

# 五月祭 実験報告：光子の過去を問う

川畑 幸平（理学部物理学科 4 年）

2016 年 9 月 7 日

# 目次

## 1. 実験の概要

- ・ 実施概要
- ・ 原論文のレビュー
- ・ 実験の方法と結果

## 2. 実験の考察

- ・ 原論文の主張 (TSVF)
- ・ 通常量子力学による解析
- ・ 古典的な解析

# 目次

## 1. 実験の概要

- ・ 実施概要
- ・ 原論文のレビュー
- ・ 実験の方法と結果

## 2. 実験の考察

- ・ 原論文の主張 (TSVF)
- ・ 通常の量子力学による解析
- ・ 古典的な解析

# 実施概要

- **実験の動機**

量子物理の性質があらわれた、直観に反する実験がしたい  
(あるいは、量子物理らしい実験がしたい)

- **実験の内容** (再現実験)

Danan *et al.* (PRL 111, 240402)

“Asking photons where they have been ”

- **実験の実施期間** : 2/12 ~ 5/10

→ 五月祭での発表 (5/14・5/15)

# 光子の過去を問う (1-1)

レーザー  
(785 nm)

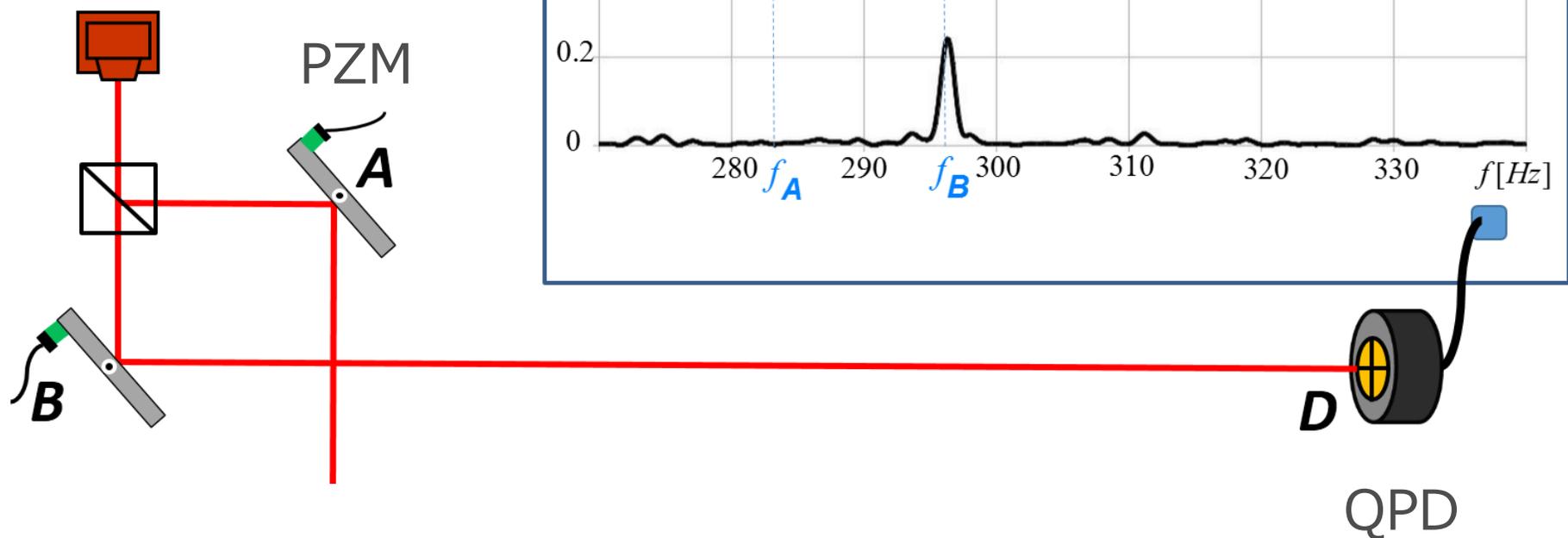


特定の周波数で弱く揺らす (角度方向)

QPD のスペクトルを見ることで、光がどこを通ったかわかる!

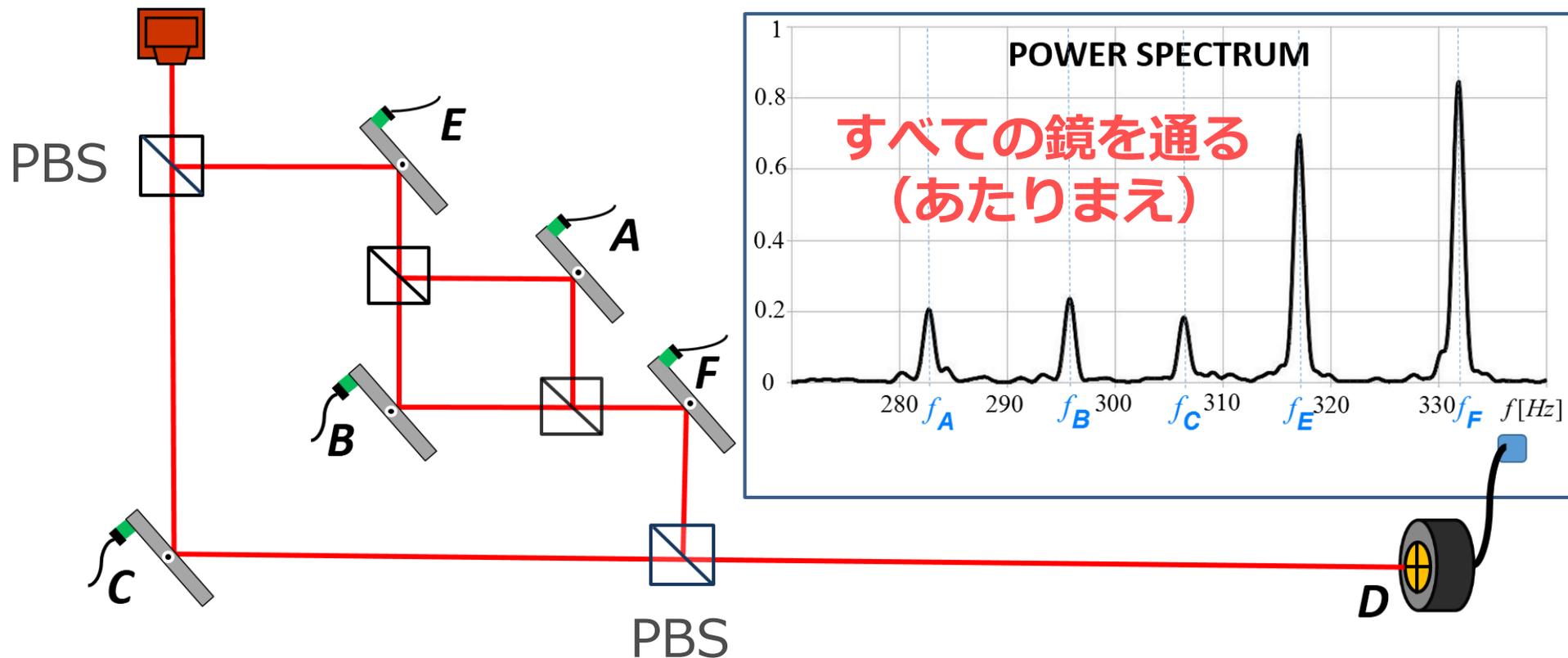
# 光子の過去を問う (1-2)

レーザー  
(785 nm)

