

# Experimental free-space quantum teleportation

自由空間量子テレポーテーション実験

Xian-Min Jin, Ji-Gang Ren, Bin Yang, Zhen-Huan Yi,  
Fei Zhou, Xiao-Fan Xu, Shao-Kai Wang, Dong Yang,  
Yuan-Feng Hu, Shuo Jiang, Tao Yang, Hao Yin,  
Kai Chen, Cheng-Zhi Peng & Jian-Wei Pan

Nature Photonics **4**, 376 - 381 (2010)

平野研究室 07-041-037

田中 創吾



# 発表の流れ

---

- 量子テレポーテーションの歴史と本論文の成果
- 予備知識
  - 1光子の偏光状態
  - 量子状態のエンタングルメント
  - 量子テレポーテーション } とは
- 本論文の概要
  - 実験の流れ
  - 測定結果
- 考察、まとめ

# 歴史

## 本論文の実験成果

### 量子テレポーテーション

エンタングルメントと古典情報を用いて量子状態を送信する

- 1997年 初めての量子テレポーテーションの実験に成功

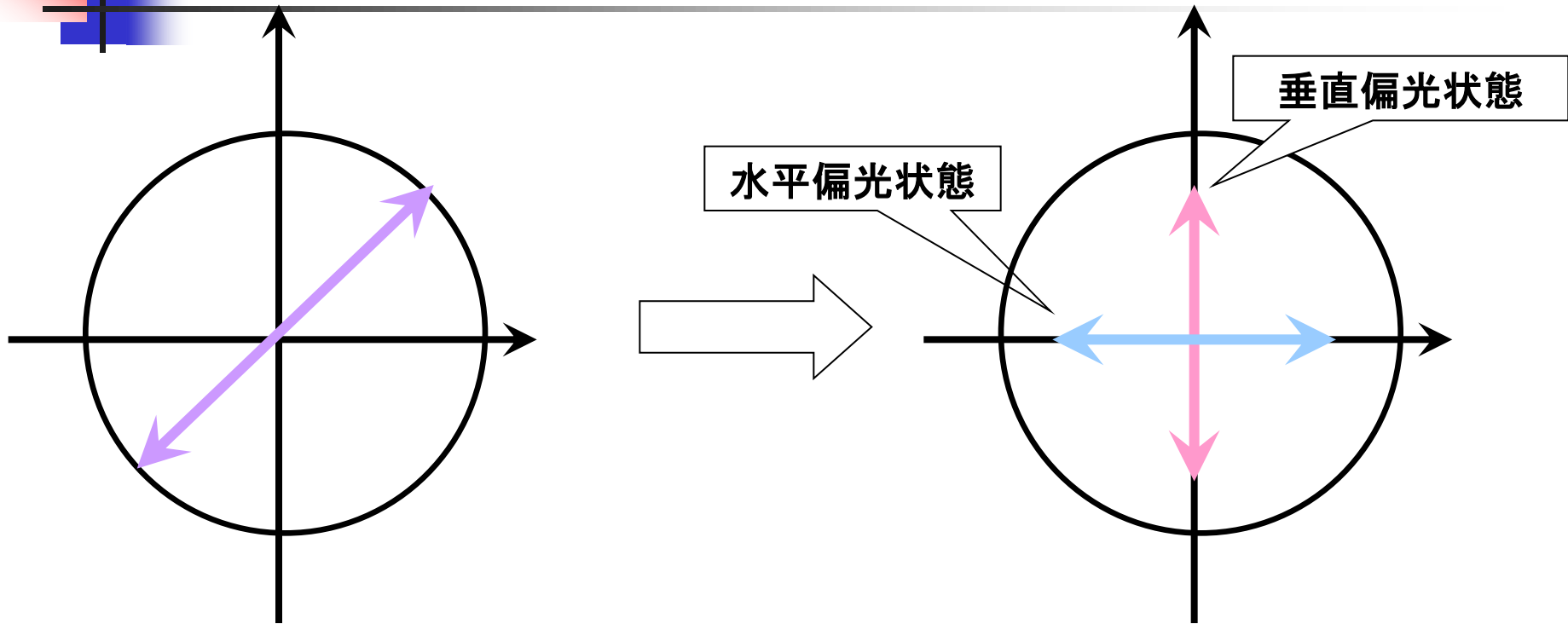
ジュネーブ大学で実施、本論文の筆者の一人(Pan)も参加

- 2004年 ファイバーベースでの600m(ドナウ川横断)の量子テレポーテーションの成功

- 2010年 **本論文**

**長距離間(16km)の自由空間での  
量子テレポーテーションの成功**

# 1光子の偏光状態



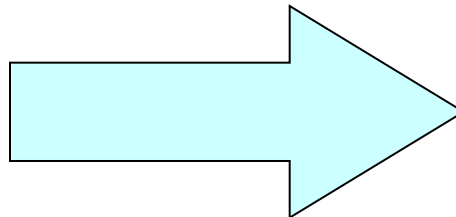
$$|\Psi\rangle_p = \alpha |H\rangle_p + \beta |V\rangle_p$$

$|\rangle$ : ケット 縦ベクトルの表記  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$  ( $\alpha, \beta$ : 複素数)

# 偏光のエンタングルメント

$$|\Phi^-\rangle_{1p2p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \underline{|H\rangle_{1p}} \underline{|V\rangle_{2p}} - \underline{|V\rangle_{1p}} \underline{|H\rangle_{2p}} \right)$$

