

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

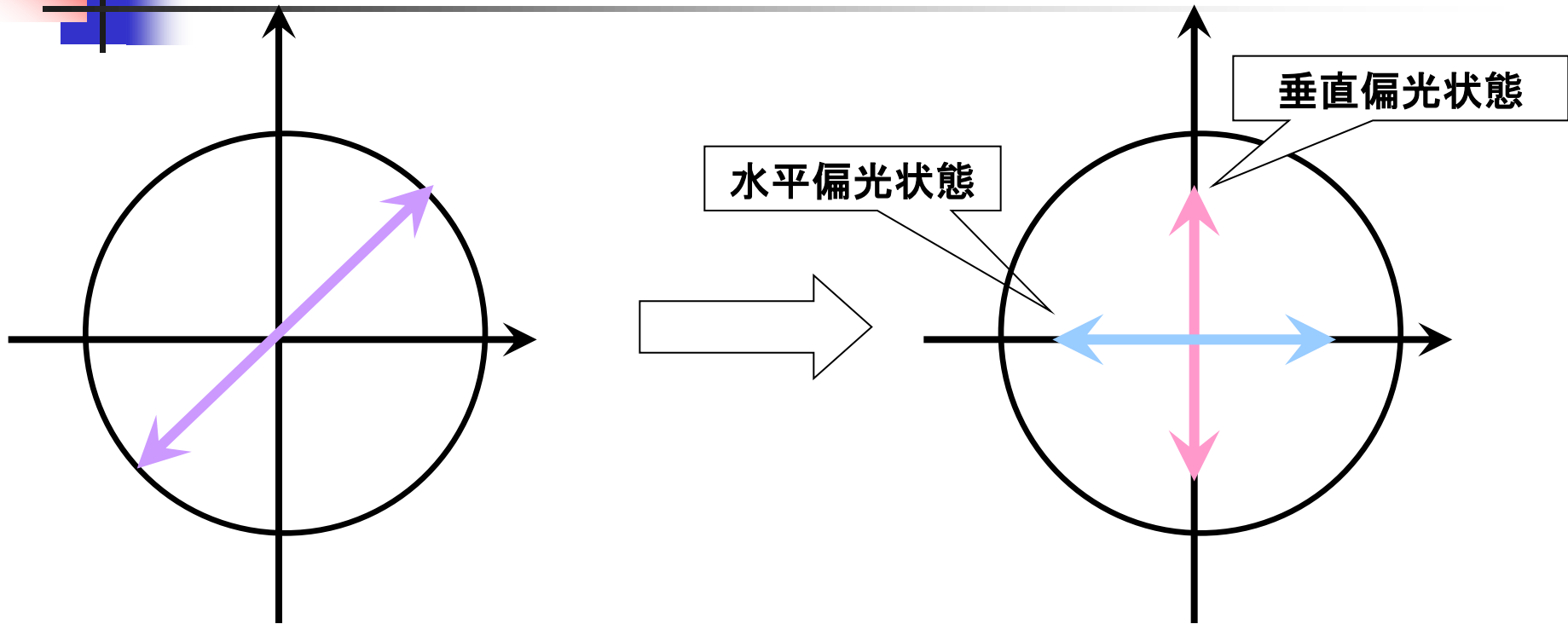
ジュネーブ大学で実施、本論文の筆者の一人(Pan)も参加

- 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



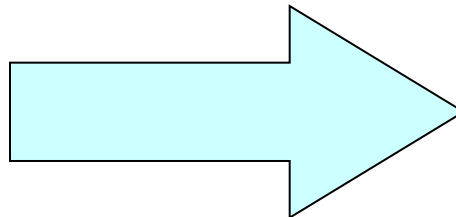
$$|\Psi\rangle_p = \alpha |H\rangle_p + \beta |V\rangle_p$$

