

P2前期の実験発表資料

一光子干渉による干渉縞の測定

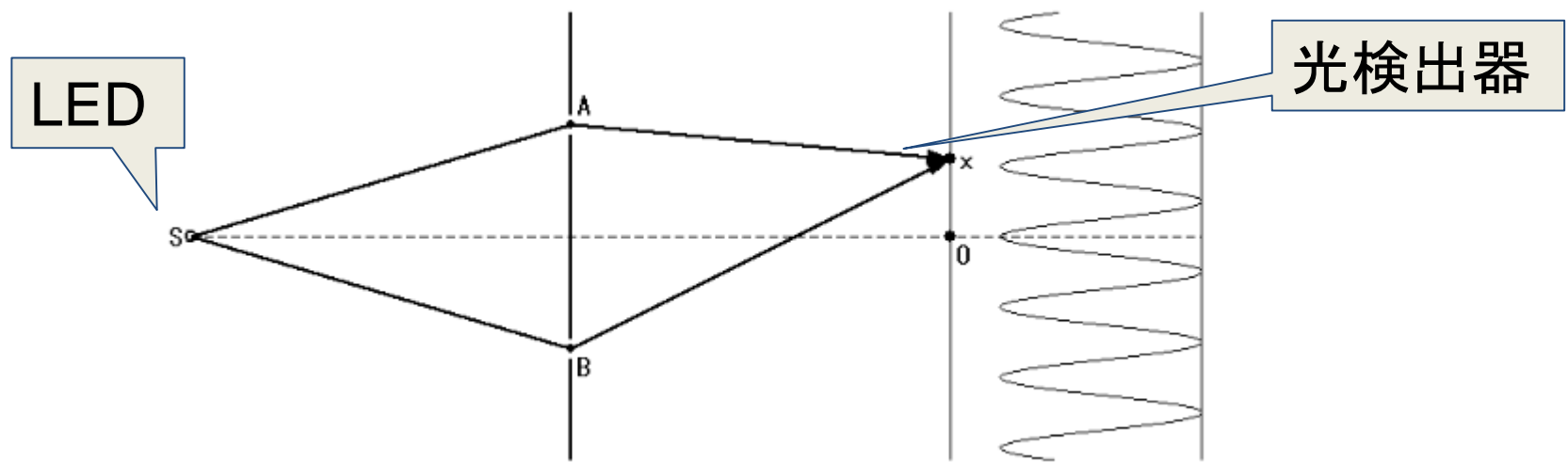
今川 要, 高橋 唯基, 谷 真央, 辻川 吉明,
富永 貴弘, 中川 耕太郎, 中田 拓海, 西田 森彦

スライドの流れ

- 実験の目的
- MPPC回路
- LEDドライバ
- 実験のセットアップ
- 本実験
- 解析
- まとめ

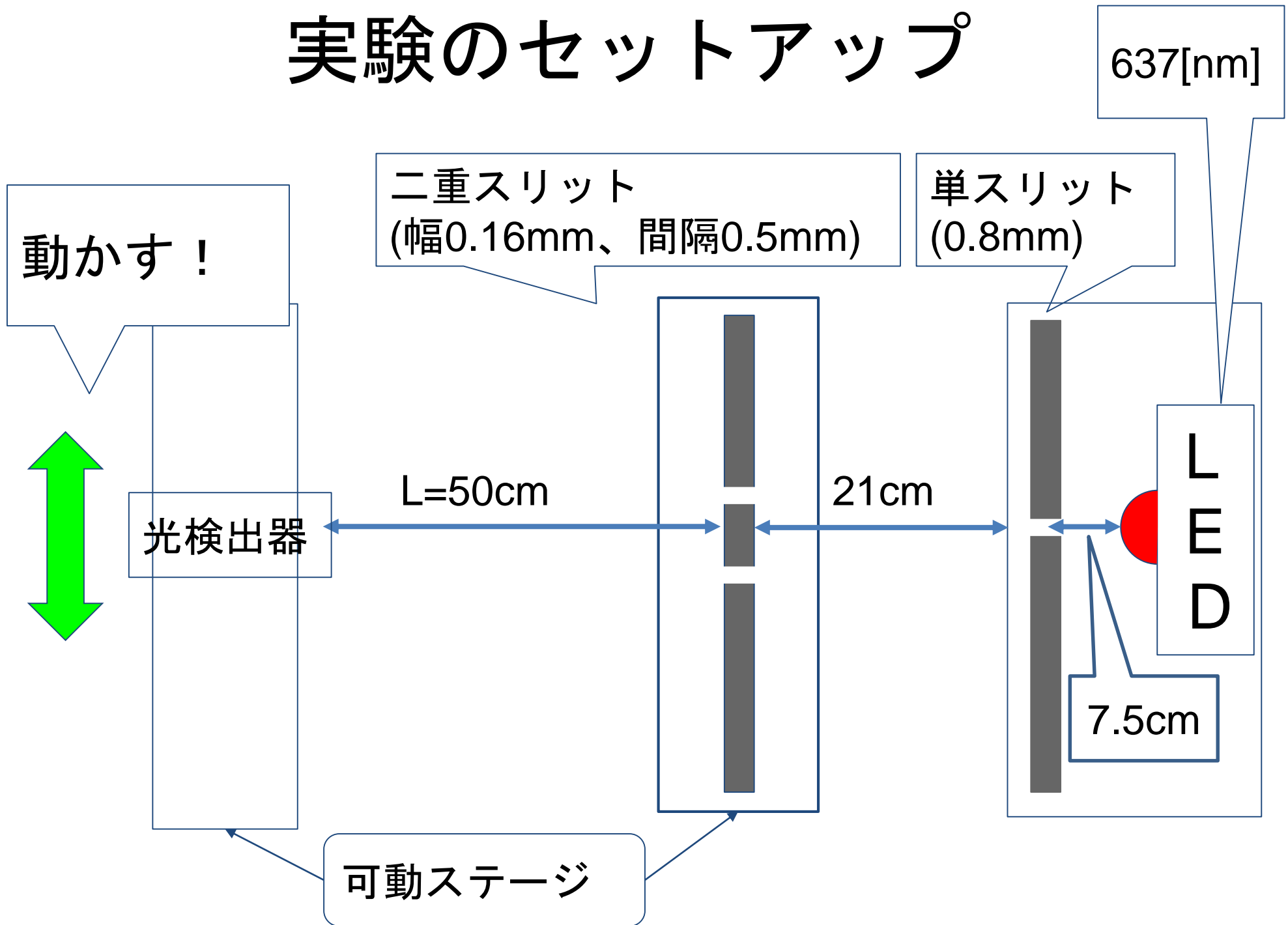
実験の目的

- 量子力学における、光の「粒子と波動の二重性」を検証したい
- 1光子による干渉が起こることを確認する



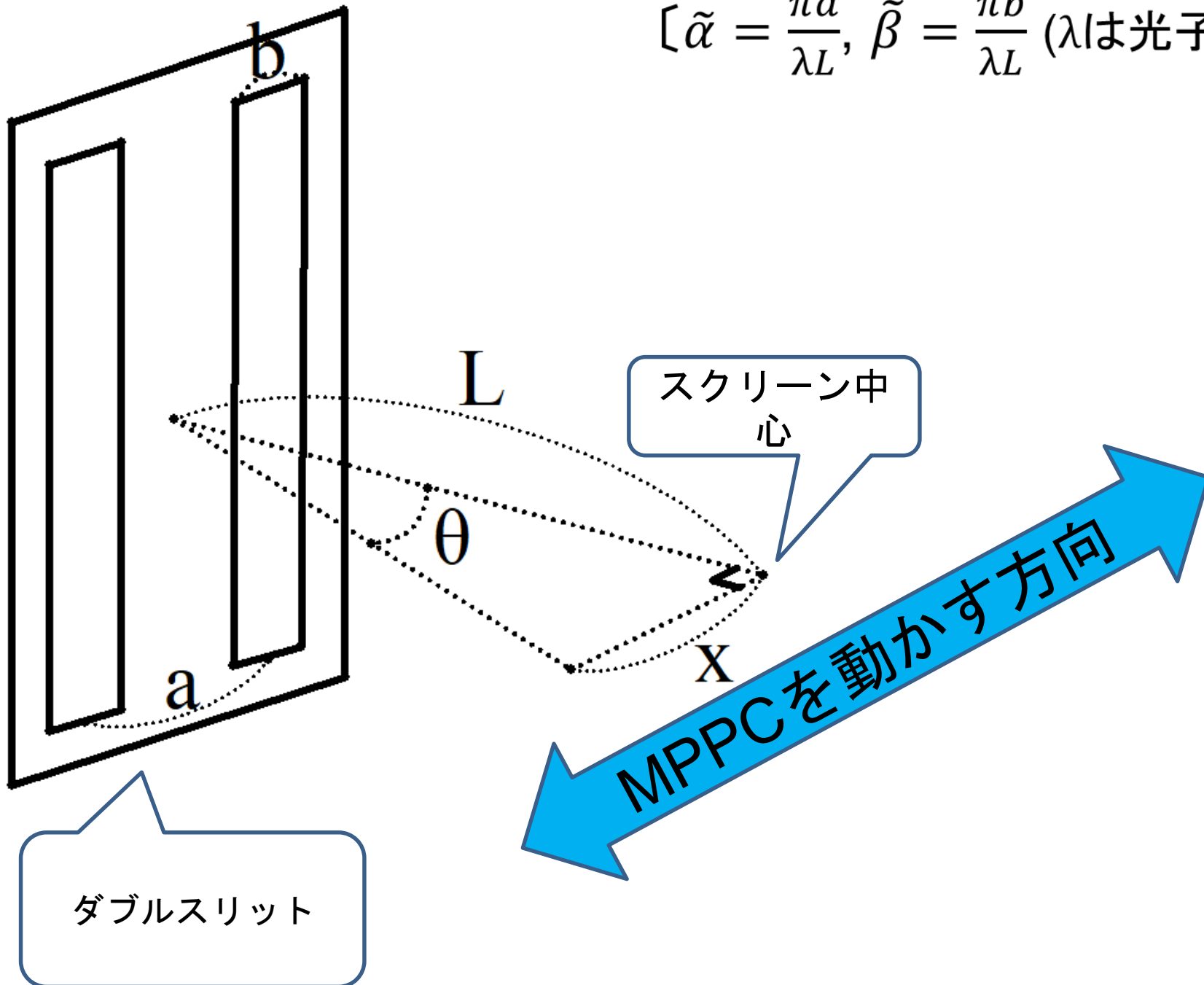
二重スリットによる光の干渉実験

実験のセットアップ

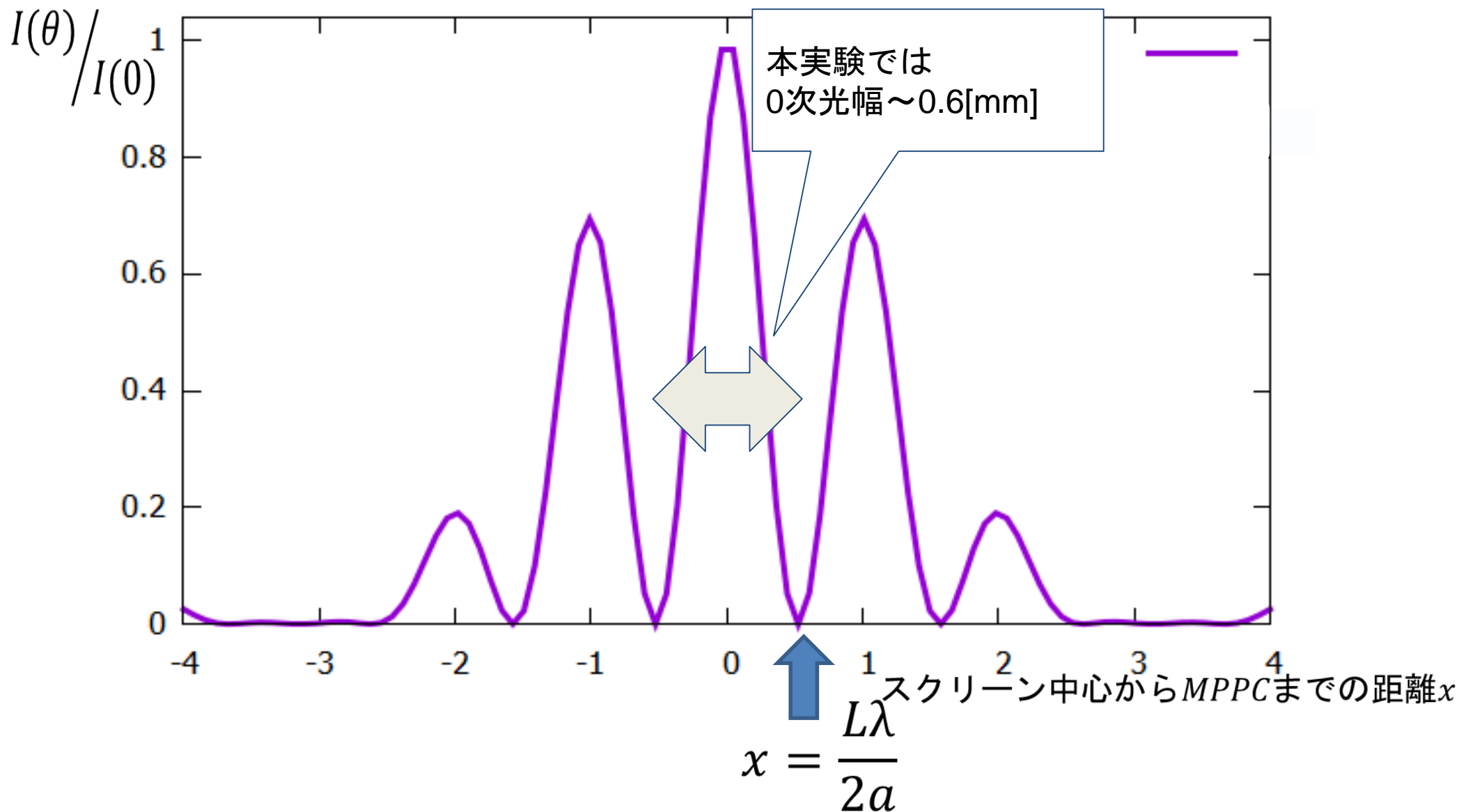


光子の強度 : $I(x) = I(0) \left(\frac{\sin \tilde{\beta} x}{\tilde{\beta} x} \right)^2 (\cos \tilde{\alpha} x)^2$

$[\tilde{\alpha} = \frac{\pi a}{\lambda L}, \tilde{\beta} = \frac{\pi b}{\lambda L} \text{ (}\lambda\text{は光子の波長)}]$