垂直偏光



垂直偏光

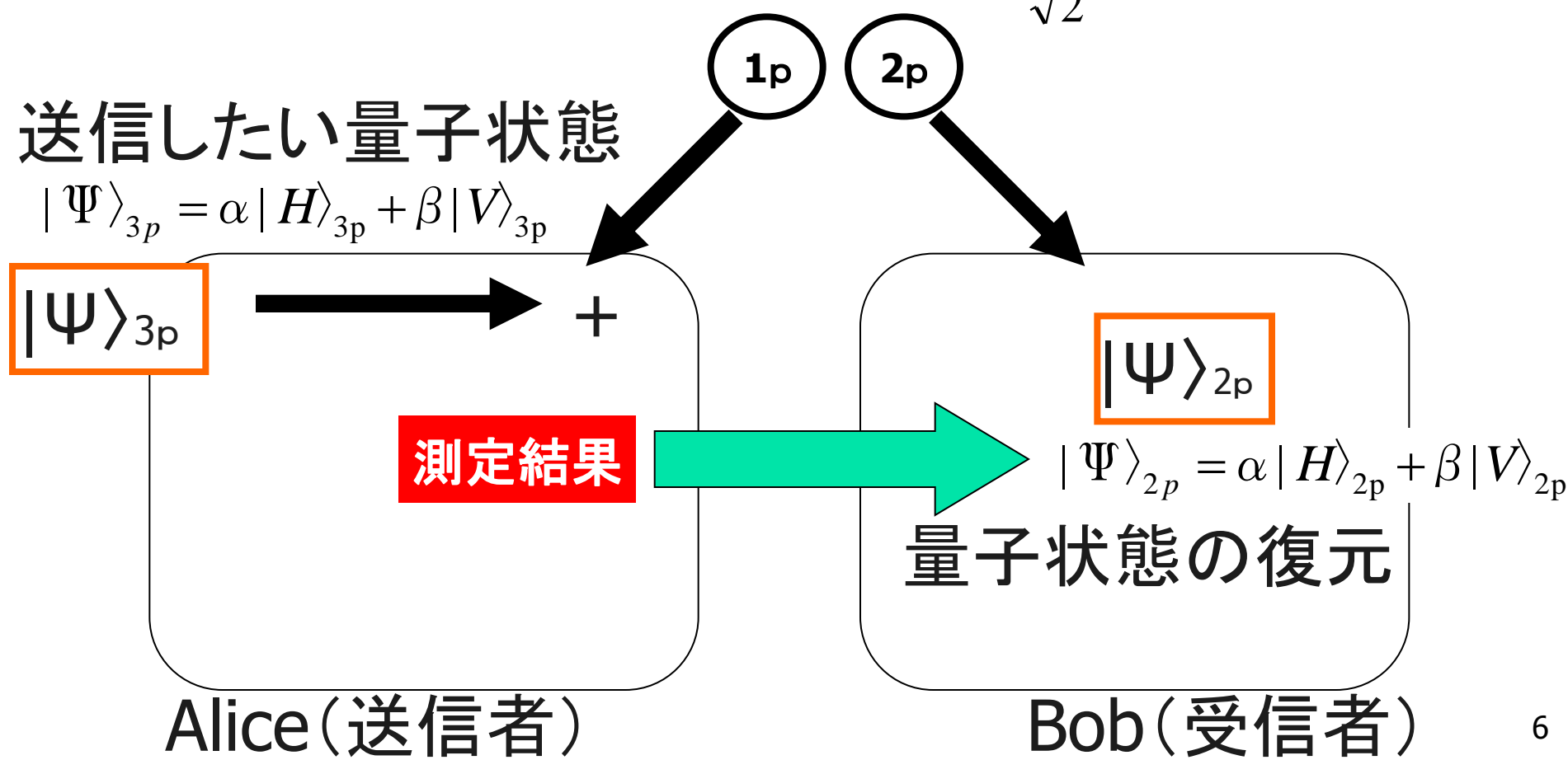
光子1

光子2

とわかるような相関関係を持つ

# 量子テレポーテーションとは

エンタングルメント  $|\Phi^-\rangle_{1p2p} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle_{1p} |V\rangle_{2p} - |V\rangle_{1p} |H\rangle_{2p})$



# 量子テレポーテーション について

送信したい  
任意の偏光状態  $|\Psi\rangle_{3p} = \alpha |H\rangle_{3p} + \beta |V\rangle_{3p}$

エンタングルメント  $|\Phi^-\rangle_{1p2p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p}|V\rangle_{2p} - |V\rangle_{1p}|H\rangle_{2p} \right)$

光子1、光子2、光子3の全体の状態を考える

$$|\Psi\rangle_{3p} |\Phi^-\rangle_{1p2p} = \left( \alpha |H\rangle_{3p} + \beta |V\rangle_{3p} \right) \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p}|V\rangle_{2p} - |V\rangle_{1p}|H\rangle_{2p} \right)$$

ベル状態

$$|\Phi^+\rangle_{1p3p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p}|V\rangle_{3p} + |V\rangle_{1p}|H\rangle_{3p} \right), \quad |\Psi^+\rangle_{1p3p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p}|H\rangle_{3p} + |V\rangle_{1p}|V\rangle_{3p} \right)$$

$$|\Phi^-\rangle_{1p3p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p}|V\rangle_{3p} - |V\rangle_{1p}|H\rangle_{3p} \right), \quad |\Psi^-\rangle_{1p3p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p}|H\rangle_{3p} - |V\rangle_{1p}|V\rangle_{3p} \right)$$

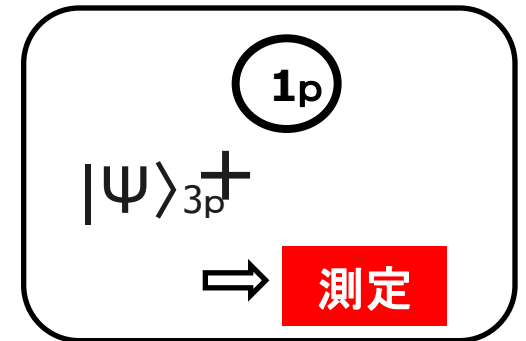
$$\begin{aligned}
& |\Psi\rangle_{3p} |\Phi^-\rangle_{1p2p} \\
&= \frac{1}{2} \left\{ |\Phi^-\rangle_{1p3p} \left( \alpha |H\rangle_{2p} + \beta |V\rangle_{2p} \right) + |\Phi^+\rangle_{1p3p} \left( -\alpha |H\rangle_{2p} + \beta |V\rangle_{2p} \right) \right. \\
&\quad \left. + |\Psi^-\rangle_{1p3p} \left( -\alpha |V\rangle_{2p} + \beta |H\rangle_{2p} \right) + |\Psi^+\rangle_{1p3p} \left( \alpha |V\rangle_{2p} - \beta |H\rangle_{2p} \right) \right\}
\end{aligned}$$