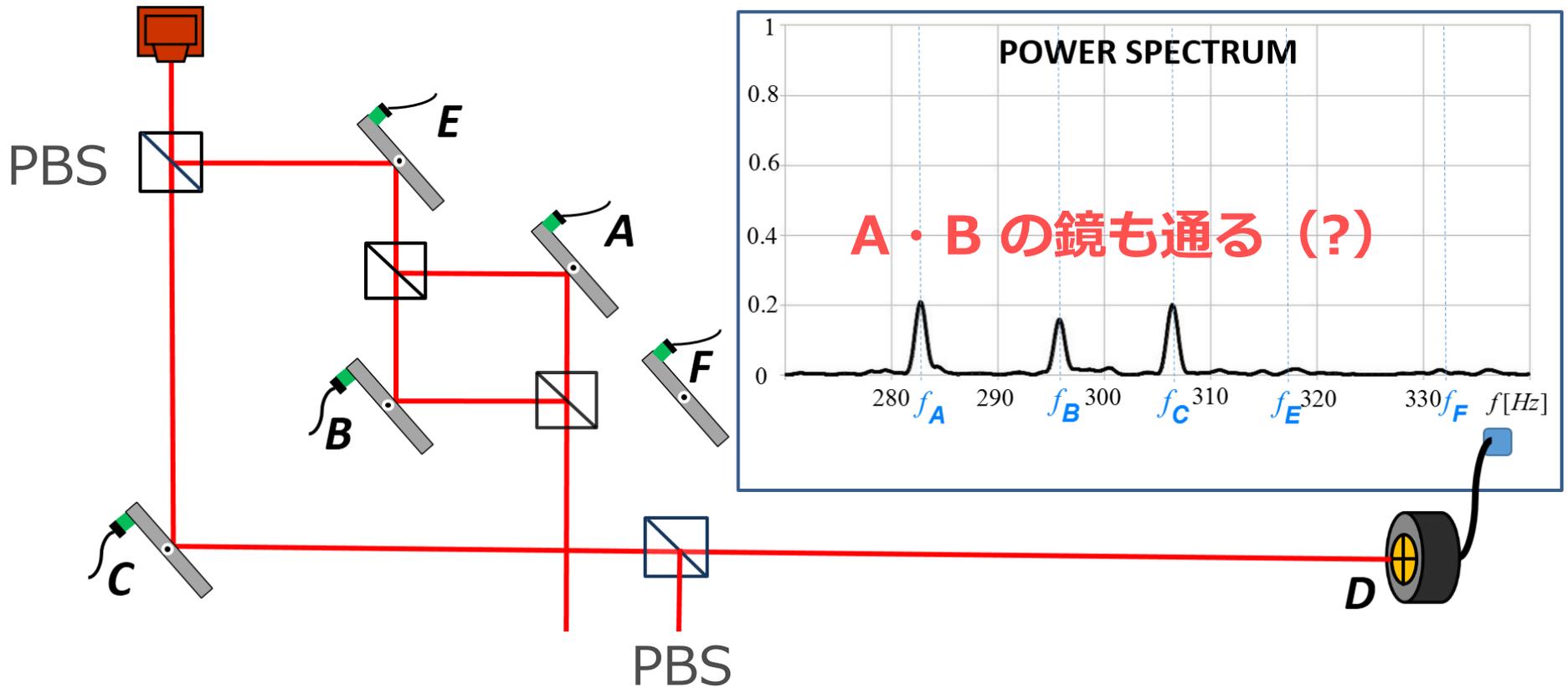


QPD のスペクトルを見ることで、光がどこを通ったかわかる！

# 光子の過去を問う (2-1)

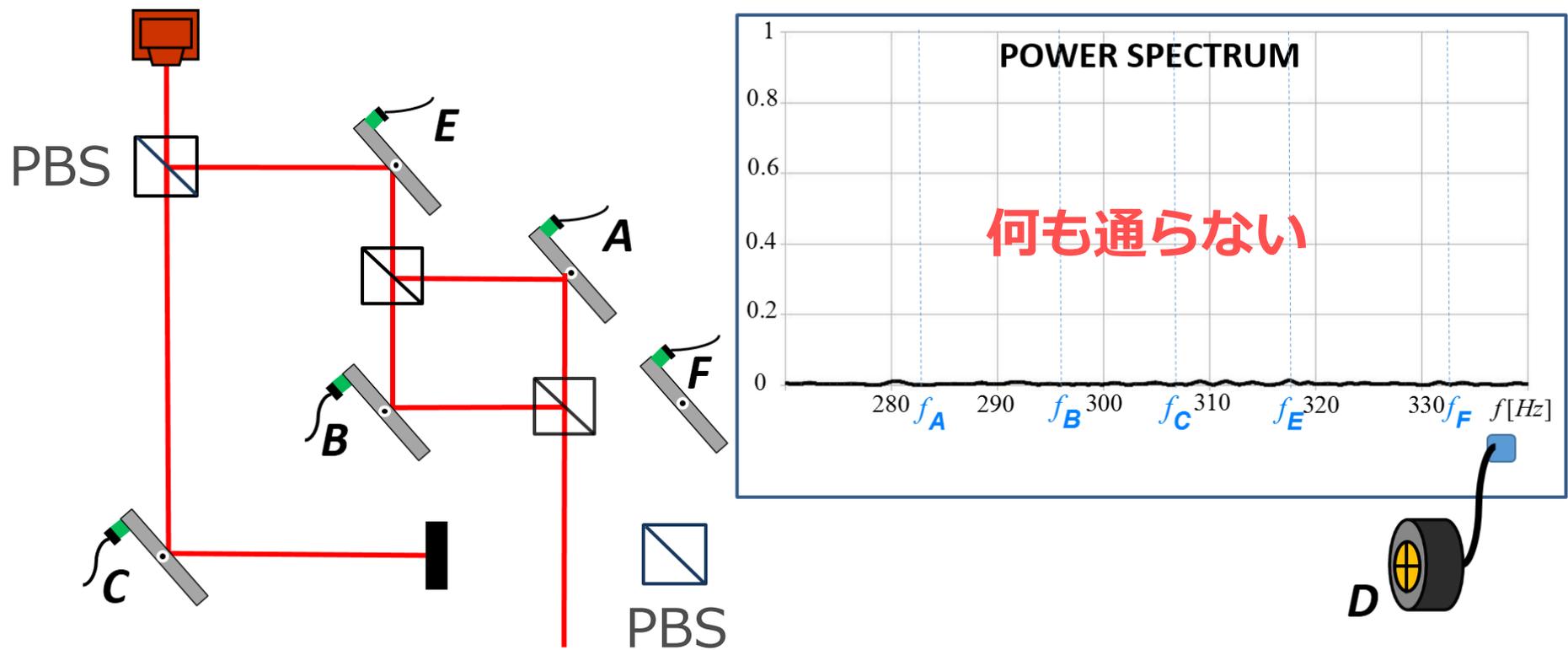


# 光子の過去を問う (2-2)



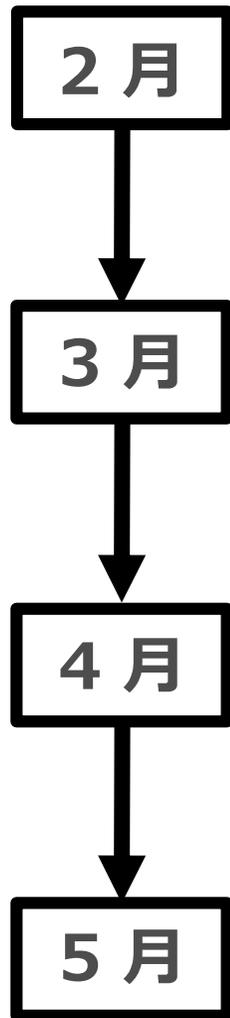
内側の MZI を制御して、F 側を dark に  
(visibility : 98.5 %)

