

# 光子の干渉

## ～Wheelerの遅延選択実験～

山中研・B4

黒田浩明

中谷洋一

柳田陽子

2007.12.25

久野・山中研究室合同年末発表会

# 目次

## ○Introduction

- Youngの干渉実験
- Wheelerの思考実験

## ○今回の実験の計画

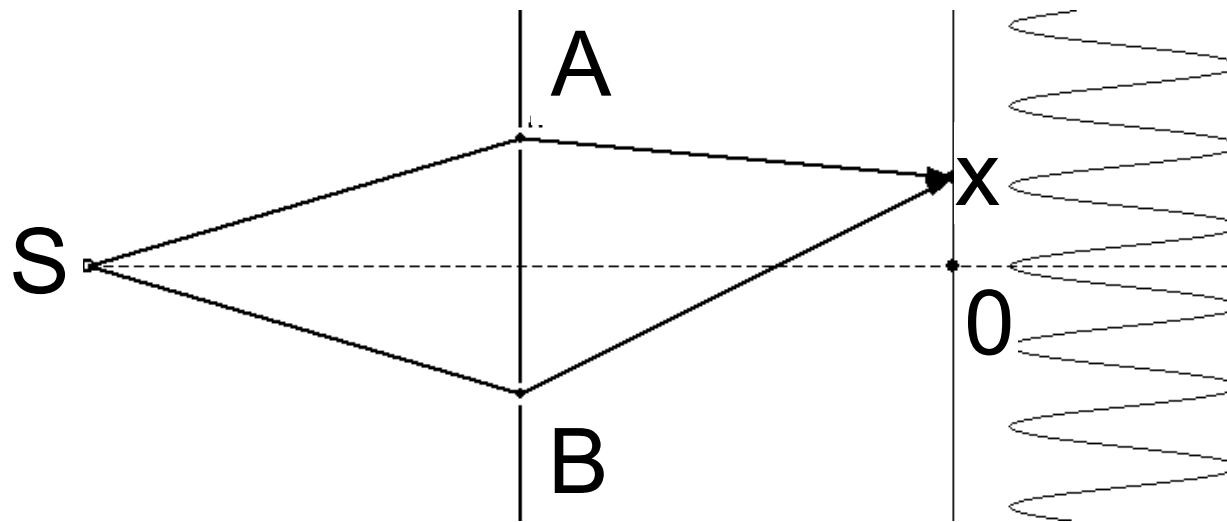
- 組み上げる干渉計
- 使用機器
- 1光子の干渉
- Delayed-choiceの方法

## ○まとめ - 課題 -

# Introduction

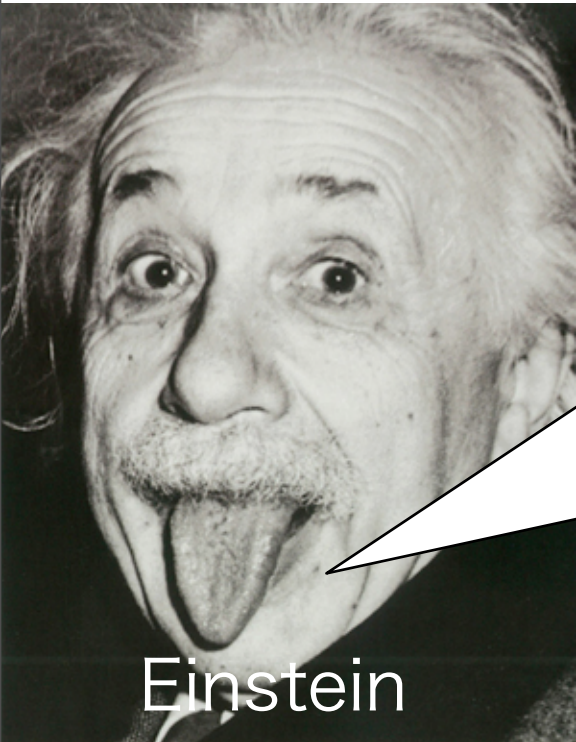
Youngの干渉実験から  
delayed-choiceへ

# Youngの干渉実験



- 1光子をスリット越しにスクリーンに当てると、その斑点の密度が干渉縞を作る。
- スリットの後ろに光源などを置き、光子の運動量を間接的に測定することで、A・Bどちらを通ったかが分かる。