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

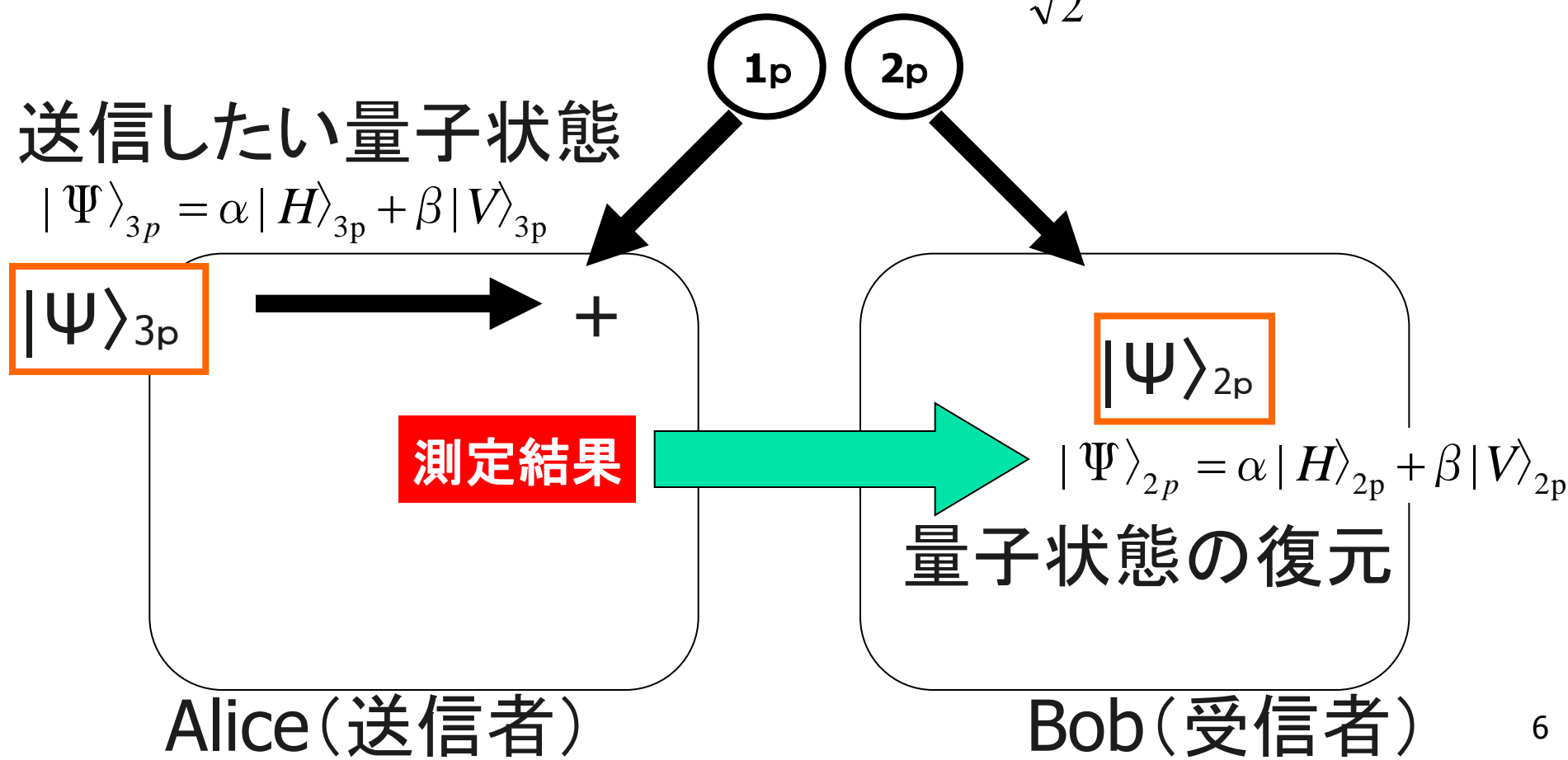
光子1

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

光子1、光子2、光子3の全体の状態を考える

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

ベル状態

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

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

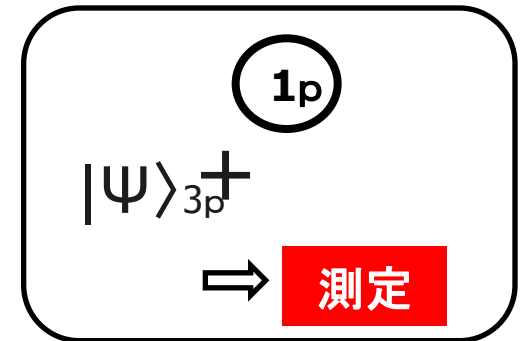
$$\begin{aligned}
& |\Psi\rangle_{3p} |\Phi^-\rangle_{1p2p} \\
&= \frac{1}{2} \left\{ |\Phi^-\rangle_{1p3p} \left(\alpha |H\rangle_{2p} + \beta |V\rangle_{2p} \right) + |\Phi^+\rangle_{1p3p} \left(-\alpha |H\rangle_{2p} + \beta |V\rangle_{2p} \right) \right. \\
&\quad \left. + |\Psi^-\rangle_{1p3p} \left(-\alpha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