$\tilde{\alpha} = 3\tilde{\beta} = 1$ のときの $I(x)/I(0)$



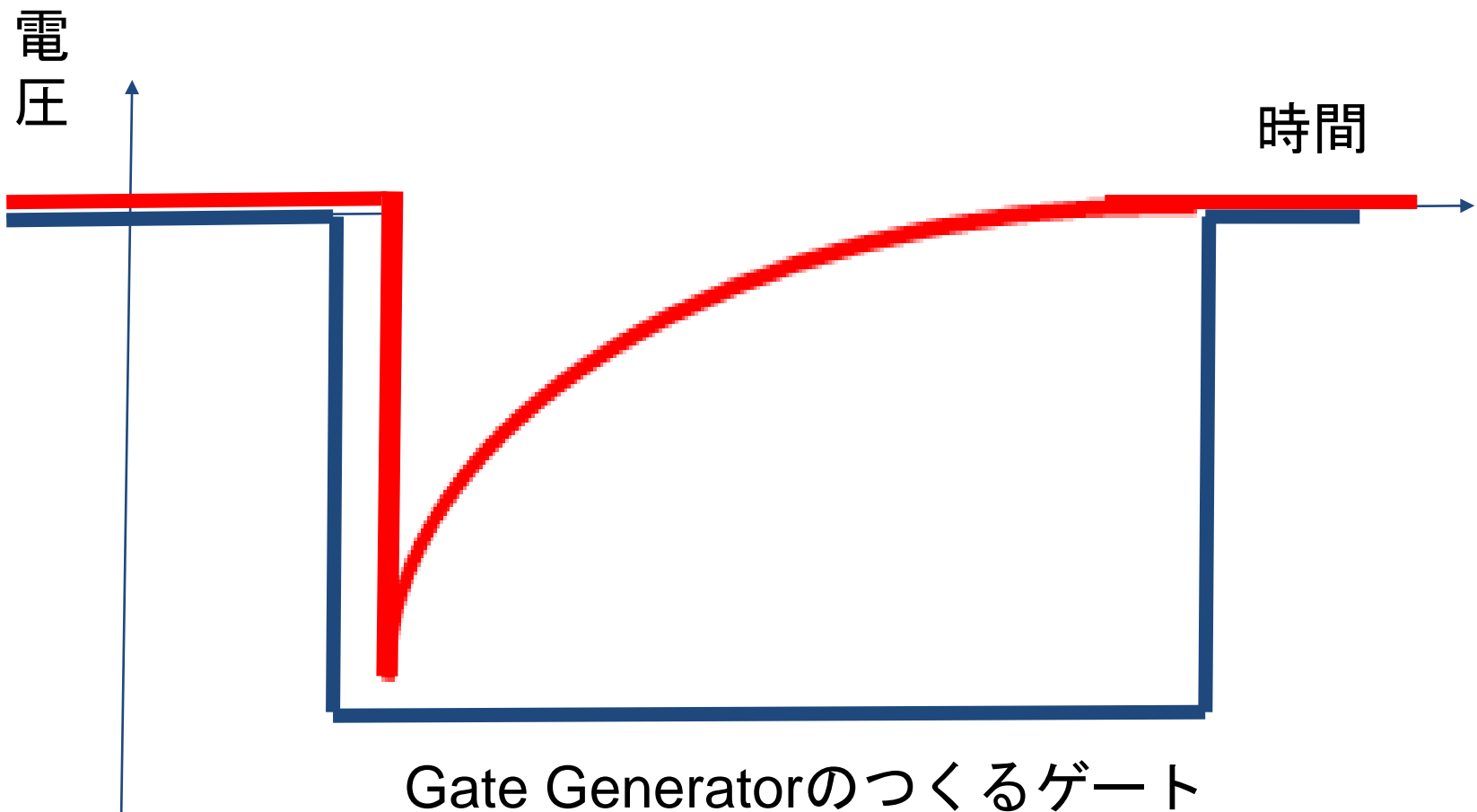
光検出器(MPPC)前に0.1[mm]の単スリット

⇒ $L = 50[\text{cm}]$ であれば, $x = 0 \sim \frac{L\lambda}{2a}$ で3点測定できる

使用した機材

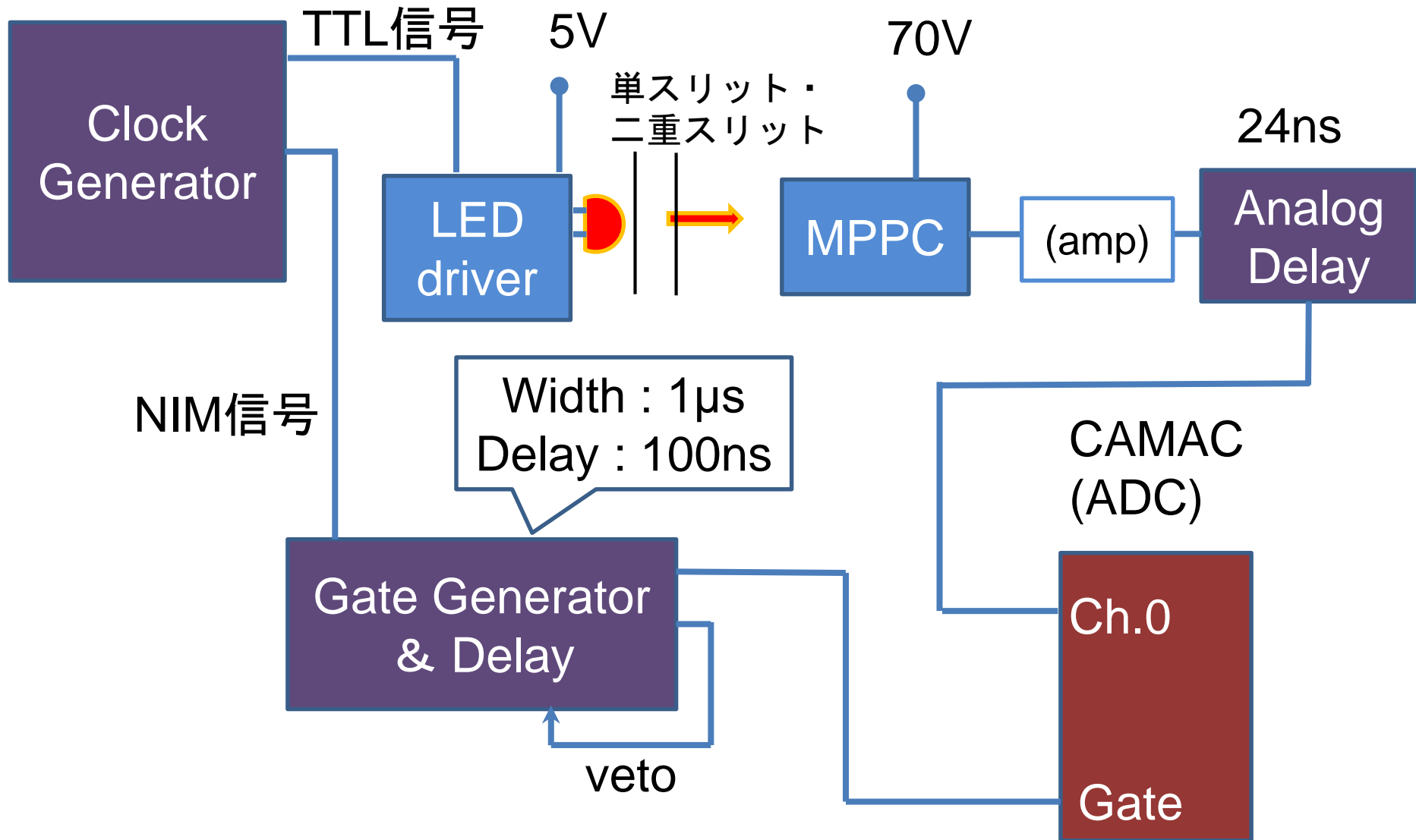
- MPPC回路
- LEDドライバ
- 各種NIMモジュール、CAMAC規格ADCモジュール
- 可動ステージ、コントローラ
- 単スリット（スリット幅0.8mm）
- 二重スリット（スリット幅0.16mm、間隔0.5mm）

ADCの使い方



ゲートが囲う時間領域内について、各チャンネルに入力された電荷の積分値と比例した値を出力する。

実験のセットアップ (電気回路)

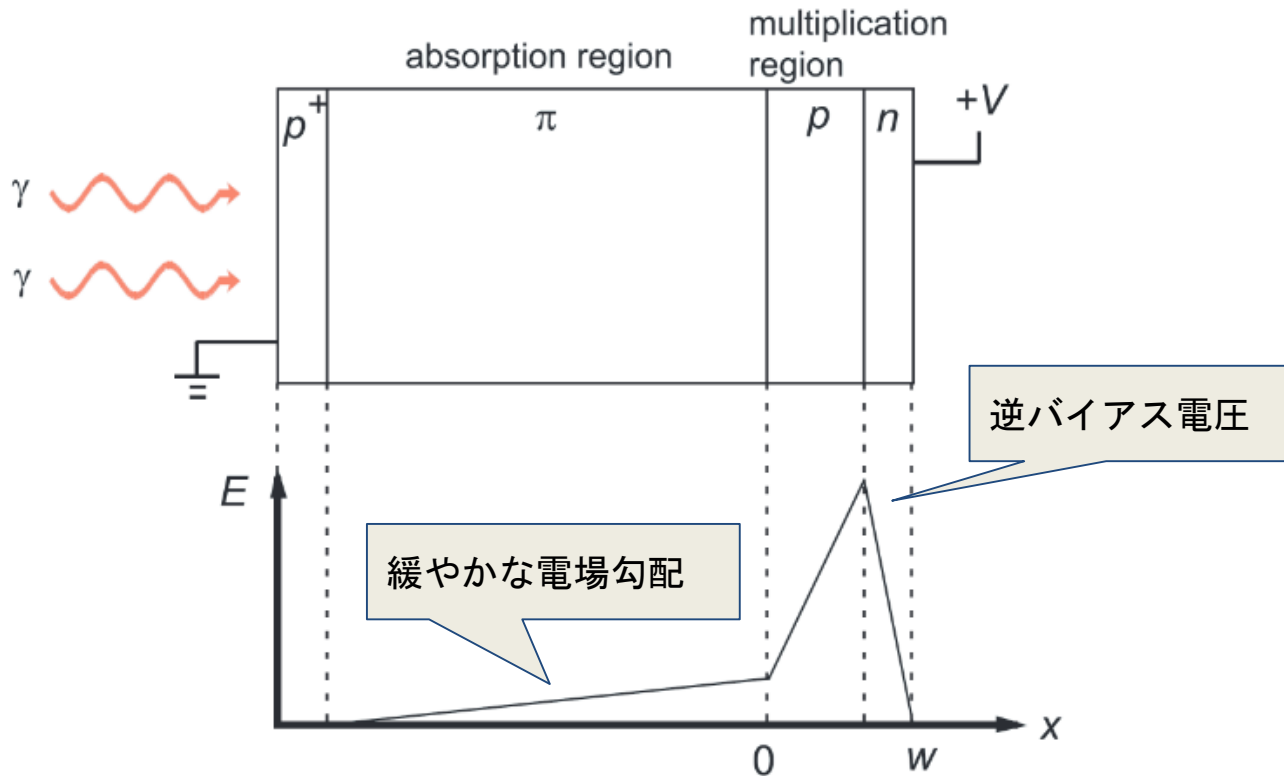


実験のセットアップ（電気回路）

- Clock Generator から Gate Generator と LED に同時に信号を送る必要がある。
- Gate Generator は NIM 信号 (-0.8V) で作動するが、LED は **正のパルスを入力すると光る（後述）**。
 -
- Clock Generator の出力として、Gate Generator へは NIM 信号、LED へは TTL 信号（正のパルス）を採用した。

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)

APD(Avalanche Photo Diode)ピクセルが並んだ光検出器

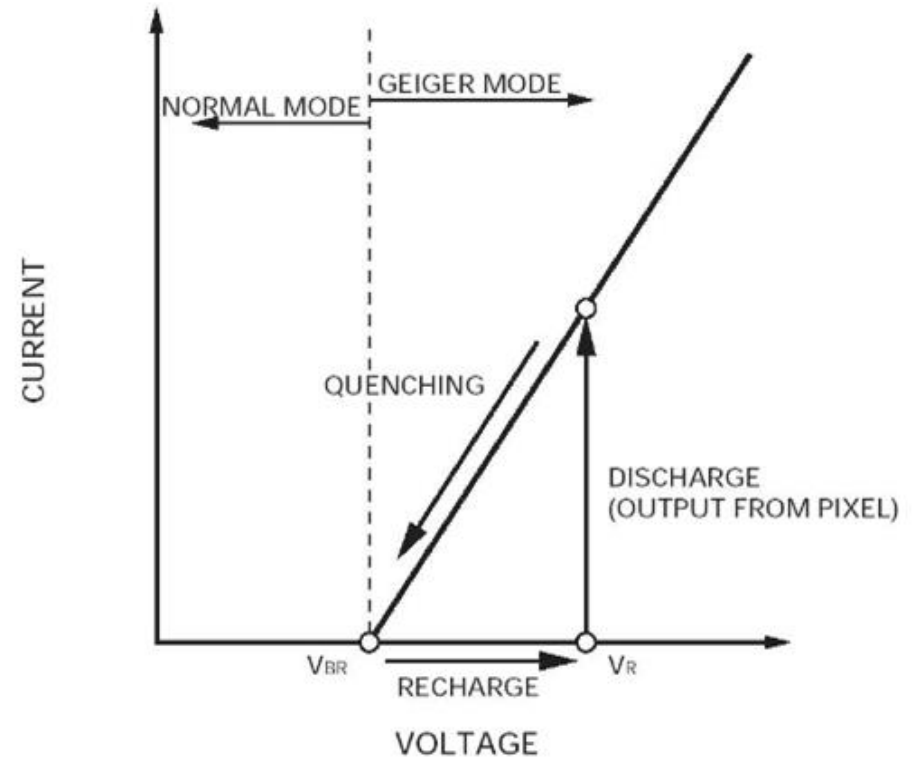
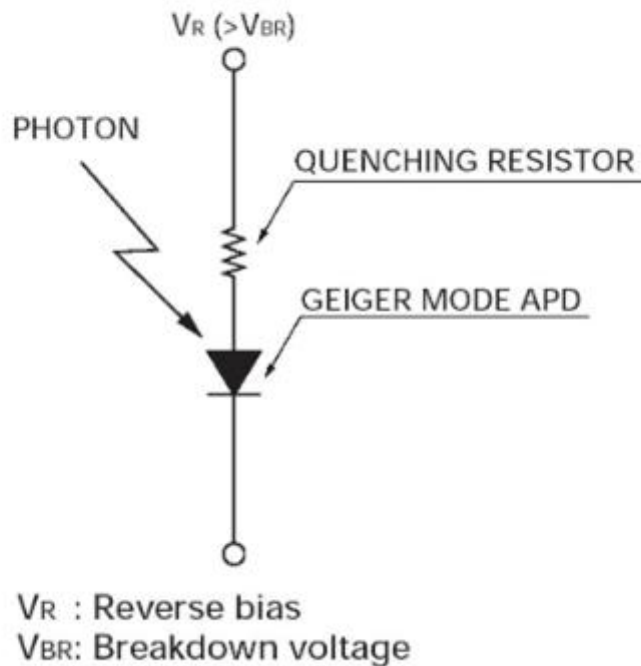


APD ピクセル



MPPC
(浜松ホトニクス社製)

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)



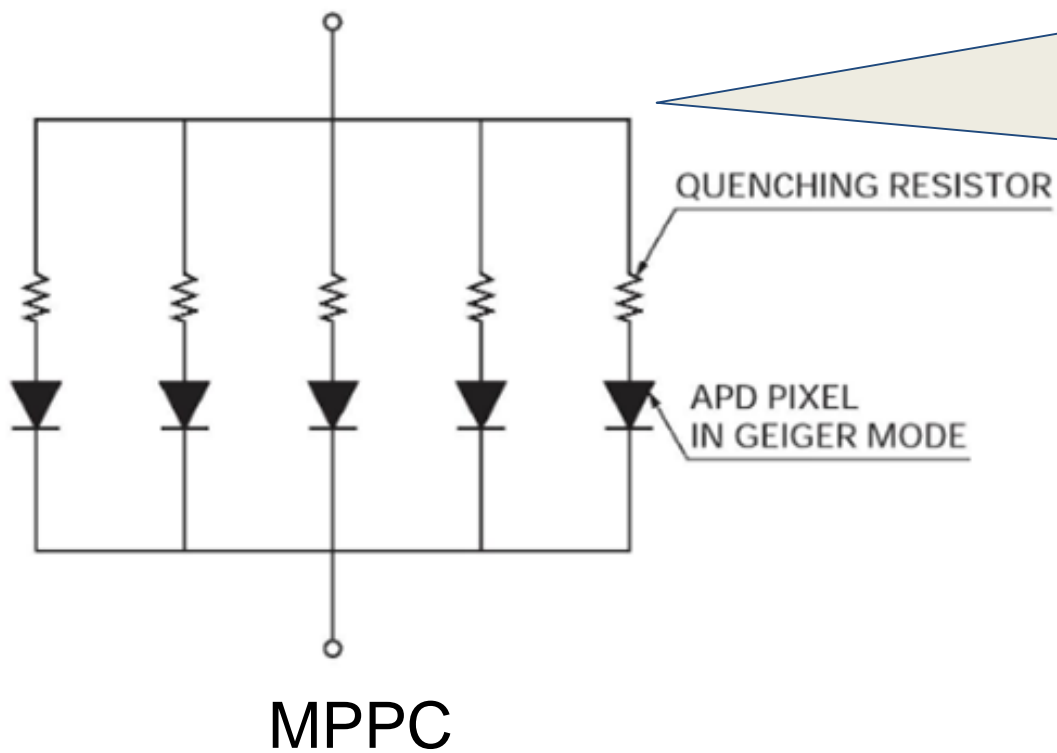
1つのAPD ピクセルの等価回路図

クエンチング抵抗の役割

1ピクセルから出る電荷 : $Q = C(V_R - V_{BR})$

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)

APD(Avalanche Photo Diode)ピクセルが並んだ光検出器



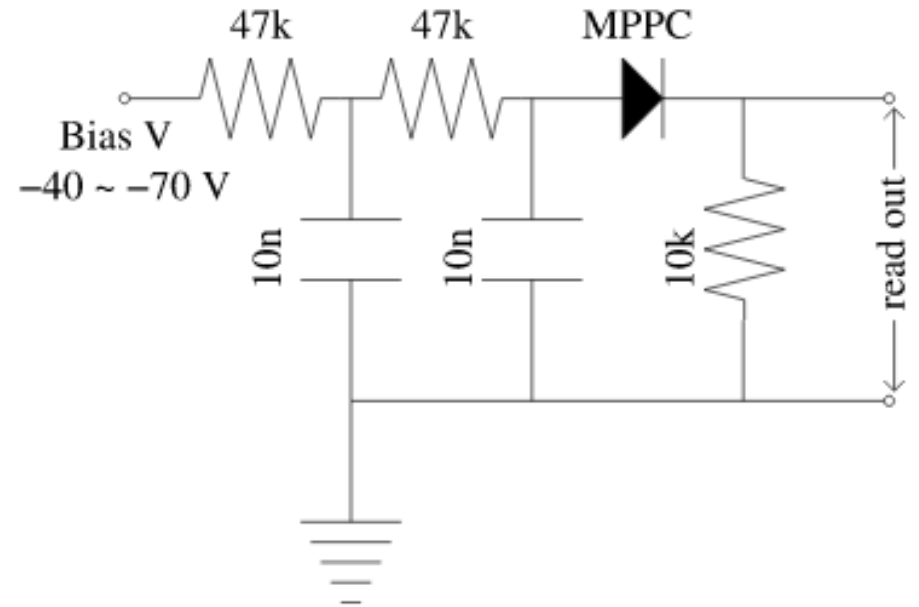
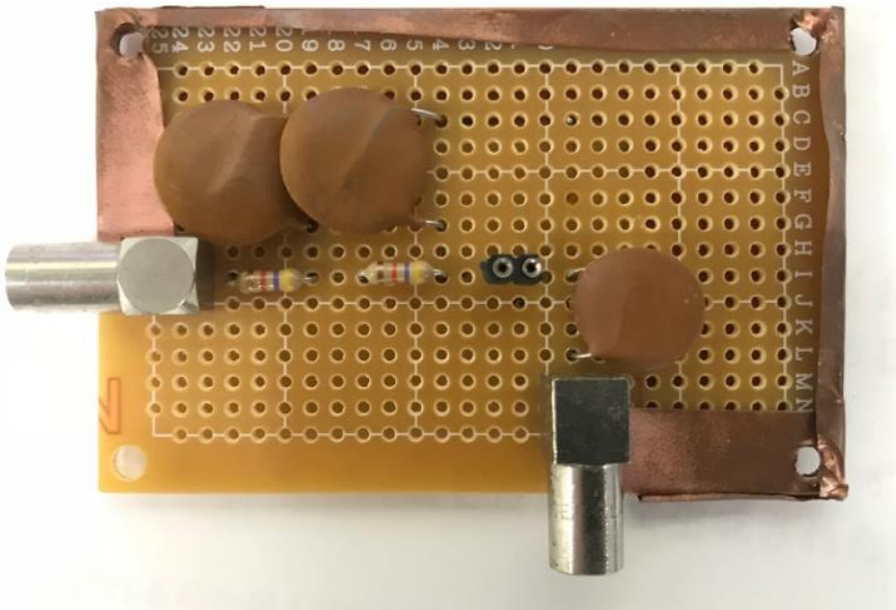
各APDピクセルには
同じ電圧がかかる