# 光子の過去を問う (2-3)



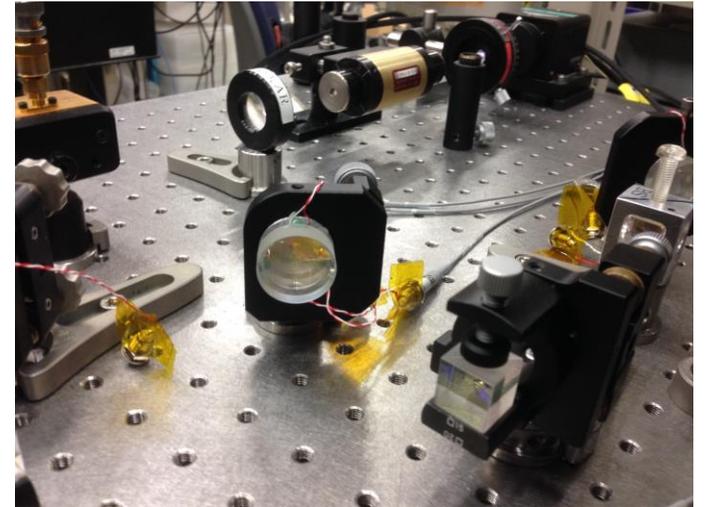
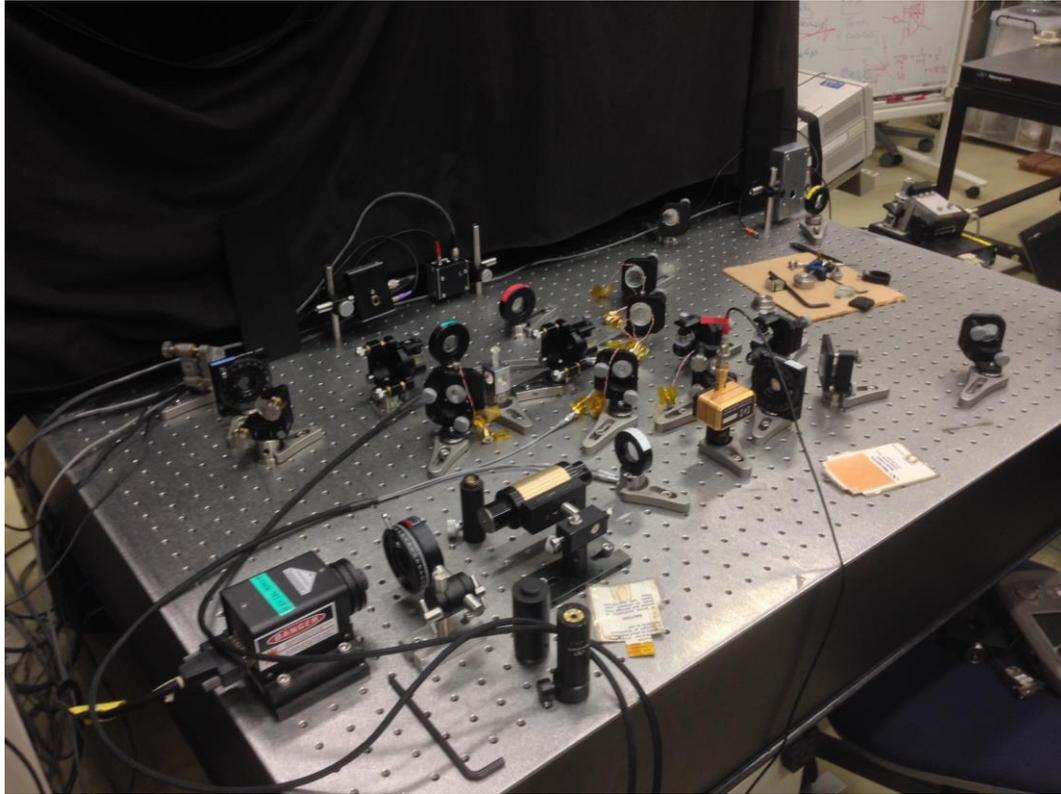
内側の MZI から光が漏れていないことの確認

# 実施概要



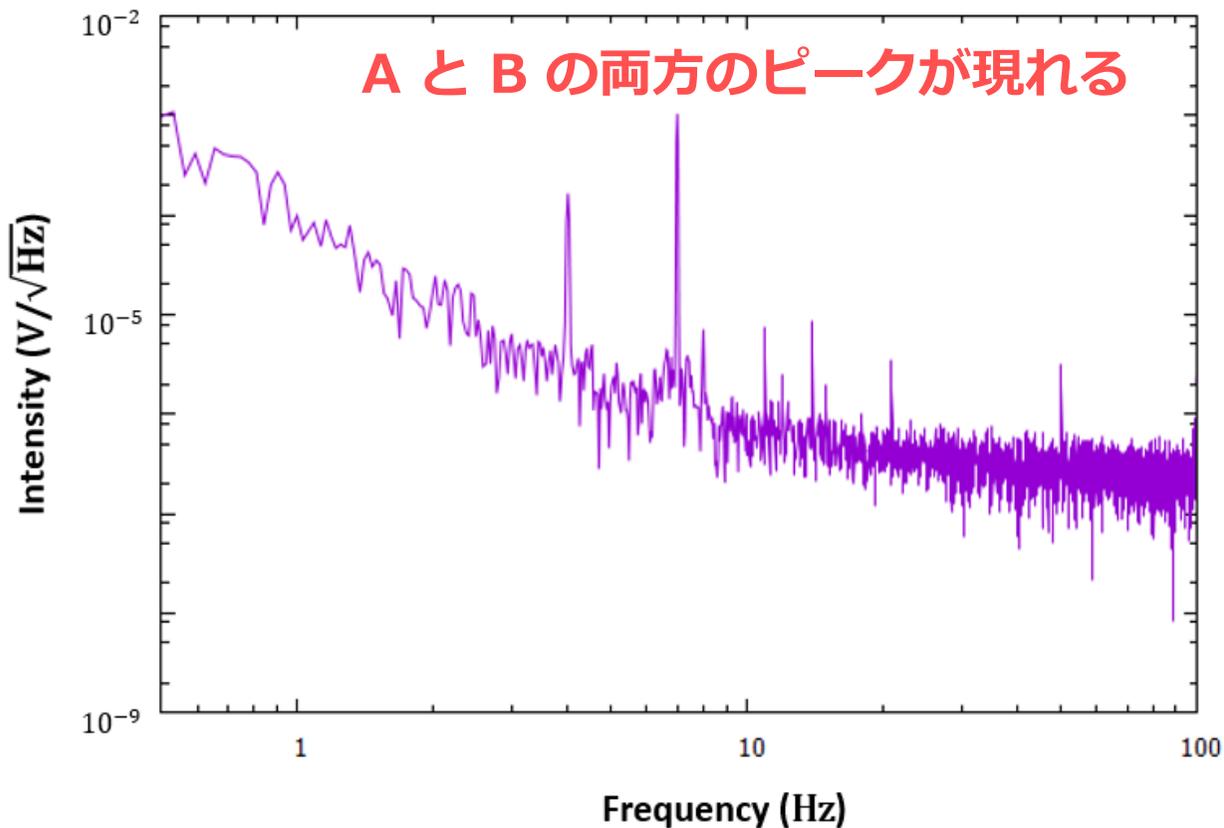
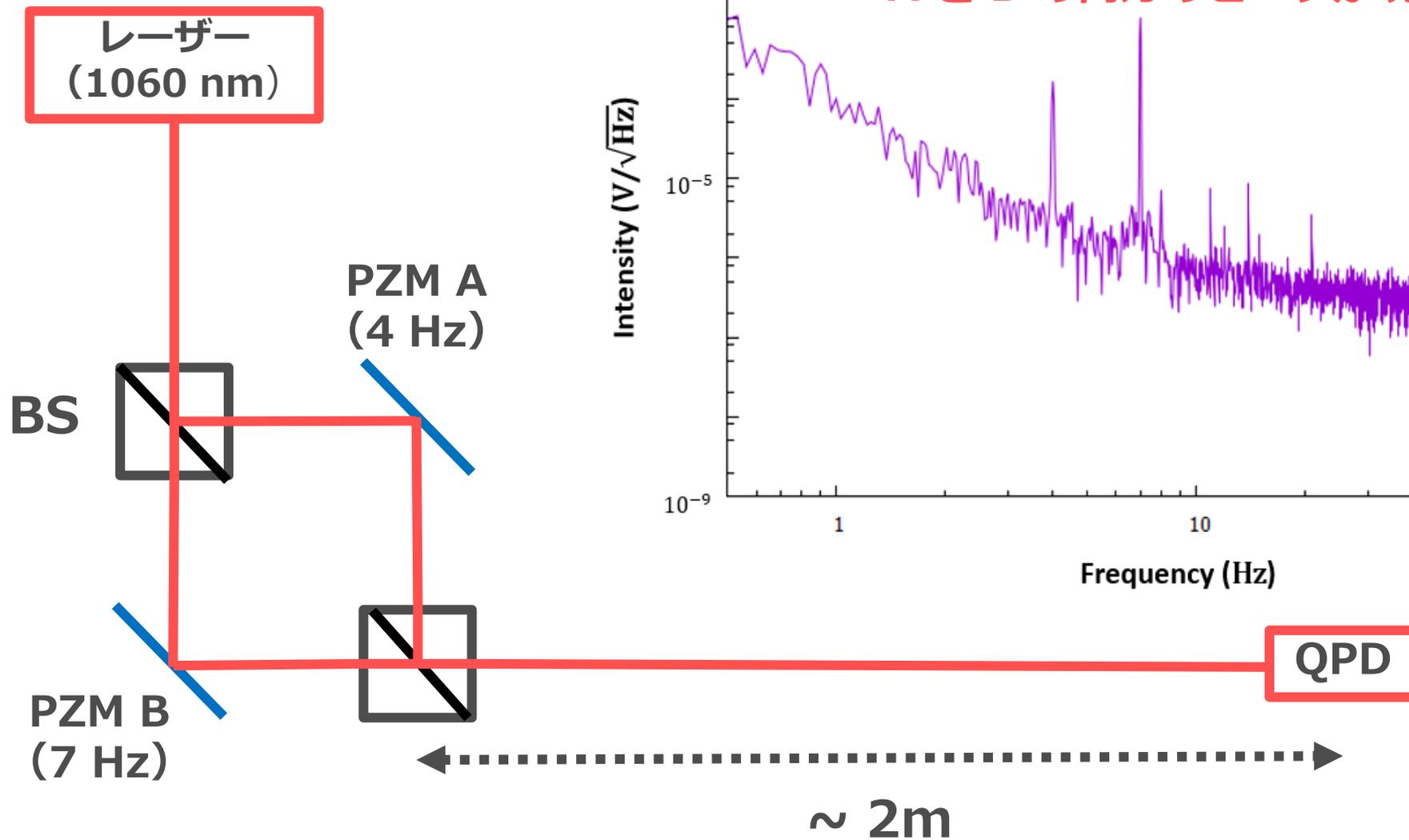
- ・ 光を通す作業
- ・ ビームプロファイルの測定
- ・ RF PD の製作  
いくつか作ったが、うまく作動せず（原因不明）、時間がかかる。  
結局、桑原さんが作ってくれたものを使うことに……
- ・ 回路を組む作業
- ・ MZI の制御  
干渉計を組むのは初めてで、いろいろな人にお世話になる……
- ・ 測定

