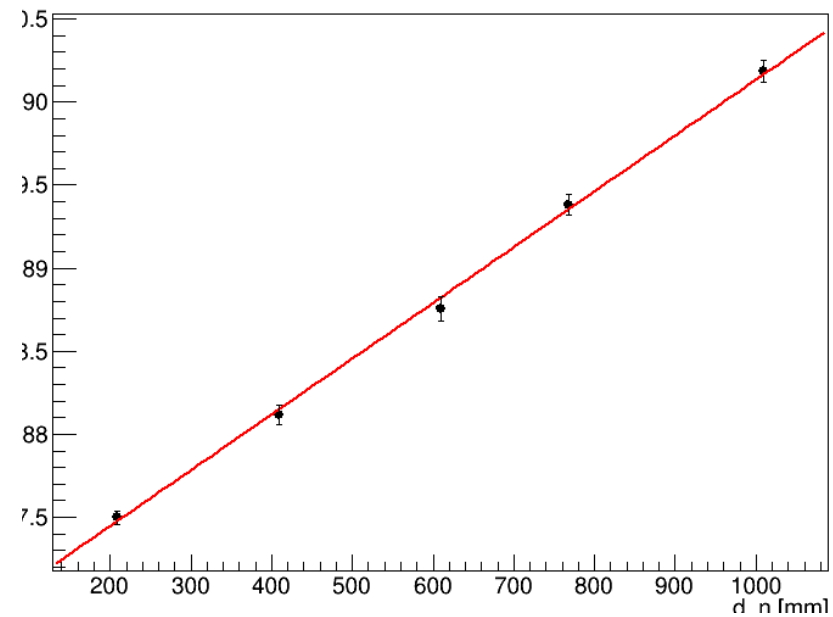
同時検出光子数2のデータのみを取り出して解析します
(Width = 16.0nsに固定)