→各ピクセルからの
応答がよく揃っている

$$Q_{total} = N_{fired} \times Q$$

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)

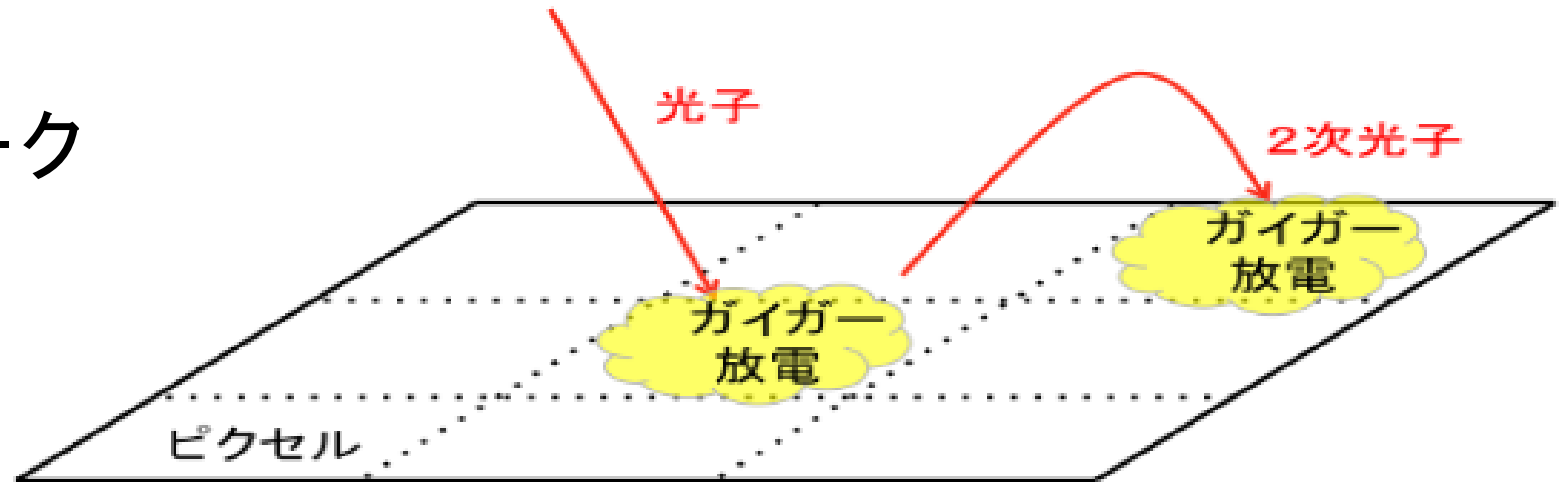
MPPC読み出し回路



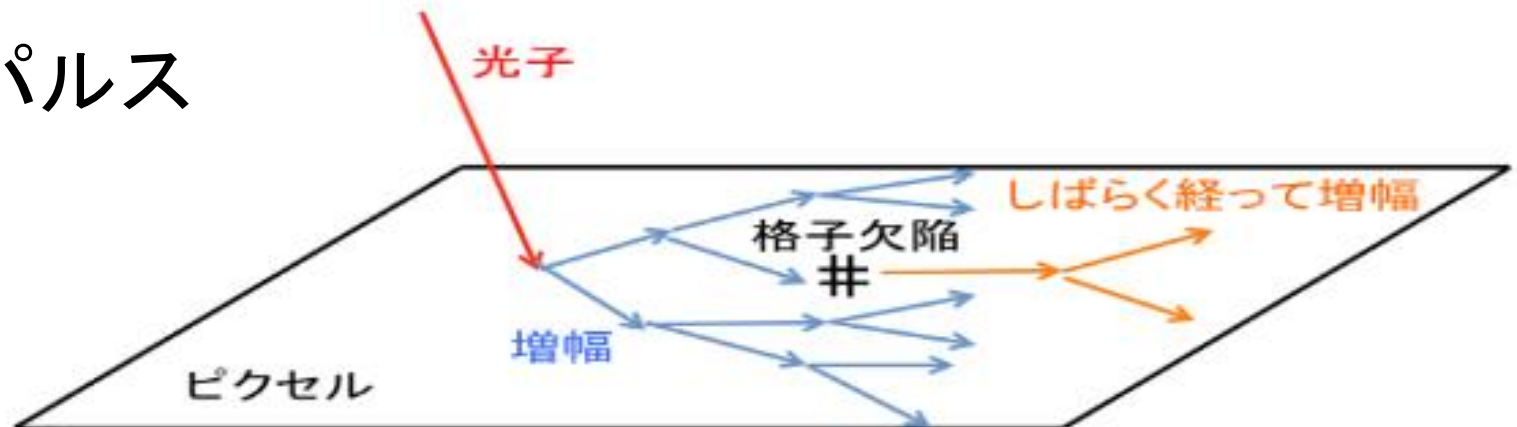
実際のMPPC読み出し回路とその回路図

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)

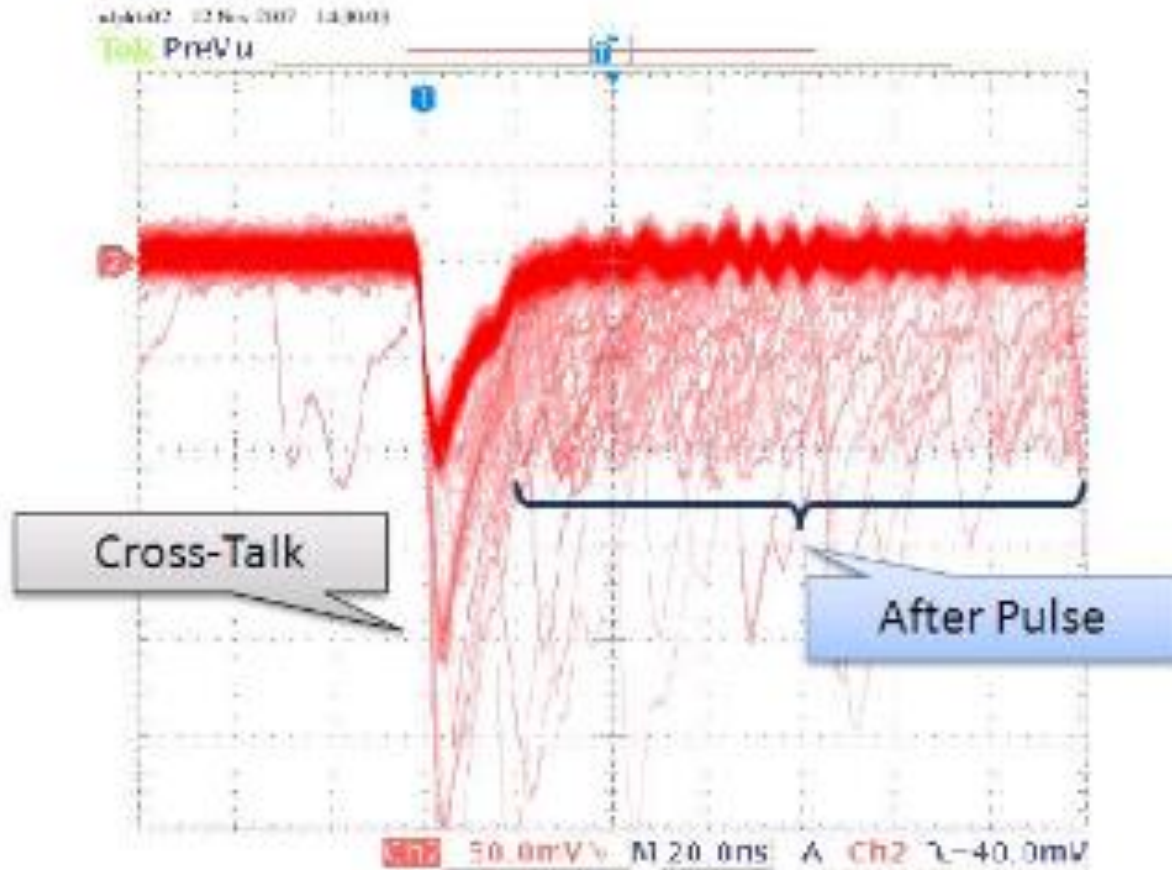
クロストーク



アフターパルス



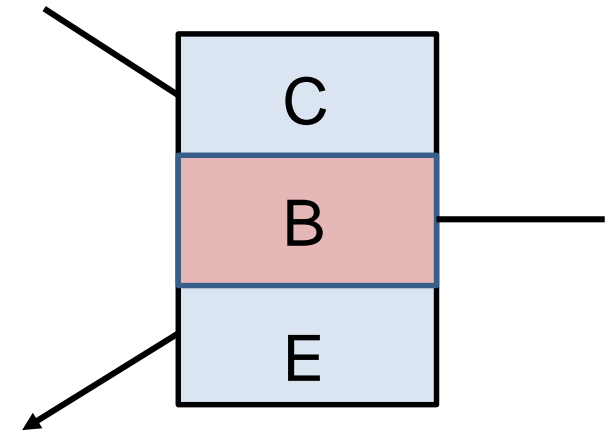
MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)



クロストークとアフターパルスのオシロでの波形

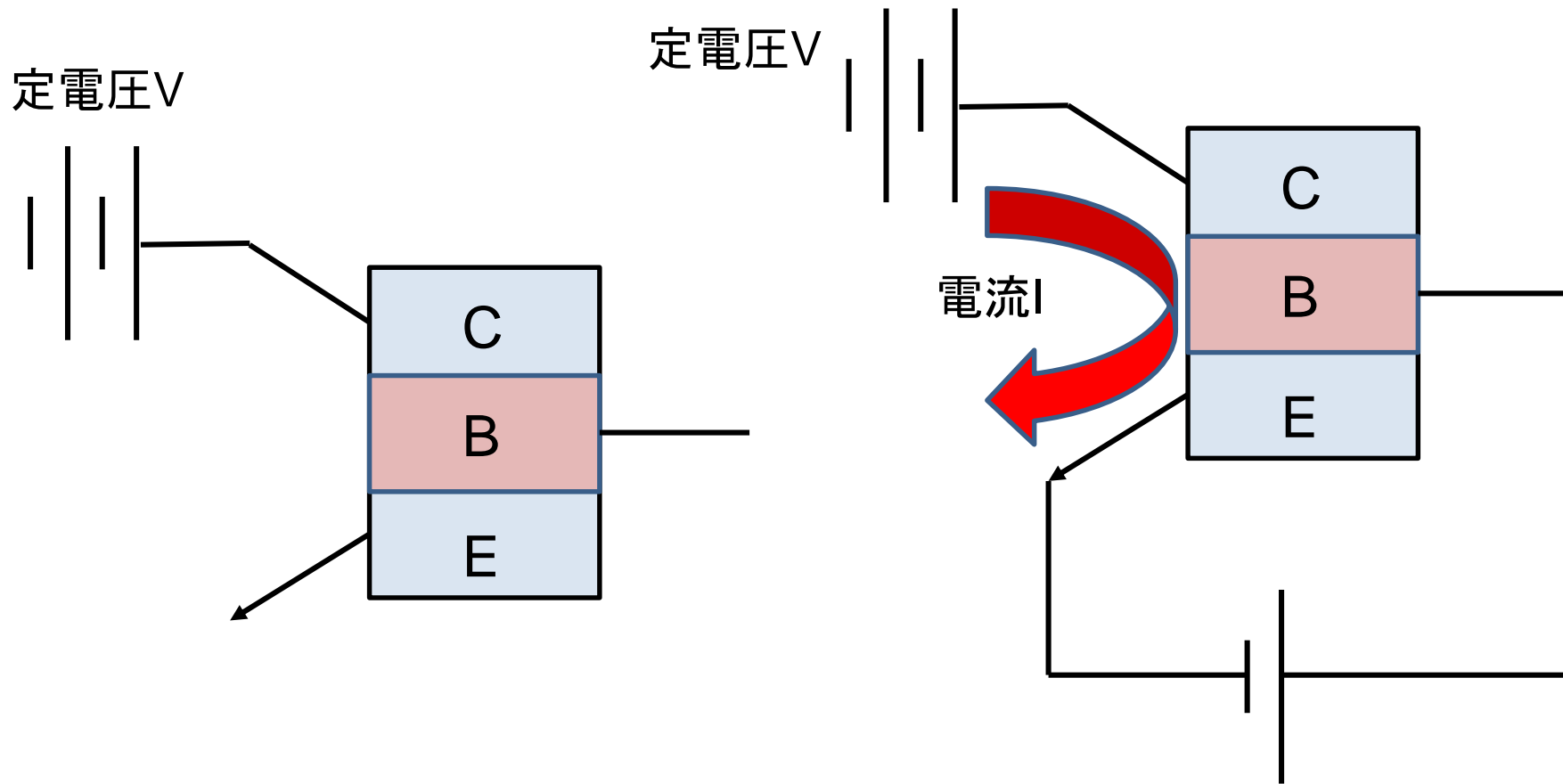
LEDドライバ

- ゲートとLEDを同期させたい。
NPN型トランジスタ (C1959)



- エミッタ (E) ベース (B) コレクタ (C) の3つの端子からなる半導体素子。コレクタ-エミッタ間に電圧をかけておく。ベースからエミッタに向かって正の電流を流した時のみ、コレクタからエミッタに向かって電流が流れる。