# 実験の様子

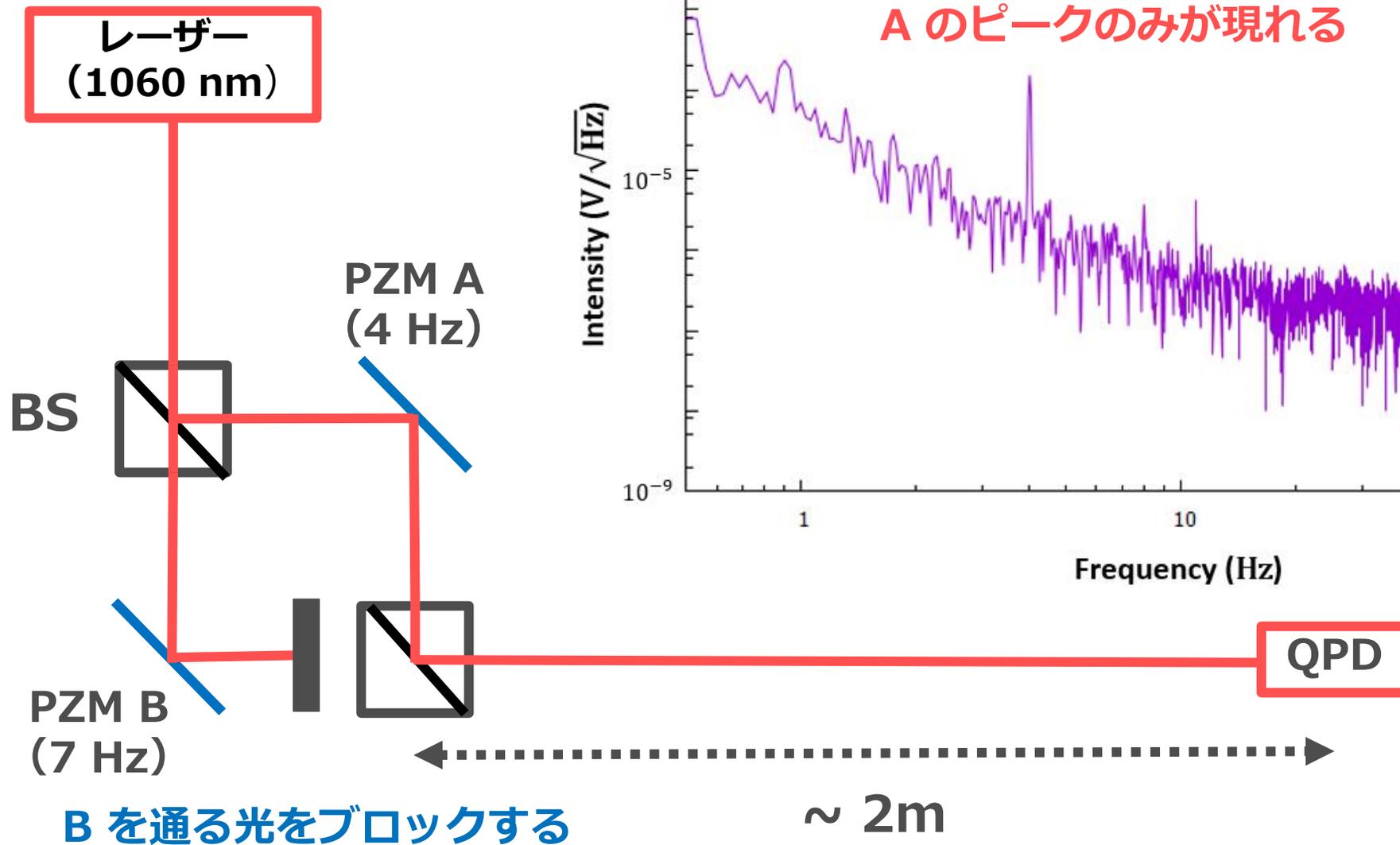


PZM は角度方向に動かすため、一端にのみ電圧を与えた

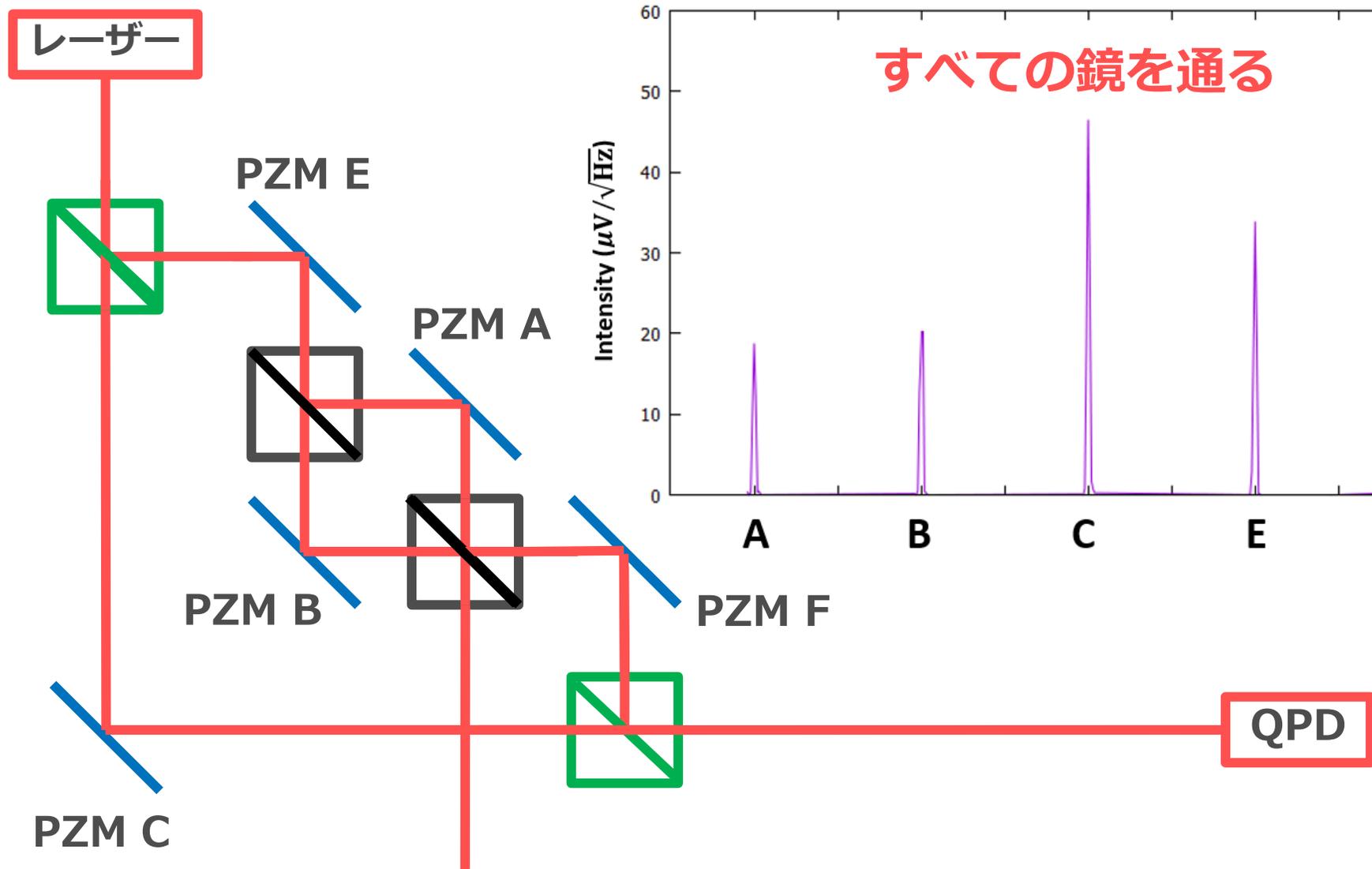
# 実験 (1-1)