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

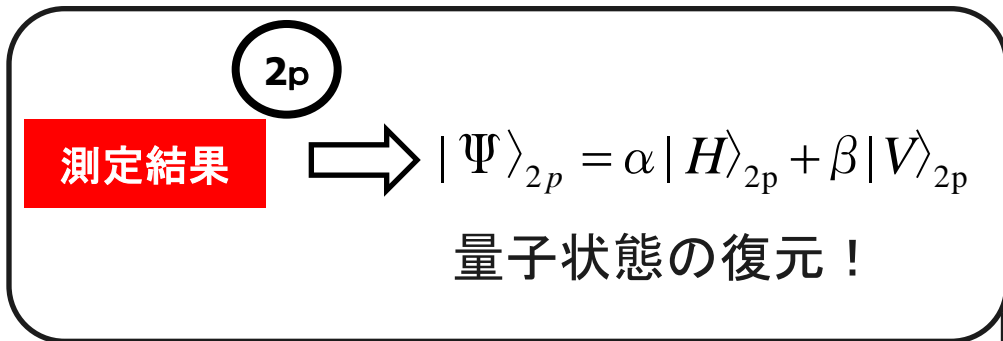
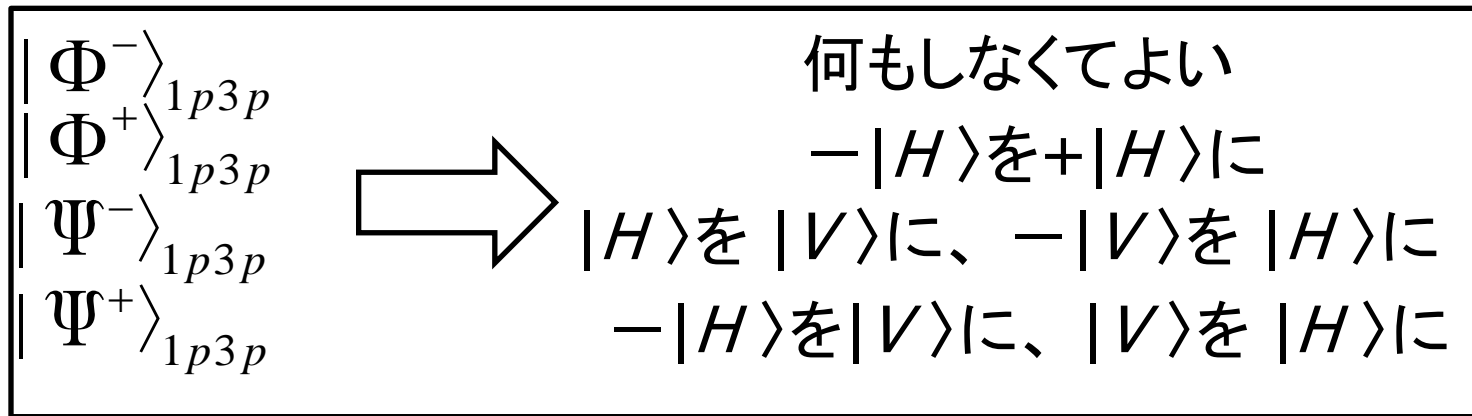
: 4つのベル状態の
どの状態にあるのかを測定する。



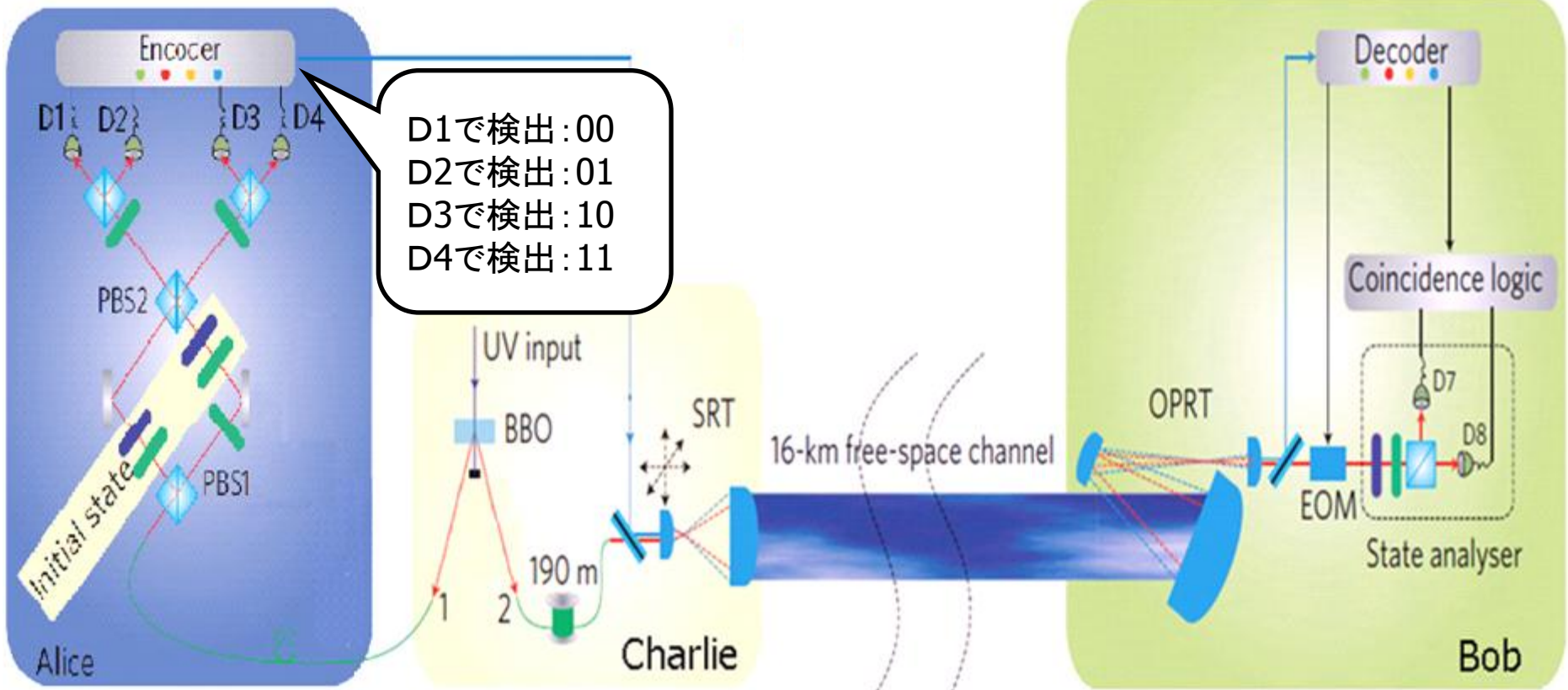
Alice(送信者)