NPN型トランジスタのしくみ

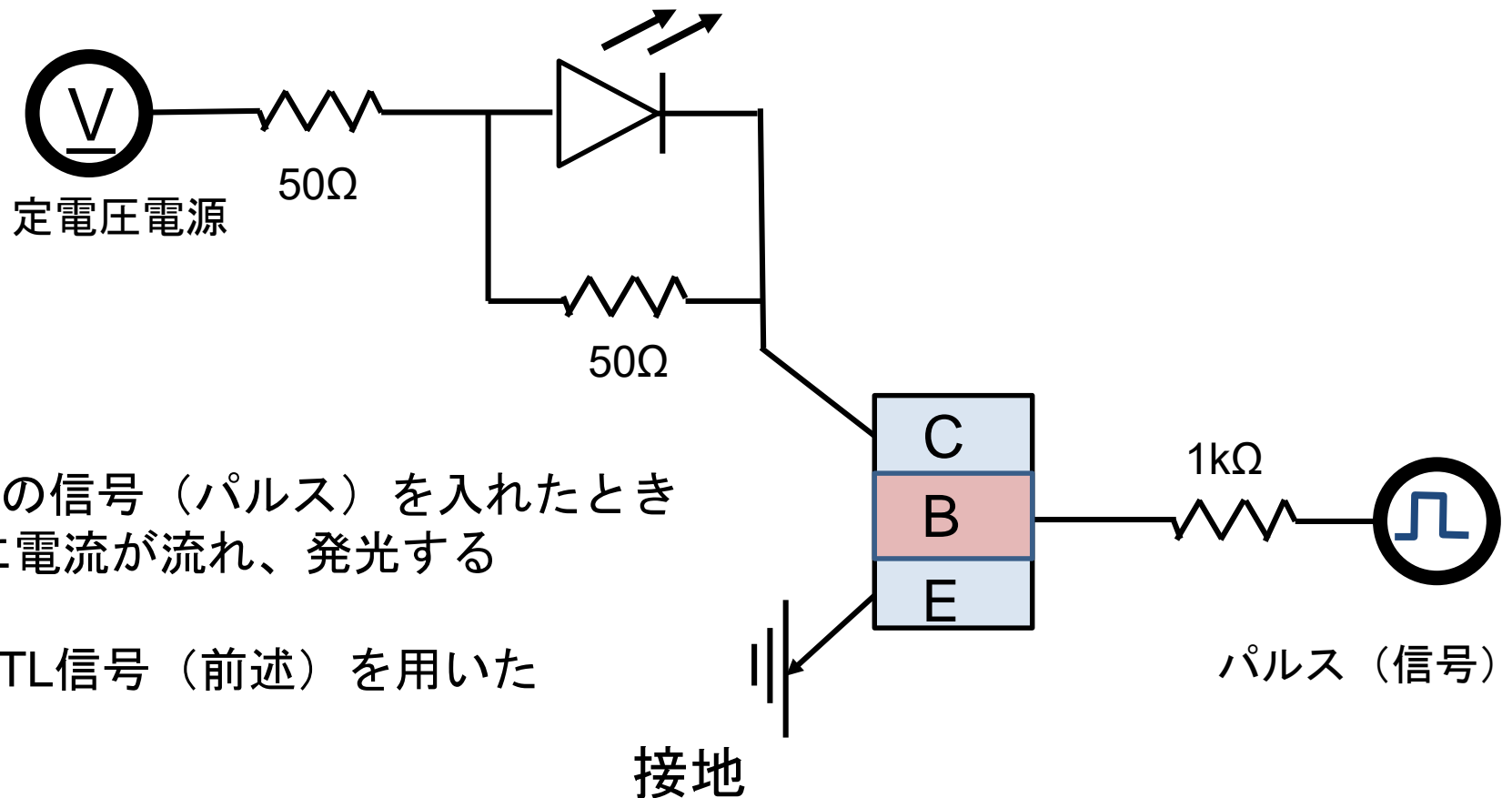


普段は電流は流れない。
。

B→Eの向きに正の電流を流したときのみ、
CからEへ電流が流れる。

LEDドライバ

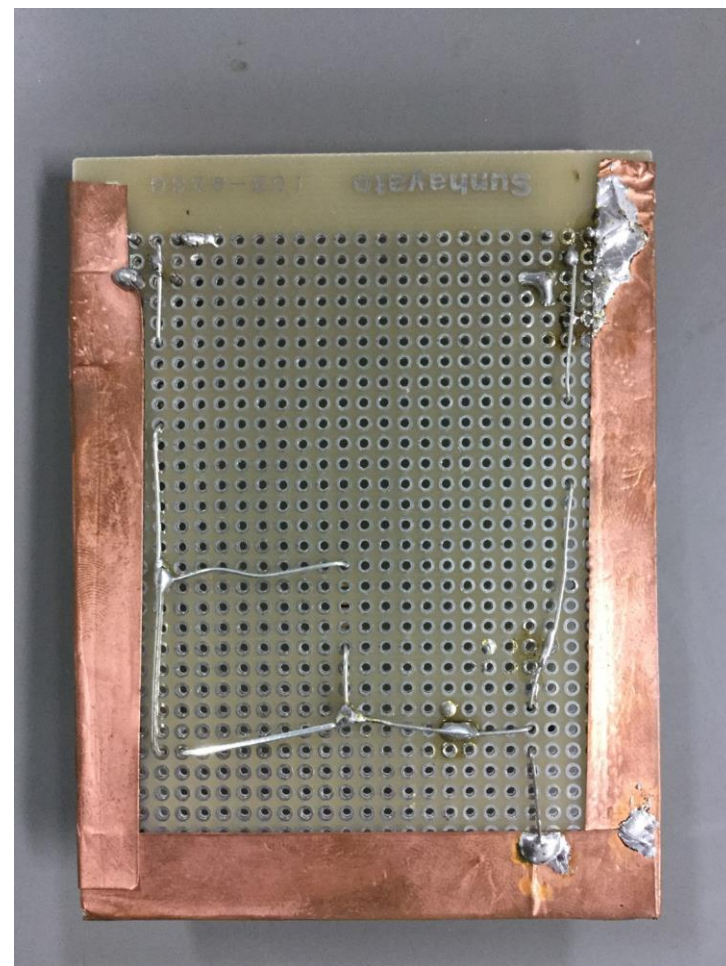
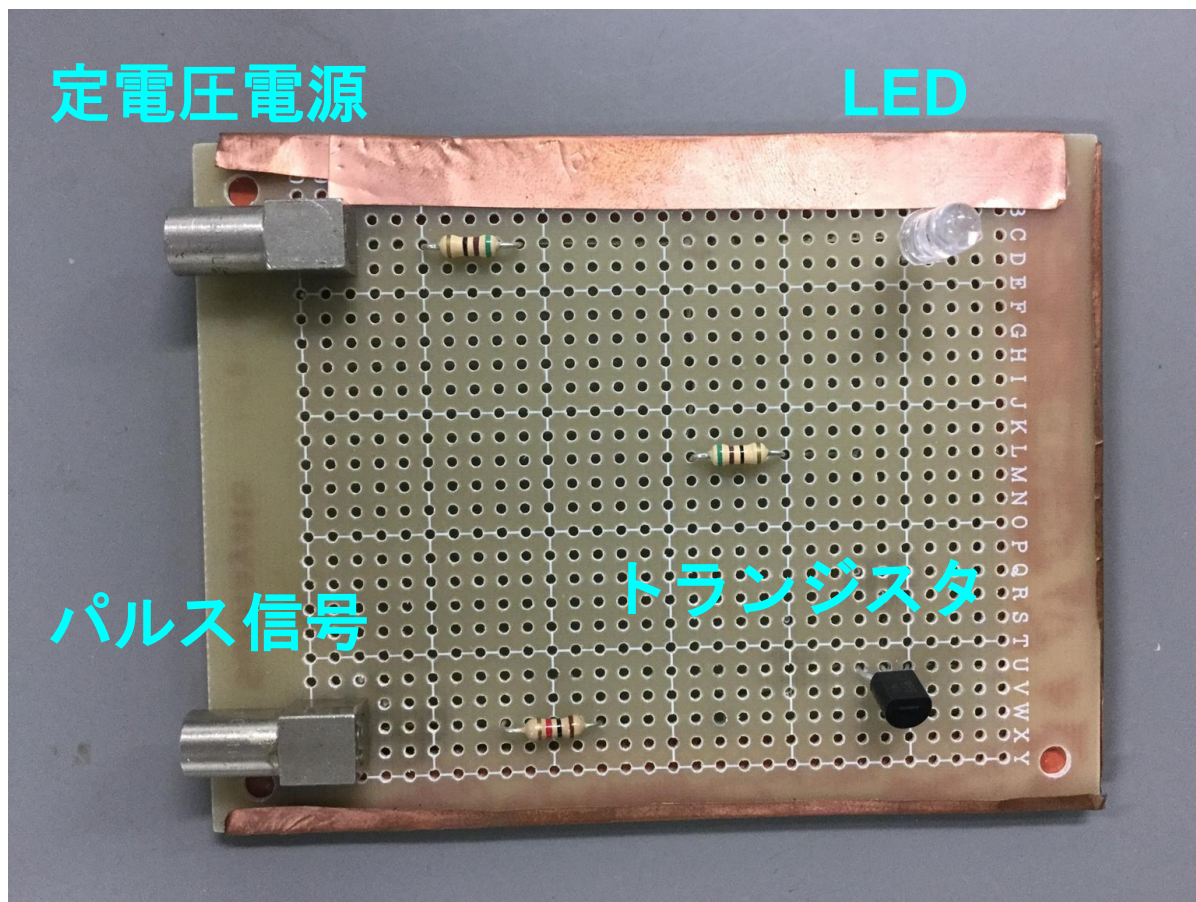
- LED (Broadcom社 HLMP-D155)
- 正の方向に電圧がかかったときのみ発光する
(発光ダイオード, 637 nm)



Bに対して正の信号 (パルス) を入れたときのみ、LEDに電流が流れ、発光する

パルスにはTTL信号 (前述) を用いた

LEDドライバ

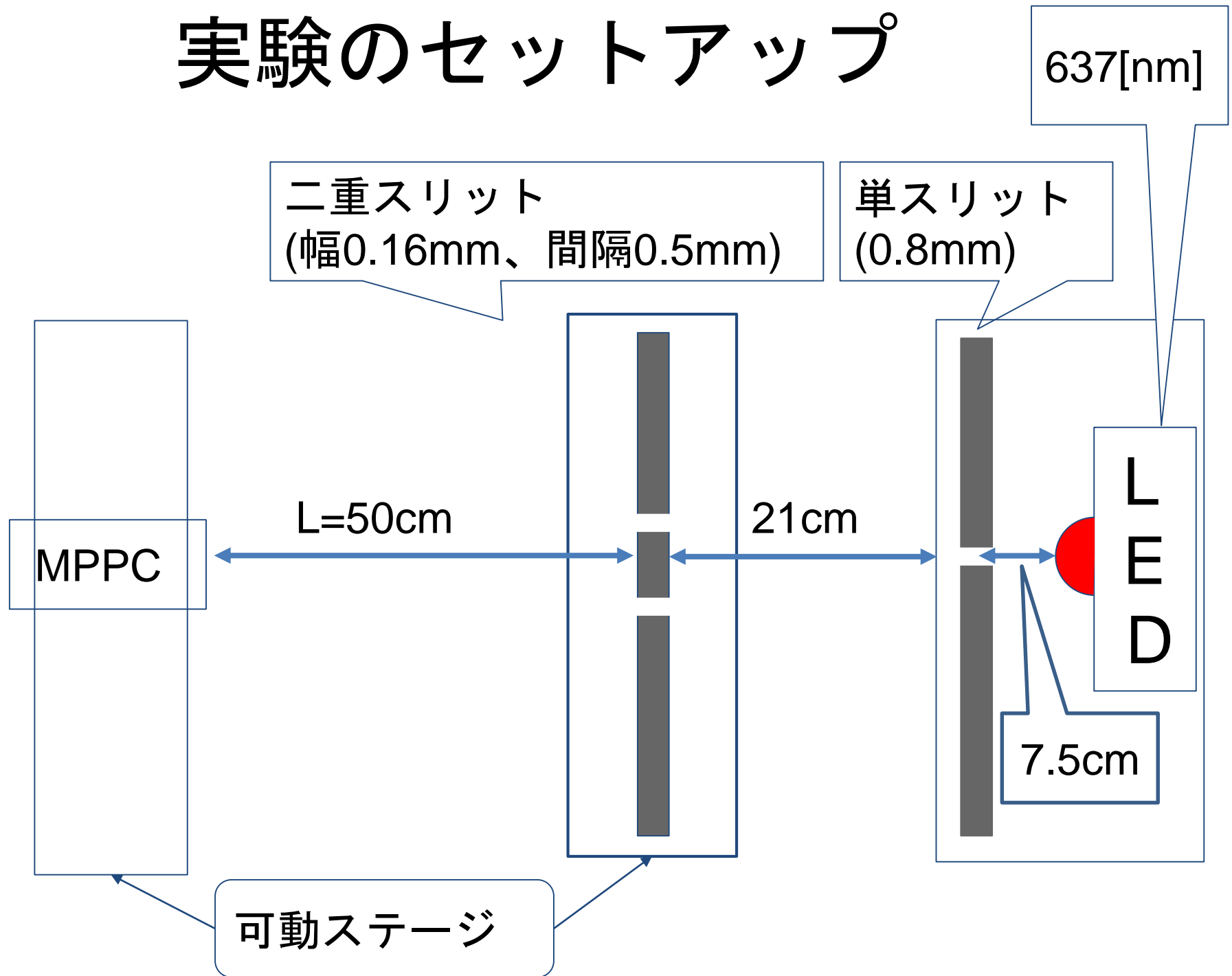


実験の流れ

- 予備実験 :
- LED,二重スリット,MPPCの位置関係の決定

- 本実験 :
- 二重スリットでの一光子干渉による干渉縞の測定

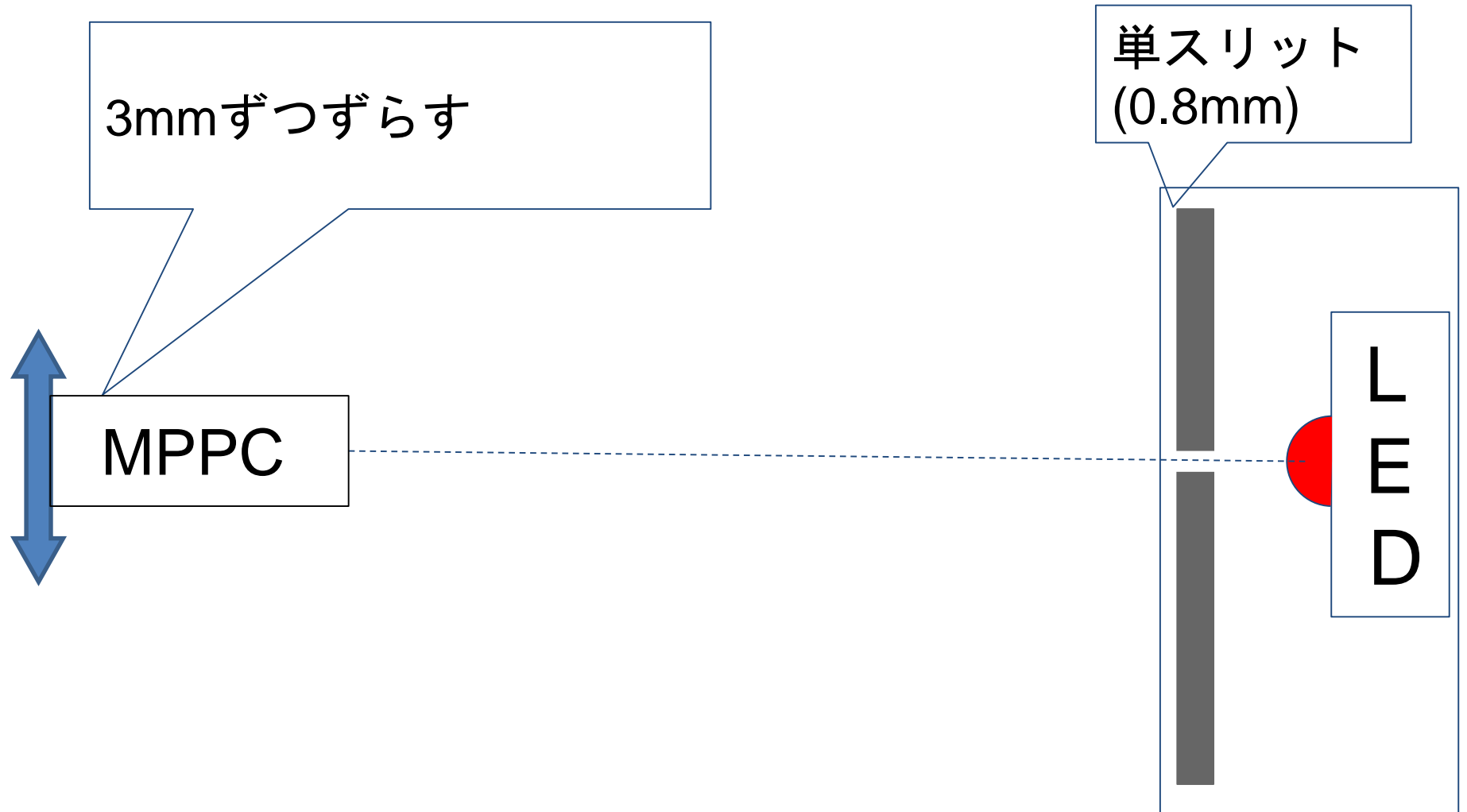
実験のセットアップ



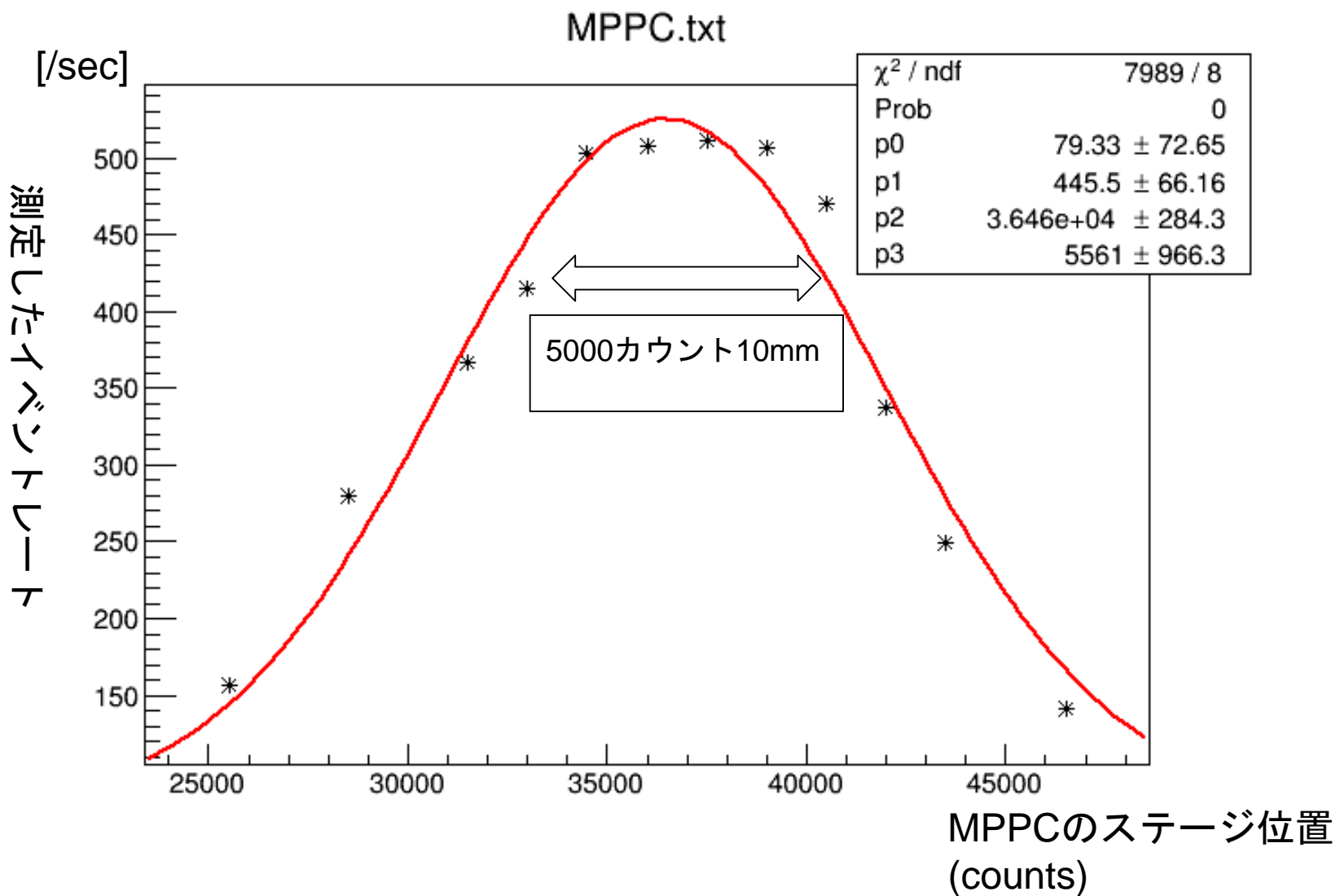
予備実験1(MPPC位置決め)

- MPPCを単スリット前方に置きたい
 - 光が最も多く検出されるであろう中央の位置を調べる。
 - まずは単スリットのみがLEDの前方にある状態でMPPCに電圧をかけ、MPPC側のステージを動かしながら測定することでLEDとMPPCの位置関係を決定する。
-
- LED電源 : 7V
 - Clock generator : 500Hz
 - ノイズレート : 31.7Hz