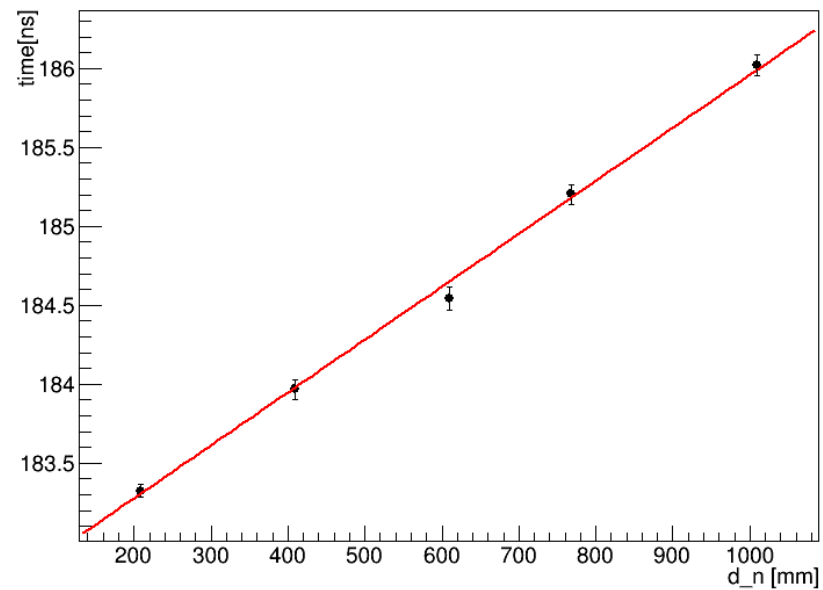
2photo_k=0.00



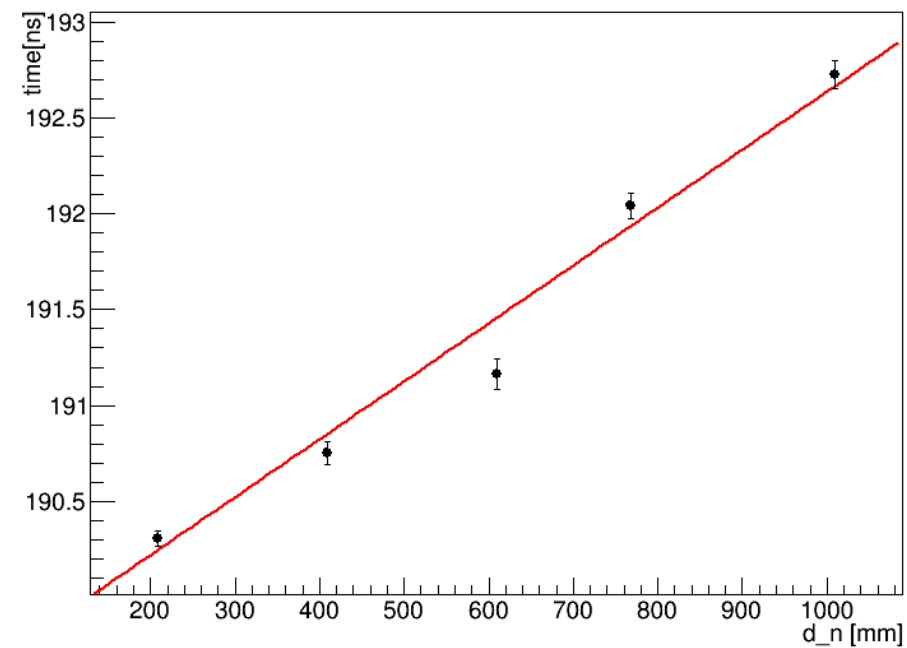
