

1 光子の干渉実験

山中研 B 4 ; 黒田浩明

中谷洋一

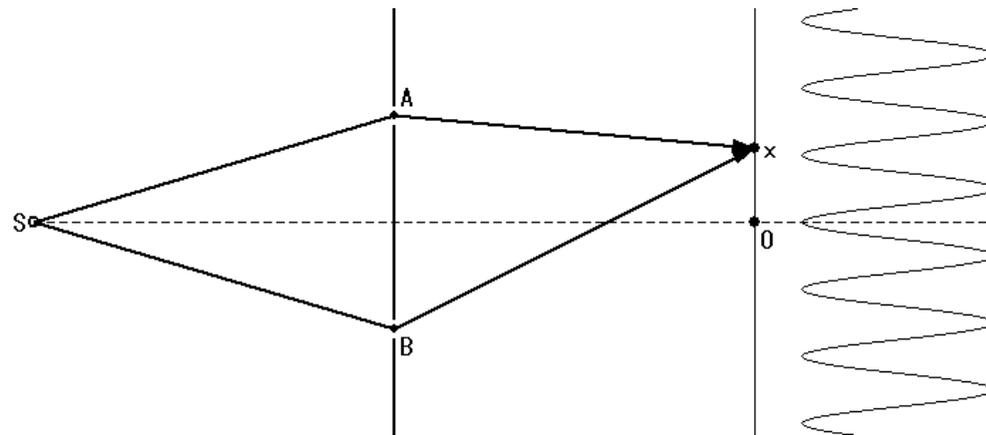
柳田陽子

目次

- インTRODクシヨN[黒田]
- 序論[黒田]
 - ・ 目的
 - ・ コヒーレント状態
 - ・ フラウンホーファー回折
 - ・ 1光子の干渉条件
- 実験[柳田]
 - ・ 1光子の用意
 - ・ ADCによる測定
 - ・ 干渉計作り
 - ・ 干渉を見る方法
- 結果[中谷]
 - ・ 測定結果
- 考察[中谷]
 - ・ 干渉の評価
- 結論[中谷]

イントロダクション

- 光子を用いた二重スリットの干渉実験では、「粒子性」を示すはずの光子が、その「(観測される) 個数」において干渉するという「波動性」をも示した。



- この事を実際に観測し、量子力学が提唱する最も基本的な概念の一つ「粒子と波動の二重性」について検証した。

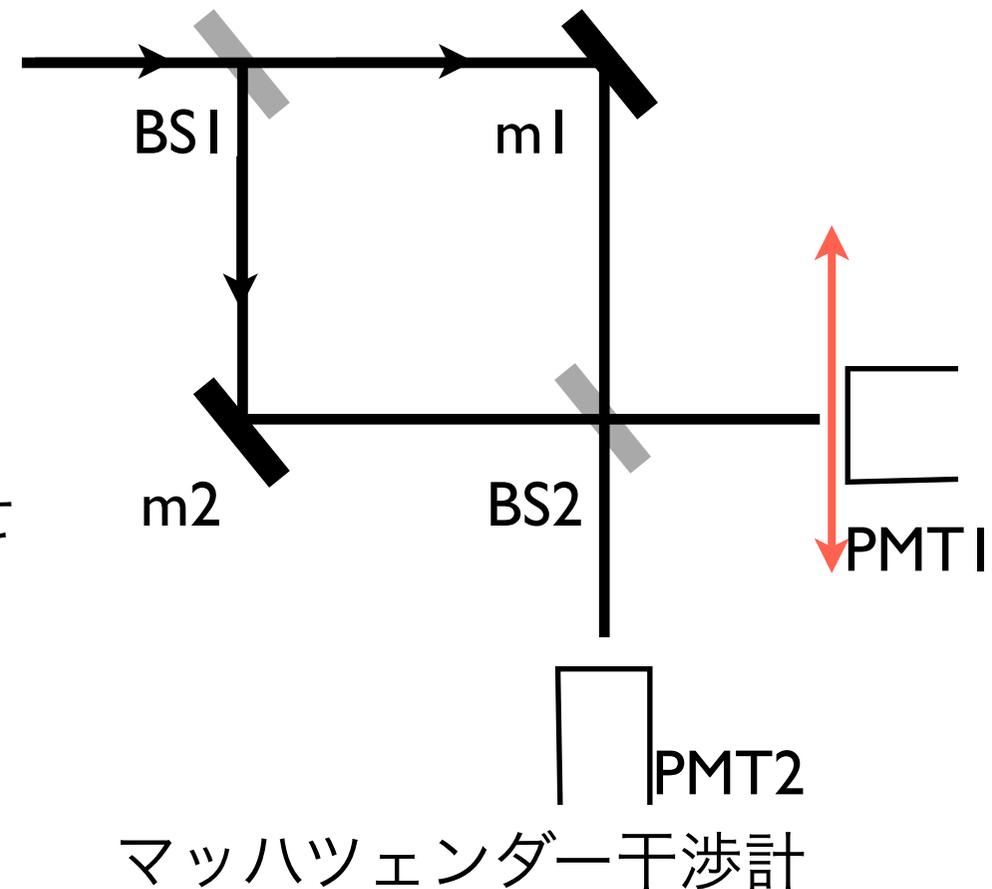
序論

目的

→光子の干渉現象を観測し、「粒子と波動の二重性」を検証

そのために...

- マッハツェンダー干渉計で干渉
- PMT 1 の位置を少しずつ移動させながら、入射してくる光子数の平均値を測定する。
- PMTで得た信号はADCに通して、光子数分布を得ることができる。



基本方針

- 1光子の確率波の干渉を見る→光子数の期待値が作る縞を見る
- 1光子状態 $|1\rangle$ を作るために、レーザー（コヒーレント状態 $|\alpha\rangle$ ）光を絞って、入射させる。
- PMTで測定し、光子数分布を得、そのデータから算出される平均光子数をプロットして干渉を見る。

コヒーレント状態

- 1光子状態 $|1\rangle$ を作るために、レーザー（コヒーレント状態 $|\alpha\rangle$ ）光を絞って、入射させる。

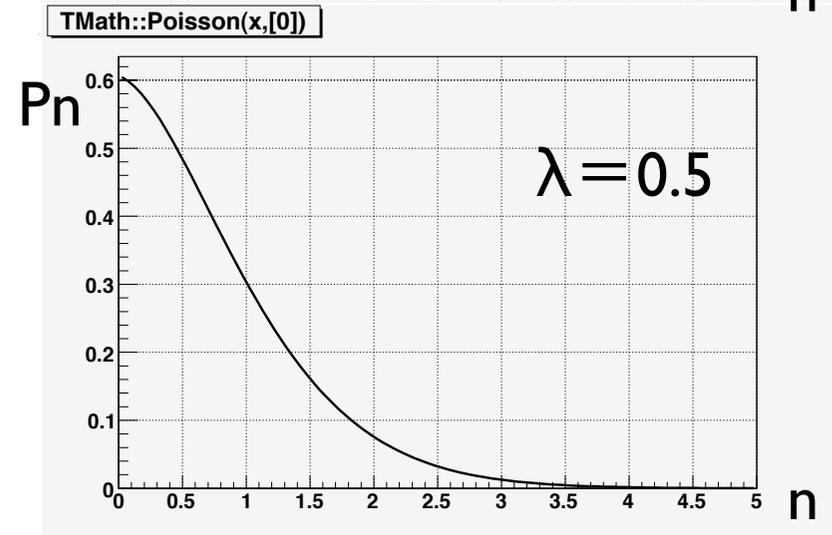
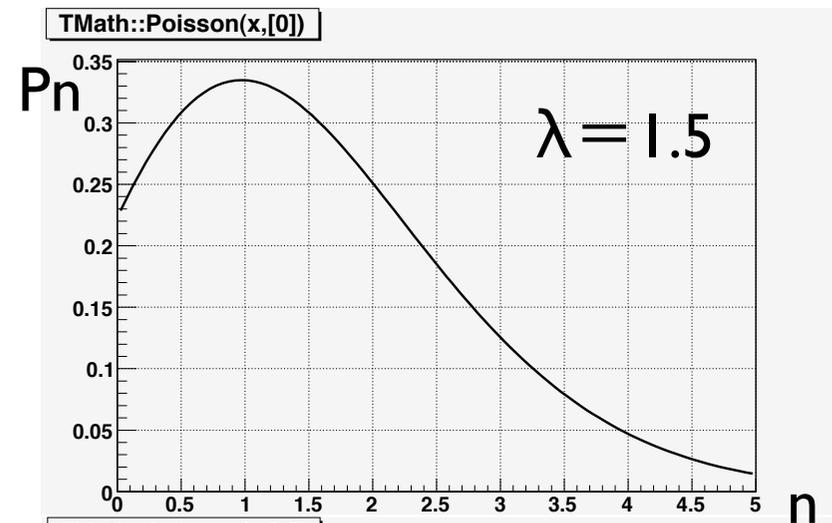
コヒーレント状態は

$$|\alpha\rangle = \sum_n \omega_n |n\rangle$$

$$|\omega_n|^2 = \frac{(|\alpha|^2)^n}{n!} e^{-|\alpha|^2} = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}$$

を満たしている ($|\alpha|^2 = \lambda$ は光子数の期待値。)