実験のセットアップ



結果（ガウスフィッティング）

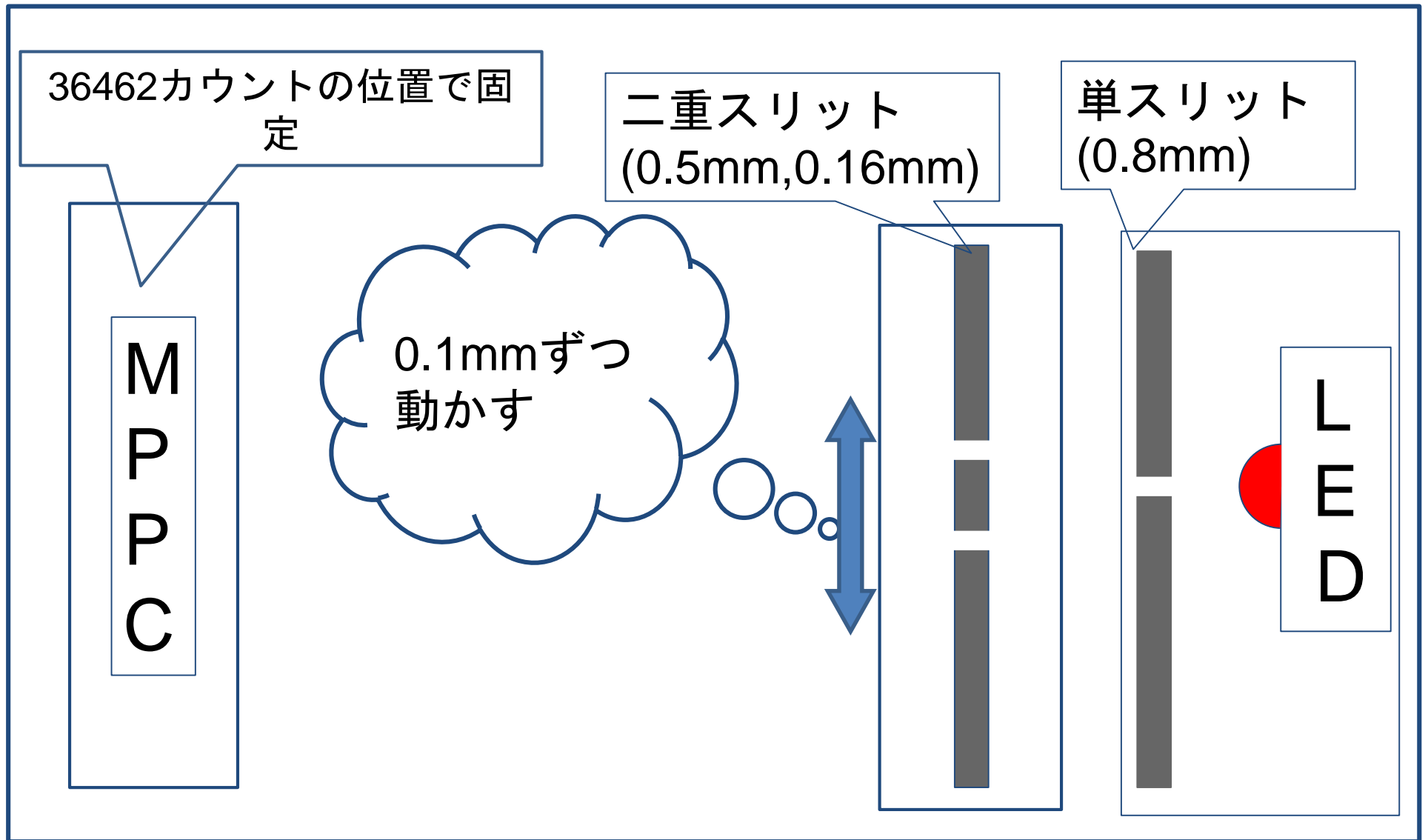


MPPCの中央の位置：36462カウント

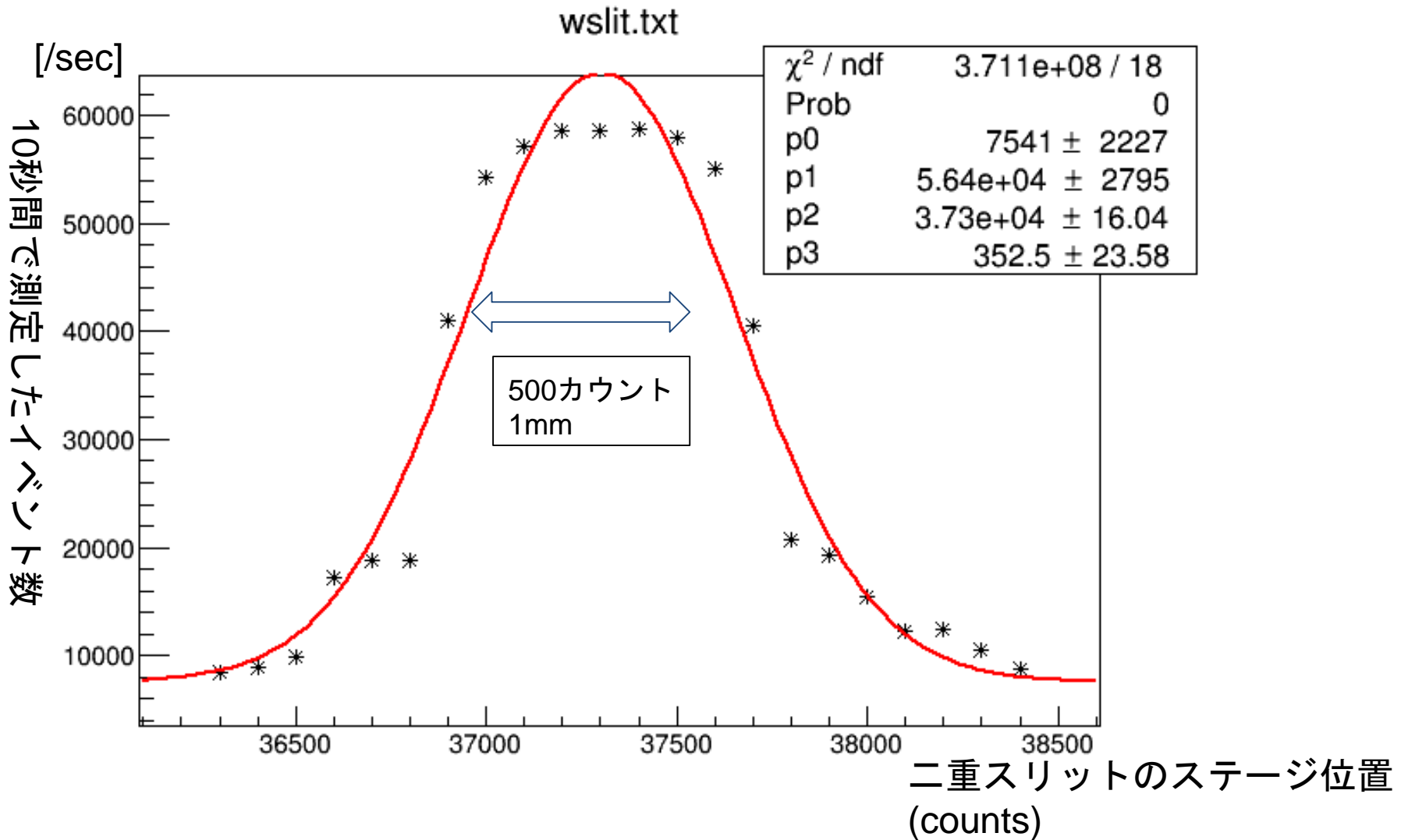
予備実験2(ダブルスリット位置決め)

- LEDとMPPCの位置関係が決定したのち、MPPCの位置を固定した状態で二重スリット側のステージを動かして、基準となる二重スリットの位置を決定した。
- LED電源 : 7V
- Clock Generator : 50kHz
- ノイズレート : 2761.8Hz

実験のセットアップ



結果（ガウスフィッティング）



二重スリットの中央の位置：37304カウント

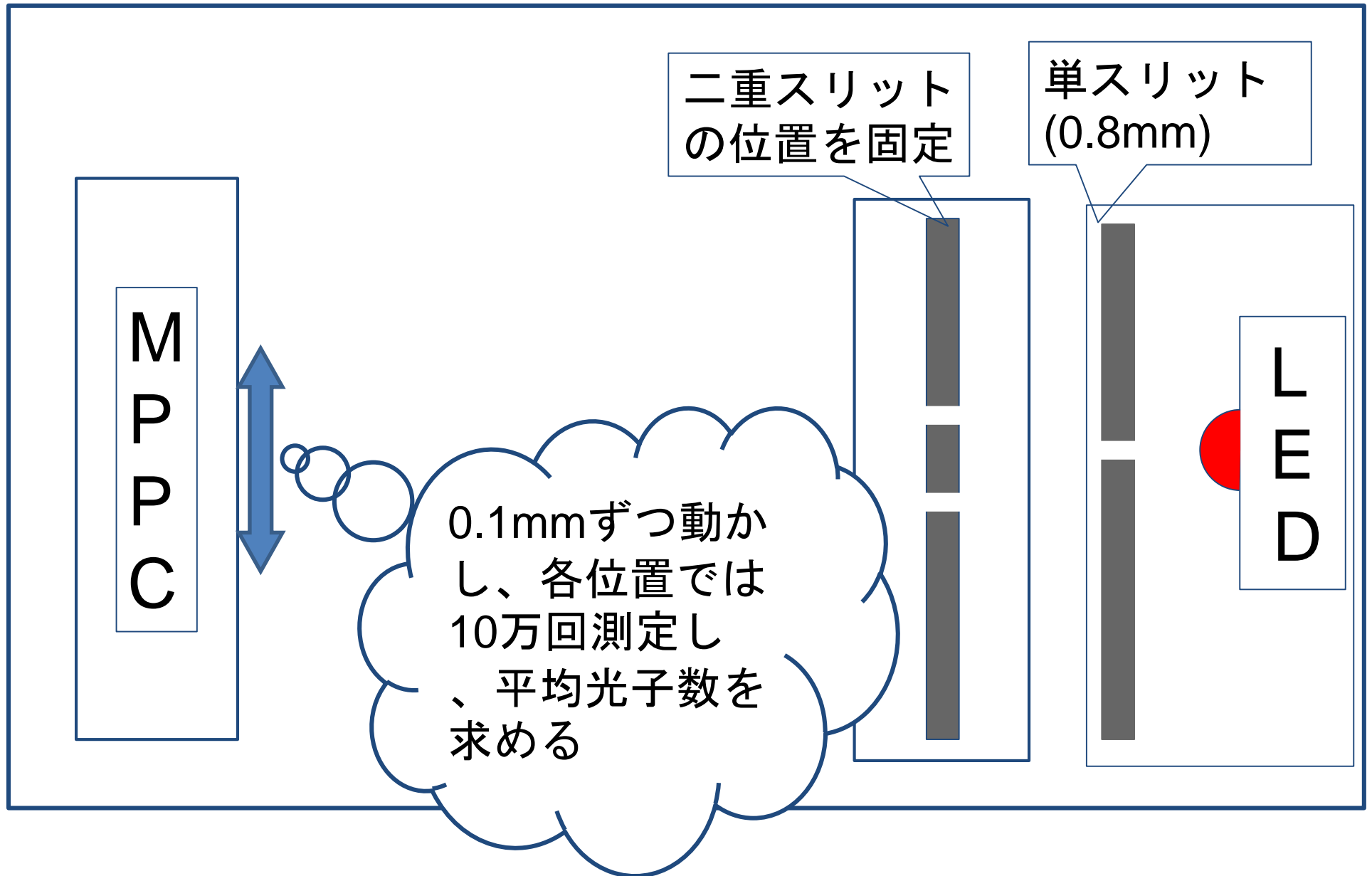
予備実験の結果

- 中央の位置は
MPPC側：36462カウント
二重スリット側：37304カウント
- 本実験では二重スリットの位置は37304カウントで固定、MPPCは36462カウントを基準に前後に移動させる。

本実験

- 予備実験で決定した位置をもとに、干渉縞の測定を行う。
- 二重スリット的位置を固定した状態で、MPPCの位置を0.1mm（50カウント分）ずつ動かしながら、各地点で10万イベント分のデータをとる。
- データから各地点での平均光子数を算出する。

本実験



熱雑音やLEDからの光を検出したときの、ある時間のMPPCのカウント数はポアソン分布に従うと仮定

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n e^{-\bar{n}}}{n!}$$

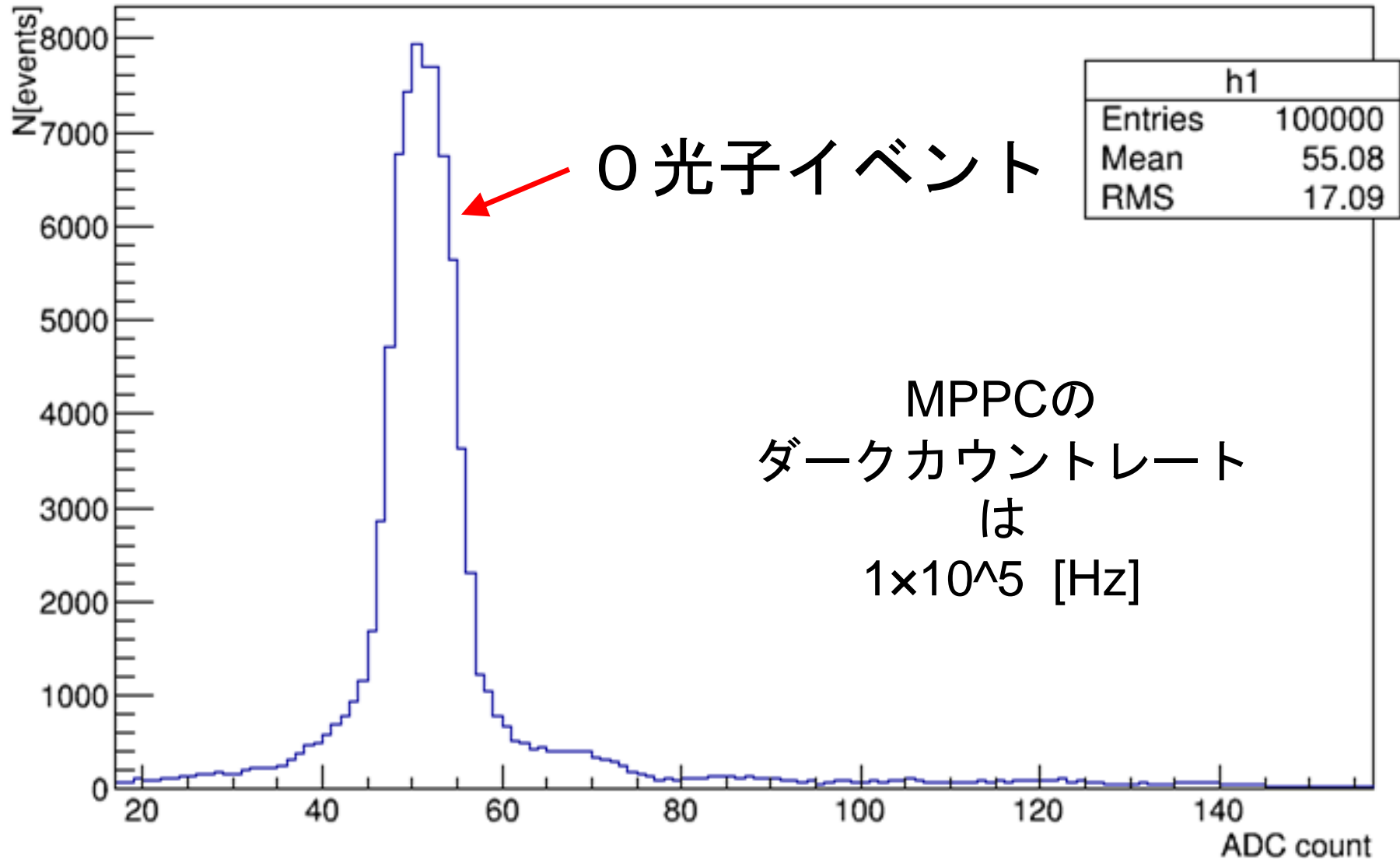
$P(n)$: 光子数が n 個と観測される確率

\bar{n} : 平均光子数

$$\bar{n} = -\log\{P(0)\} = -\log \frac{\#(0 \text{ 光子イベント})}{\#(\text{全イベント})}$$