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

どの状態であるか分かったら

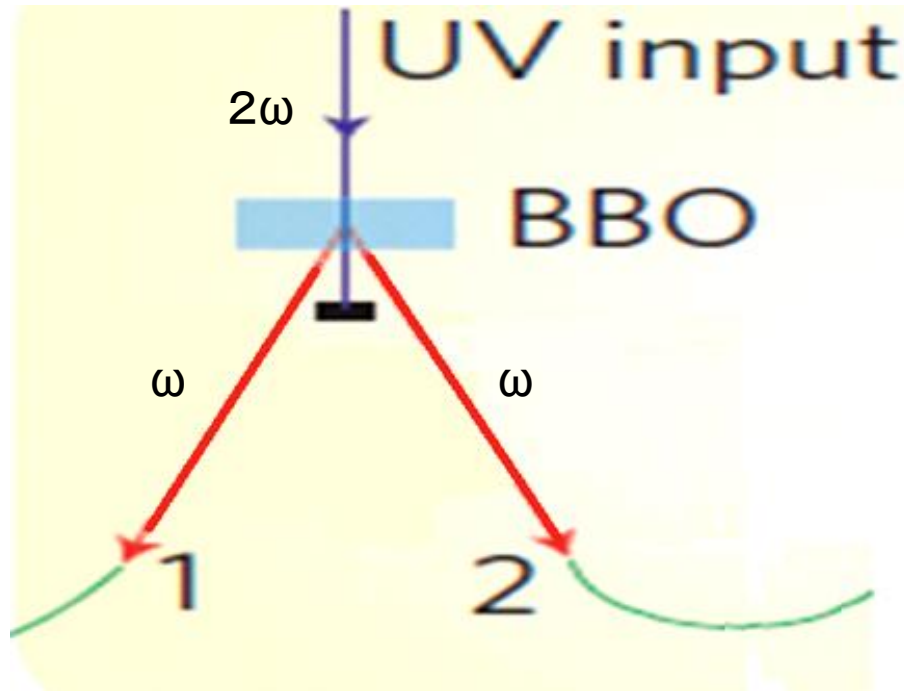


本論文の実験系



Charlieの系

送信者
Alice \wedge

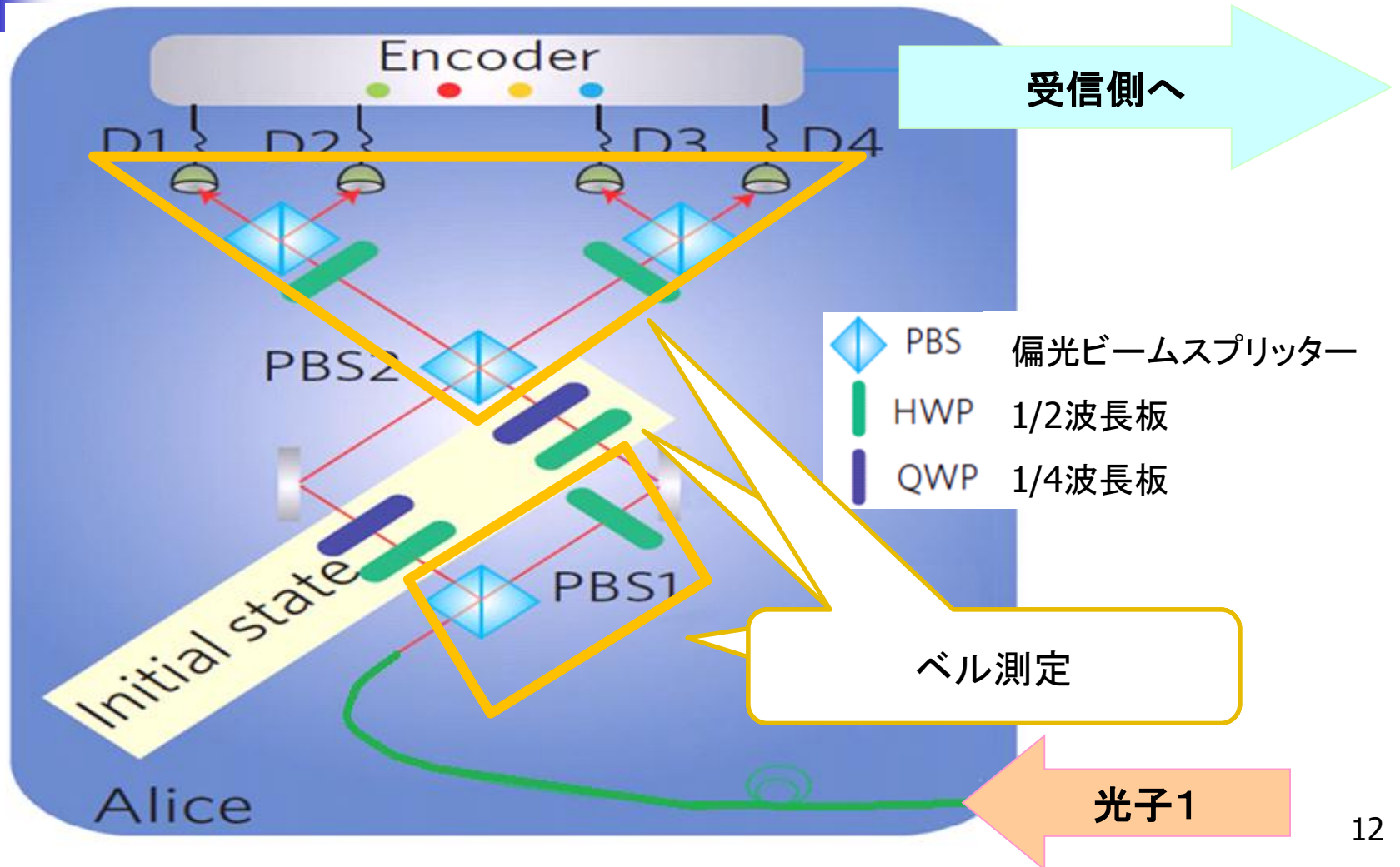


受信者