→ 平均光子数をパラメータとした、Poisson分布になっている。



フラウンホーファー回折

- 実際の測定では、レーザーのすぐ前にピンホール（直径50 μm 程度）をおいてあるので、フラウンホーファー回折も同時に起こる。

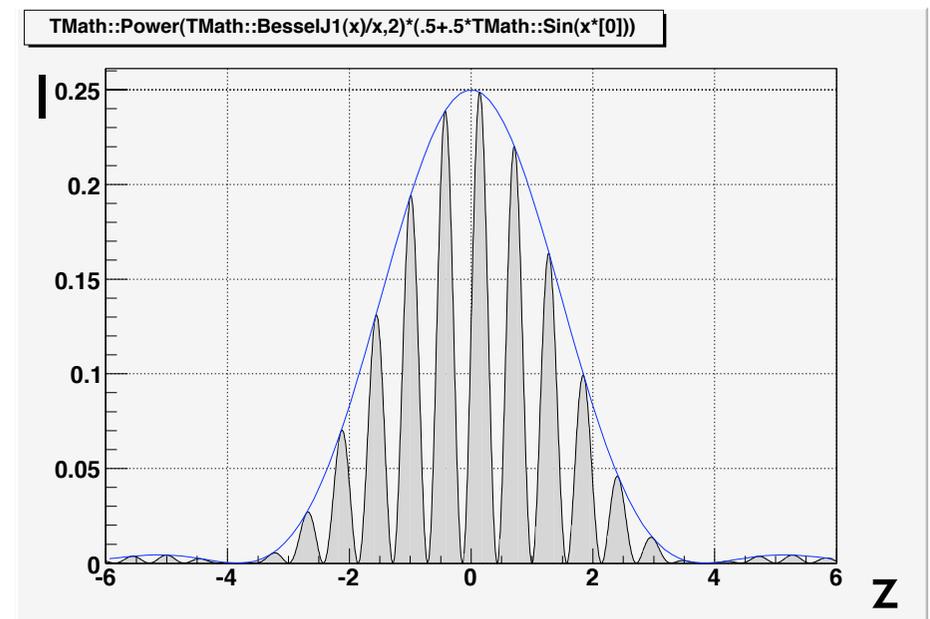
回折の式

$$I \propto \left(\frac{J_1(z)}{z} \right)^2 \quad z = kr \sin \theta$$

より、中心の明るい部分の幅はピンホールの径 r で決まる。

→明るい部分を増やすためには径を小に

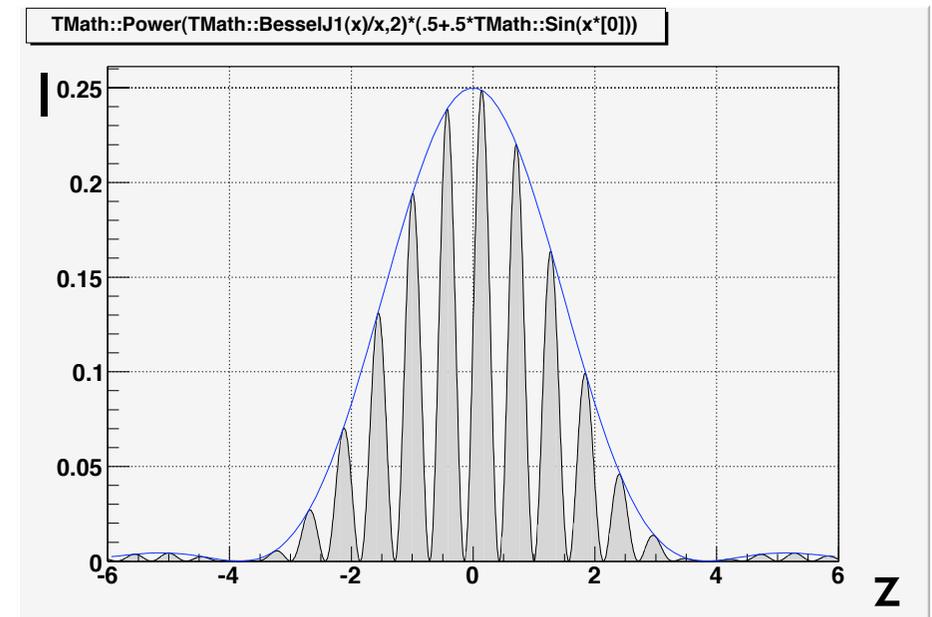
→PMTに入射する光子数を増やすためには径を大に



フラウンホーファー回折

- 干渉縞の幅は光学系をいかに精密に組み立てるかにかかっている。
- 回折の幅を広げると、干渉縞が良く見えるようになるが、入射する光子が少なくなるので測定時間が大幅に増える。
- これらのバランスを考え、回折幅を 2 cm 程度にし、干渉縞 10 周期分が入る程度にした。

→ マクロな干渉縞を見て目測したところ、縞の間隔はおよそ 2 mm だった。



1光子の干渉を見るための条件

- 1光子だけが光学系の中にあって、2光子以上は無いという確率が α 以下であるための条件を課す。

ランダムに入射する光子の時間間隔の分布が($=f\exp(-f\Delta t)$)であることを用いて...