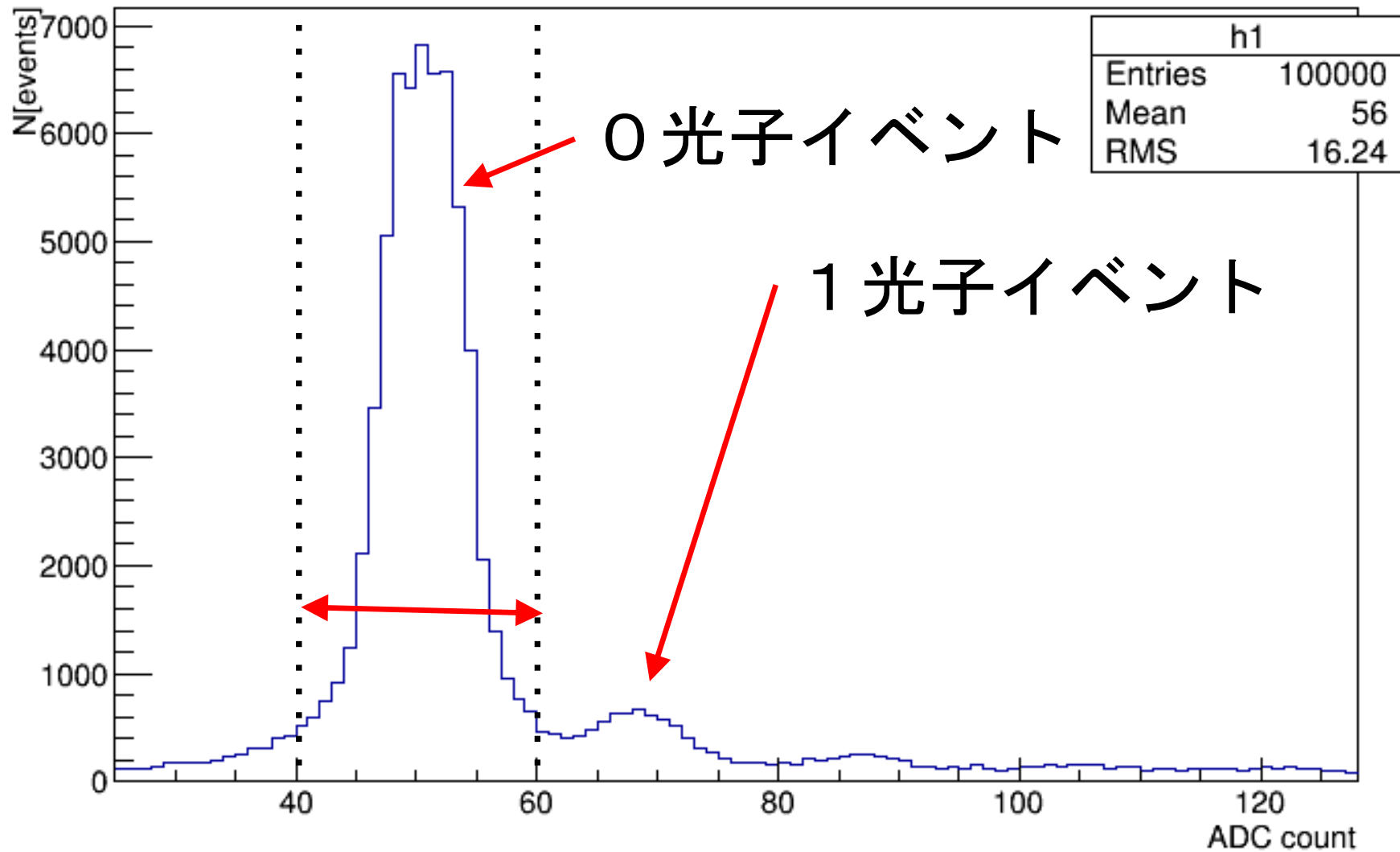
LEDなしのADCデータ

dark current



LEDありのADCデータ

ADC_center



0光子イベント

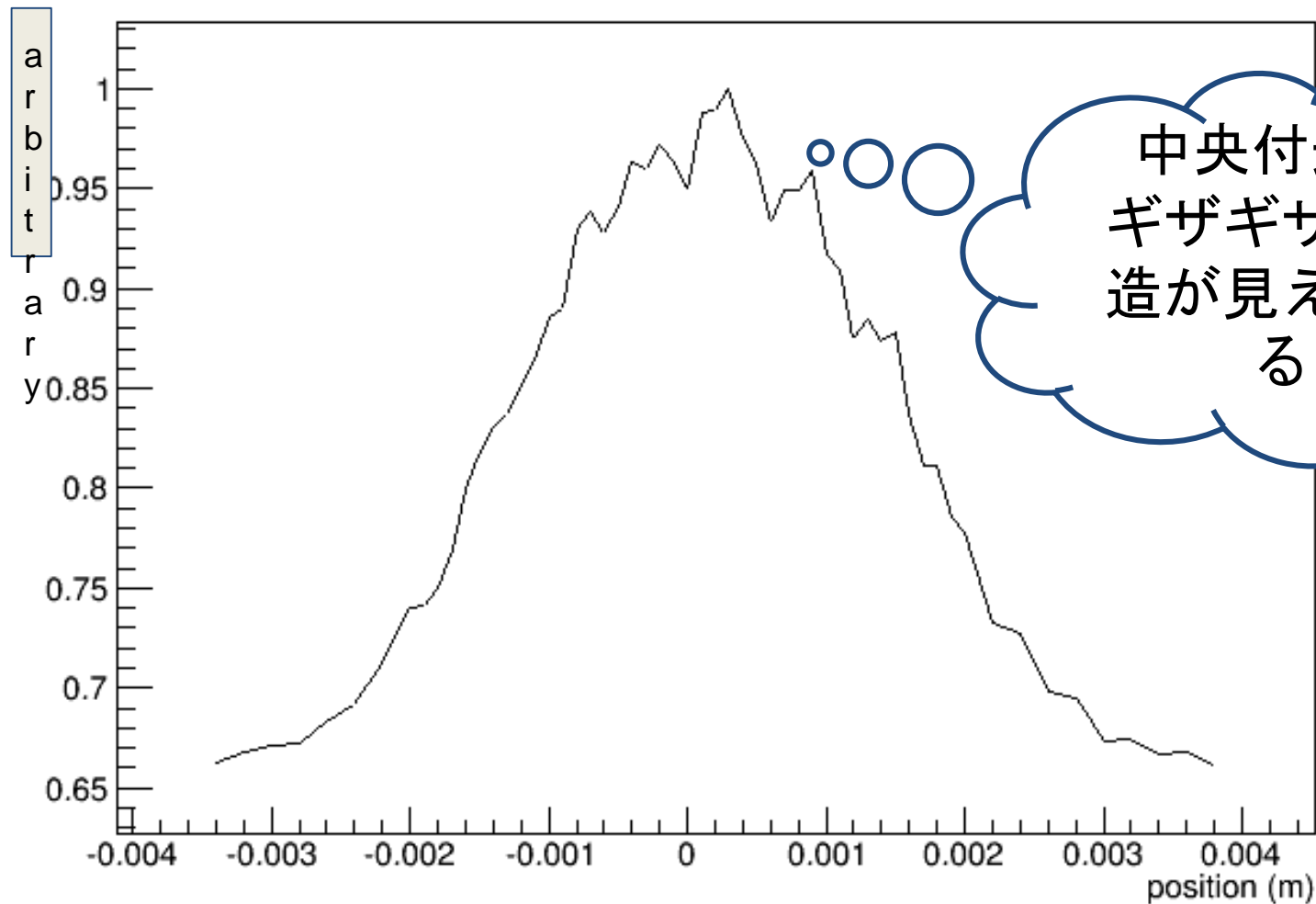
1光子イベント

※中央の位置

測定位置 vs 平均光子数

得られたグラフ

fringe_mean-photon-num-1.txt



平均光子数を使うことの妥当性

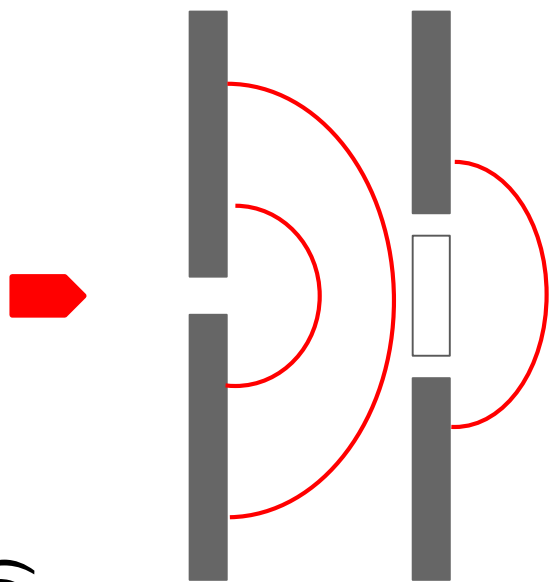
1 光子干渉を見たといえるのか？

LED由来の光子のみを検出したときの分布を考えると

$$\frac{\#(2 \text{ 光子以上のイベント})}{\#(1 \text{ 光子イベント})} = \text{約}6.1\%$$

⇒ 2 光子以上は十分無視できる。

解析



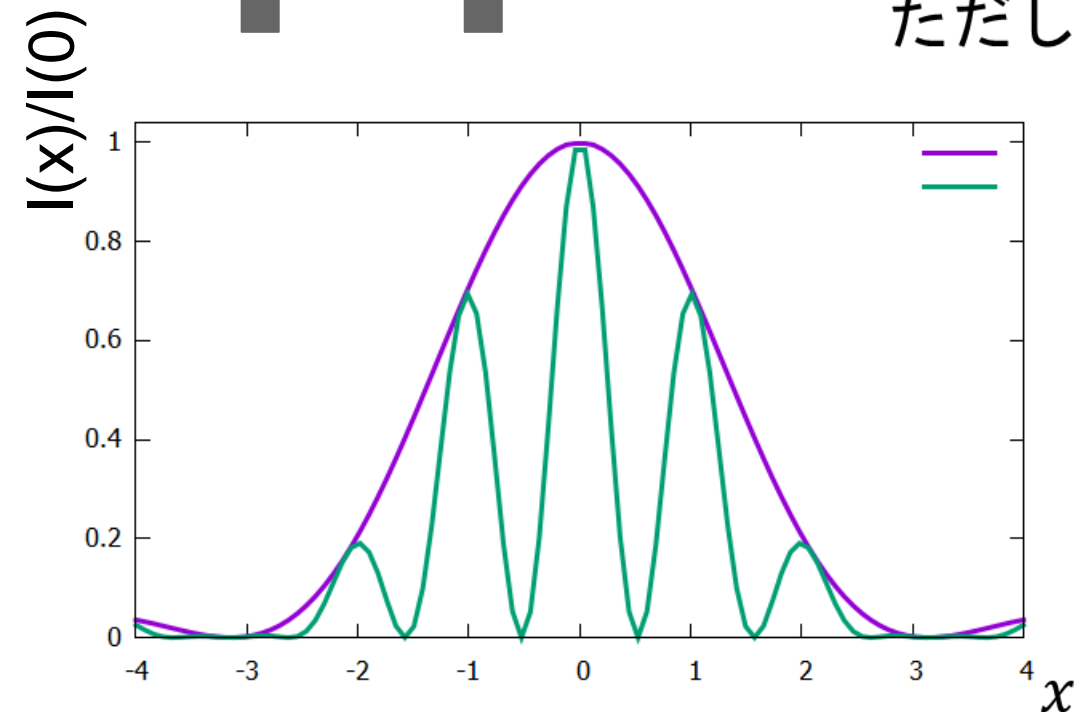
- W slit での干渉光の強度 : $I_w(x)$

$$I_w(x) = I_0 \left(\frac{\sin^2 \tilde{\beta}_w x}{(\tilde{\beta}_w x)^2} \right) \cos^2 \tilde{\alpha} x$$

- 単slit での干渉光の強度 : $I_s(x)$

$$I_s(x) = I_0 \left(\frac{\sin^2 \tilde{\beta}_s x}{(\tilde{\beta}_s x)^2} \right)$$

ただし、 $\tilde{\alpha} = \frac{\pi a}{\lambda L}$, $\tilde{\beta}_w = \frac{\pi b_w}{\lambda L}$, $\tilde{\beta}_s = \frac{\pi b_s}{\lambda L}$



緑 : $I_w(x)$, 青 : $I_s(x)$

これらが重ね合わさった
分布が見えていると仮定
し
フィットする

解析

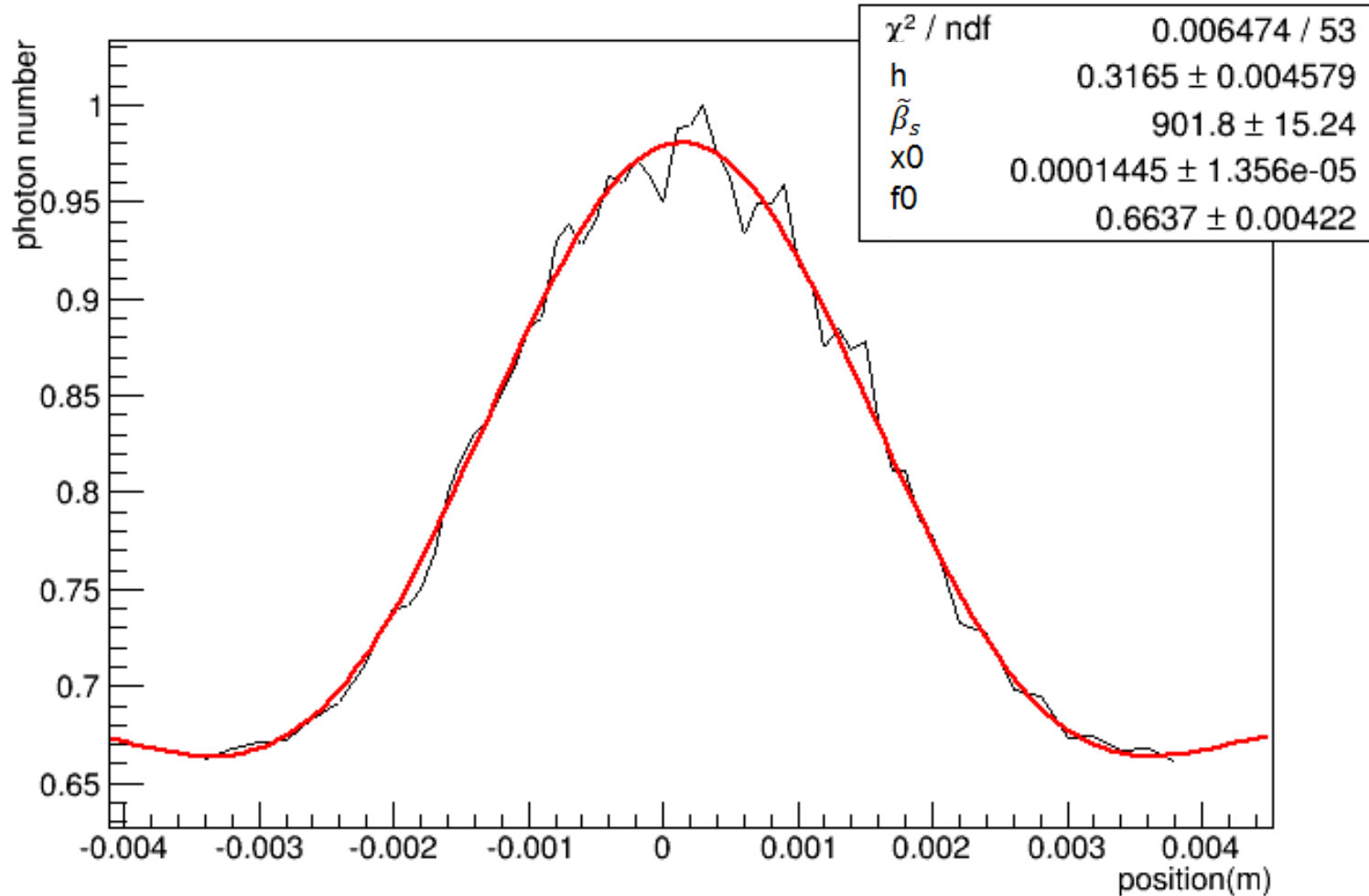
まず、単スリットによる干渉のみを考えてフィットした。

Fit関数（単スリット）：

$$f(x) = h_s \left\{ \frac{\sin \tilde{\beta}_s(x - x_0)}{\tilde{\beta}_s(x - x_0)} \right\}^2 + f_0$$

$h_s, \tilde{\beta}_s, x_0, f_0$ をフィットパラメータとしてフィット。

single-slit



$$f(x) = h_s \left\{ \frac{\sin \tilde{\beta}_s (x - x_0)}{\tilde{\beta}_s (x - x_0)} \right\}^2 + f_0$$

単スリット干渉フィット

フィット結果

	h	0.316
	$\tilde{\beta}_s$	902
	x0	1.45×10^{-4}
$h_s, \tilde{\beta}_s, x_0, f_0$	f0	0.664

これらの値をf(x)に代入したものを以後用いる。

解析

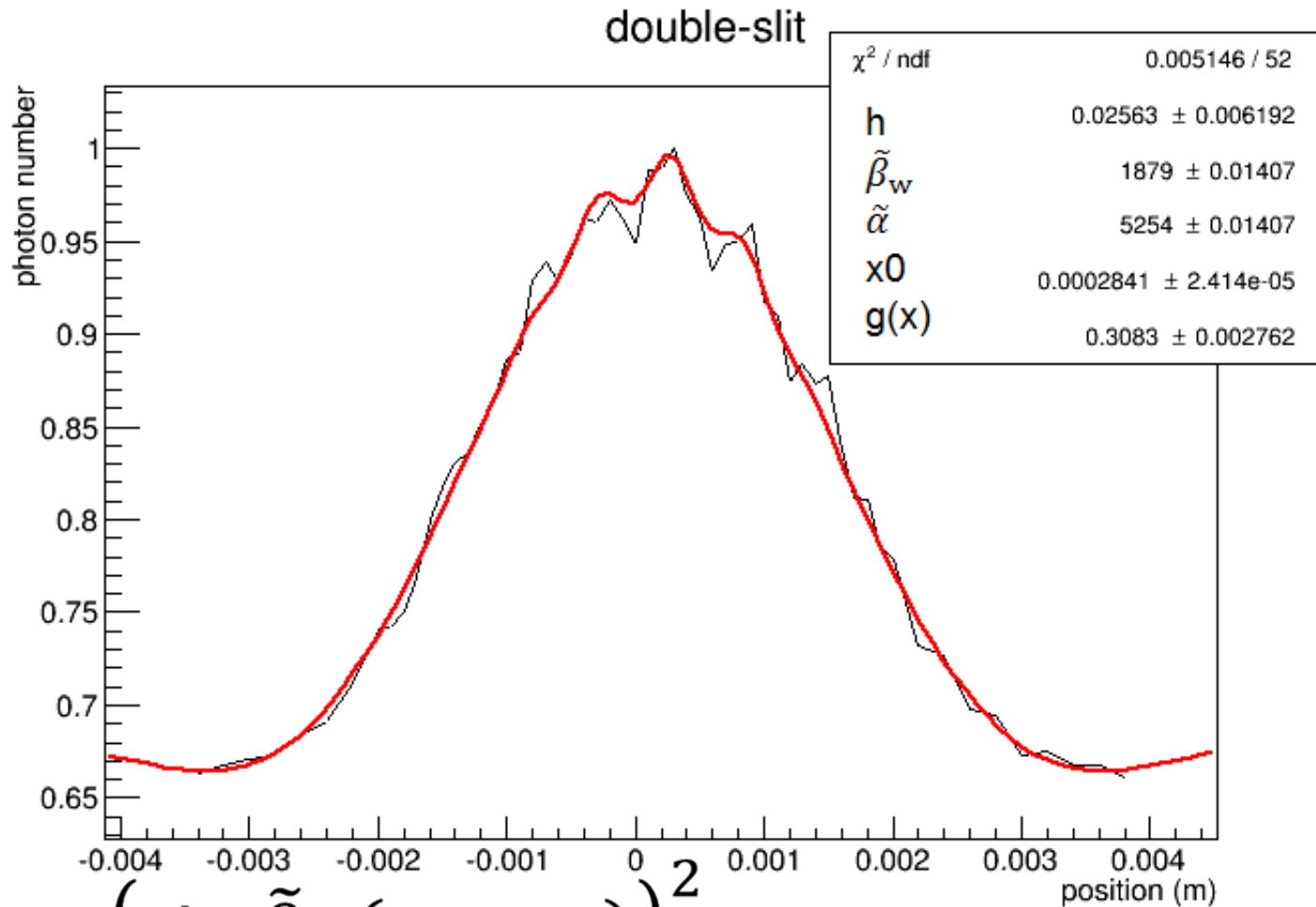
次に、単スリットで得られたパラメータをfixした状態で二重スリットによる干渉の項を考えた。