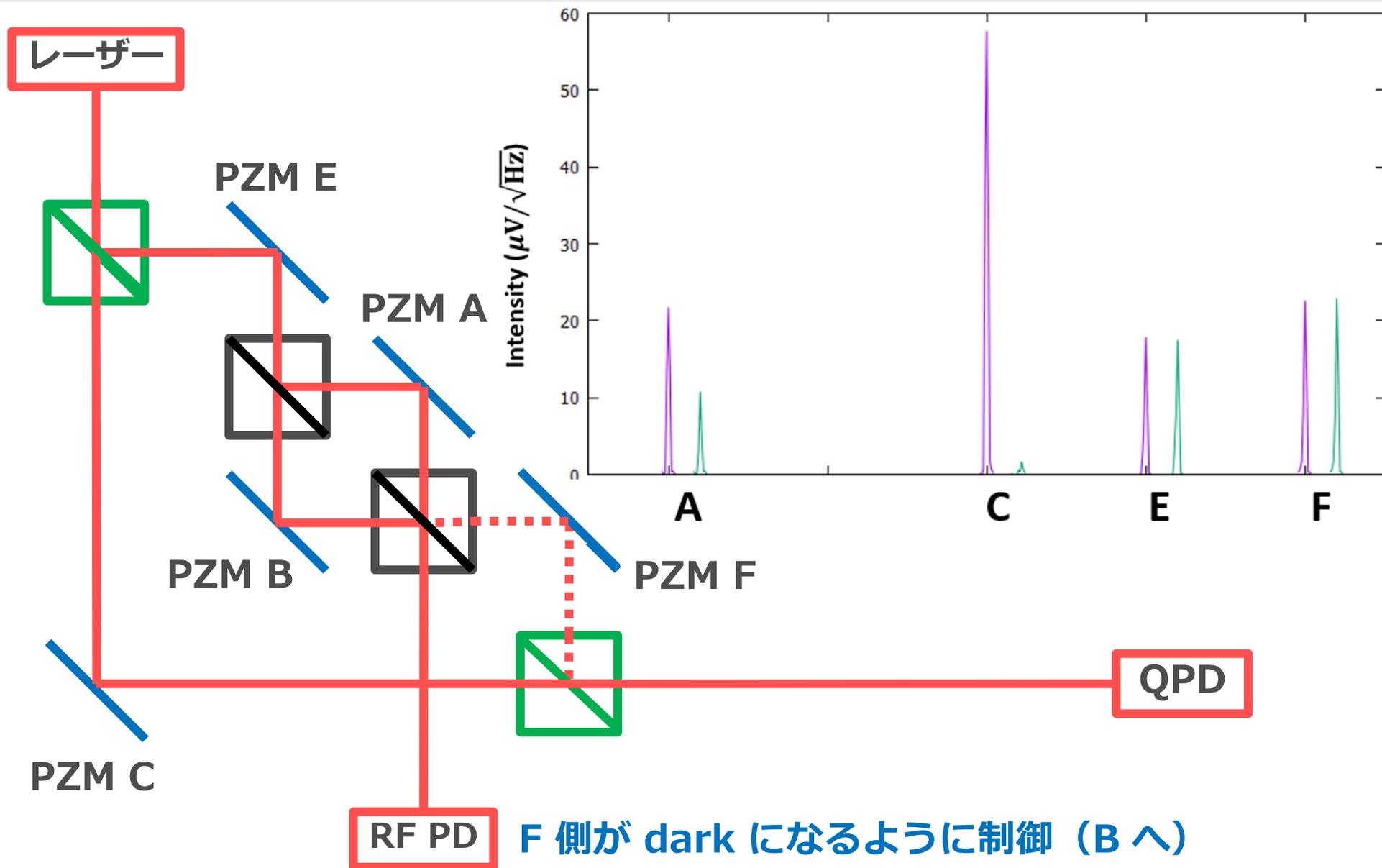
# 実験 (1-2)



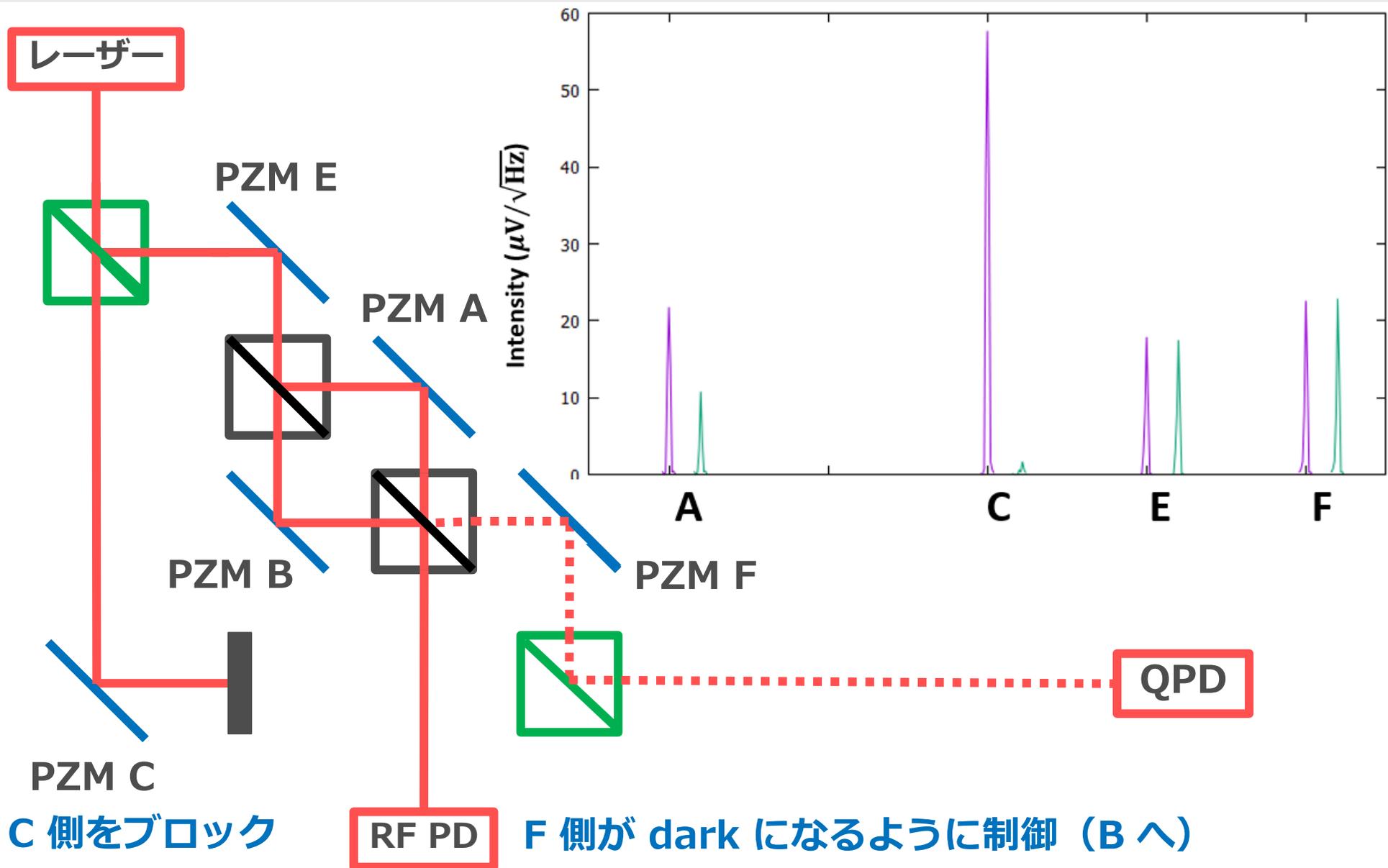
# 実験 (2-1)