$$\lambda \leq -\eta \frac{T}{\tau} \log(1 - \alpha)$$

λ ; 測定した平均光子数

η ; 量子効率

T ; ゲート時間

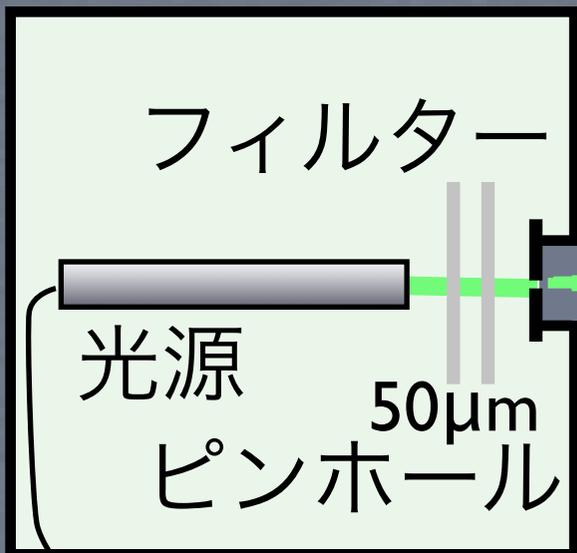
τ ; 光子が回路を通過する時間

*この条件を用いて、2光子以上が存在する確率を10%以下にするように設定した($\lambda=0.3$)。

実験

全体像

暗箱



ビームスプリッタ

1光子

ミラー

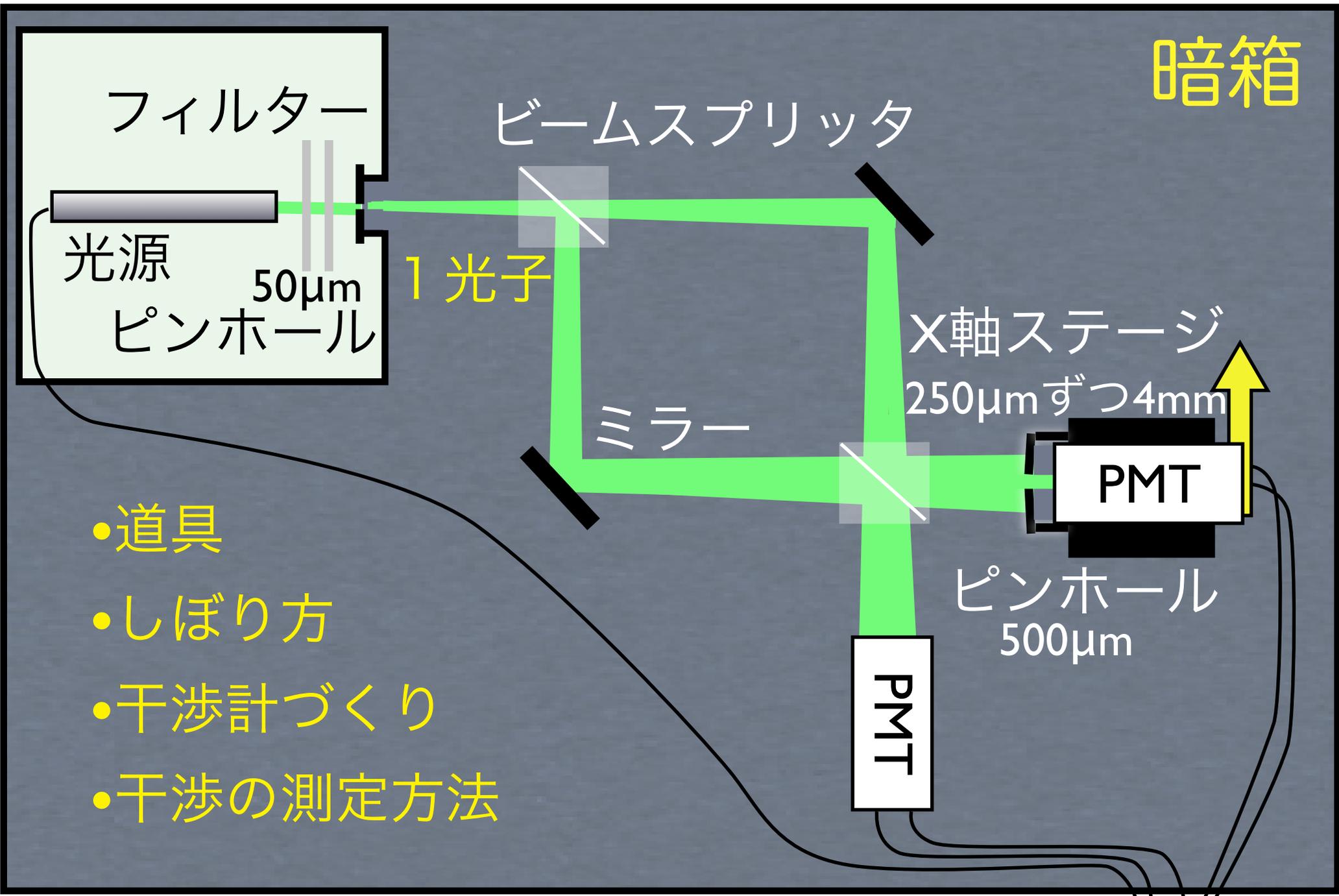
X軸ステージ
250 μm ずつ4mm

PMT

ピンホール
500 μm

PMT

- 道具
- しぼり方
- 干渉計づくり
- 干渉の測定方法



1光子を用意

光源 PMTの量子効率から紫外～青が良い

緑色レーザーポインタ



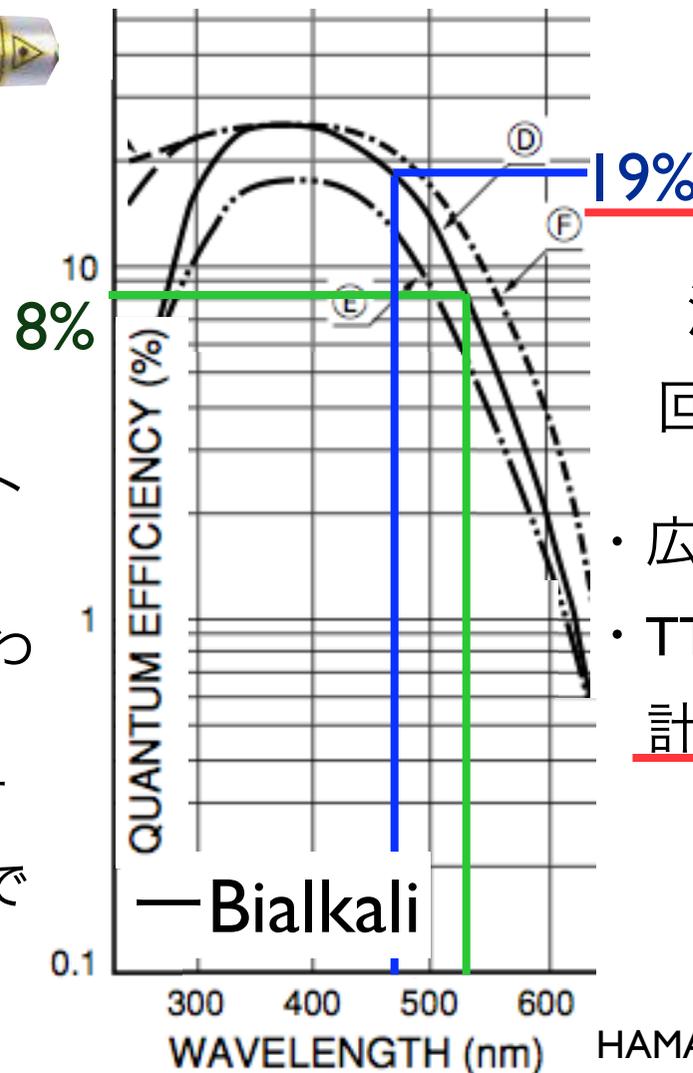
Kochi Toyonaka Giken

波長532nm

クラスII 1mW未満
広がり角1.5mrad以下

- ・ 広がらない、コヒーレント
古典的光の干渉可視
- ・ 電源は単三電池2本のかわりにTTLから3.12V
- ・ 発光15msec, トリガー不可
連続光をランダムトリガで観測

青色LED



波長に広がりがある
回折格子で波長を選ぶ

- ・ 広がる、コヒーレントでない
- ・ TTLで発光タイミング制御可
計測にトリガー可能

1光子を用意

フィルター

2つのフィルタにより微調節可

- Aluminized Mylar
分光器で確認した透過率は0.15%

- 可変式NDフィルター

Cr膜コート

透過率0~99%

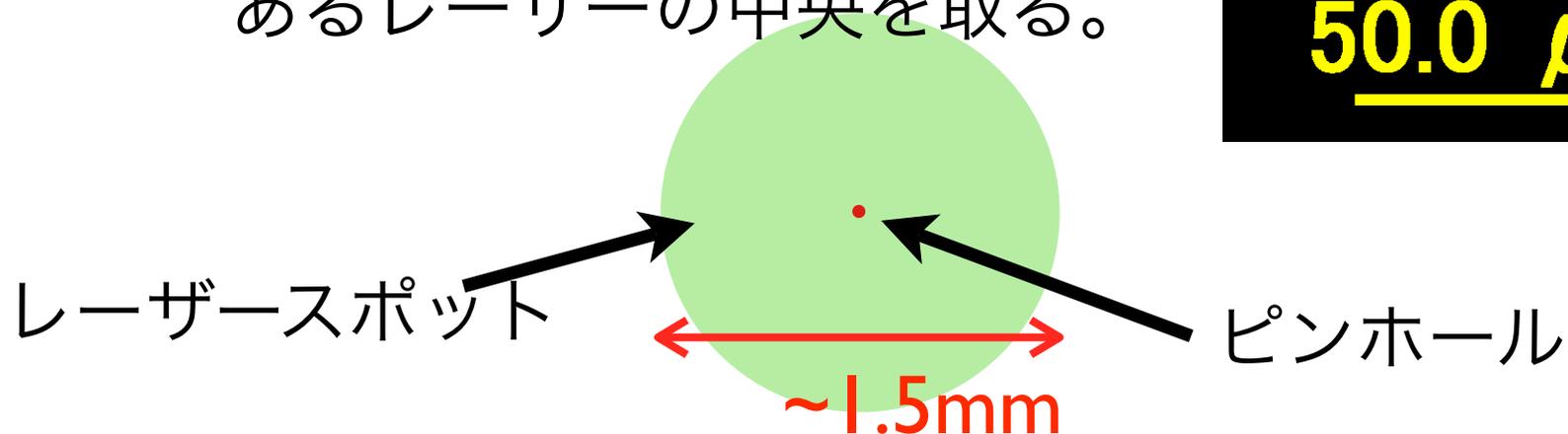
0%はマイラー1枚程度に相当



1光子を用意

光源のピンホール

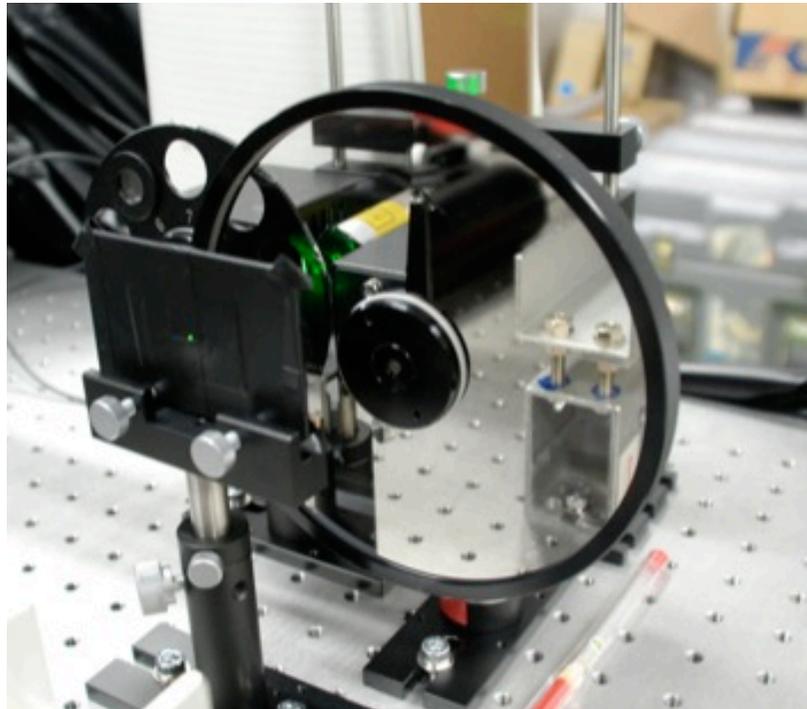
- $50\mu\text{m}$ でBS2cm内に回折が入る
- アルミホイルにガラスの針で穴を開ける
- レーザーを入れ、一番強度のあるレーザーの中央を取る。