2photo_k=0.80



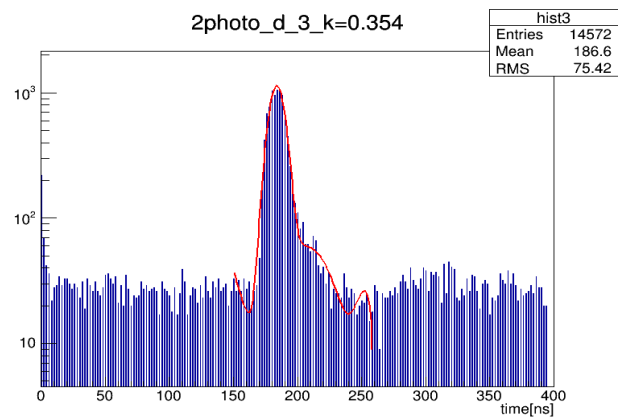
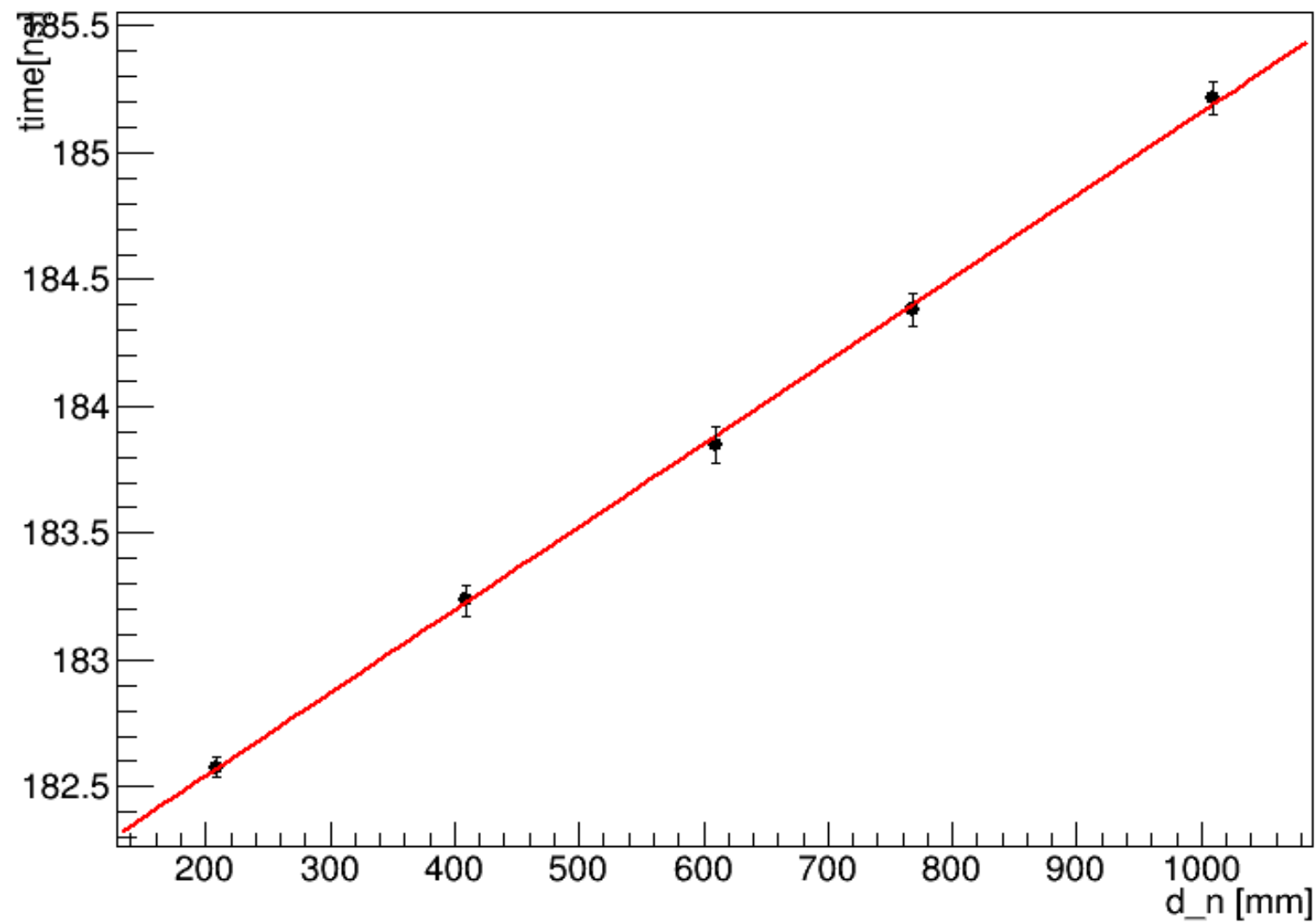
2photo_k=0.40