Bob \wedge



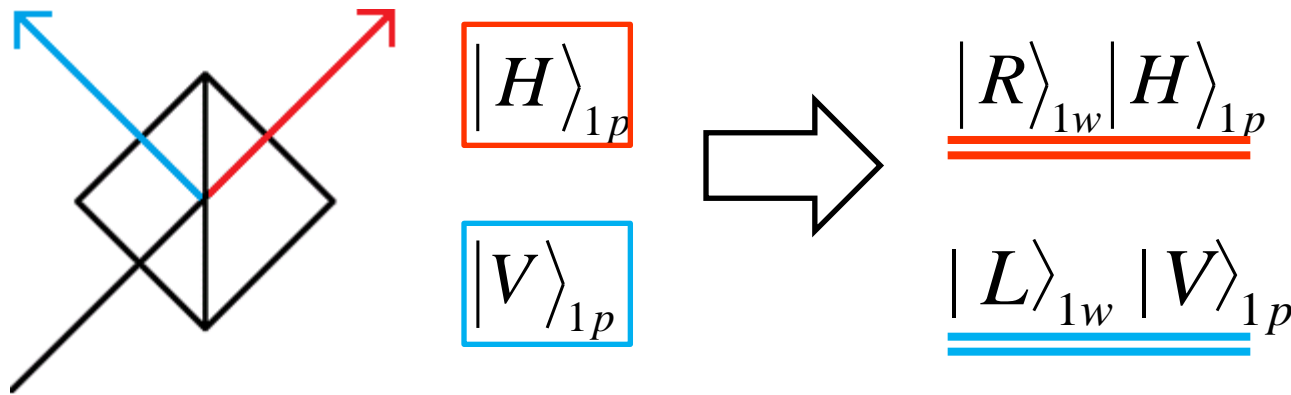
$$|\Psi^-\rangle_{1p2p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|H\rangle_{1p} |V\rangle_{2p} - |V\rangle_{1p} |H\rangle_{2p} \right)$$