1光子を用意

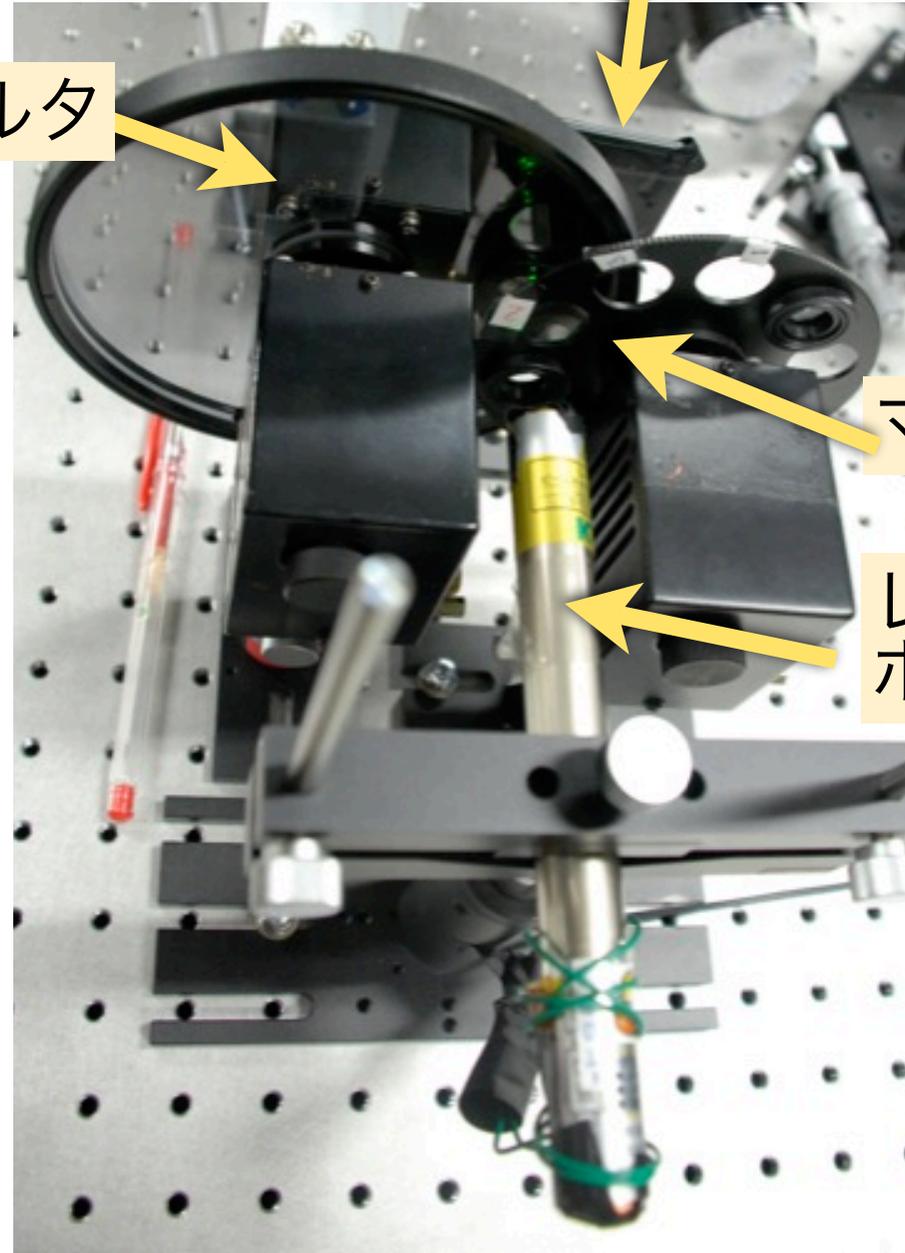
光源の全体

可変式NDフィルタ



この全体を
ブラックシートで覆う

ピンホール



ミラー

レーザー
ポインタ

1 光子を用意

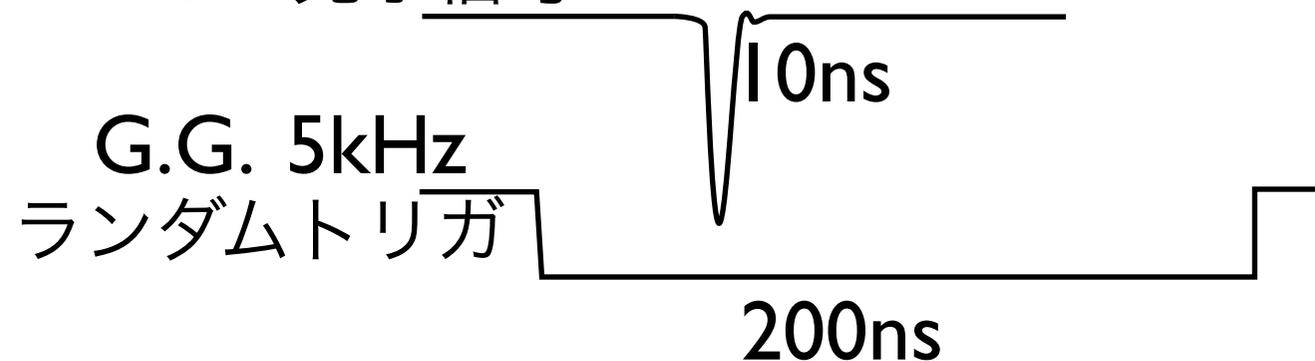
光量の調整



ADCで1光子を測定

Analog-to-Digital Converter

PMTの1光子信号



1つの信号が途切れるのは20個に1個

G.G.の200nsにはいる光子数は
平均 λ 個のポアソン分布

ADCで1光子を測定

実際の光子数

$$= \frac{\lambda_{200\text{ns}}}{\text{Gate幅} \cdot \text{量子効率}}$$

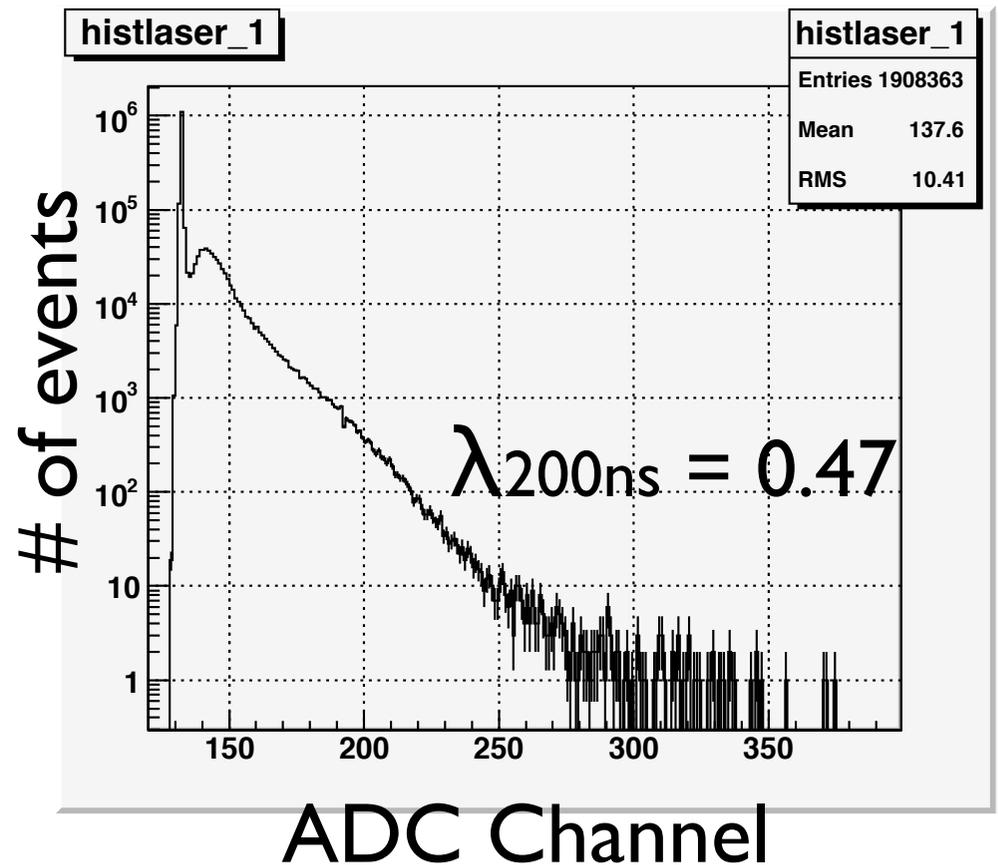
$$= \frac{0.47}{200\text{ns} \cdot 0.05}$$