# 歴史的導入～アインシュタインとボーア～



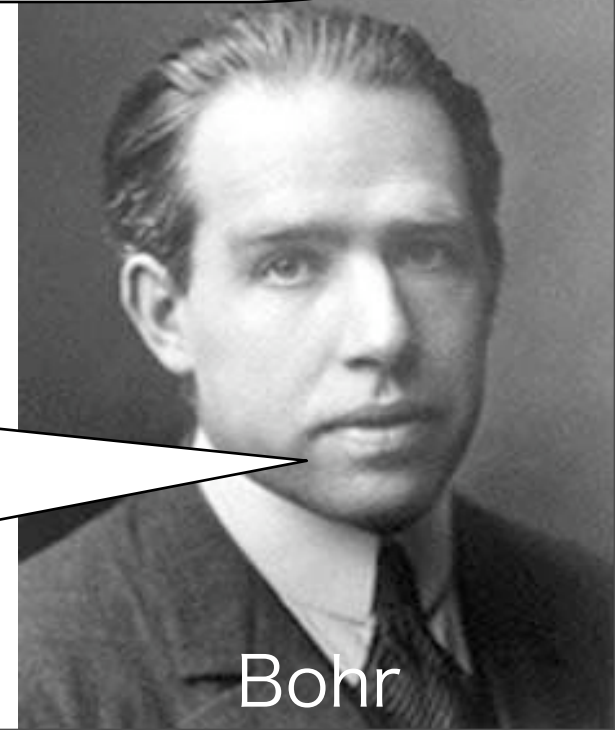
Einstein

光子が粒子である以上、A・Bのどちらか一方を通っているはず。

光子の運動量を検出器の位置で測定するなどして、どちらを通ったか推測することはできないか。

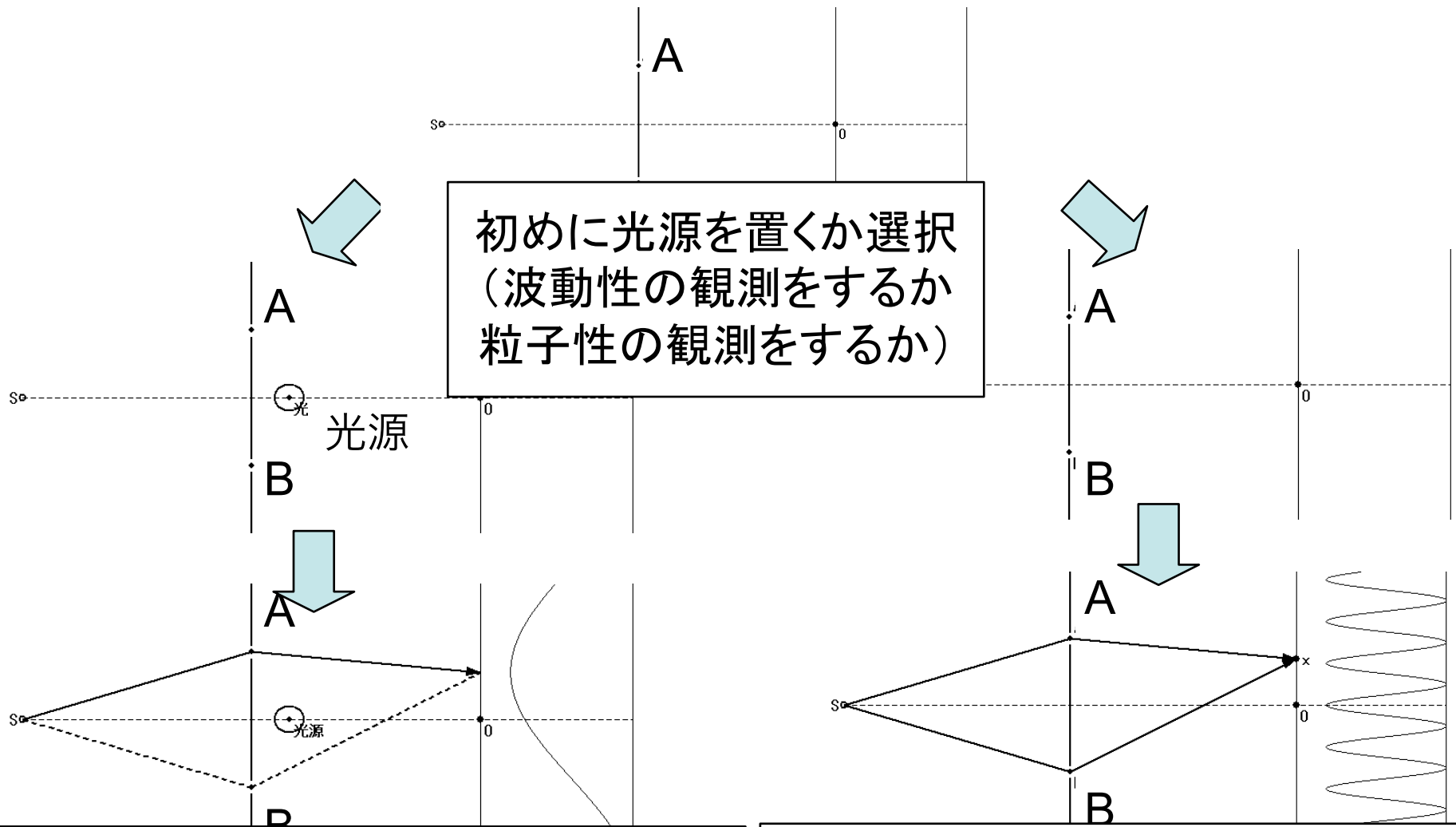
運動量と検出器の位置の不確定性により、検出器の位置が特定できない。

我々には確率でしか光子の振る舞いを予言できない。



Bohr

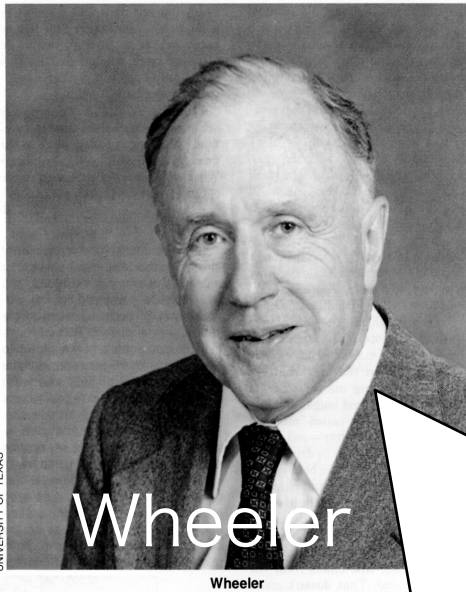
# これまでの干渉実験



光源を置くと、ABどちらを通ったか分かるようになるが、干渉縞は現れない(粒子性)

ABどちらを通ったか分からない代わりに、干渉縞が現れる(波動性)

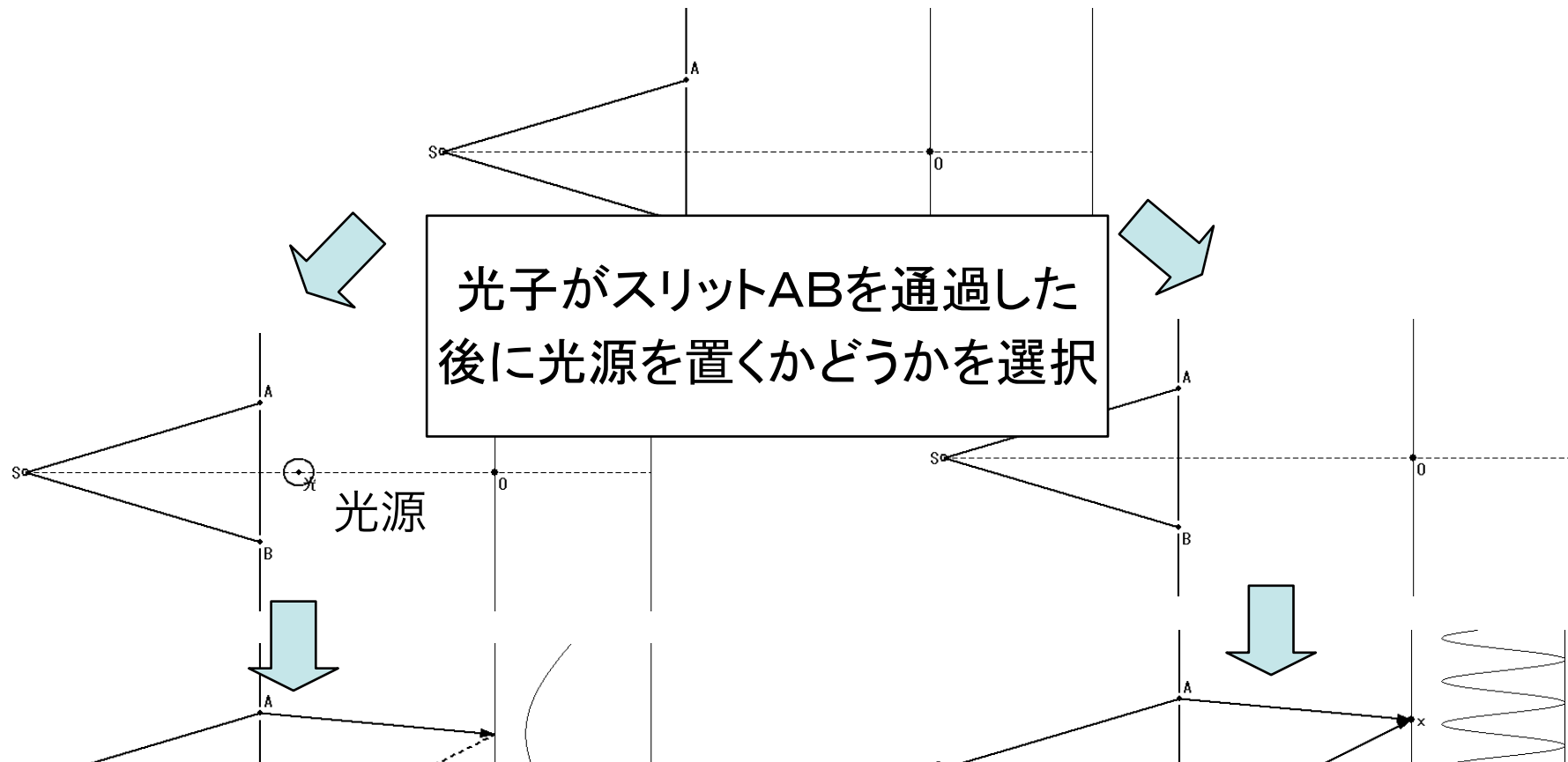
# J. A. Wheelerの提案



- John Archibald Wheeler、1911年7月9日～
- プリンストン大学助教授
- 宇宙の波動関数を記述するホイーラー・ドウィット方程式 (Wheeler-DeWitt equation) は、量子重力研究の先駆的成果の一つ(ーWikipediaより)