# 実験 (2-2)

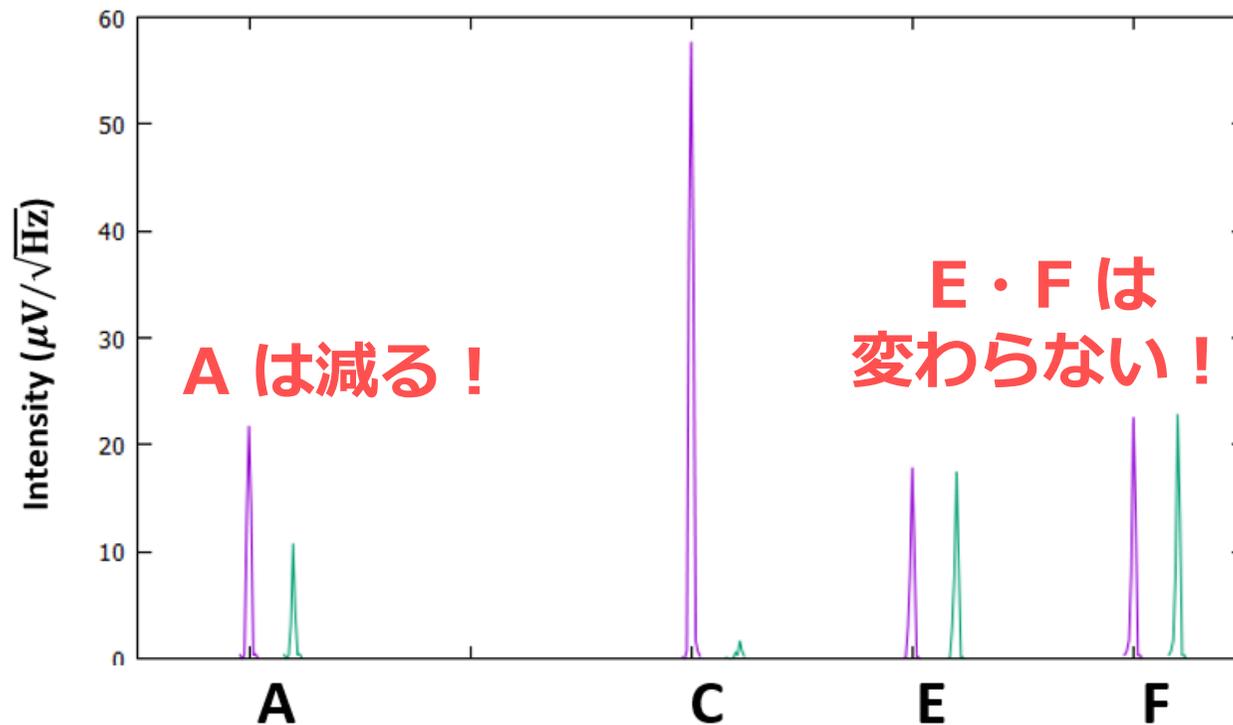


# 実験 (2-3)



# 実験 (2-2) と実験 (2-3) の比較

- C 側をブロックしても A・E・F が現れる
  - F 側を dark にする制御が不完全で、光が漏れている
- C 側をブロックの有無で A は減少、E・F は変わらない
  - A を通って、かつ C を通る光が存在する！



# 原論文との差異

- MZI の visibility のちがい (F 側に光が漏れた原因)

今回の実験 : 82% (時間変動が大きく、もっと低い可能性も)

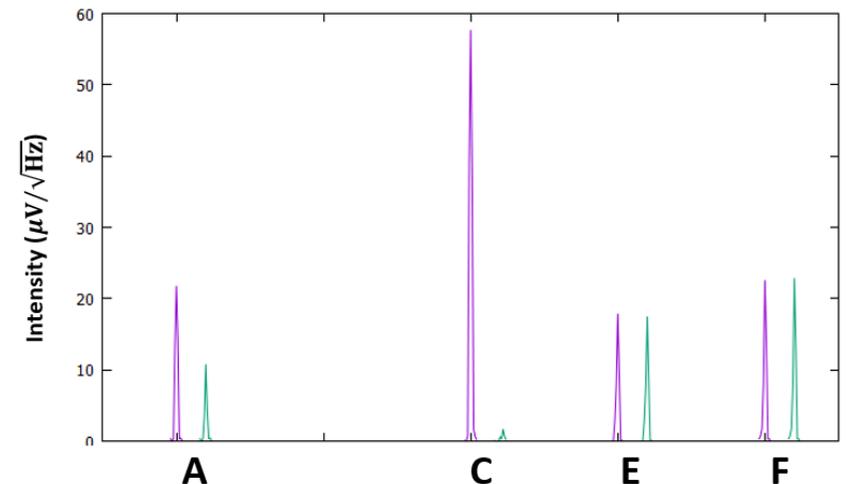
原論文 : 98.5 % (コンピューターを用いて制御)

→ 原論文の実験結果を完全に再現するためには、visibility を上げてより正確な制御を行う必要がある

- 信号発生器が 2 台までしか使えなかったため、鏡をべつべつに揺らして測定を行った (特に問題ない?) 。

# 実験結果のまとめ

- ・それぞれの鏡を特定の周波数で揺らすことで、光がどこを通ったかを測定することができた。
- ・制御が不完全なため同じ結果は再現できなかったが、古典的な直観に従わないような光が存在することが確認できた（その意味では、実験結果が再現できた）。
- ・原論文の完全な再現のためには、より正確な制御を行う必要がある。



# 目次

## 1. 実験の概要

- ・ 実施概要
- ・ 原論文のレビュー
- ・ 実験の方法と結果

## 2. 実験の考察

- ・ 原論文の主張 (TSVF)
- ・ 通常の量子力学による解析
- ・ 古典的な解析

# 原論文の主張 (Two-State Vector Formalism)

- 光子はつながった経路を通らない
- そのため、直観的な「粒子」の描像に反する
- TSVF を受け入れると、直観的に理解できる

TSVF : Two-State Vector Formalism

Aharonov らが提案している量子力学の新しい形式

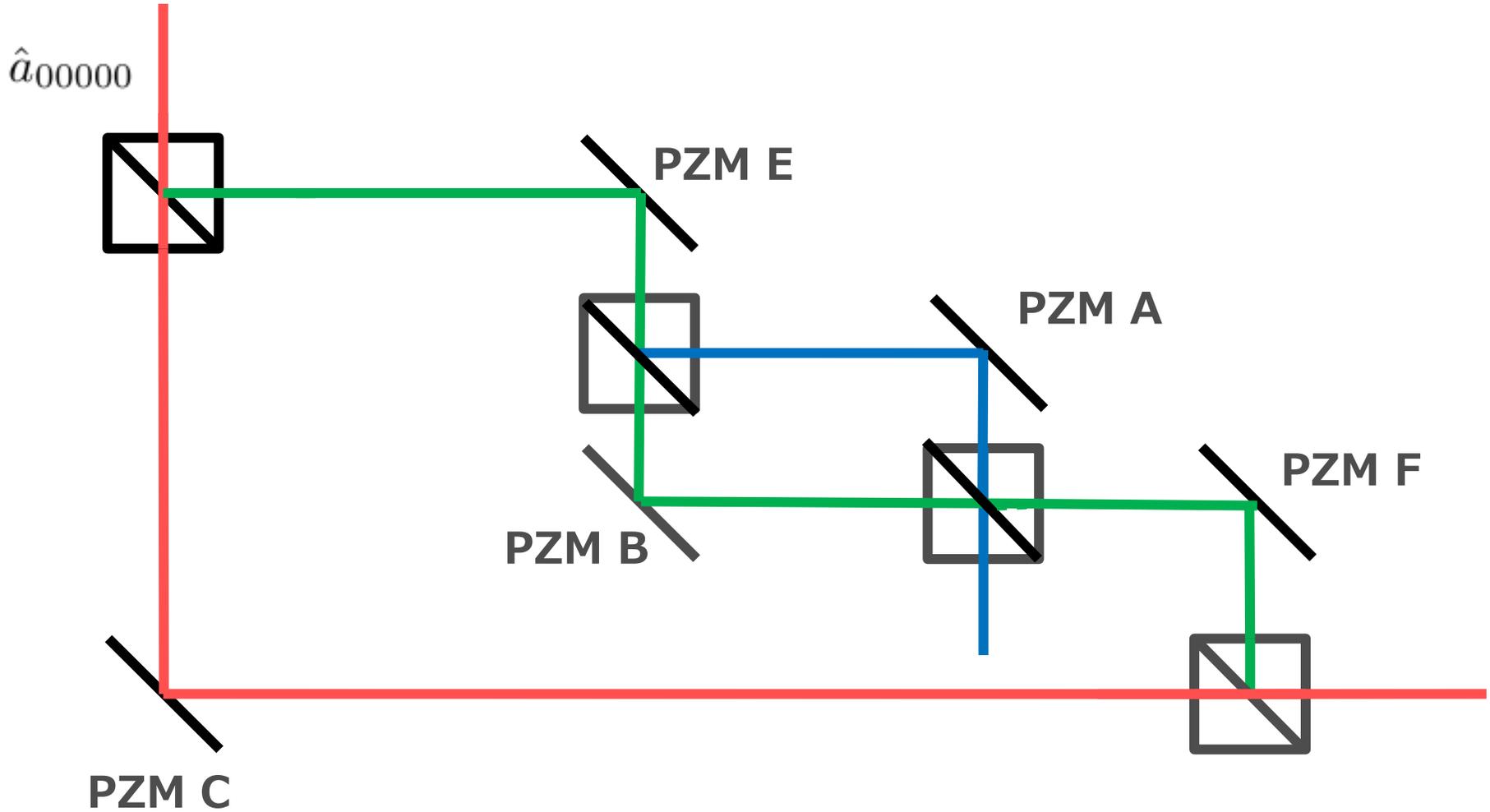
# 原論文の主張 (Two-State Vector Formalism)