Fit関数（二重スリット）：

$$g(x) = h \left\{ \frac{\sin \tilde{\beta}_w(x - x_0)}{\tilde{\beta}_w(x - x_0)} \right\}^2 \cos^2 \tilde{\alpha}(x - x_0) + f(x)$$

$h, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}_w, x_0, f(x)$ はフィットパラメータ。特に、 $f(x)$ は前ページで決定した単スリット干渉フィット関数。

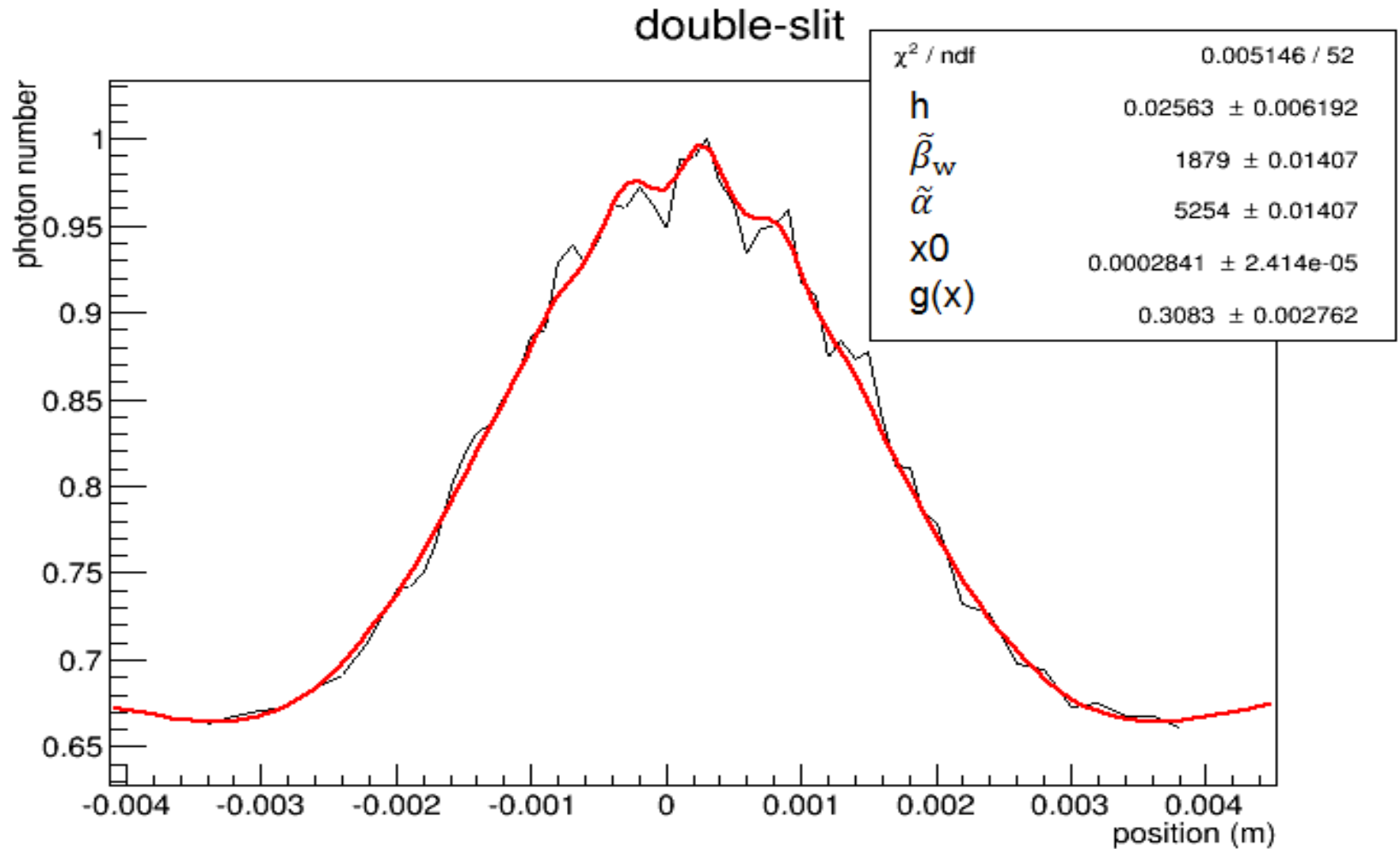
解析



$$g(x) = h \left\{ \frac{\sin \tilde{\beta}_w (x - x_0)}{\tilde{\beta}_w (x - x_0)} \right\}^2 \cos^2 \tilde{\alpha} (x - x_0) + f(x)$$

考察

- 二重スリットFit関数のパラメータ



考察

- ・ 二重スリットFit関数のパラメータ

$\tilde{\alpha}$: ピークとピークの間隔を表す

Fit結果...5254 真値...48??

⇒誤差 ?%で優位な結果が得られた。

$\tilde{\beta}_w$: ピークの高さの減少具合を表す

Fit結果...1879 真値...14??

⇒誤差 3?%で優位な結果が得られなかった。
真値より高く、ピークは理想より高い。

考察

- ・ 真値とずれた理由

グラフが左右非対称である。

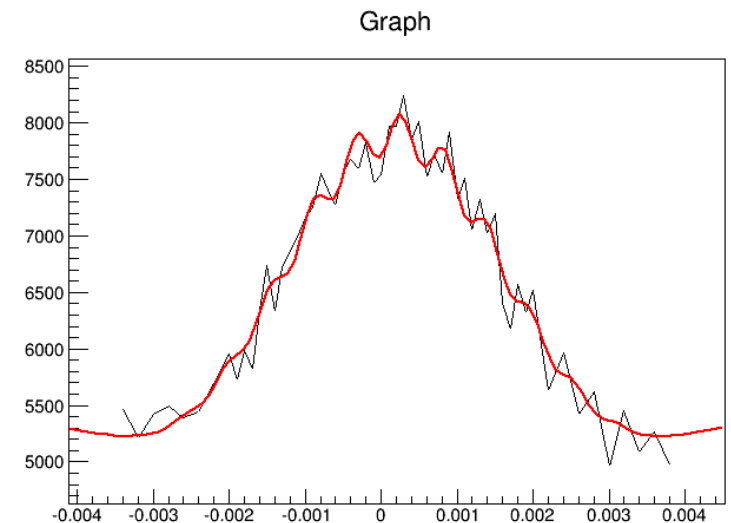
←単スリット干渉の関数と二重スリット干渉の関数の中心が異なる。

←セットアップからの影響

考察2

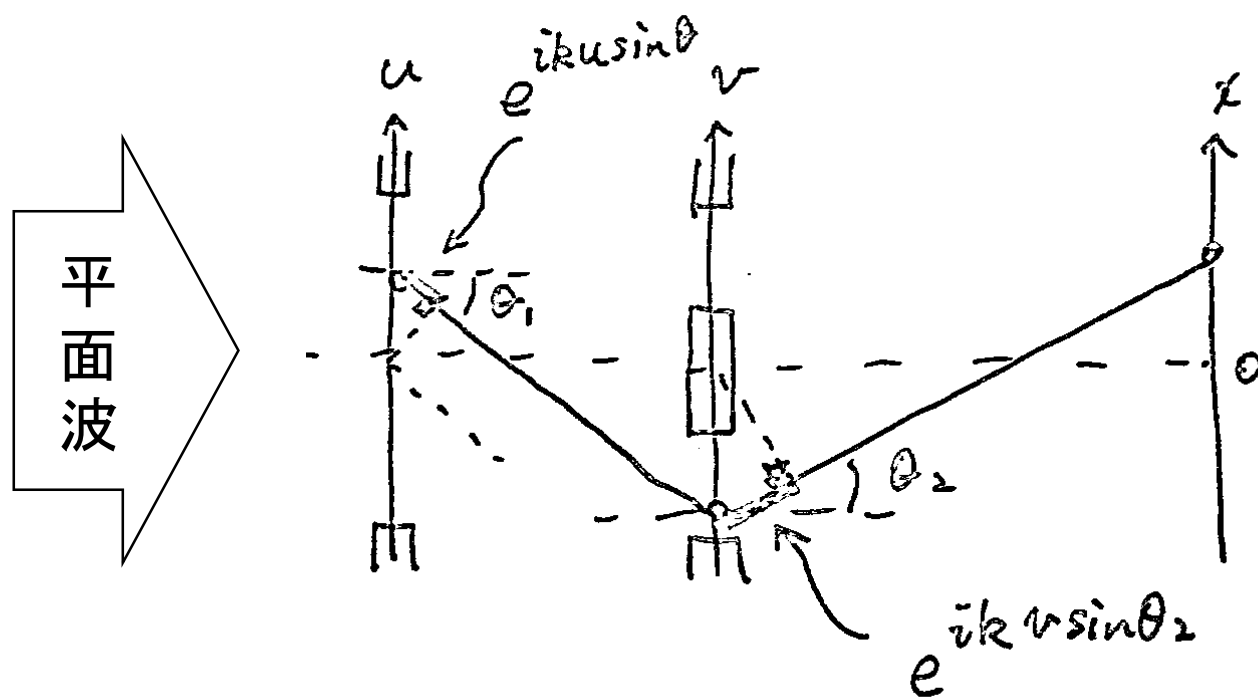
単スリット干渉の寄与

- 二重スリットの干渉パターンは見えている
- 単スリット干渉による包絡線が現れるはず
 - $I \sim \cos^2(\alpha x) \text{sinc}^2(\beta x)$
 - $\alpha \sim$ 二重スリットの間隔
 - $\beta \sim$ スリットの幅



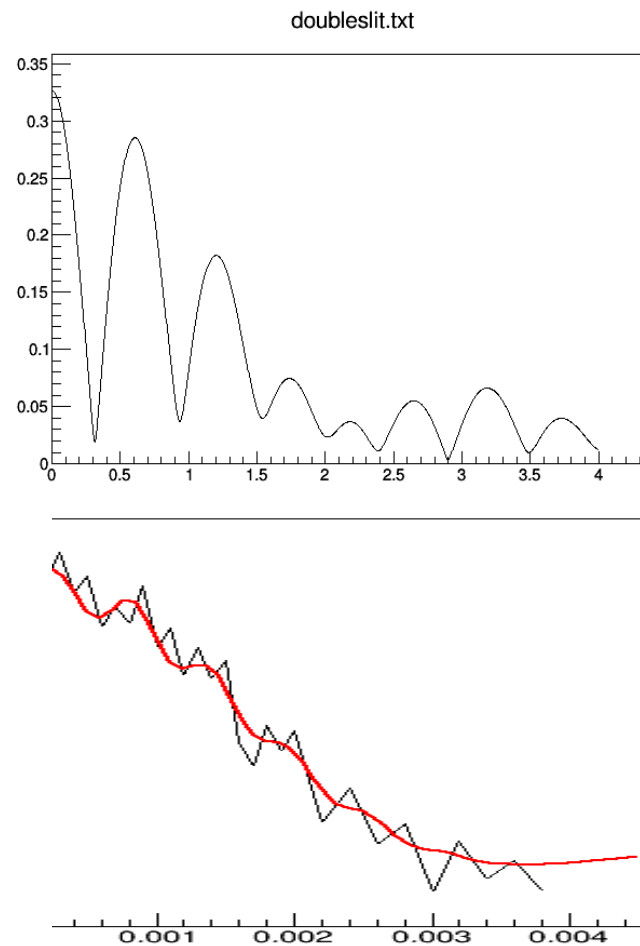
単スリット干渉の寄与

- ホイヘンスの原理に基づいて数値計算した



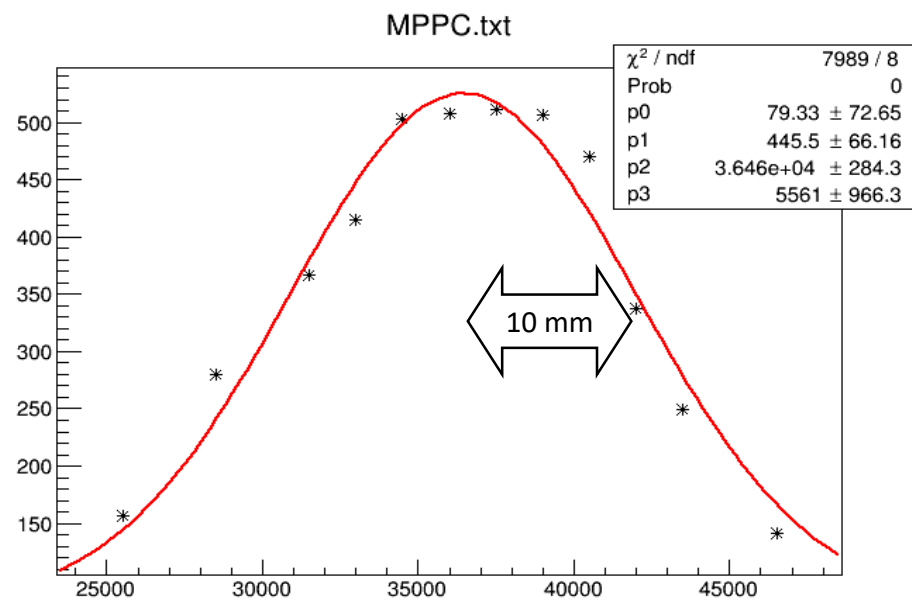
単スリット干渉の寄与

- 暗線の強度が毎回ほぼ0まで落ちる
- 今回の測定結果に合わない？



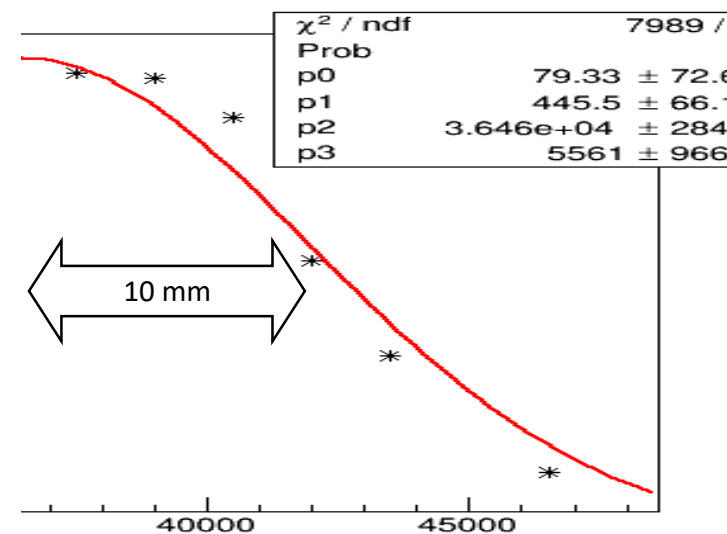
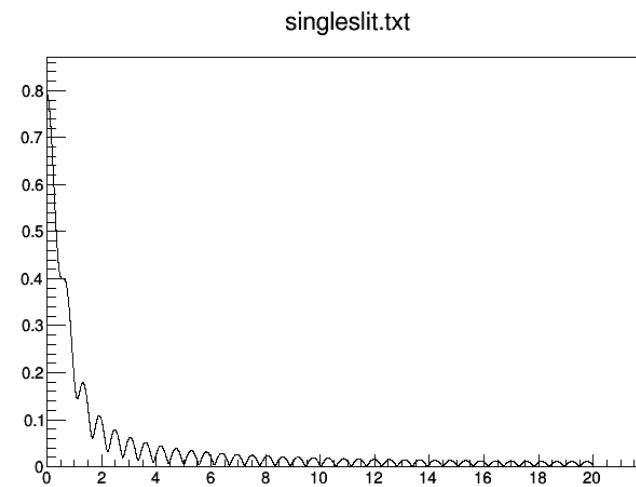
(recall) MPPCのセンター出し