ベル状態

$$\begin{aligned}
|\Phi^+\rangle_{1p3p} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p} |V\rangle_{3p} + |V\rangle_{1p} |H\rangle_{3p} \right), & |\Psi^+\rangle_{1p3p} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p} |H\rangle_{3p} + |V\rangle_{1p} |V\rangle_{3p} \right) \\
|\Phi^-\rangle_{1p3p} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p} |V\rangle_{3p} - |V\rangle_{1p} |H\rangle_{3p} \right), & |\Psi^-\rangle_{1p3p} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p} |H\rangle_{3p} - |V\rangle_{1p} |V\rangle_{3p} \right)
\end{aligned}$$

ベル測定

: 4つのベル状態の  
どの状態にあるのかを測定する。

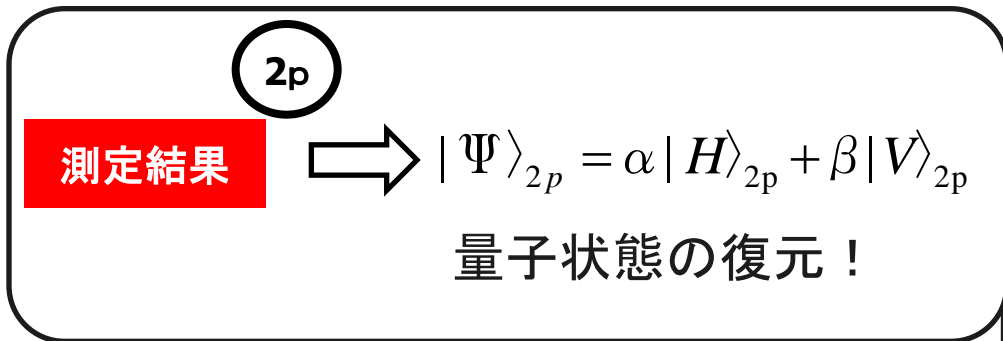
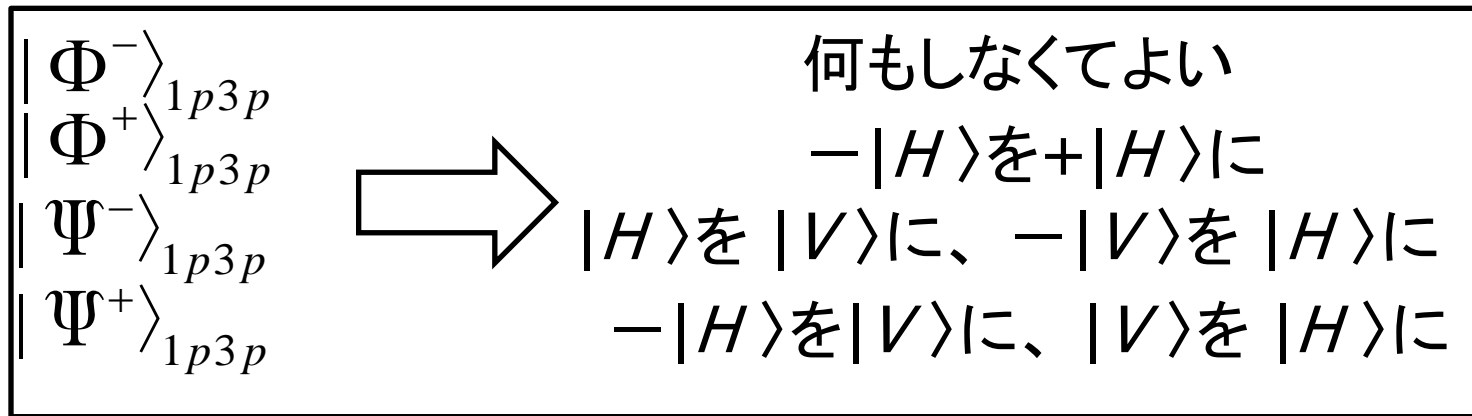


Alice(送信者)