$$= 47\text{MHz} = f$$

$$1 - e^{-\tau f} = 0.12$$

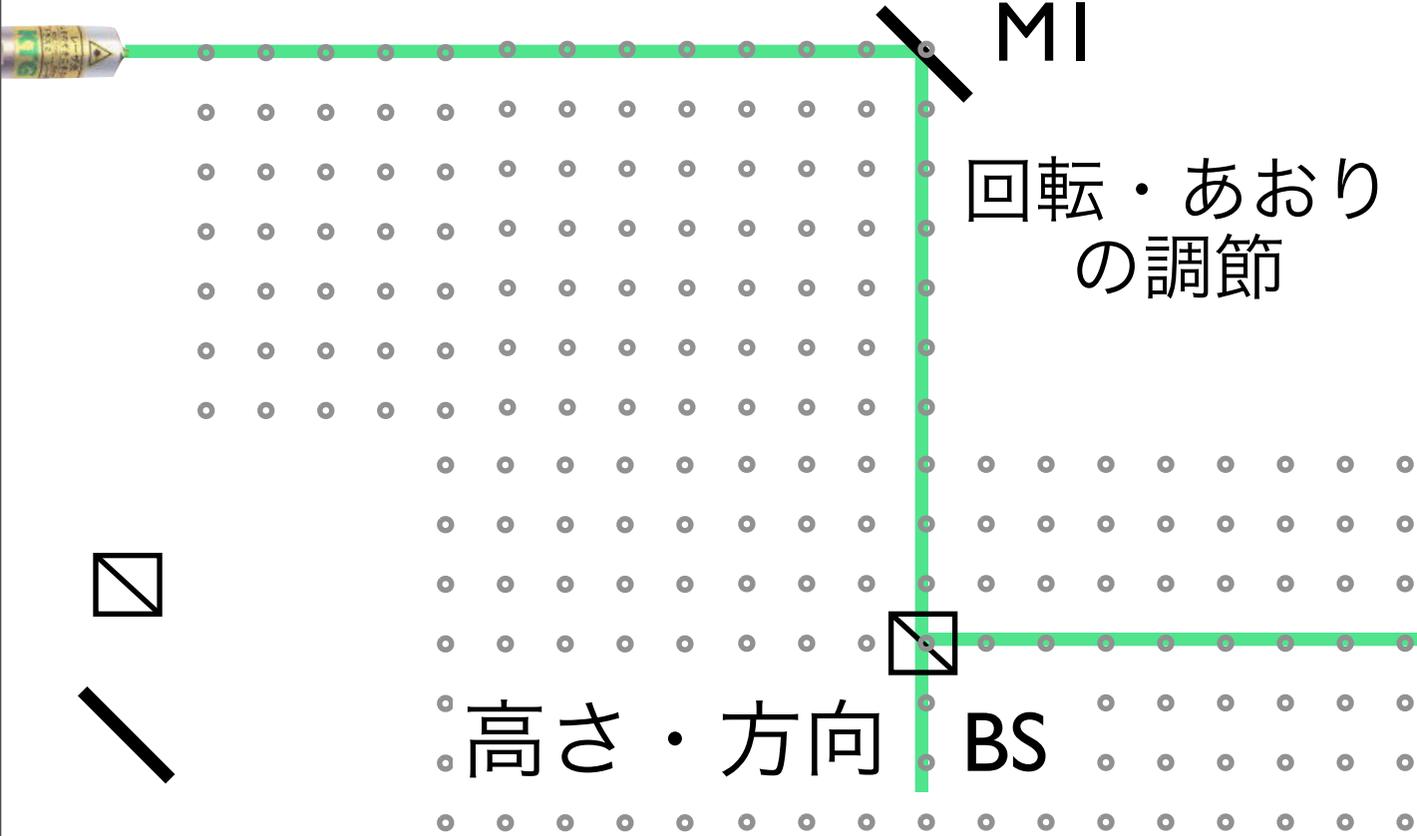
τ = レーザ発光面からPMTまでの時間

12%の光子は前の光子と共に存在



干渉計づくり

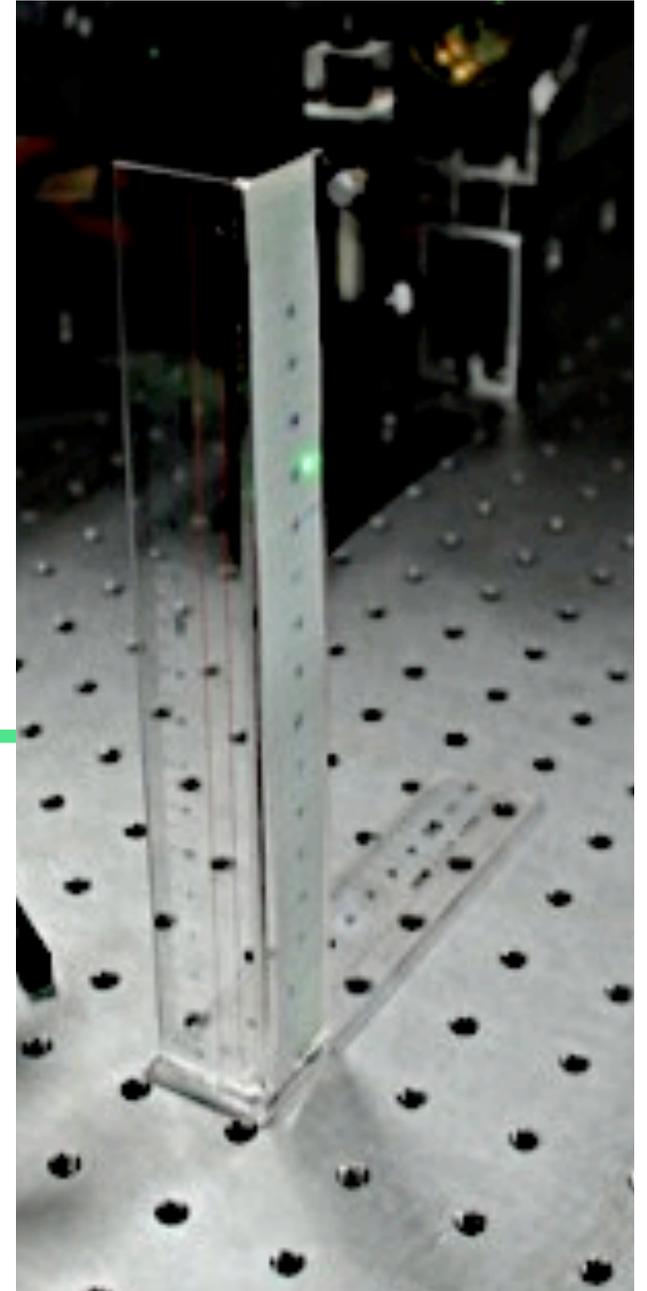
フィルター、ピンホールなし



高さ・方向

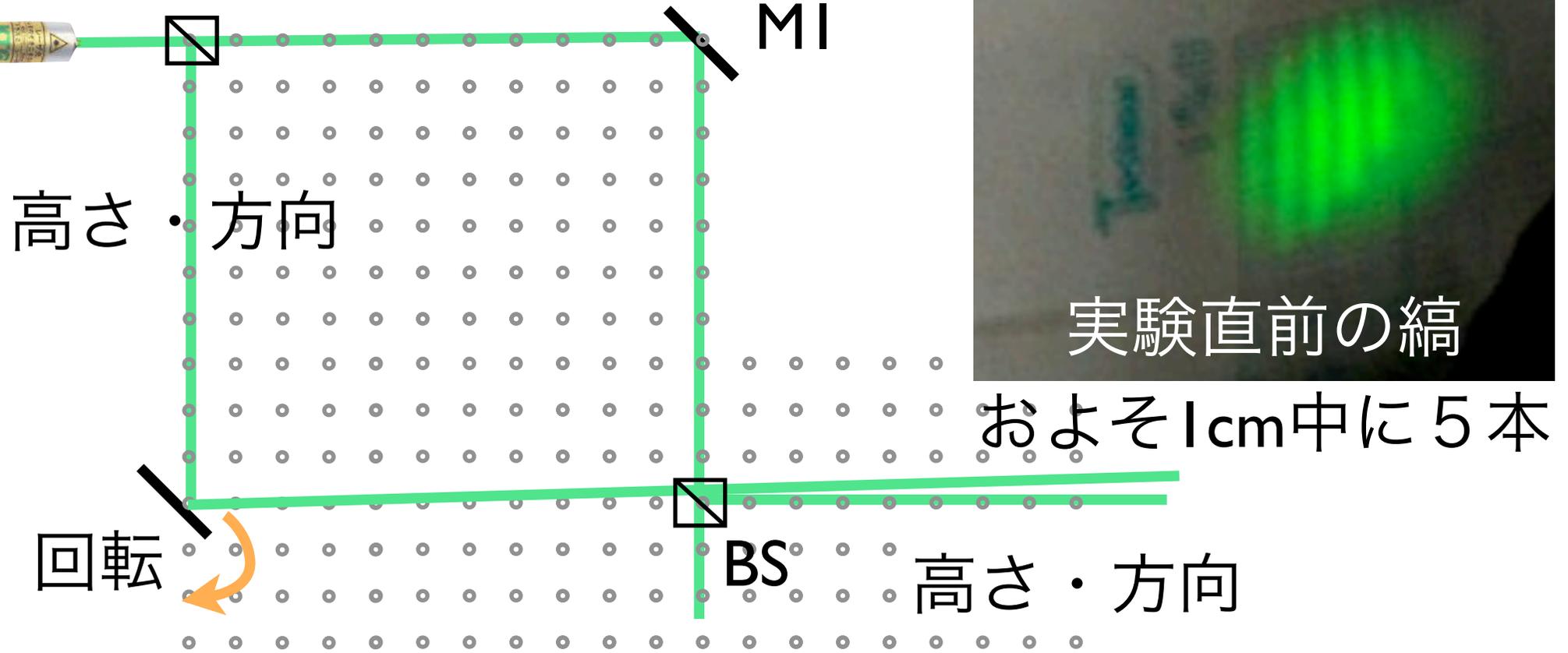
光学台の25mm間隔

M6の穴を利用



干渉計づくり

フィルター、ピンホールなし



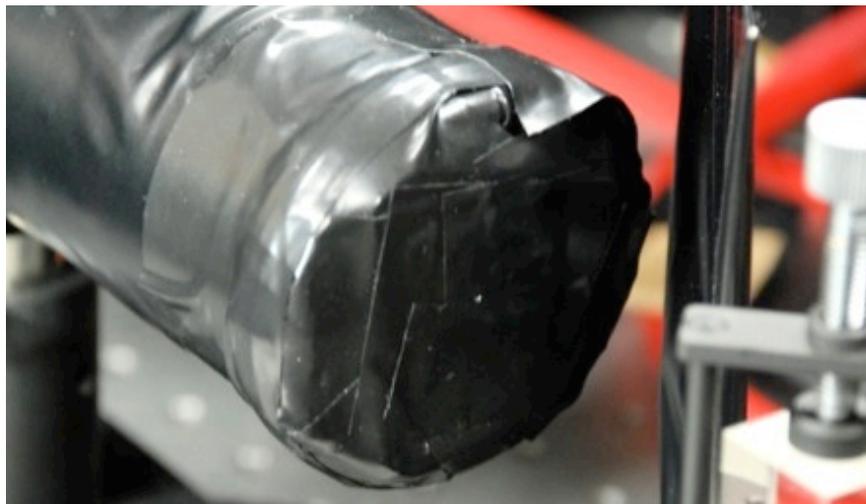
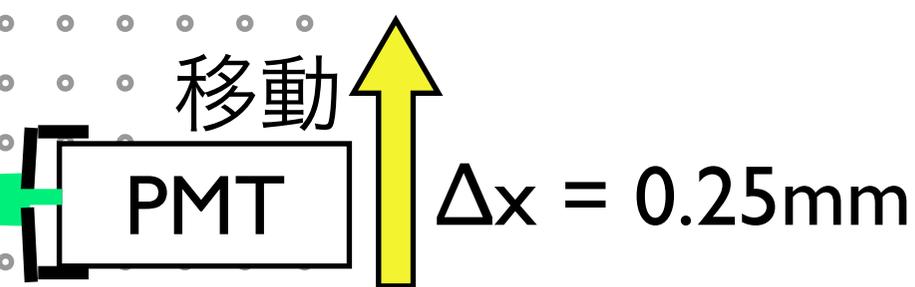
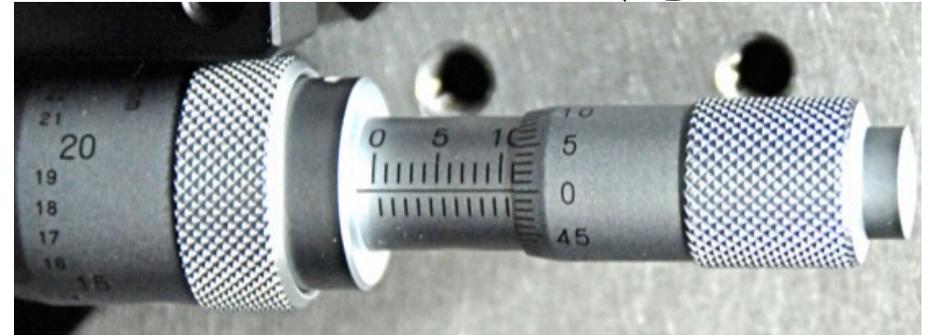
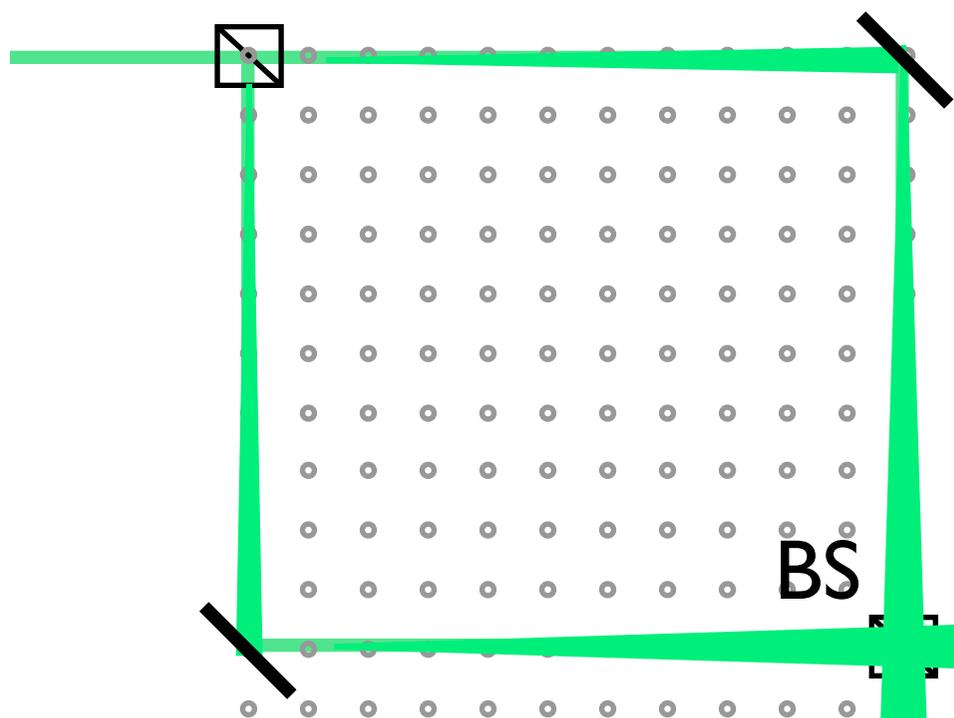
実験直前の縞