- 光子はつながった経路を通らない
- そのため、直観的な「粒子」の描像に反する
- TSVF を受け入れると、直観的に理解できる

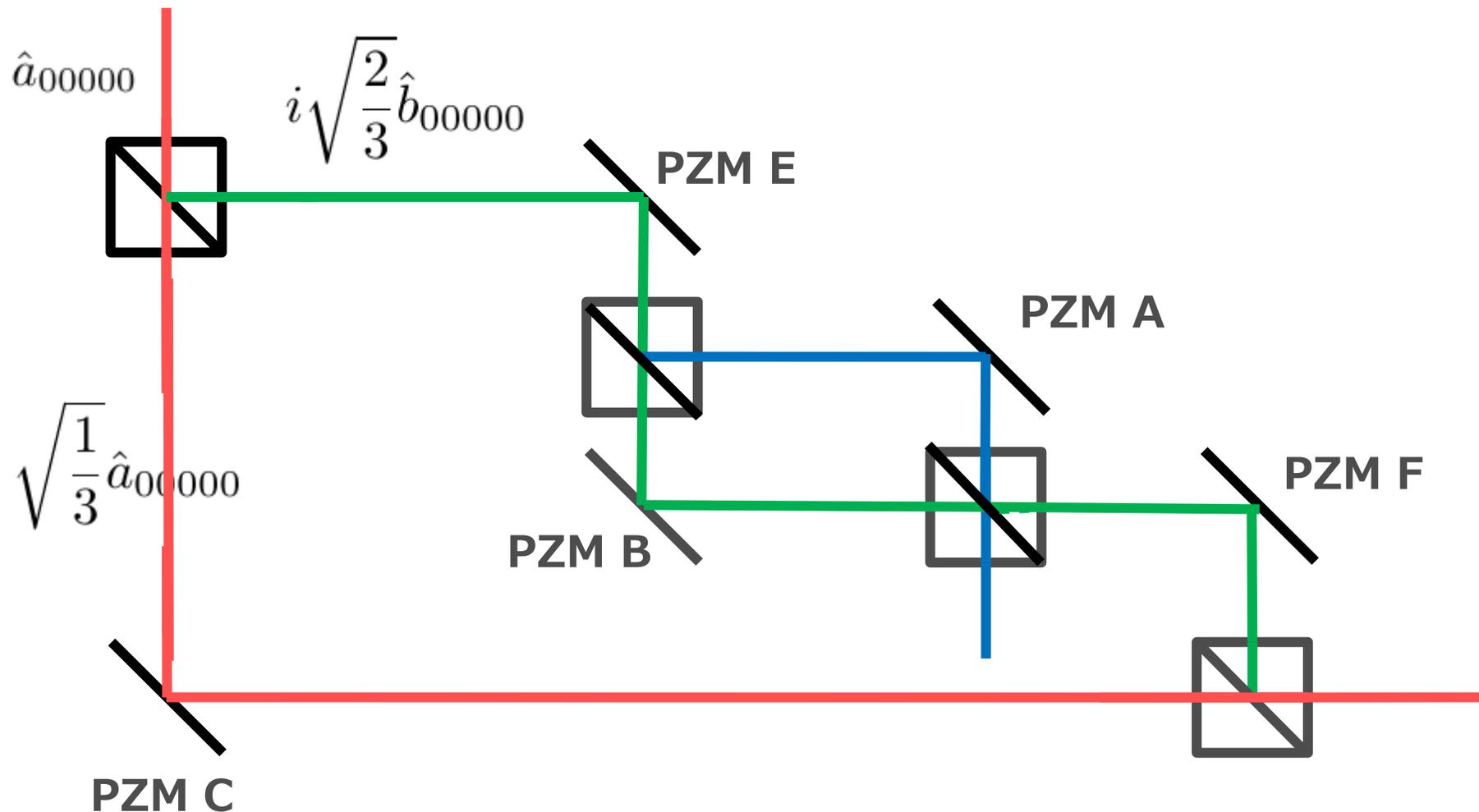
TSVF : Two-State Vector Formalism

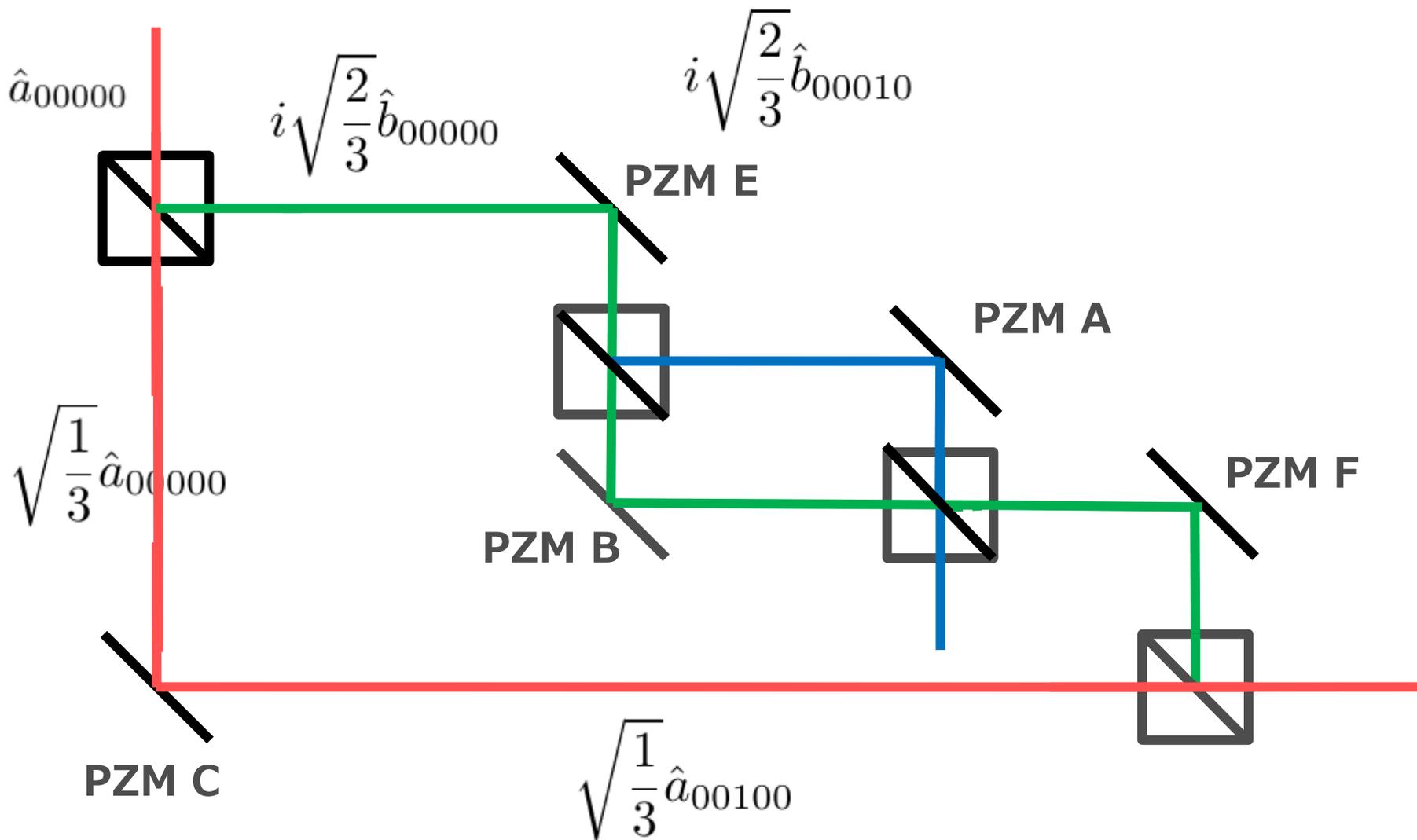
Aharonov らが提案している量子力学の新しい形式

- しかし、**TSVF でなければ説明できないというわけではない**  
(ふつうの量子力学でも、古典電磁気学でも説明できる)
- 古典電磁気学でも、ふつうの量子力学でも説明できない、  
TSVF でしか説明できない実験が提案できるか？



## 強度比 2:1 でスプリット

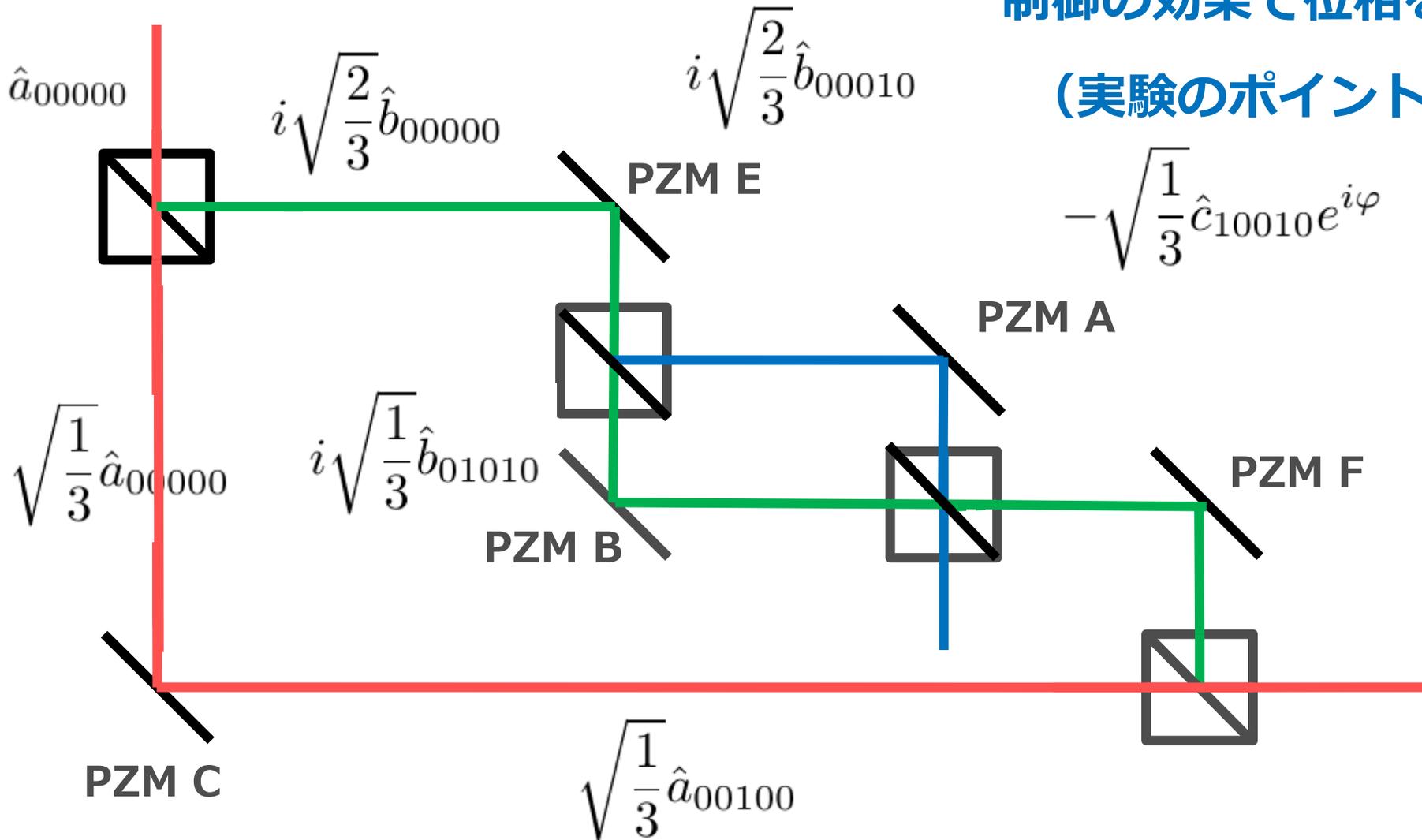




## 鏡との相互作用

制御の効果で位相を獲得

(実験のポイント!)



- 結局、

$$\hat{a}_{000000} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{3}} (\hat{a}_{00101} - \hat{a}_{01011} + e^{i\varphi} \hat{a}_{10011})$$

- 実験 (2-1) : 制御なし ( $\varphi = \pi$ )

$$p_A = p_B = p_C = \frac{1}{3}, p_E = p_F = \frac{4}{3}$$

“ふしぎな” 結果の原因は、

- 実験 (2-2) : 制御あり ( $\varphi = 0$ )

$$p_A = p_B = p_C = \frac{1}{3}, p_E = p_F = 0$$

位相の制御にあった

☆ふつうの量子力学から、実験結果が説明できた！

- 観測量

$$\Delta I(t) = \int_0^\infty |\psi(y; t)|^2 dy - \int_{-\infty}^0 |\psi(y; t)|^2 dy \quad \text{の Fourier 変換}$$

- Gaussian ビーム (分散を  $1/\sqrt{2}$  とした)

$$\Psi_{\text{in}} \propto e^{-y^2}$$