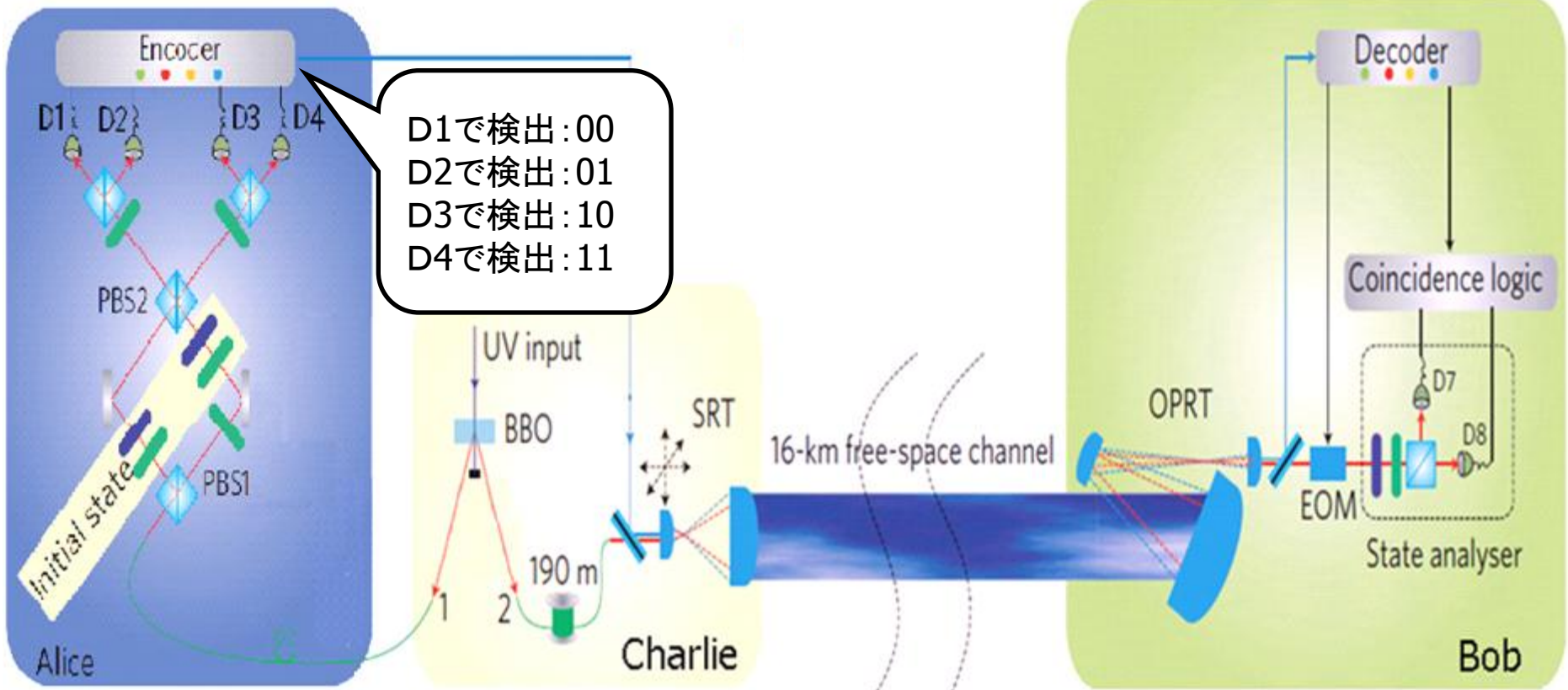


$$= \frac{1}{2} \left\{ |\Phi^-\rangle_{1p3p} (\alpha|H\rangle_{2p} + \beta|V\rangle_{2p}) + |\Phi^+\rangle_{1p3p} (-\alpha|H\rangle_{2p} + \beta|V\rangle_{2p}) \right. \\ \left. + |\Psi^-\rangle_{1p3p} (-\alpha|V\rangle_{2p} + \beta|H\rangle_{2p}) + |\Psi^+\rangle_{1p3p} (\alpha|V\rangle_{2p} - \beta|H\rangle_{2p}) \right\}$$