光子がスリットを通過した後に光源を置くかどうか(すなわち、波動性と粒子性のどちらを観測するか)の選択を行ったとしたらどうなるだろうか？

# Wheelerの思考実験

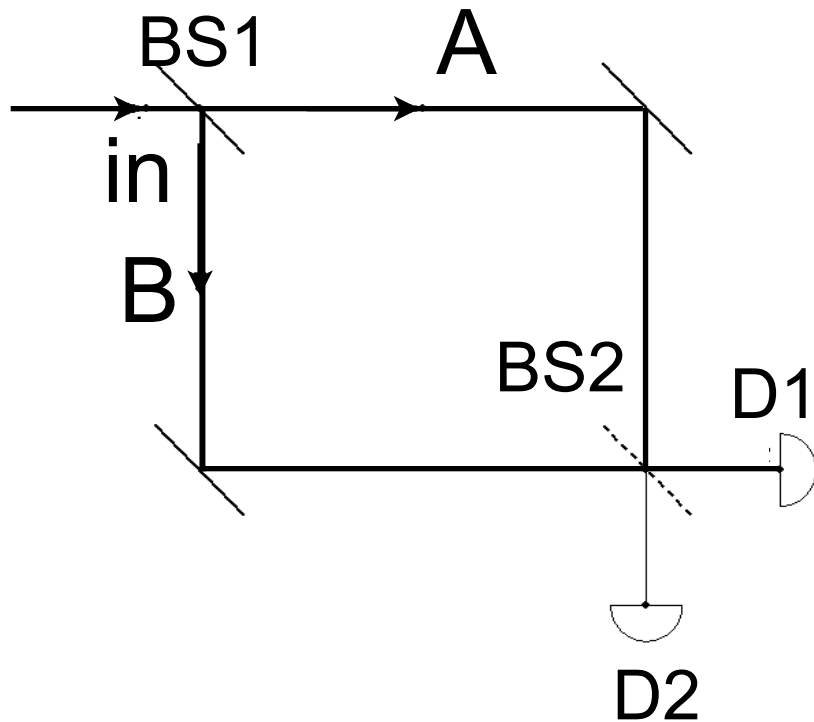


もしこれまでと同じように、光源があった時に粒子性を示し、光源が無い時に波動性を示せば、スリットを通過した時点ではどちらの状態か決まっていないと言える。

つまり、波動性も粒子性も一光子に共存しているという事が言える！？



# 実際に用いられる装置



- 実際にはビームスプリッター (BS1, BS2) を用いて、左図のような装置を組んで、実験をする。
- BS1がスリットと同じ役割を果たし、BS2を置くかどうかという選択が波動性・粒子性のどちらを観測するかという選択と対応している。

# 簡単な説明 (BS2なし)

$$\hat{a}_A = \sqrt{T} \hat{a}_{in} + i \sqrt{R} \hat{a}_{vac}$$

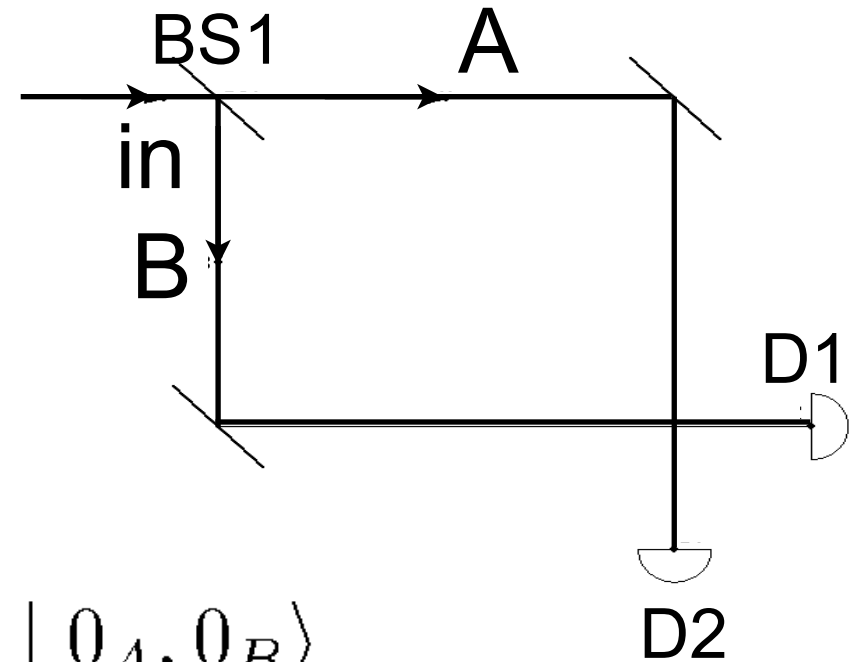
$$\hat{a}_B = \left( \sqrt{T} \hat{a}_{vac} + i \sqrt{R} \hat{a}_{in} \right) e^{i\phi}$$

$$|\psi\rangle_{AB} = \hat{a}_{in}^\dagger |0_A, 0_B\rangle$$

$$= \left( \sqrt{T} \hat{a}_A^\dagger + i \sqrt{R} \hat{a}_B^\dagger e^{i\phi} \right) |0_A, 0_B\rangle$$

$$= \sqrt{T} |1_A, 0_B\rangle + i \sqrt{R} e^{i\phi} |0_A, 1_B\rangle$$

$$\langle \psi | \hat{a}_A^\dagger \hat{a}_A | \psi \rangle_{AB} = T = \frac{1}{2} \quad \langle \psi | \hat{a}_B^\dagger \hat{a}_B | \psi \rangle_{AB} = R = \frac{1}{2}$$



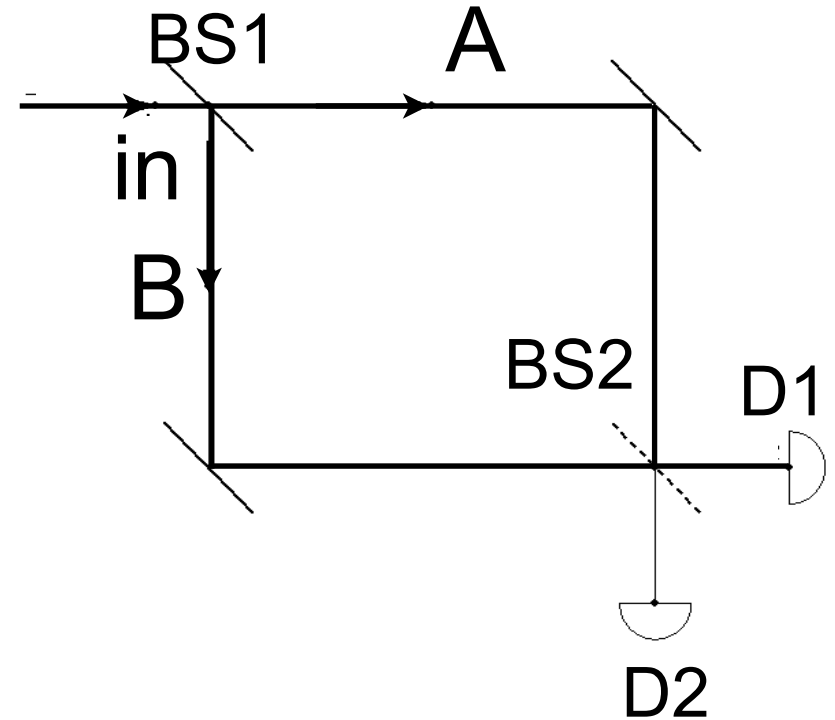
# 簡単な説明 (BS2あり)