2photo_k=1.0



2photo_k=0.354



解析結果

- $k=0.354$ にて, 光子数2に限定して解析
- 光速の測定値
 - $(3.057 \pm 0.0804) \times 10^8 \text{ m/sec}$
 - 光子数に制限をかけなければ $c = (3.001 \pm 0.0458) \times 10^8 \text{ m/sec}$

データの取得方法 (2班)

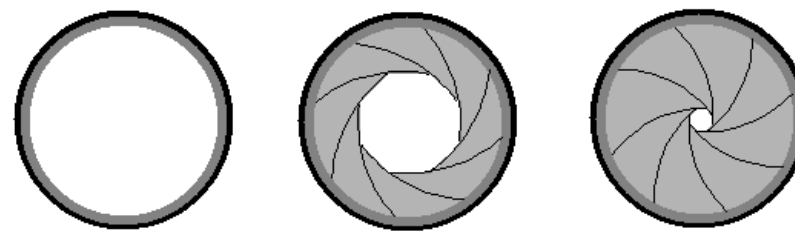
- ・ 1班との違い

- TTLパルスの幅: 7.5ns (1班: 16ns, 30ns)
- 計測地点の間隔

地点	d1	d2	d3	d4	d5
距離(mm)	0	309.3	625.2	926.2	1239.4

- 光度の調節に絞りをを用いた
 - － 計測された波形で調節

絞り（虹彩絞り）



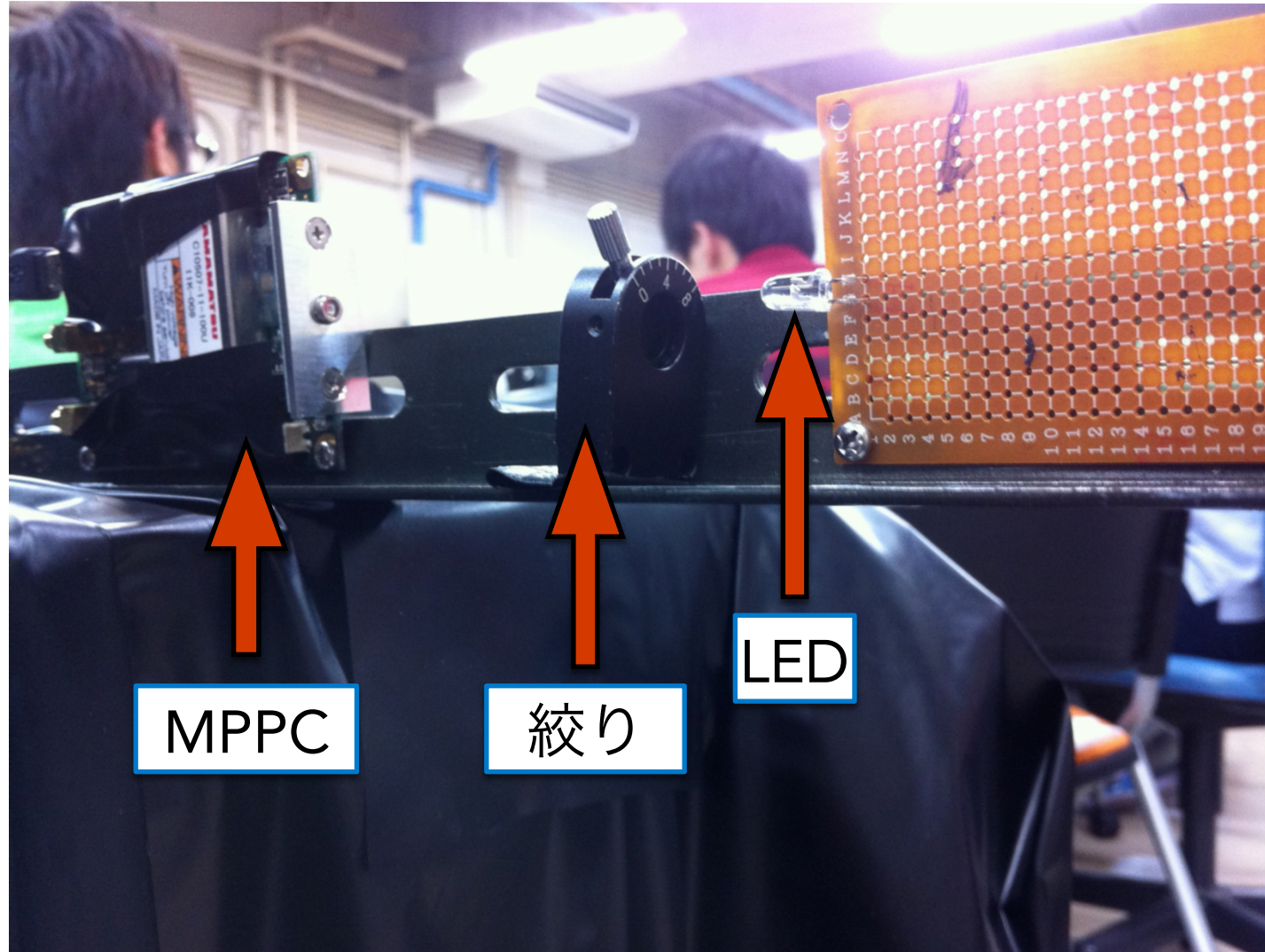
開

遠距離

閉

近距離

実際の配置



具体的な判断基準

- ・ ピーク地点のADCcountがおおむね100前後に収まっている
- ・ ピーク地点のADCcountが100からずれた値が出る頻度が同程度

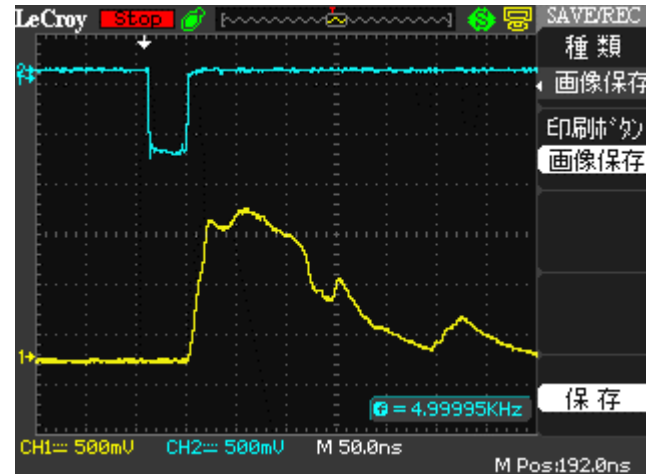
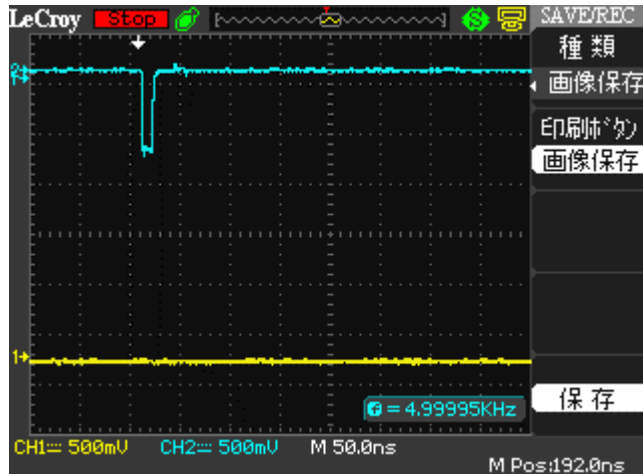
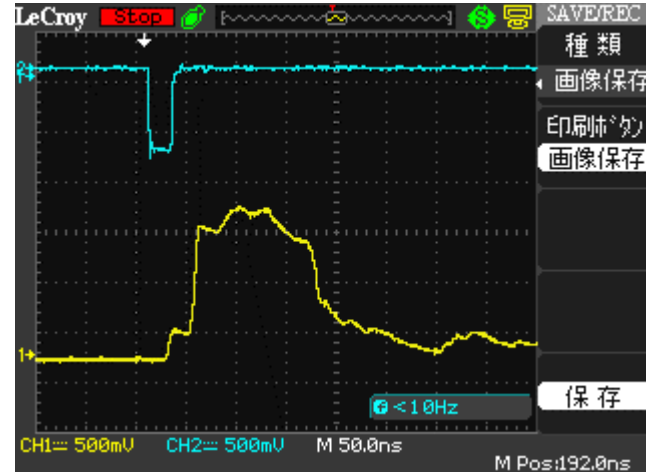
まとめ