どの状態であるか分かったら

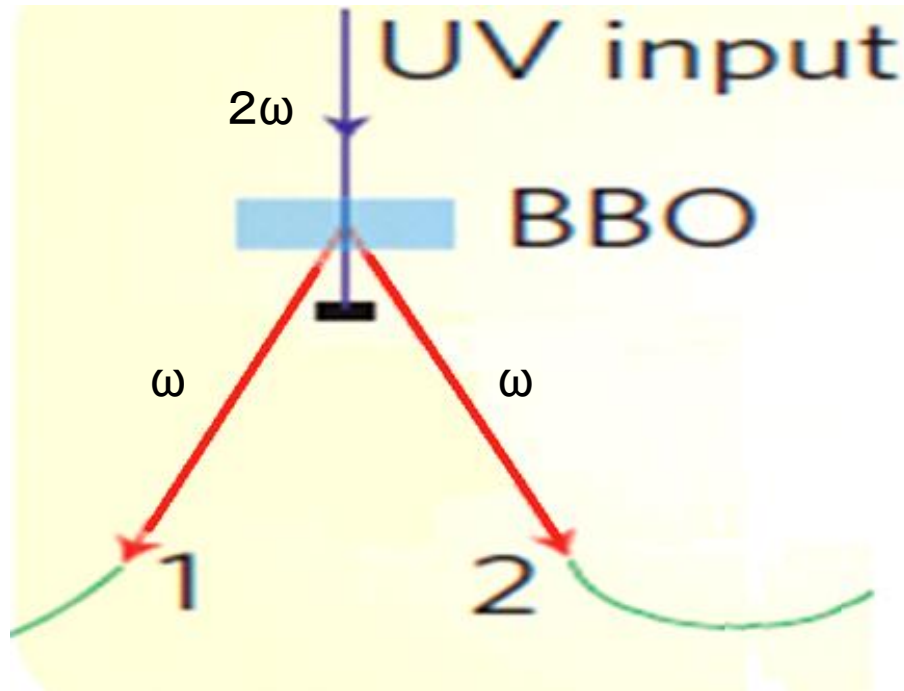


# 本論文の実験系



# Charlieの系

送信者  
**Alice**  $\wedge$

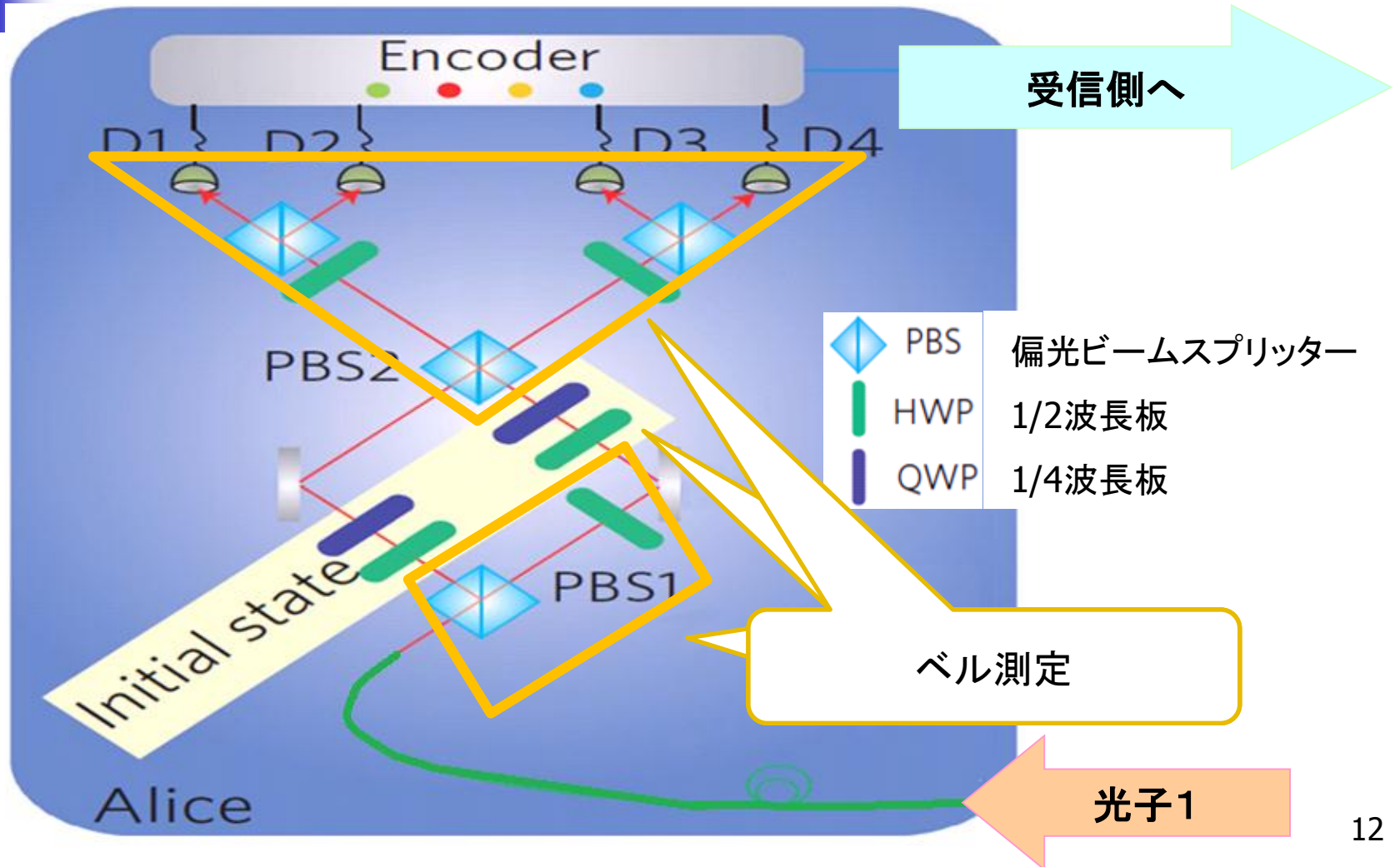


受信者  
**Bob**  $\wedge$



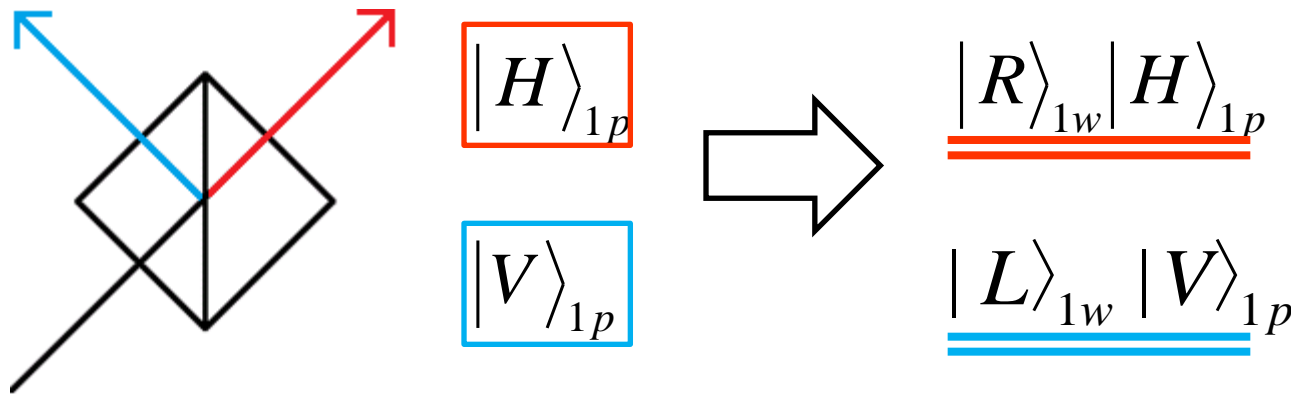
$$|\Psi^-\rangle_{1p2p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p} |V\rangle_{2p} - |V\rangle_{1p} |H\rangle_{2p} \right)$$

# Alice(送信者)の系



# Alice(送信者)の系

$$|\Psi^-\rangle_{1p2p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \boxed{|H\rangle_{1p}} |V\rangle_{2p} - \boxed{|V\rangle_{1p}} |H\rangle_{2p} \right)$$



$$|\Psi^-\rangle_{1w1p2p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \underline{\underline{|R\rangle_{1w} |H\rangle_{1p}}} |V\rangle_{2p} - \underline{\underline{|L\rangle_{1w} |V\rangle_{1p}}} |H\rangle_{2p} \right)$$

1p,2p:光子の偏光状態を示す。(1:送信者 2:受信者)  
 1w:光子のとる光路

# 実験の流れ

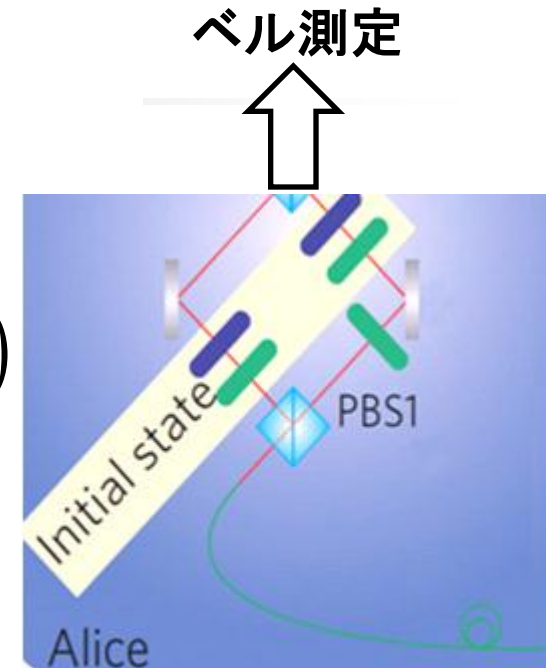
送られてきた状態

$$|\Psi^-\rangle_{1p2p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{1p} |V\rangle_{2p} - |V\rangle_{1p} |H\rangle_{2p} \right)$$