$$\hat{a}_1 = \sqrt{T}\hat{a}_A + i\sqrt{R}\hat{a}_B$$

$$\hat{a}_2 = \sqrt{T}\hat{a}_B + i\sqrt{R}\hat{a}_A$$

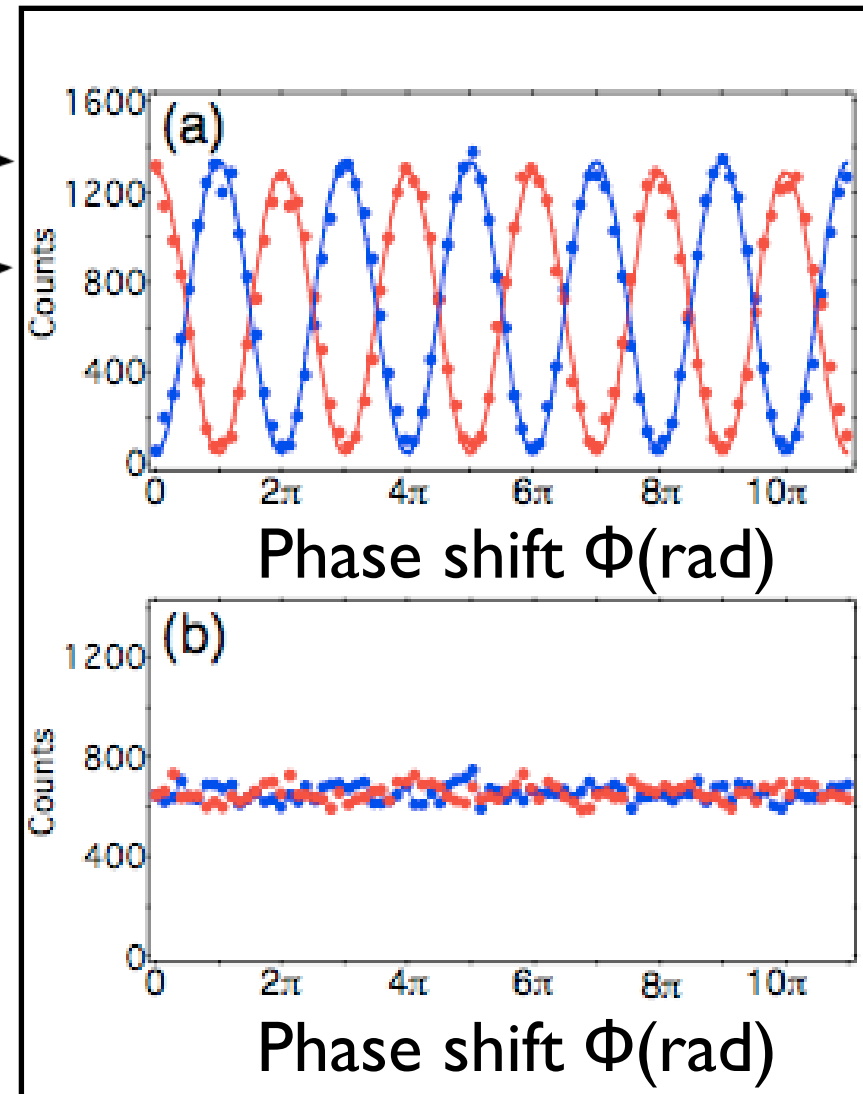
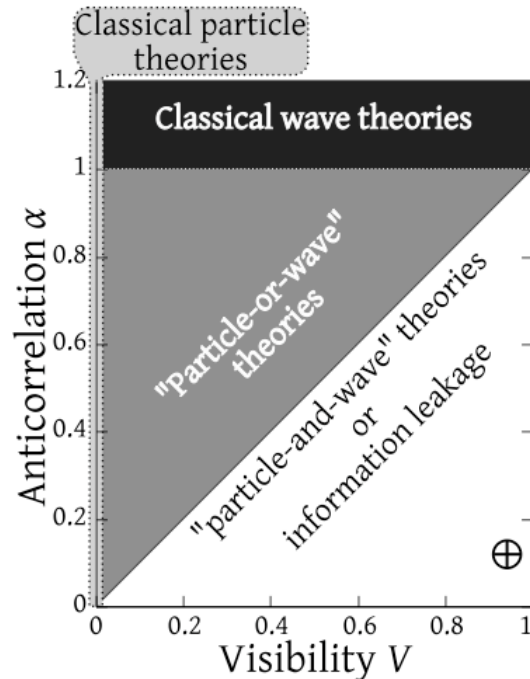
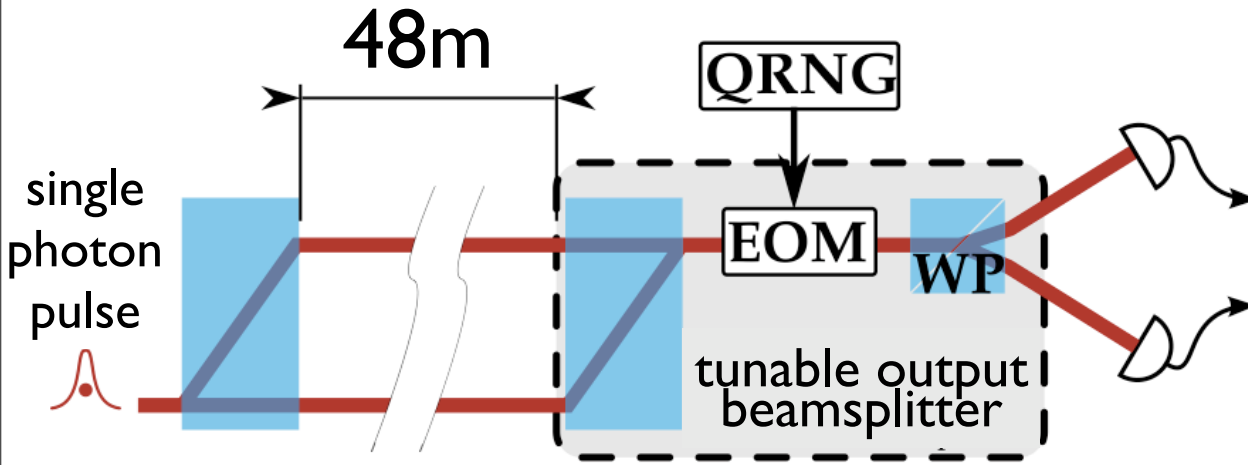
$$\langle \psi | \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_1 | \psi \rangle_{AB} = \sin^2 \frac{\phi}{2}$$

$$\langle \psi | \hat{a}_2^\dagger \hat{a}_2 | \psi \rangle_{AB} = \cos^2 \frac{\phi}{2}$$



# 最新の実験結果

最も確実に証明された論文の紹介



(L):V. Jacques .etc, Ann. Phys. Fr. I (2007) EDP Sciences, Les Ulis

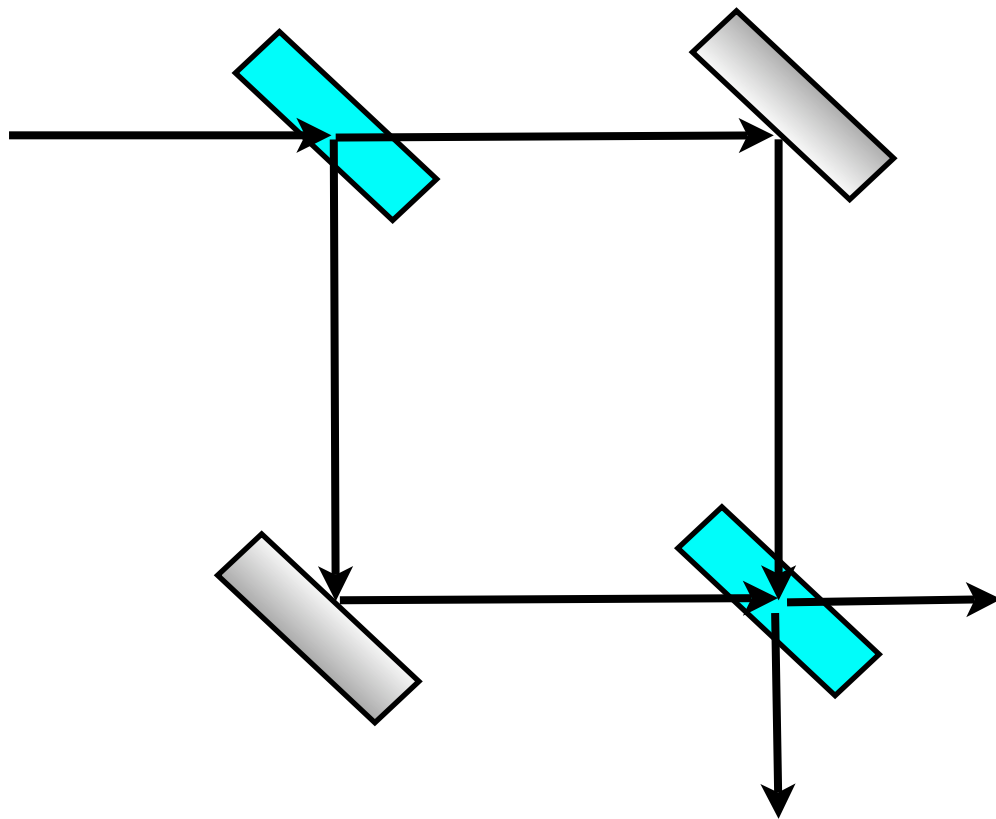
(R):V. Jacques .etc, Science 315, 966(2007)