Alice(送信者)の系



Alice(送信者)の系

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



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

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

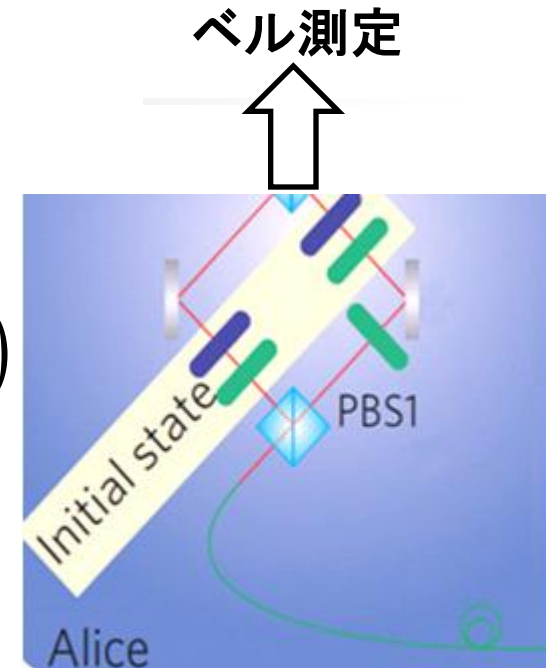
送られてきた状態

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

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

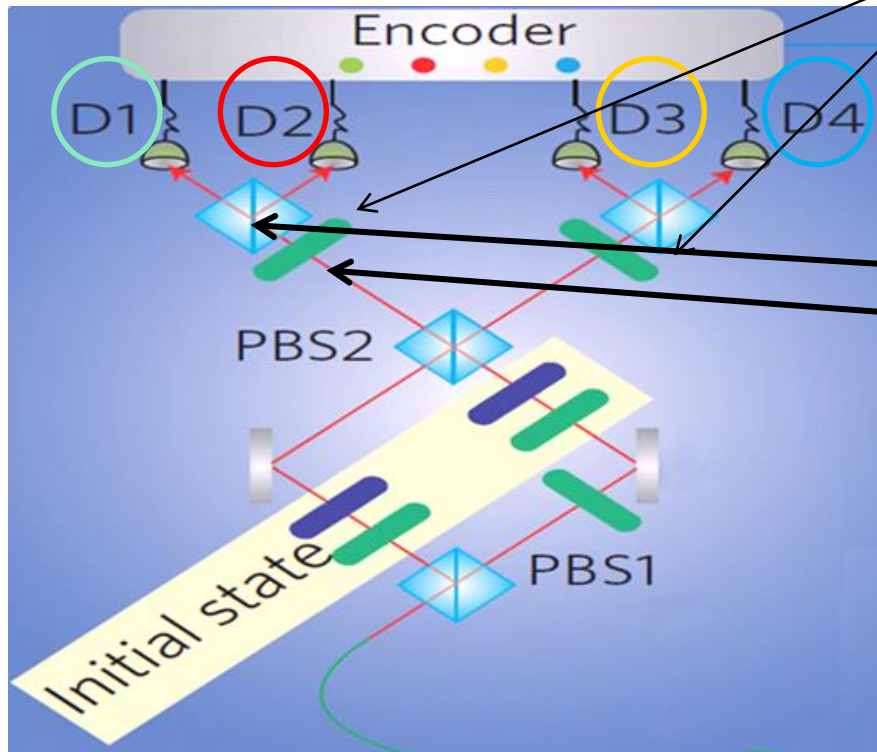
$$|\Phi^\pm\rangle_{1w1p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|R\rangle_{1w} |V\rangle_{1p} \pm |L\rangle_{1w} |H\rangle_{1p} \right)$$

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

測定の前は

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

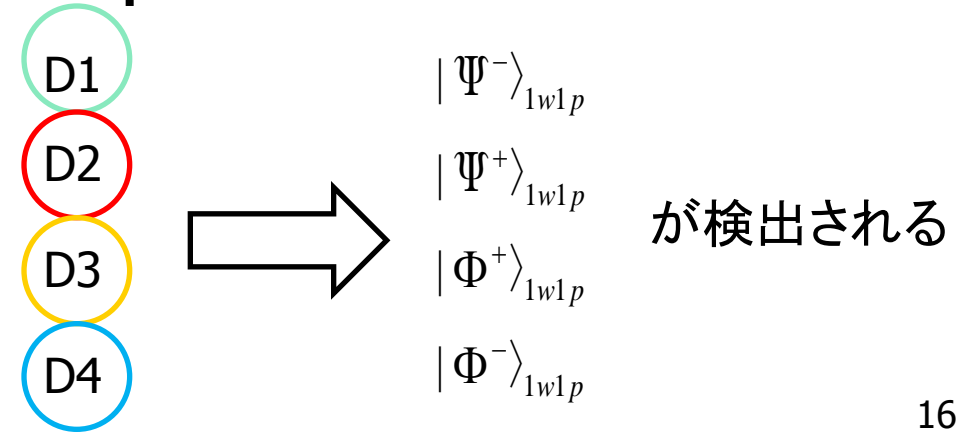
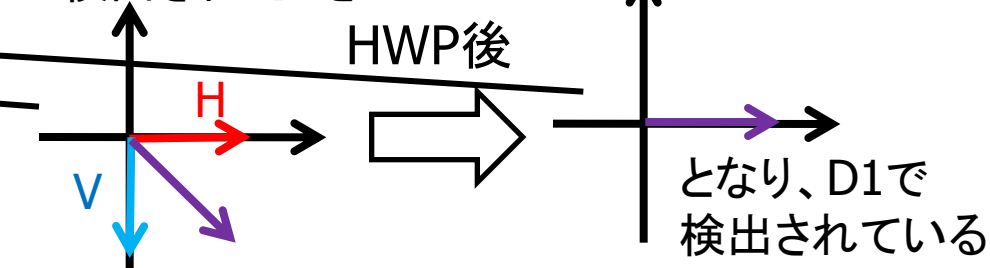
PBS2以降の操作