PBS通過後の状態

1pの偏光状態を光路によってわけ、  
状態を書き換える

$$|\Psi^-\rangle_{1w1p2p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |R\rangle_{1w} |H\rangle_{1p} |V\rangle_{2p} - |L\rangle_{1w} |V\rangle_{1p} |H\rangle_{2p} \right)$$





# ベル測定を行う

測定前の状態

$$|\Psi^-\rangle_{1w1p2p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \alpha |H\rangle_{1p} + \beta |V\rangle_{1p} \right) \left( |R\rangle_{1w} |V\rangle_{2p} - |L\rangle_{1w} |H\rangle_{2p} \right)$$

ベル状態

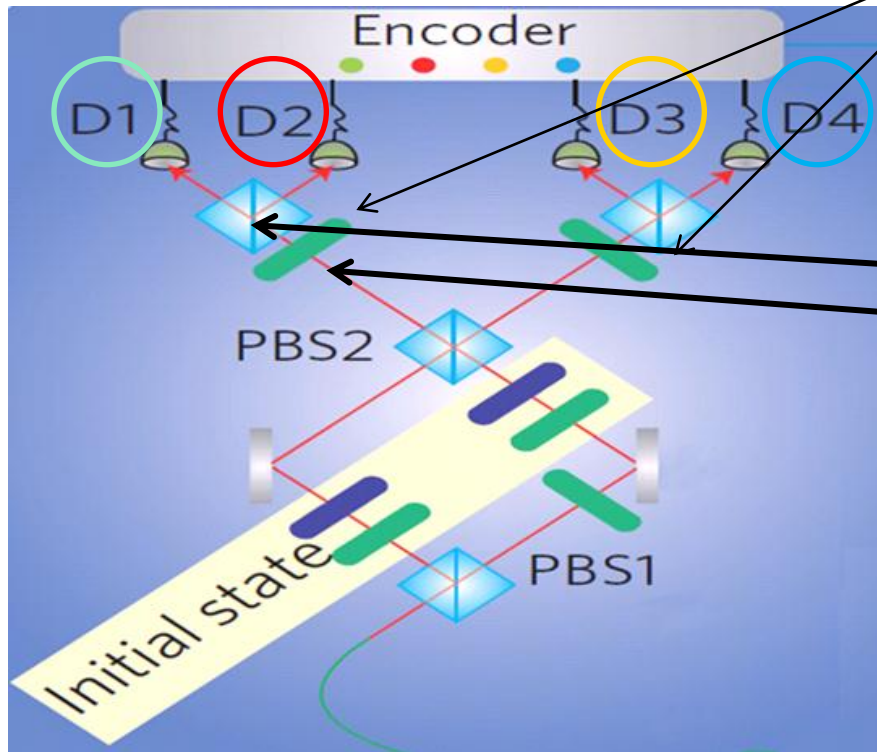
$$|\Phi^\pm\rangle_{1w1p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |R\rangle_{1w} |V\rangle_{1p} \pm |L\rangle_{1w} |H\rangle_{1p} \right)$$

$$|\Psi^\pm\rangle_{1w1p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |R\rangle_{1w} |H\rangle_{1p} \pm |L\rangle_{1w} |V\rangle_{1p} \right) \quad \text{とすると}$$

測定の前は

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ |\Phi^-\rangle_{1w1p} \left( \alpha |H\rangle_{2p} + \beta |V\rangle_{2p} \right) - |\Phi^+\rangle_{1w1p} \left( \alpha |H\rangle_{2p} - \beta |V\rangle_{2p} \right) \right. \\ \left. + |\Psi^-\rangle_{1w1p} \left( -\alpha |V\rangle_{2p} + \beta |H\rangle_{2p} \right) + |\Psi^+\rangle_{1w1p} \left( \alpha |V\rangle_{2p} - \beta |H\rangle_{2p} \right) \right\}$$

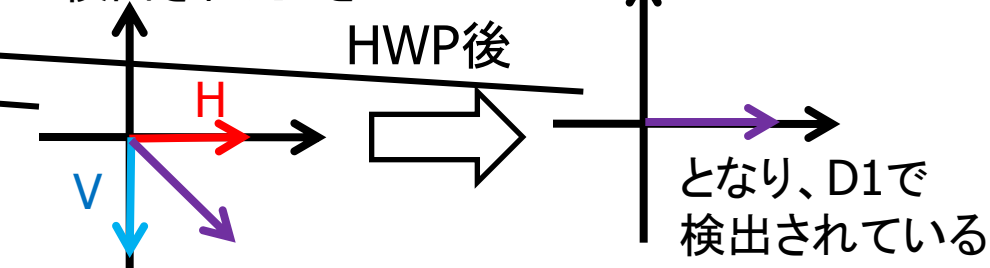
# PBS2以降の操作



HWPを+45°  
偏光を傾けるように設定する

$$|\Psi^-\rangle_{1w1p} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|R\rangle_{1w}|H\rangle_{1p} - |L\rangle_{1w}|V\rangle_{1p})$$