およそ1cm中に5本

目と手で合わせられるまで合わせた後、
ピンホールを置くと縞が見える。
縞の間隔は鏡の回転で調整。

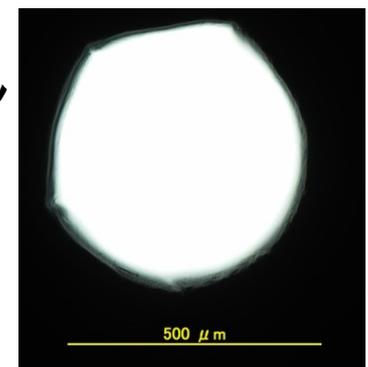
干渉を見る方法

1 目盛り 0.01mm,
1 周 0.5mm

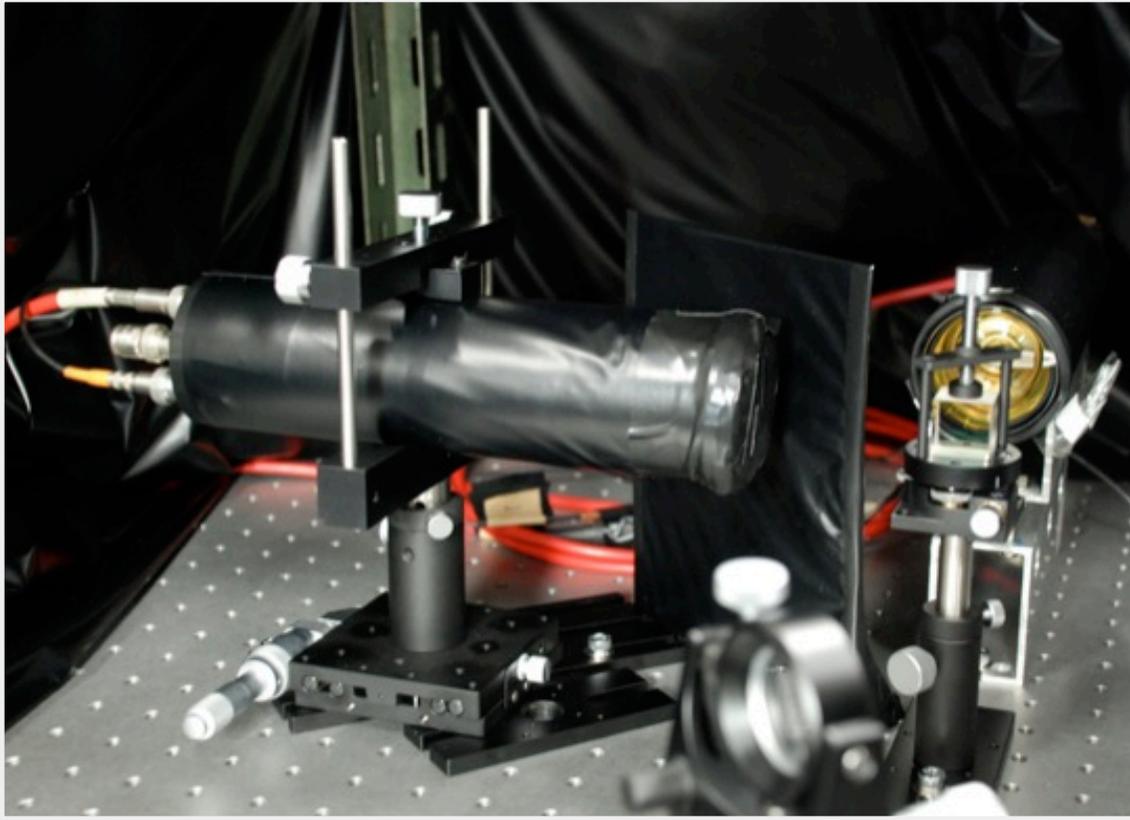


PMT
固定

ピンホール



500μm



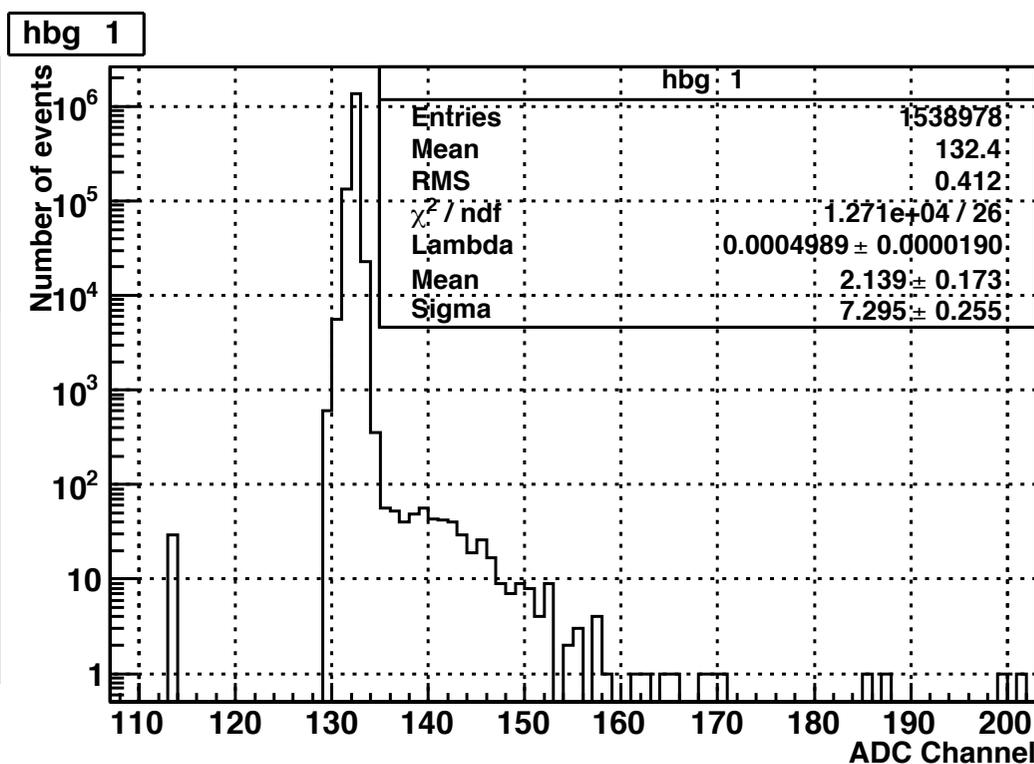
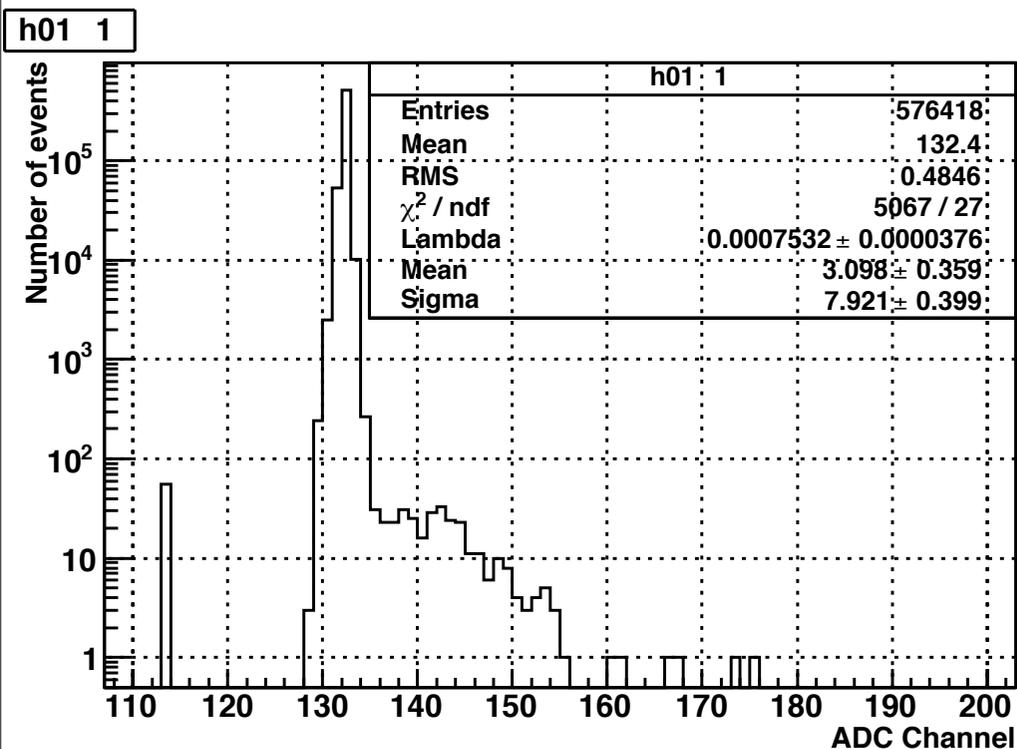
結果

測定結果

- 横軸にADCのチャンネル、縦軸にイベント数を取りプロット。

$x = 0$ [mm] (光源ON)

バックグラウンド (光源OFF)