# 今回の実験の計画

装置、方法、検出率

# 組上げ予定の干渉計

基本型はマツハツェンダー型干渉計



- ミラー × 2
- ビームスプリッター × 2

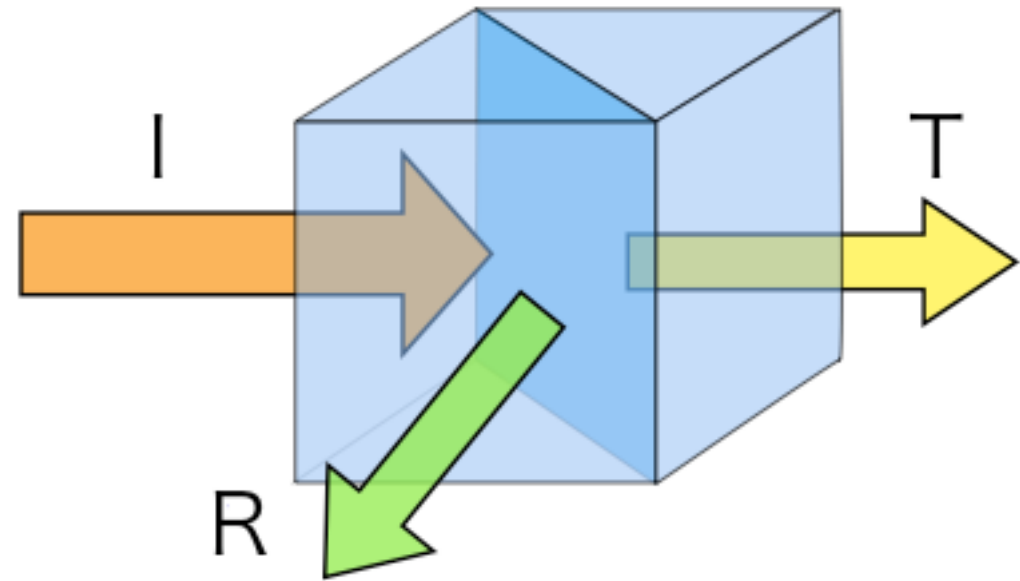
で構成される。

# 光源と検出器

光源	検出器
レーザーポインター	光電子増倍管
波長 532nm 出力 1mW以下	H7195 (浜松ホトニクス) $\lambda \sim 370\text{nm}$ 量子効率27%最大 $\lambda \sim 532\text{nm}$ ~ 7%

# ビームスプリッター(BS)

入射光路 I より入った光子をある確率で透過光路 T へ透過させる。



- キューブ型

入射光路 I と透過光路 T とのズレがほとんどない

- 透過率 / 反射率

p 波 s 波ともに 50% 近い透過率





$$\bar{n}_1 = \langle \phi_{AB} | \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_1 | \phi_{AB} \rangle = \dots$$

$$= T^2 + R^2 - 2TR \cos \phi$$

$$\bar{n}_2 = \langle \phi_{AB} | \hat{a}_2^\dagger \hat{a}_2 | \phi_{AB} \rangle = \dots$$