が検出されたとき



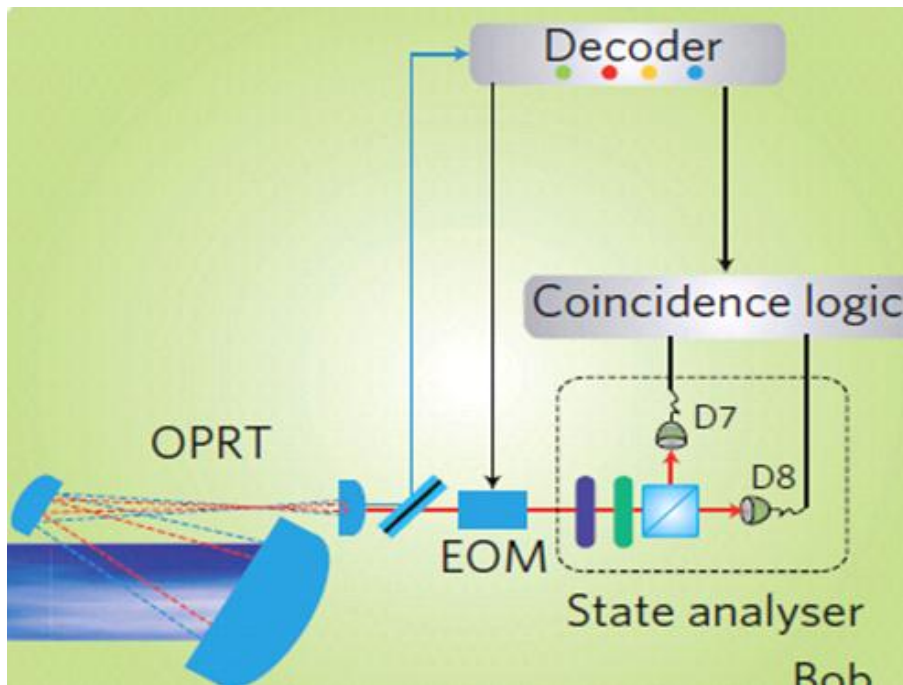
となり、D1で  
検出されている

- D1  $|\Psi^-\rangle_{1w1p}$
  - D2  $|\Psi^+\rangle_{1w1p}$
  - D3  $|\Phi^+\rangle_{1w1p}$
  - D4  $|\Phi^-\rangle_{1w1p}$
- が検出される



# Bob (受信) 側での操作

測定結果により  
光子2の偏光をEOMにより操作



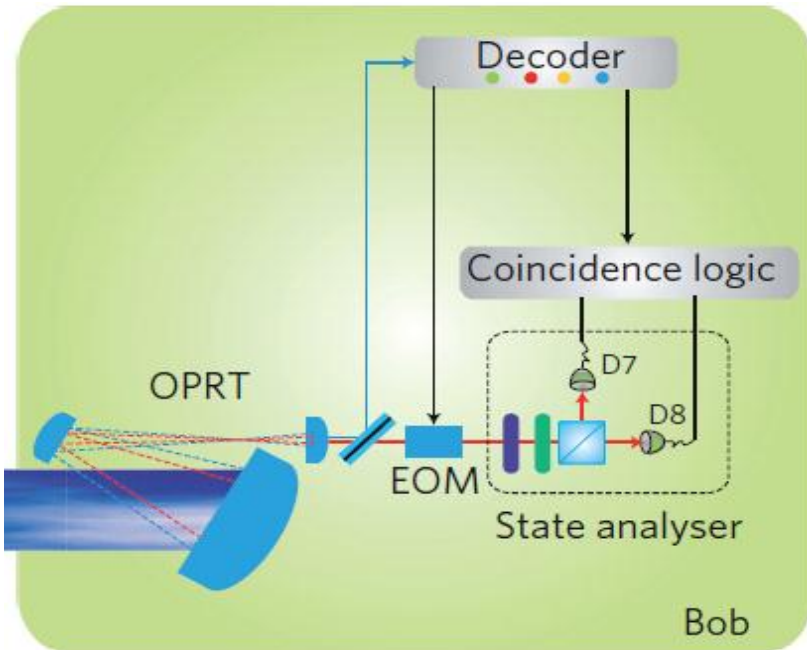
$ \Phi^-\rangle_{1w1p}$	$\Rightarrow$ 何もしなくてよい
$ \Phi^+\rangle_{1w1p}$	$\Rightarrow - V\rangle$ を $+ V\rangle$ に
$ \Psi^-\rangle_{1w1p}$	$\Rightarrow  H\rangle$ を $ V\rangle$ に、 $- V\rangle$ を $ H\rangle$ に
$ \Psi^+\rangle_{1w1p}$	$\Rightarrow - H\rangle$ を $ V\rangle$ に、 $ V\rangle$ を $ H\rangle$ に

$$|\Psi^-\rangle_{2p} = \alpha|H\rangle_{2p} + \beta|V\rangle_{2p}$$

となり、光子2の偏光状態が  
送信したかった偏光状態に！

# 実験結果

# 実験結果



一般の偏光状態

$$|\Psi^-\rangle_{1p} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha|H\rangle_{1p} + \beta|V\rangle_{1p})$$

⇒ 代表的な偏光状態を選んで実験

送信した偏光状態	$ H\rangle$
D7で $ H\rangle$ を測定	2,936
D8で $ V\rangle$ を測定	225
$ H\rangle$	
$ V\rangle$	

送信する状態  $|\Psi\rangle_{1p}$  を  $|H\rangle$  に設定

$|H\rangle$  のときはD7でカウント、

$|V\rangle$  のときはD8でカウントするように設定する

$|H\rangle$  のときはD8でカウント、

$|V\rangle$  のときはD7でカウントするように設定する

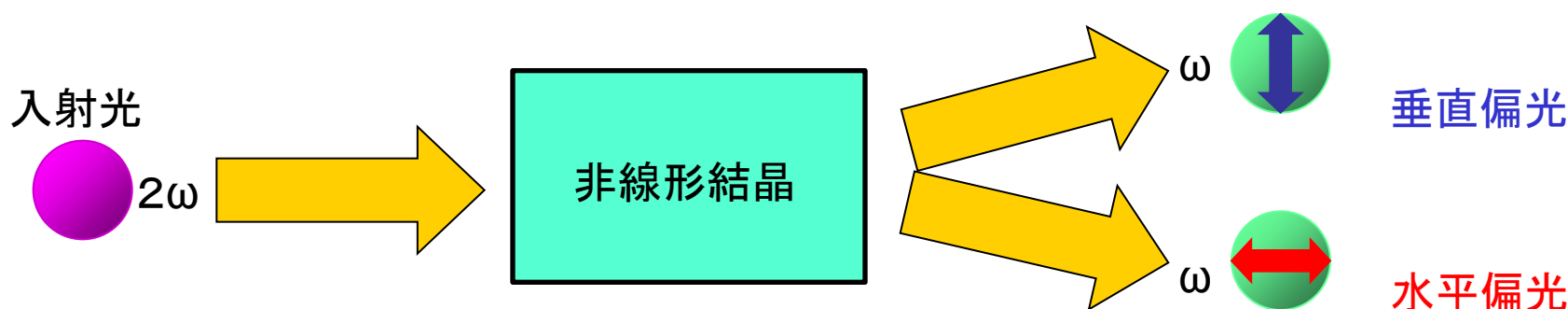


# 考察及びまとめ

---

- 自由空間での量子テレポーテーションができた
  - **16km**で自由空間量子テレポーテーションの成功
- 今後の活用
  - 実効的に大気圏を突破する距離である、**16km**を超えたので衛星通信技術として用いられるかもしれない。