HWPを+45°
偏光を傾けるように設定する

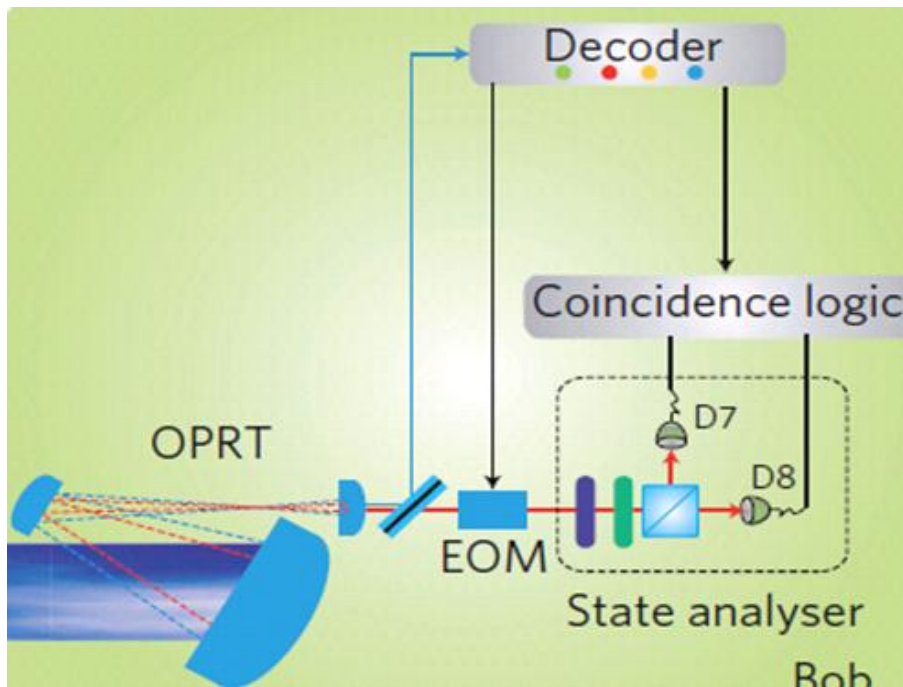
$$|\Psi^-\rangle_{1w1p} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|R\rangle_{1w}|H\rangle_{1p} - |L\rangle_{1w}|V\rangle_{1p})$$

が検出されたとき



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



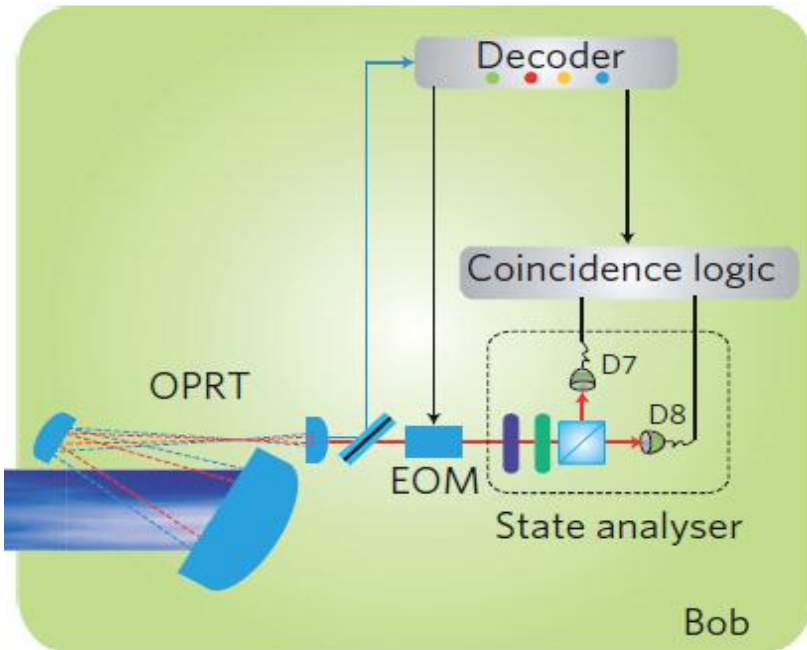
$ \Phi^-\rangle_{1w1p}$	\Rightarrow 何もしなくてよい
$ \Phi^+\rangle_{1w1p}$	$\Rightarrow - V\rangle$ を $+ V\rangle$ に
$ \Psi^-\rangle_{1w1p}$	$\Rightarrow H\rangle$ を $ V\rangle$ に、 $- V\rangle$ を $ H\rangle$ に
$ \Psi^+\rangle_{1w1p}$	$\Rightarrow - H\rangle$ を $ V\rangle$ に、 $ V\rangle$ を $ H\rangle$ に

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

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

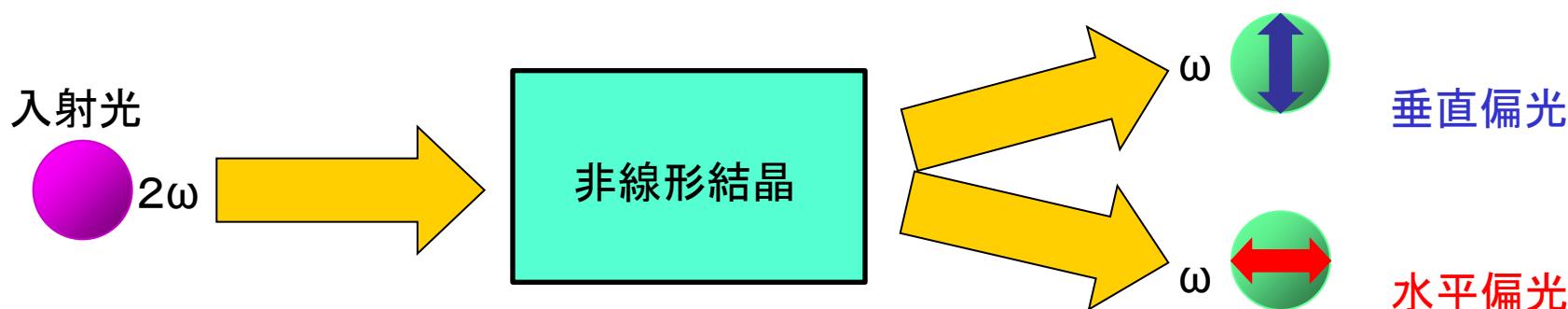
送信した偏光状態	$ H\rangle$	送信する状態 $ \Psi\rangle_{1p}$ を $ H\rangle$ に設定
D7で $ H\rangle$ を測定	2,936	$ H\rangle$ のときはD7でカウント、 $ V\rangle$ のときはD8でカウントするように設定する
D8で $ V\rangle$ を測定	225	
$ H\rangle$		$ H\rangle$ のときはD8でカウント、 $ V\rangle$ のときはD7でカウントするように設定する
$ V\rangle$		