$$\begin{aligned} \Psi_{\text{out}} &\propto k e^{-(y-\Delta_C)^2} - e^{-(y-\Delta_B-\Delta_E-\Delta_F)^2} + e^{i\varphi} e^{-(y-\Delta_A-\Delta_E-\Delta_F)^2} \\ &\simeq e^{-y^2} \left\{ k - 1 + e^{i\varphi} + 2y \left[ e^{i\varphi} \Delta_A - \Delta_B + k\Delta_C + (e^{i\varphi} - 1) (\Delta_E + \Delta_F) \right] \right\} \end{aligned}$$

$k = 0$  : C をブロックする

$\varphi = 0$  : F 側を dark に制御

$k = 1$  : C をブロックしない

$\varphi = \pi$  : 制御しない

- 実験 (2-1) :  $k = 1, \varphi = \pi$

$$\Psi \propto e^{-y^2} [1 + 2y (\Delta_A + \Delta_B - \Delta_C + 2\Delta_E + 2\Delta_F)]$$

$$\rightarrow \mathbf{A \cdot B \cdot C \cdot E \cdot F}$$

- 実験 (2-2) :  $k = 1, \varphi = 0$

$$\Psi \propto e^{-y^2} [1 + 2y (\Delta_A - \Delta_B + \Delta_C)]$$

$$\rightarrow \mathbf{A \cdot B \cdot C}$$

- 実験 (2-3) :  $k = 0, \varphi = 0$

$$\Psi \propto e^{-y^2} \cdot 2y (\Delta_A - \Delta_B)$$

$$\rightarrow \mathbf{\text{何も出ない (QPD を使ったことによる)}}$$

☆ 古典電磁気学から、実験結果が説明できた！

## まとめ

- ・ 古典的な粒子の直観に従わないような光が存在することが確認できた。
- ・ 原論文の実験結果を（不完全だが）再現できた。
- ・ 結果は直観に反するが、ふつうの量子力学でも、古典論でも説明できる。
- ・ 古典論でも、ふつうの量子力学でも説明できない、TSVF でしか説明できない現象は存在するか？