$$= 2TR + 2TR \cos \phi$$

$$T + R = B$$

$$T = xB$$

$$R = (1 - x)B$$

$$\bar{n}_1 - \bar{n}_2 = (T - R)^2 - 4TR \cos \phi$$

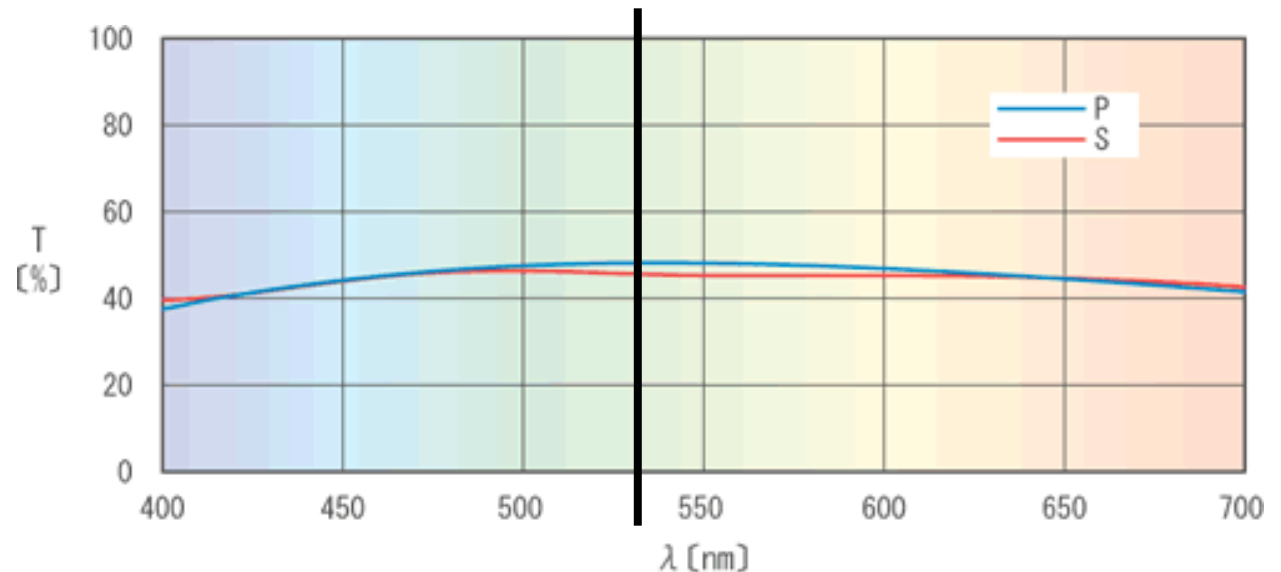
$$= B^2 \{1 - 4x(1 - x) \cos \phi\}$$

T=R=(T+R)/2 のとき光路長の変化による干渉の効果が最もはっきり見える。

透過率

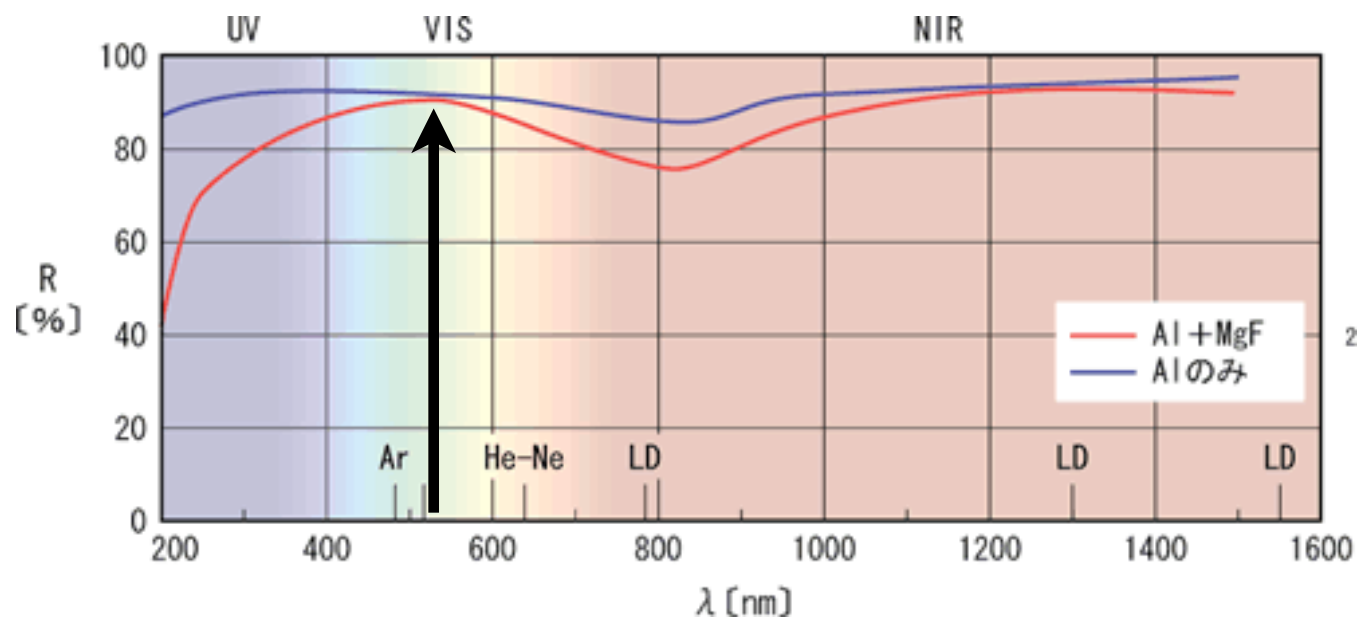
P: ~48% S: ~45%

吸収 < 10%



# ミラー

反射率 ~92 % @ 532 nm



# 調整装置

光軸、光路長の調整に使用する装置

- ミラー  
鉛直軸回りの回転、あおり、  
X軸位置微調整
- B S  
鉛直軸回りの回転、あおり



# 1つの光子の干渉

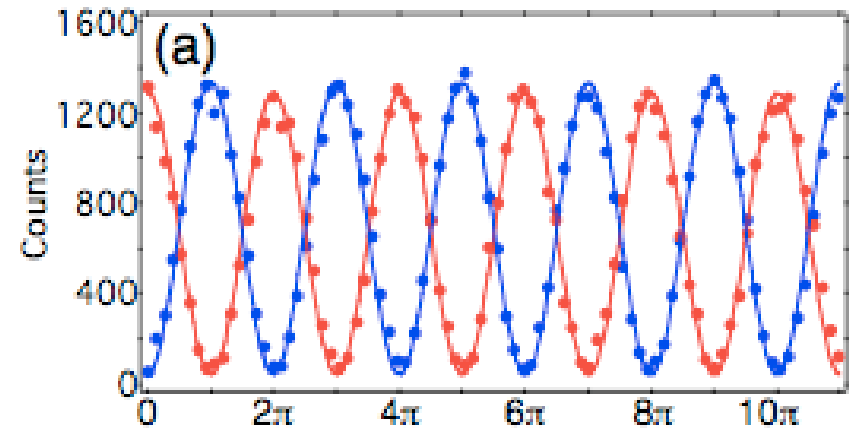
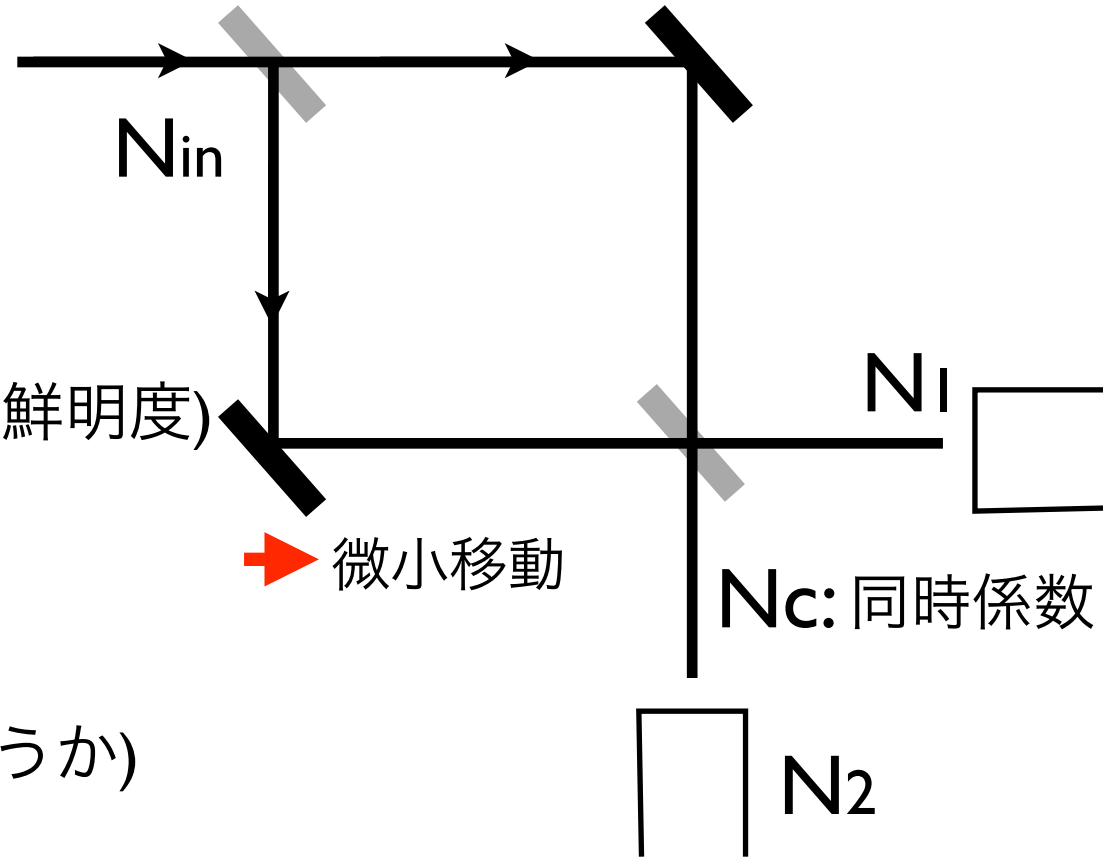
- 1光子を入射
- Visibility(干渉縞の可視度、鮮明度)

$$V = \frac{N_{MAX} - N_{MIN}}{N_{MAX} + N_{MIN}}$$

- Anticorrelation(古典的かどうか)