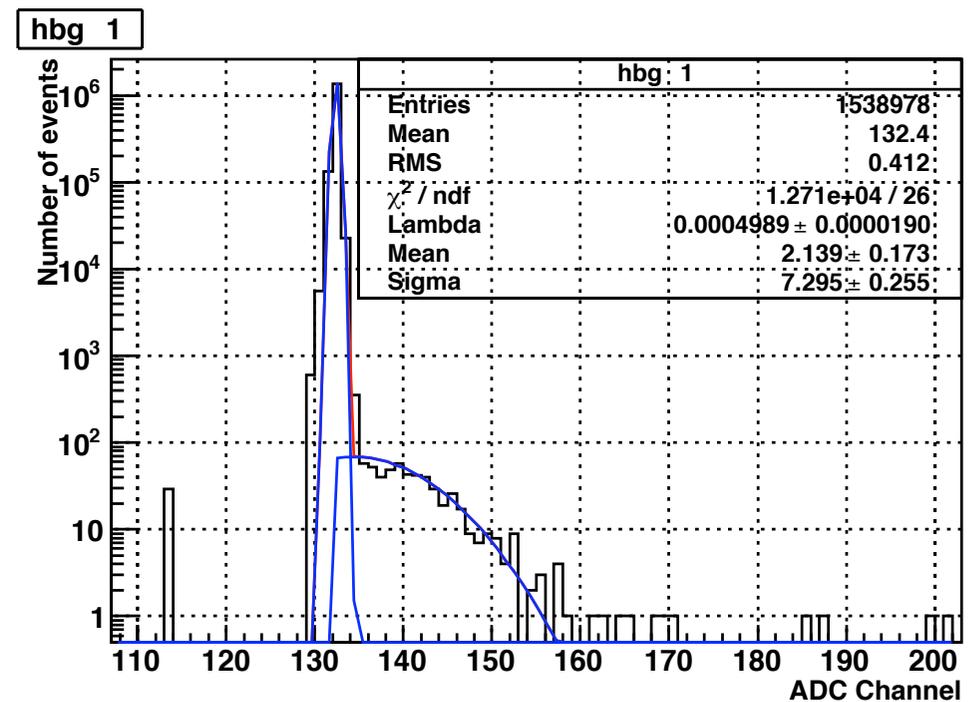
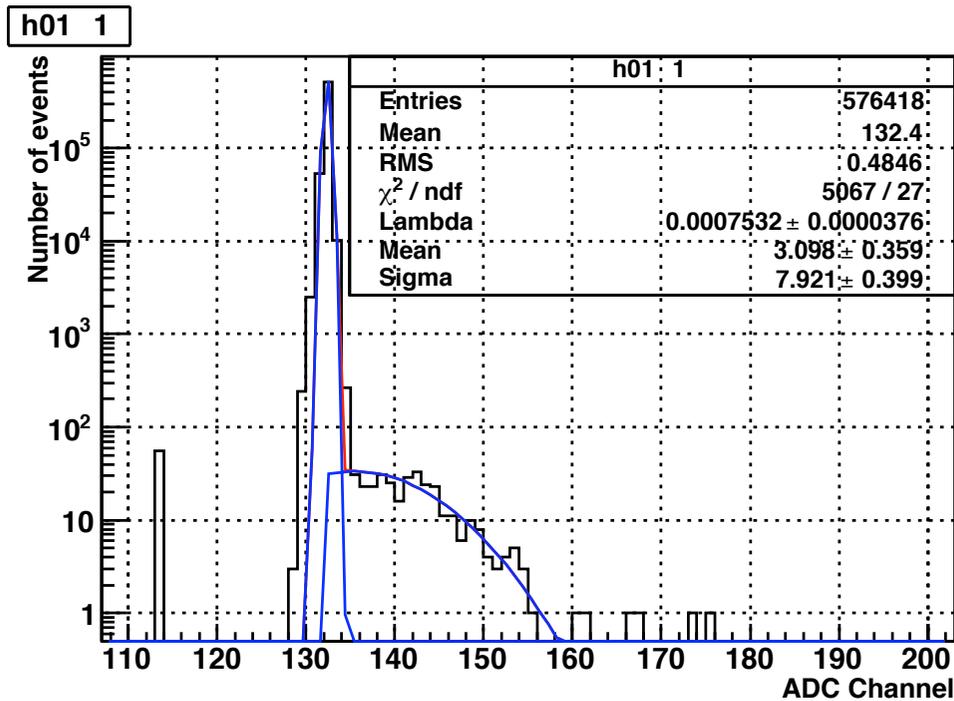
これらのデータをフィッティングして平均値 λ を求める。

測定結果 (つづき)

- ペDESTALのピークにはガウシアンを、もう一つのピークは切断の入ったガウシアンを用いてフィットした。

$x = 0$ [mm] (光源ON)

バックグラウンド (光源OFF)



→フィットから得られた平均値 λ を変位 x についてプロットする

考察

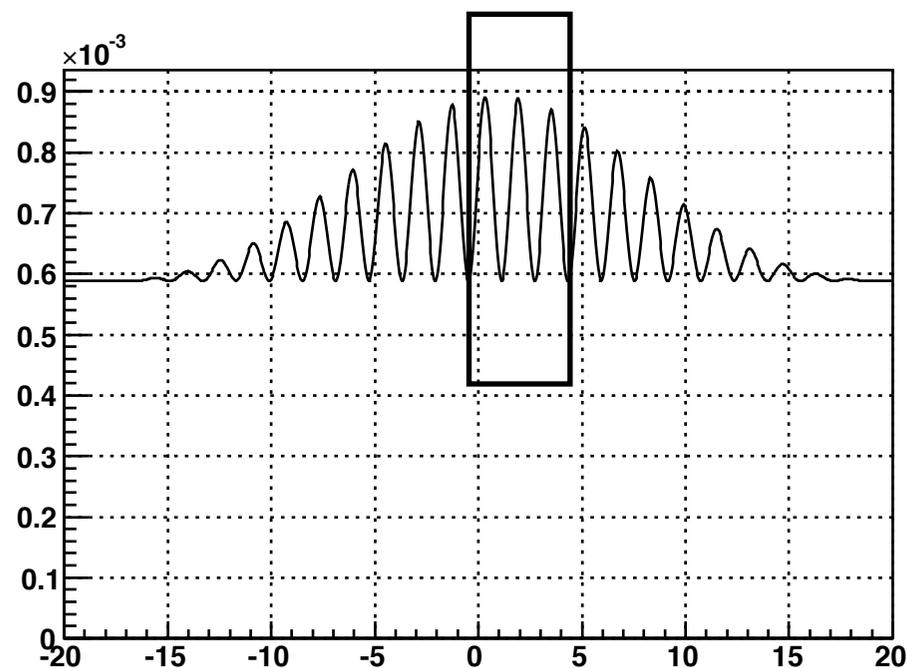
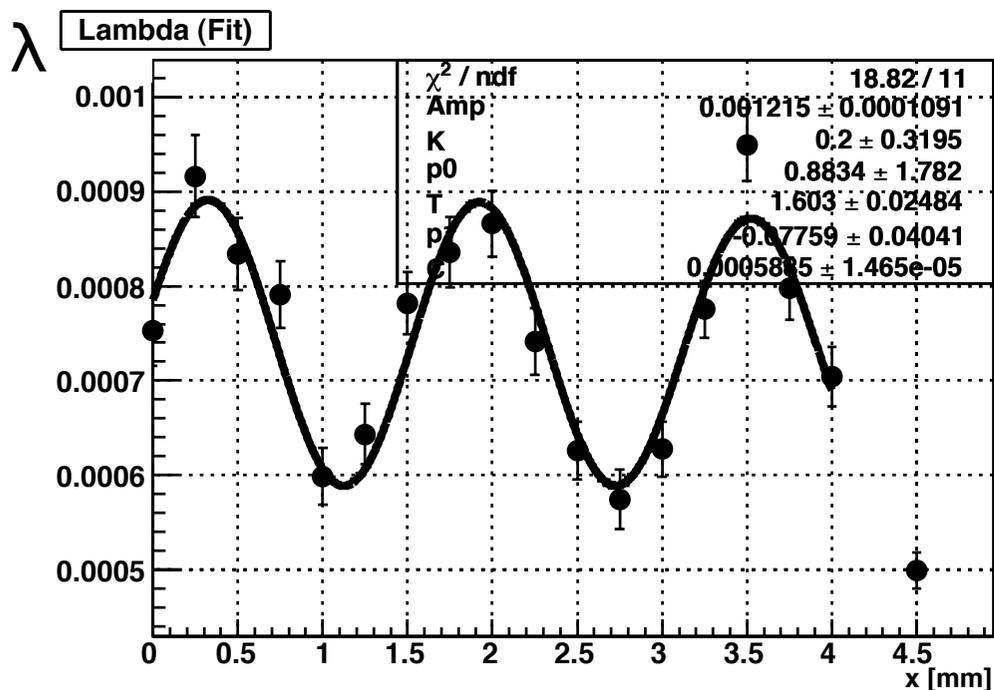
干渉の評価

●λのプロットは以下の様であった。

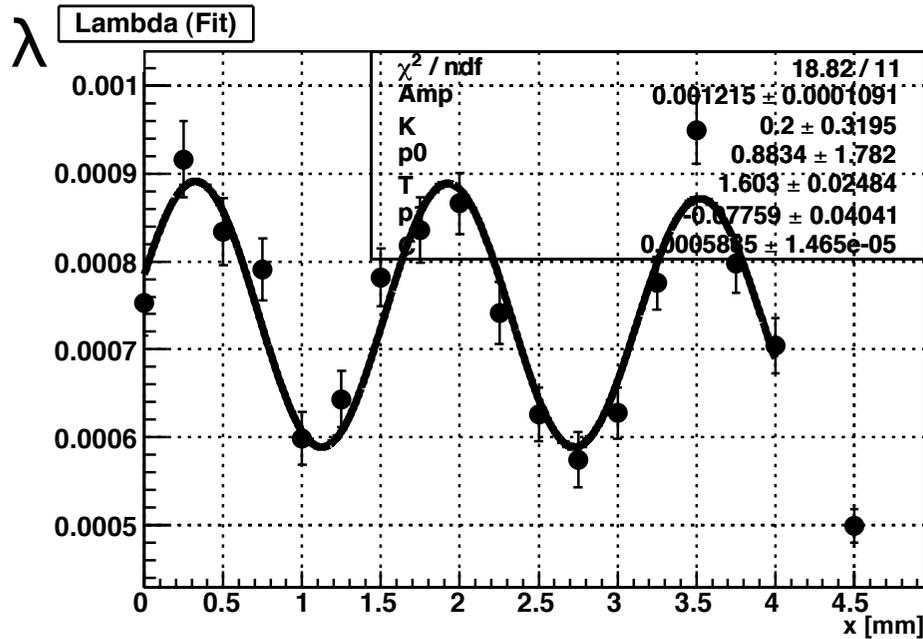
$$\lambda(x) = \text{Amp} \times \left| \frac{J_1(k(x - x_0))}{k(x - x_0)} \right|^2 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\pi \frac{x - x_1}{T} \right) + \text{const}$$