福重 雄大

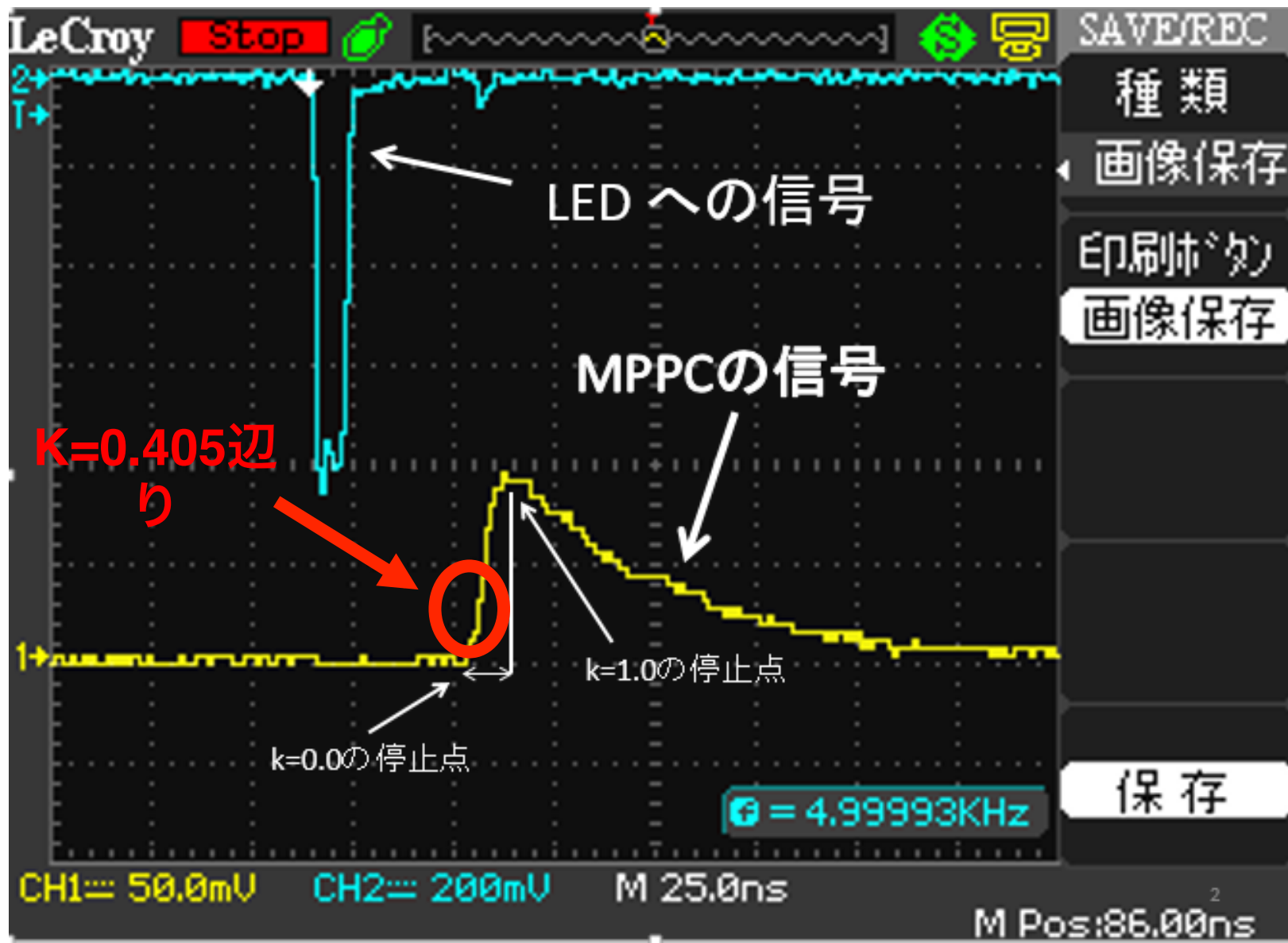
考察～共通～①

- 誤差が生まれた原因
 - 時間計測の誤差
 - 距離計測の誤差
 - M P P C による影響 (ダークカウント、クロストーク、アフターパルス等)

考察～共通～②



考察～1班～



考察～1班～

- ・ 光子数を制限して解析を行った。（その結果event数は1/10）

⇒結果の中心値はずれたが、直線フィットの停止点によるばらつき
を抑えられた

⇒より多くのデータを確保できれば、さらに精度がよくなるのでは？

考察～2班～

- 波形の調節を**目視**で行ったため、誤差が大きいのではないかな
⇒もっと精密に判別できなかったか（プログラムの作成？）
- 解析の際、 k の値を $k = 0.5$ と固定して行った。
⇒1班のように、 k の値を最適化できればよかった。

結果／まとめ

- ・ 1班、2班ともに、中心値が誤差の範囲で文献値 (299, 792, 458m/s) を含む結果が得られた。
 - ・ 1班 $(3.001 \pm 0.046) \times 10^8 \text{ m/s}$
 - ・ 2班 $(2.927 \pm 0.134) \times 10^8 \text{ m/s}$

総括

- ・ 実験自体は難しいものではなかった。
- ・ 実験後のデータ解析の方が難しく、かつ重要であると感じた。
- ・ Flash ADC を使うことで、多量のeventを得られ、かつゴミデータの排除までできたので、昨年と比較して精度は上がった。