- 二重スリットをどけて、絞り用の単スリットだけを通して測った
- 約 20 mm 幅の像が得られた



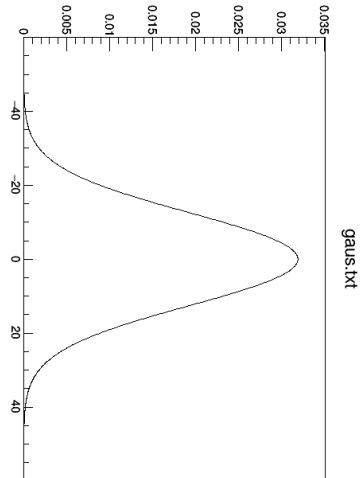
(recall) MPPCのセンター出し

- 二重スリットをどけたときの数値計算の結果
 - 半幅約 2mm の明線
- 測定したもののより明線が細い
- LEDの大きさが反映されていないため？



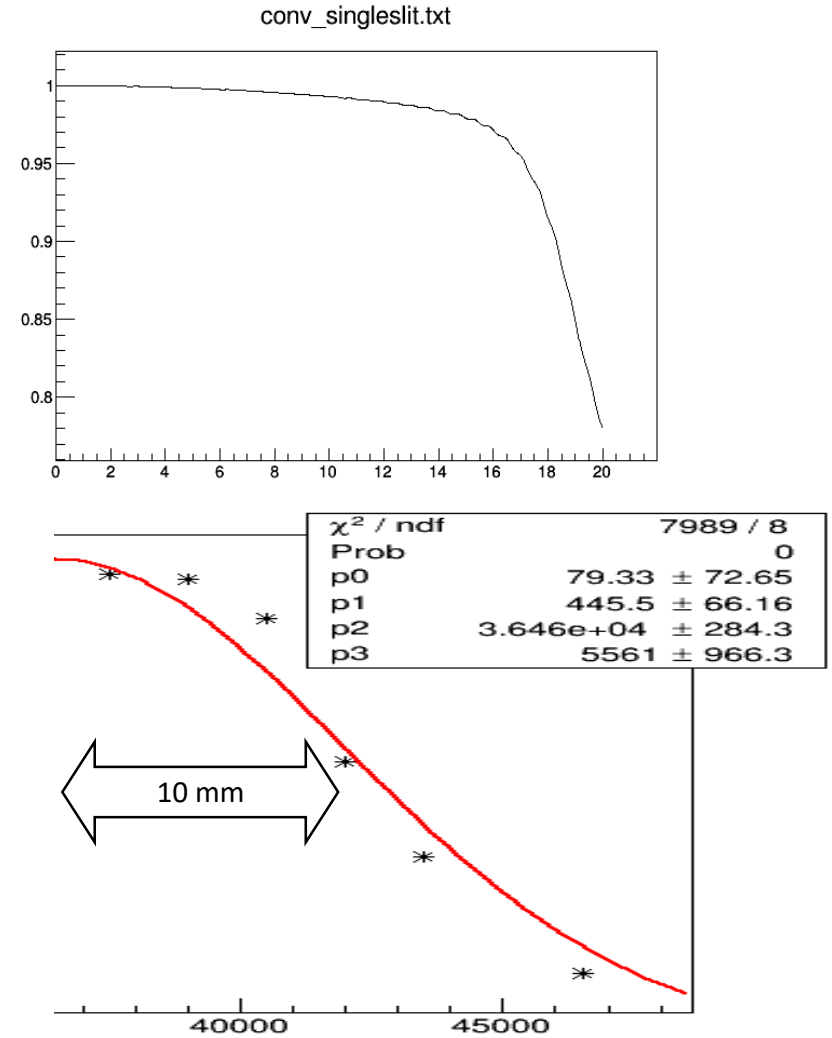
LEDの大きさの考慮

- LEDの直径 : 5 mm
- 5 mm の領域のどこかから平面波が出ると考える
- 強度分布 : 適当なガウス関数を仮定



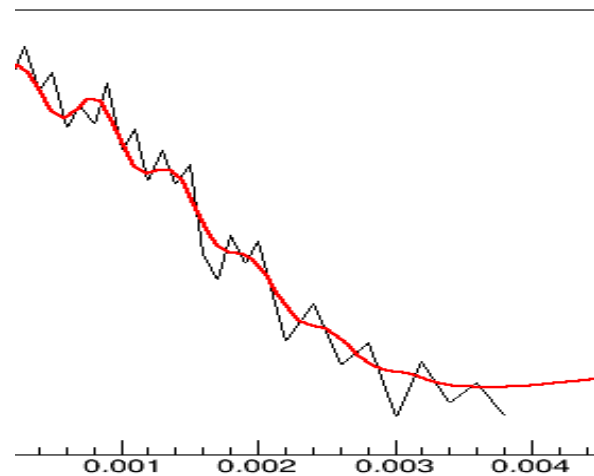
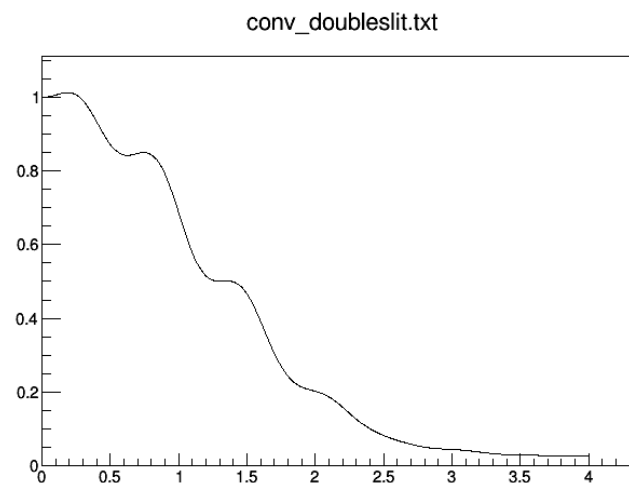
LEDの大きさの考慮

- 数値計算結果、半幅 20 mm の明線が得られた
 - 測定結果(半幅10 mm)とコンパラ
- LEDの大きさを考慮することで明線を“太らせる”ことができた



LEDの大きさの考慮

- LEDの大きさを考慮して二重スリットの結果を数値計算
- 測定結果に近い結果が得られた！



まとめ

- LEDドライバー、MPPC回路を自作して1-photonの二重スリット干渉実験を行った
- 二重スリットによる干渉パターンが確認できた
- 干渉パターンは数値計算の結果と一致した

改良案

- 暗線で強度がきれいに0に落ちないのは、LEDの大きさが原因だった
 - LEDと絞り用単スリットの間隔をもっと開ける
 - 絞り用単スリットをもっと細いものにする
- いずれにせよMPPCに到達する平均光子数は減ってしまう
 - LEDドライバーにも改良が必要？

ご清聴ありがとうございました。

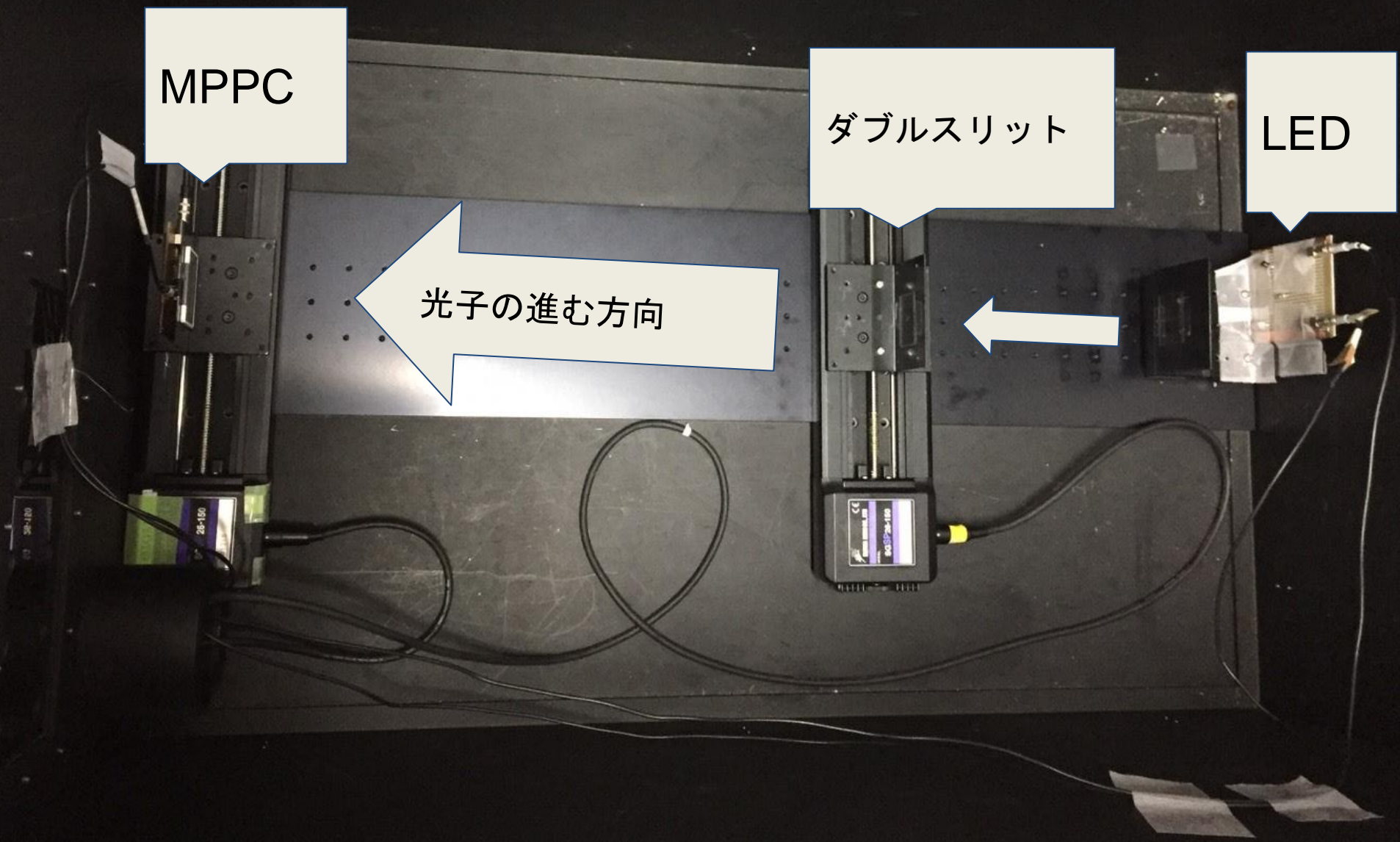
以下、予備のスライド

MPPC

ダブルスリット

LED

光子の進む方向





SIGMA KOKI

Step

02

M1: 92181 L
12: 45325 L

2 μ m/count

STOP



ORIGIN



HOST/MANUAL



RESET



HIGH/LOW



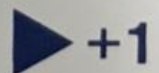
+2



-1



+1

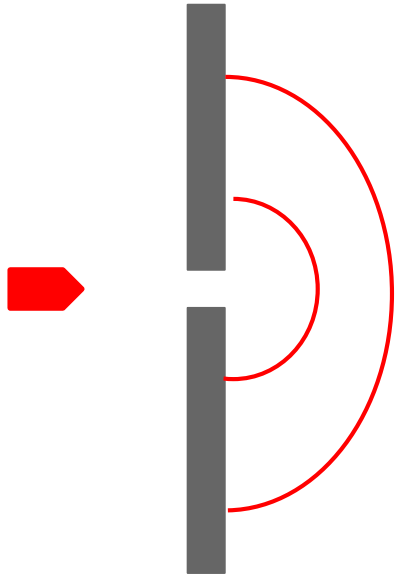


-2



Two-axis STAGE CONTROLLER

LEDの前の単スリットの必要性



- ・ LEDから四方に出た光を、
単スリットからの光源にそろえる
- ・ MPPCの位置決めが必要

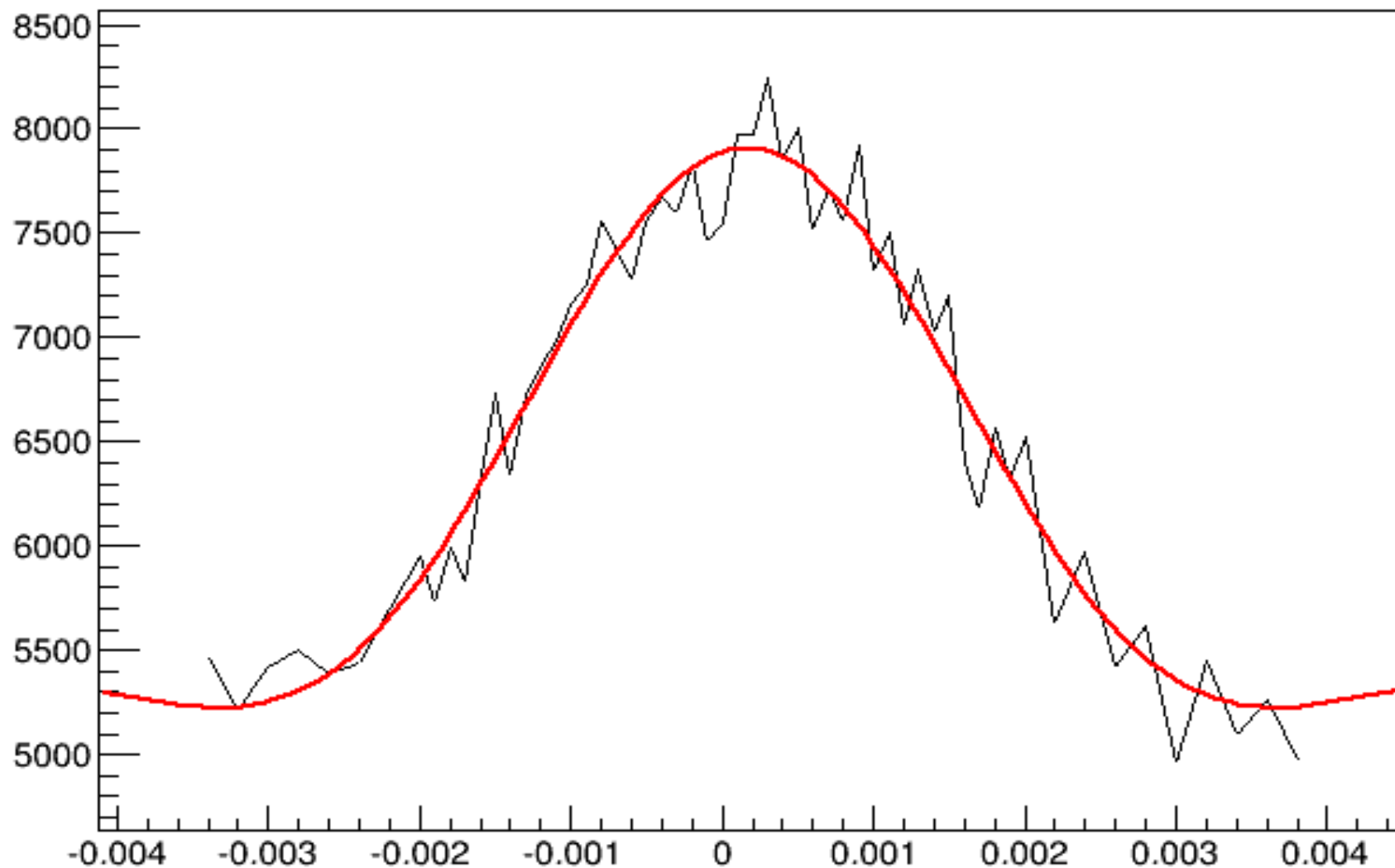
干渉点

$$\frac{ld}{L} = m\lambda$$

- L MPPCとダブルスリットとの距離 : m
- l MPPCの中心からのずれ :
- d スリットとスリットの幅 : 0.5mm
- m 何度目の干渉点か
- λ LEDの出す光の波長 : 637nm

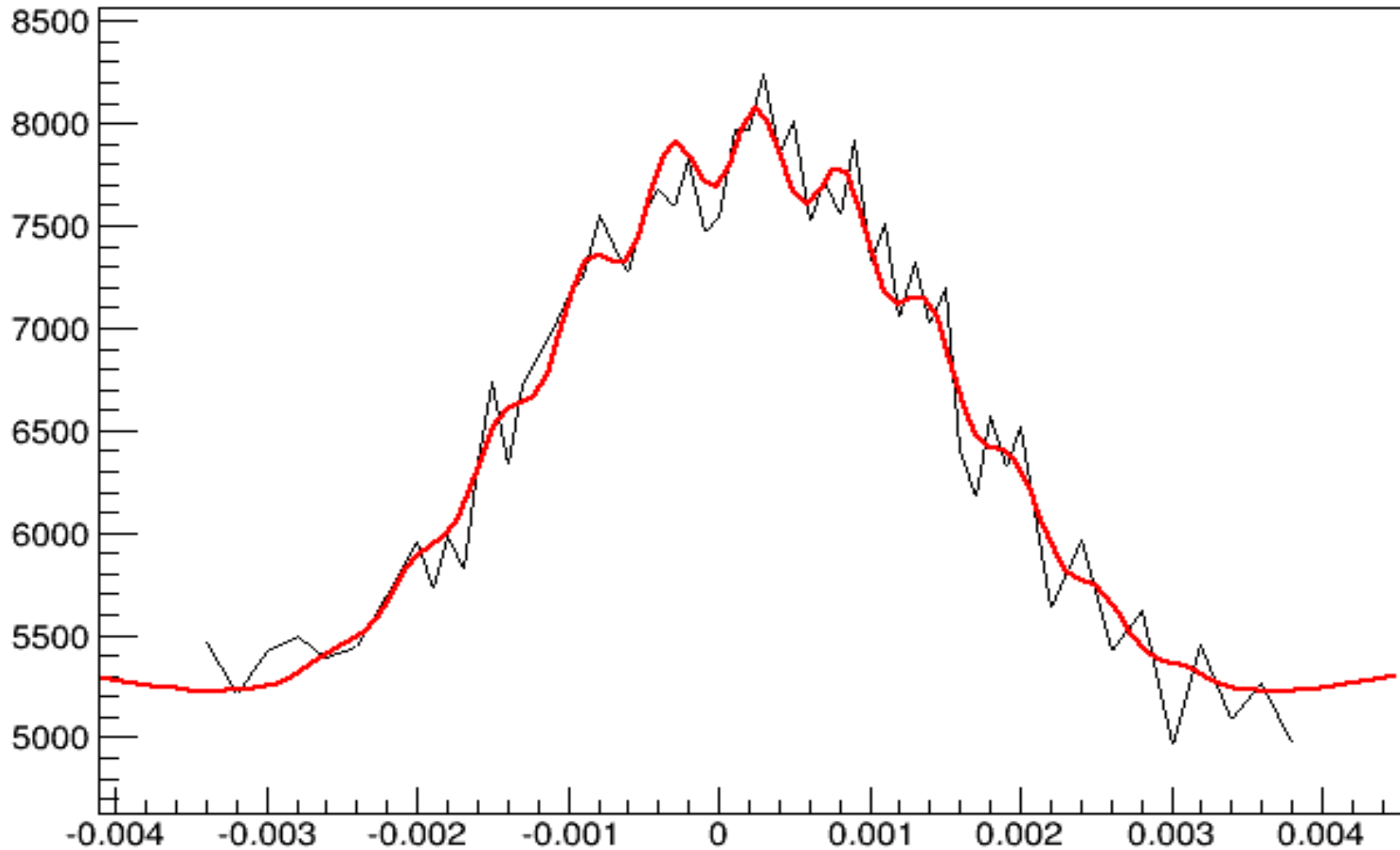
1光子イベント数の分布 & Fit

Graph



1光子イベント数の分布&Fit

Graph



- ・ Fitパラメータ

単スリット : 中心...

$$\widetilde{\beta}_s \dots$$

二重スリット : 中心...0.000262546

$$\widetilde{\beta}_w \dots 811.365$$

$$\widetilde{\alpha} \dots 5426.92$$