$$\alpha = \frac{N_c N_{in}}{N_1 N_2} = 0 \quad \text{量子力学的}$$

$$\geq 1 \quad \text{古典的}$$



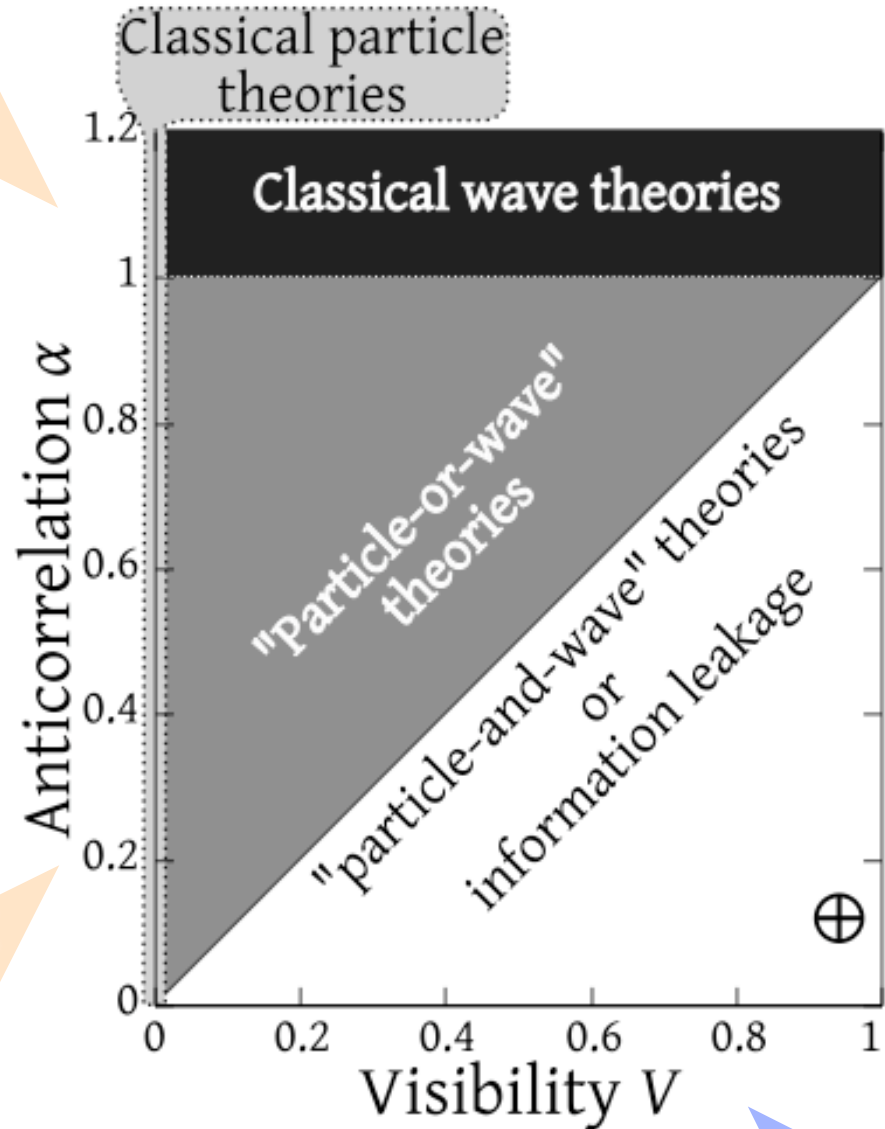
# 1つの光子の干渉

- $\alpha > 1$  では古典的波
- $V = 0$  では古典的粒子
- $\alpha = 0, V = 1$  は波と粒の二重性

$$V = \frac{N_{MAX} - N_{MIN}}{N_{MAX} + N_{MIN}}$$

$$\alpha = \frac{N_c N_{in}}{N_1 N_2}$$

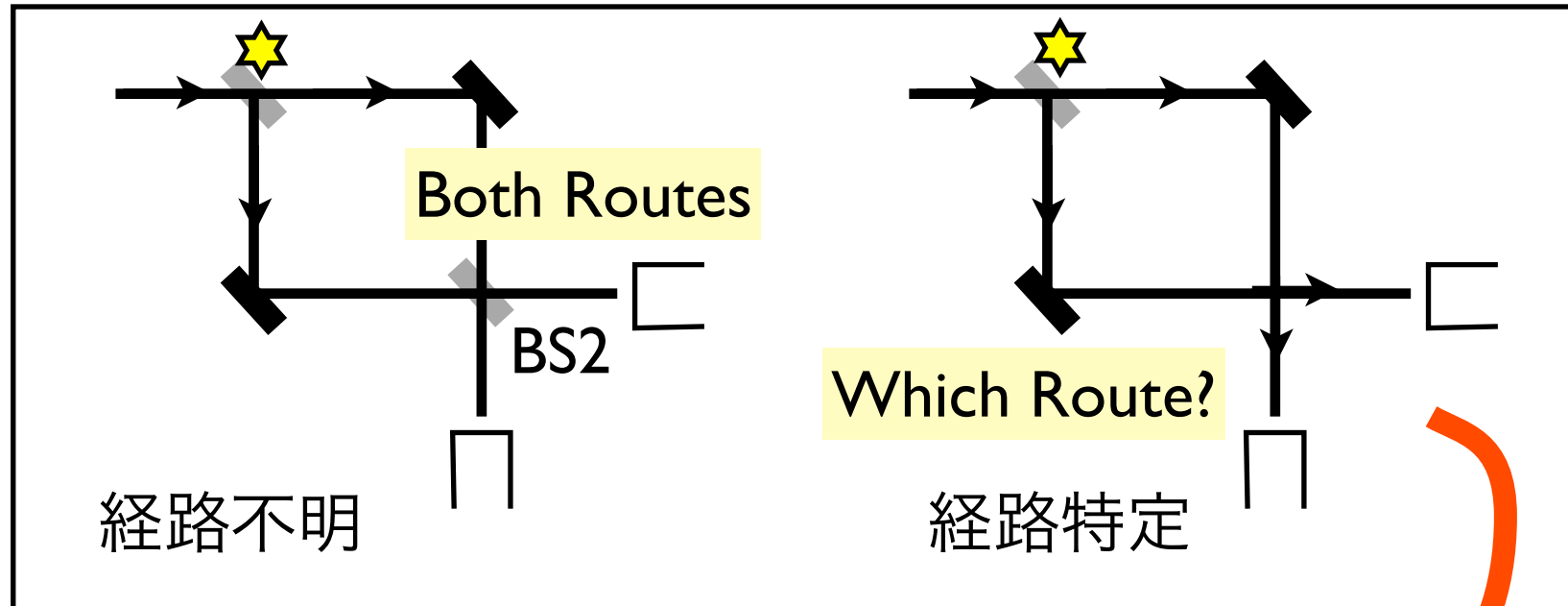
↑ 古典的な波  
↓ 素粒子的



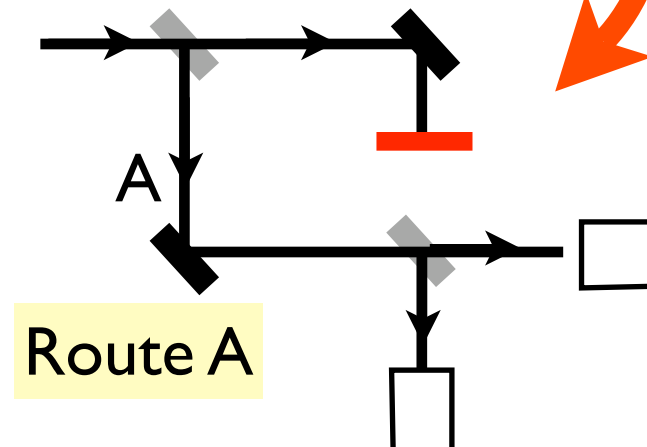
→ 波っぽさ

# Delayed choice

光子が干渉計に入った後、BS2を置くか置かないかを選択する

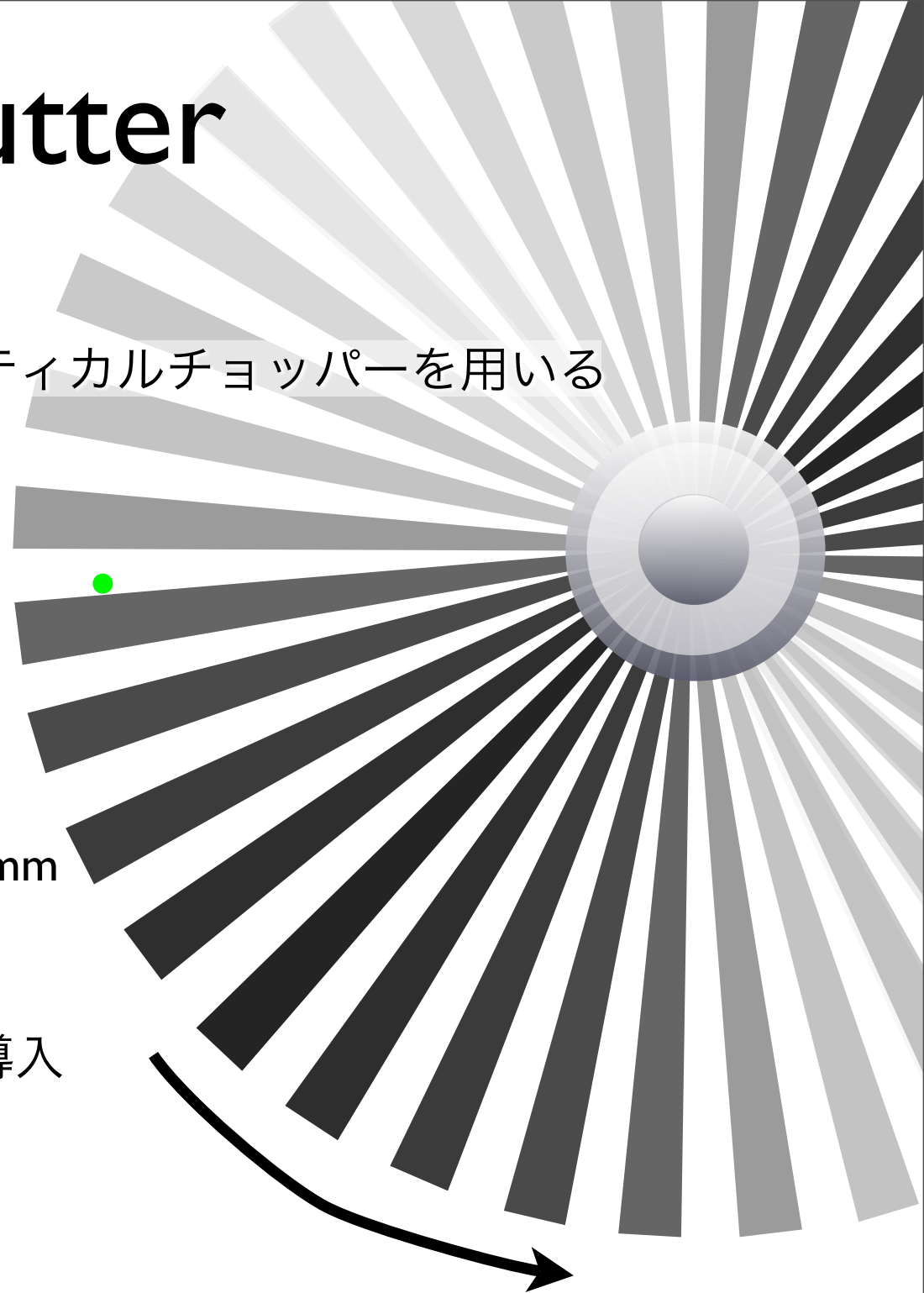


一方の経路を遮断することで、  
経路の特定の代わりとする

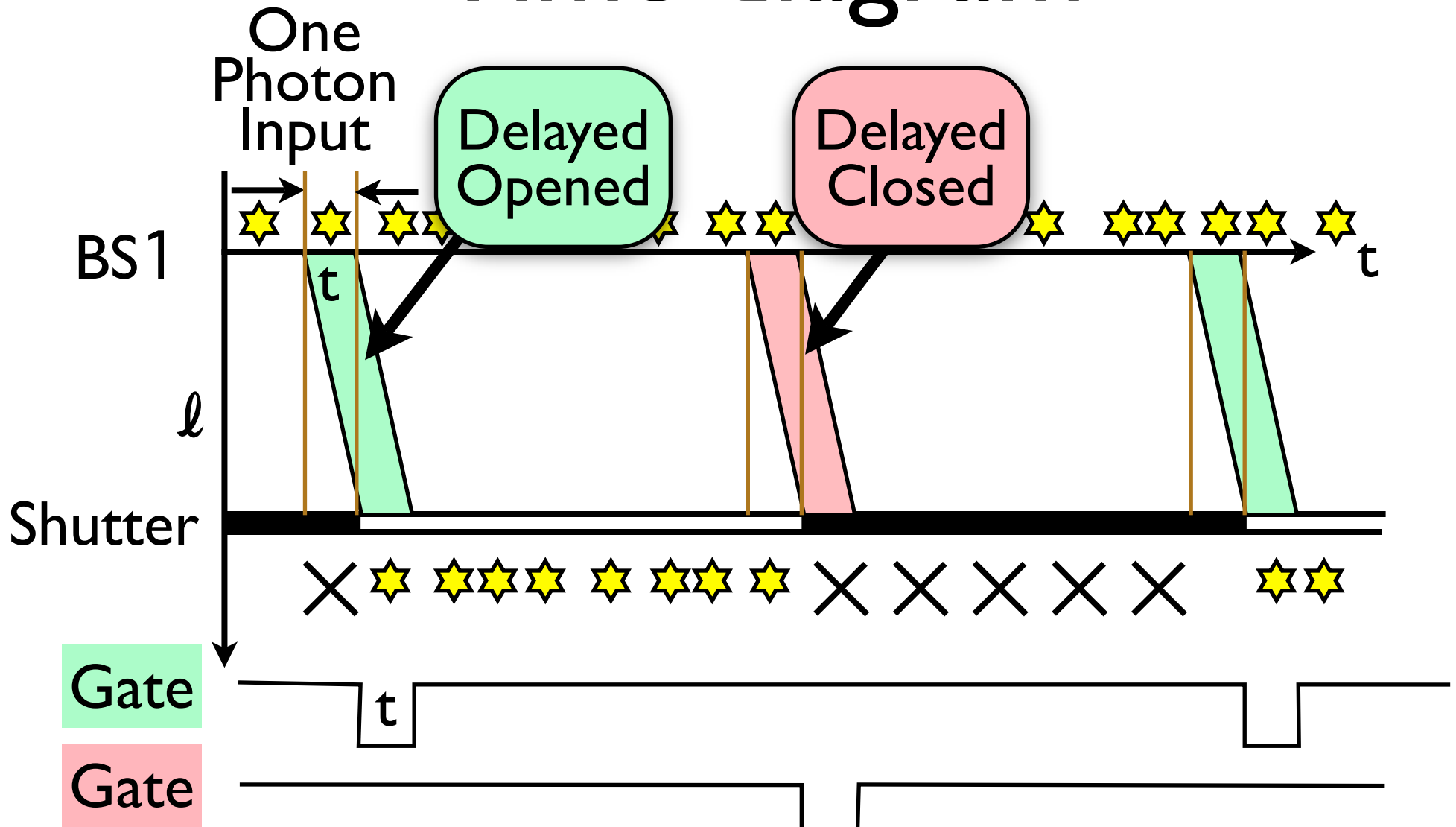


# Shutter

- 高速シャッターとしてオプティカルチョッパーを用いる
- 製品として有るもの
  - 100Hzで回転=6000rpm
  - 透過：遮断=1：1
  - 羽根の本数200本
  - 半径5cmのところ幅0.8mm
  - シャッターの間隔=25 $\mu$ s
- レーザーをレンズで絞って導入



# Time diagram



$$t[s] = \frac{l[m]}{3.0 \times 10^8[m/s]}$$

光路長が1mだと3ns。  
3nsでchopperが進む距離は0.1 $\mu$ m



# 検出と時間

- One photon の検出率

$$0.9^2(\text{BS}) \times 0.92(\text{M}) \times 0.07(\text{QE}) = 5.2\%$$

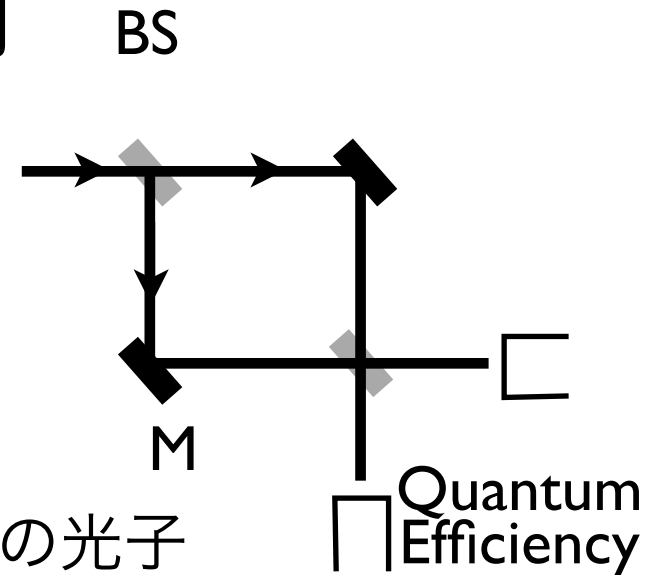
- 1 回のdelayed-choice中にせいぜい1個の光子

- Chopperが 20 kHzなら、20 kHz以下の測定