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。

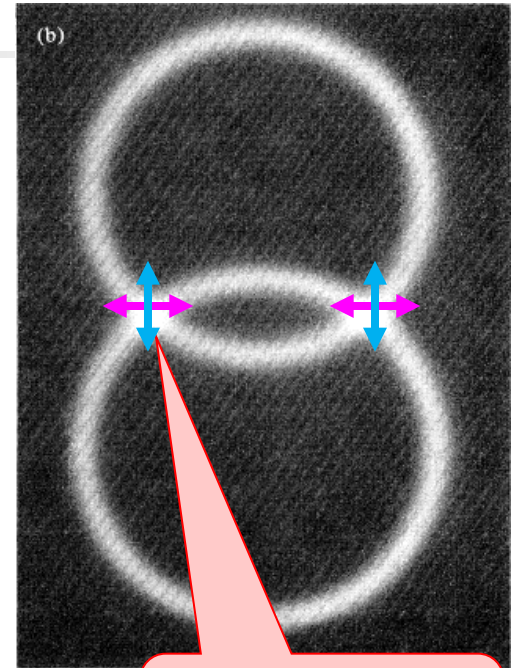
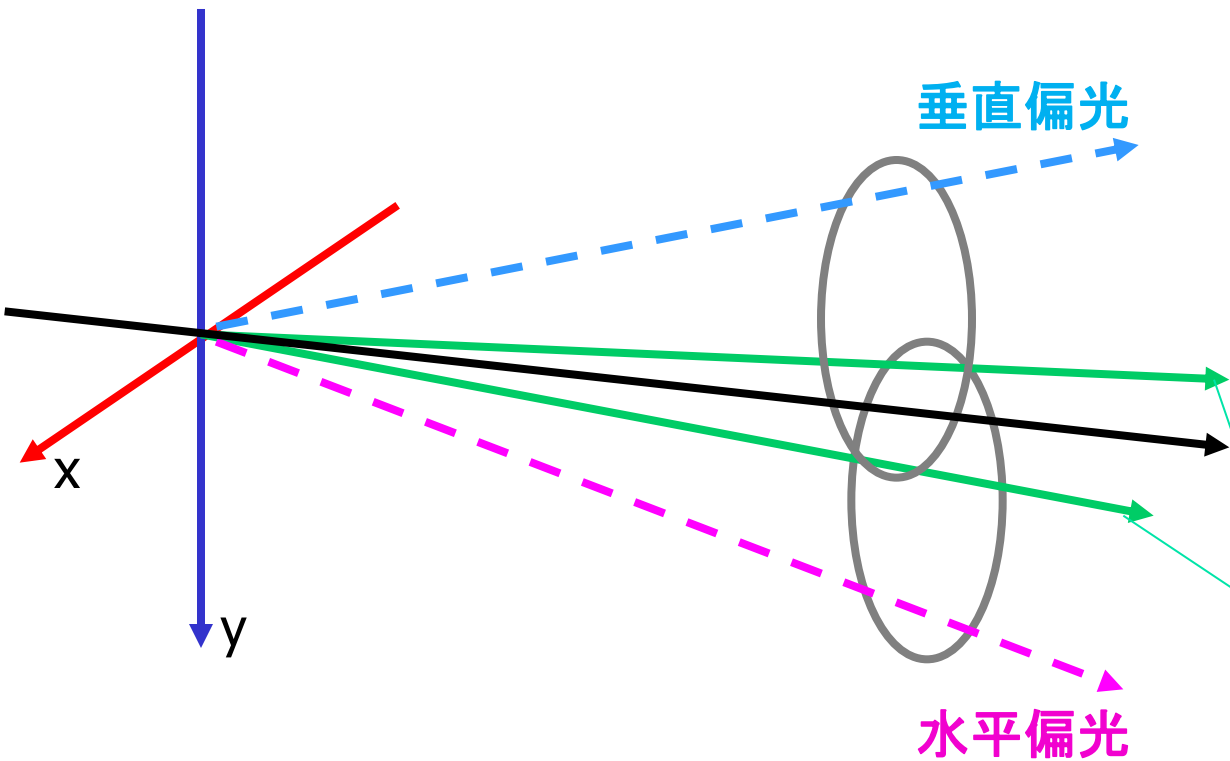
(2ω の光子1つ $\Rightarrow\omega$ の光子2つに。)

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。