→ [Fraunhofer回折] × [光子干渉の効果] + [熱雑音]

でフィッティングする。



干渉の評価 (つづき)



← バックグラウンド

- 熱雑音の項の値は、バックグラウンド測定より得られた値とおおよそ一致。
- 干渉の周期($T=1.6\text{mm}$)は、光量大の時の肉眼で確認した周期の程度。

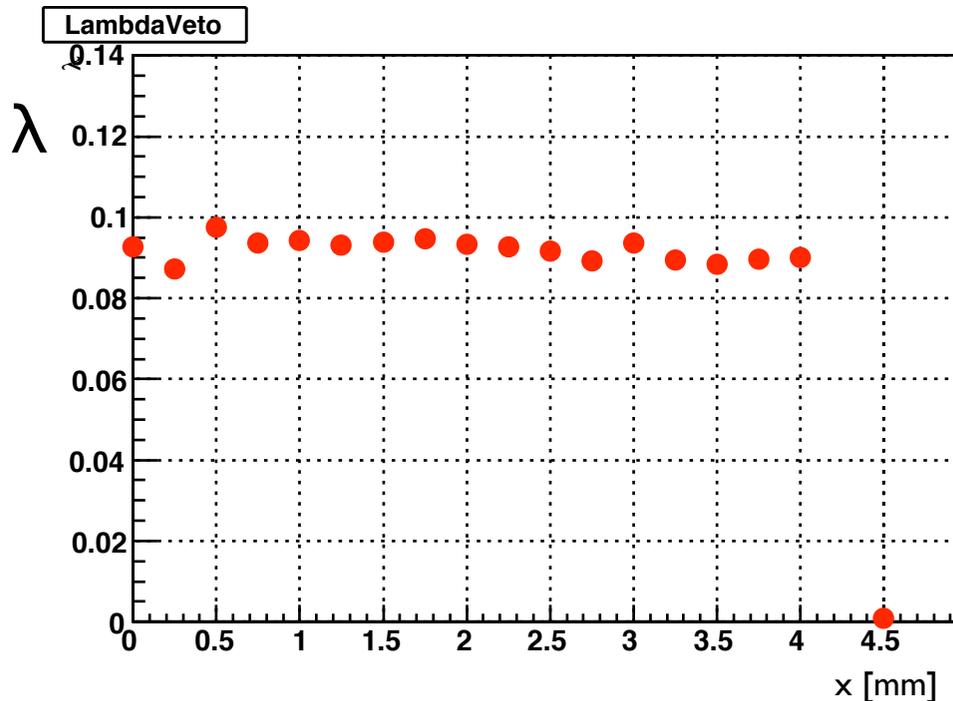
干渉の評価（つづき2の1）

いくつかの確認。

1) 平均光子数 λ が振動したという結果は、元の光源の強度が時間経過とともに変化していったからではないのか？

干渉の評価 (つづき 2 の 2)

同時に測定していた PMT2 のデータから光源強度が変化していたのかを確認できる。



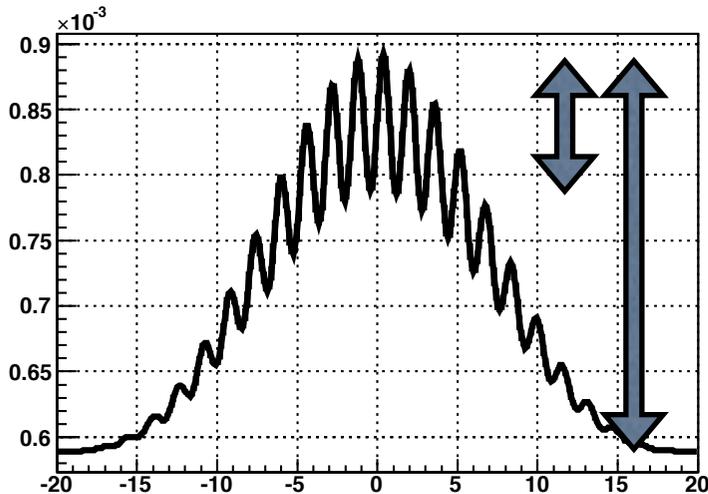
平均光子数 λ をプロットした結果、横ばい
 \Rightarrow 光源の強度は一定

干渉の評価（つづき3の1）

2)干渉項の振動は本当に、1光子の干渉によっているのか？

干渉の評価 (つづき 3 の 2)

- いま、1光子干渉は起きないとすると. . .
- 干渉は起こさないとしても、フラウンホーファー回折は起こしている。



- 2光子による干渉があったとすると、左図のような事が予想される。
- 実験から得られた結果では、1光子由来でない12%のイベントによるものとは考えにくい。

結論

1 光子の干渉が見えた。

したがって、「粒子と波動の二重性」という
概念も妥当だと考えられる。

PMTでの測定について（補足）

$$f = \frac{\lambda}{\eta T} \quad [s^{-1}]$$

$$\int_0^{\tau} f e^{-f t} dt \leq \alpha$$

$$1 - e^{-f \tau} \leq \alpha$$

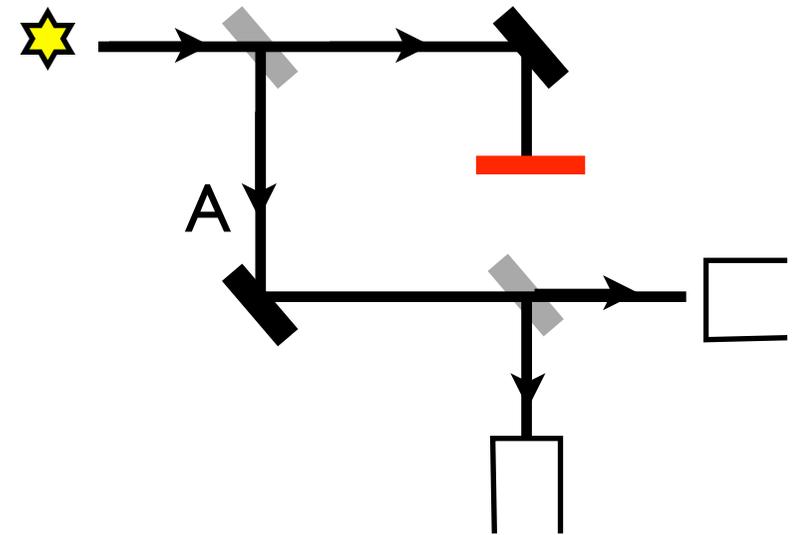
$$f \tau \leq -\log(1 - \alpha)$$

- λ ; 測定で得た平均光子数（ゲート時間あたり）
- η ; 量子効率
- T ; ゲート時間
- τ ; 回路内を光子が通過する時間

Delayed Choiceに関する簡単な説明

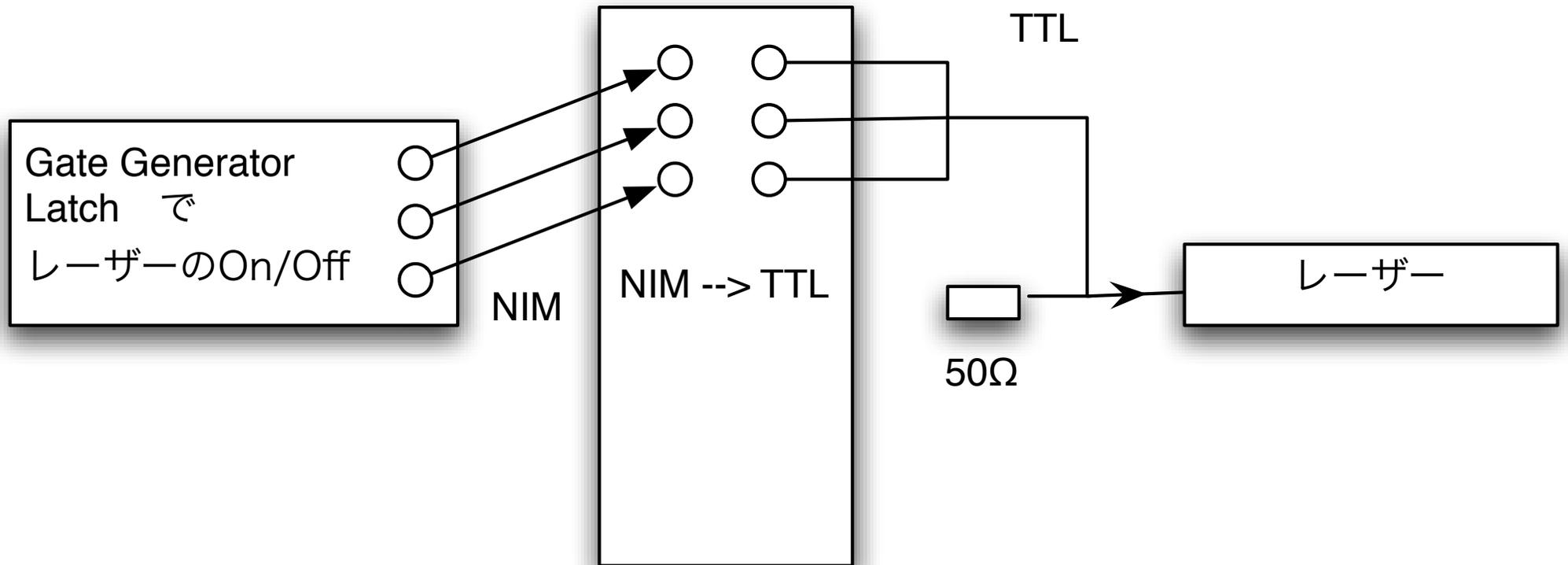
1 光子が回路内に入った瞬間に光路を防ぎ（もしくは解放し）、それでも干渉するのかという事を確かめることで、粒子性と波動性のどちらを示すかは観測によって決まる(あらかじめどちらの性質を示すかは決まっていない)事を観測する実験。

十分な光路を得るためのファイバー導入技術、高速で切り替えができる仕組み、等の困難から実現できないと判断
→光子の干渉のみを観測



光源のTTL

Transistor-transistor logic



電力を必要とするため
3つ、三つ又で結合して入力