- PMTで見れるのは  $20 \text{ kHz} \times 5.2\% \sim 1000 \text{ Hz}$

- 経路内に複数の光子が入ることの見積もり

- 平均 20 kHz以下のランダムな光子として見積もり



# 課題

- Chopperの精度、Gateに見合った光路の延長
  - 鏡による多数回反射
- Gate
  - Delayed-choiceの時間幅( $\propto$ 光路長)に設定
  - Shutterの動きと同期
- レーザー径の広がりによる干渉への影響
- 入射レーザーの幅
  - Shutter導入にレンズの使用
- ...

# まとめ

- 光子の波と粒子の二重性を観測したい
- Wheelerの思考実験：Delayed-choiceによって、両方の性質を同時に持って入射したと言える
- 半導体レーザー（レーザーポインター）をしぼった1光子を用いてマッハツェンダー干渉計で観測
- 課題山積。。

# References

- Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences, *Europhys. Lett.*, **1** (4), pp. 173-179 (1986)
- Wheeler's delayed-choice thought experiment: Experimental realization and theoretical analysis, *Ann. Phys. Fr.* **1** (2007) EDP Sciences, Les Ulis
- Experimental realization of Wheeler's delayed-choice GedankenExperiment, *Science* **315**, 966 (2007)
- T. Hellmut et. al, Delayed-choice experiments in quantum interference, *Phys. Rev A* **72**, 2533 (1987)
- J.A. Wheeler, pp. 182-213 in *Quantum Theory and Measurement*, J.A. Wheeler and W. H. Zurek edit. W. A. Beveratos, R. Brouri, T. Gacoin, (Princeton University Press, 1984)
- 量子光学 松岡 正浩 (著) 東京大学出版会 (1996/09)