# パラメトリック下方変換



## パラメトリック下方変換

非線形結晶に入射した高い周波数の光子が、低い周波数の2光子に変換される現象。

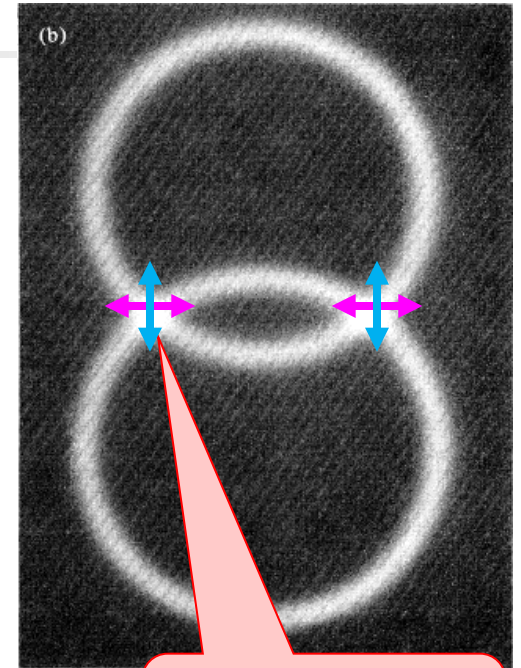
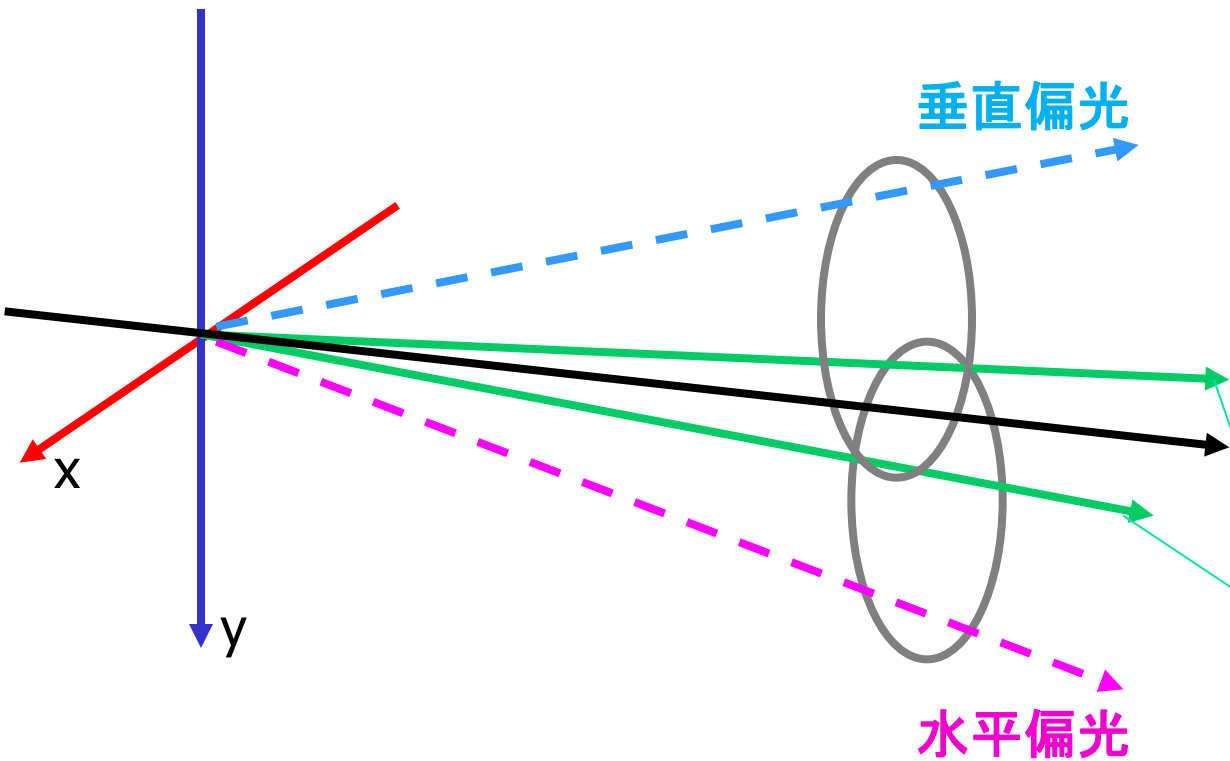
( $2\omega$ の光子1つ $\Rightarrow\omega$ の光子2つに。)

エネルギー、運動量は保存される。

この現象は第2次高調波発生 (SHG) の逆過程。



# パラメトリック下方変換



垂直、水平偏光  
の重ね合わせ

偏光エンタングル  
光子対の方向

# フィデリティー

$$F = 1 / (1 + \sqrt{C'_7 C_8 / C_7 C'_8})$$

このような式で表せる指標のこと

⇒すべて再生できていたら

$$C_7 C'_8 = 0 \text{ となり、}$$

$$F = 1 \text{ になる}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_7 : D7 \text{ で検出した } |\Psi^-\rangle_{1p} \\ C_8 : D8 \text{ で検出した } |\Psi^-\rangle_{1p}^\perp \\ C'_7 : D7 \text{ で検出した } |\Psi^-\rangle_{1p}^\perp \\ C'_8 : D8 \text{ で検出した } |\Psi^-\rangle_{1p} \end{array} \right. \text{ の光子数}$$

$$F \geq \frac{2}{3} \text{ のとき量子テレポーテーションが成功 } \left( \frac{2}{3} : \text{古典限界} \right)$$

⇒テレポーテーションができず、ランダムであったら

フィデリティーは2/3を超えることはない

**今回の実験では89パーセントだった。**