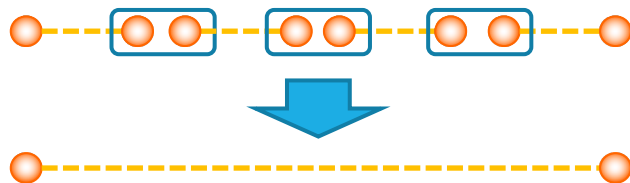




Q-LEAP 人材育成プログラム
量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム

Hamiltonian



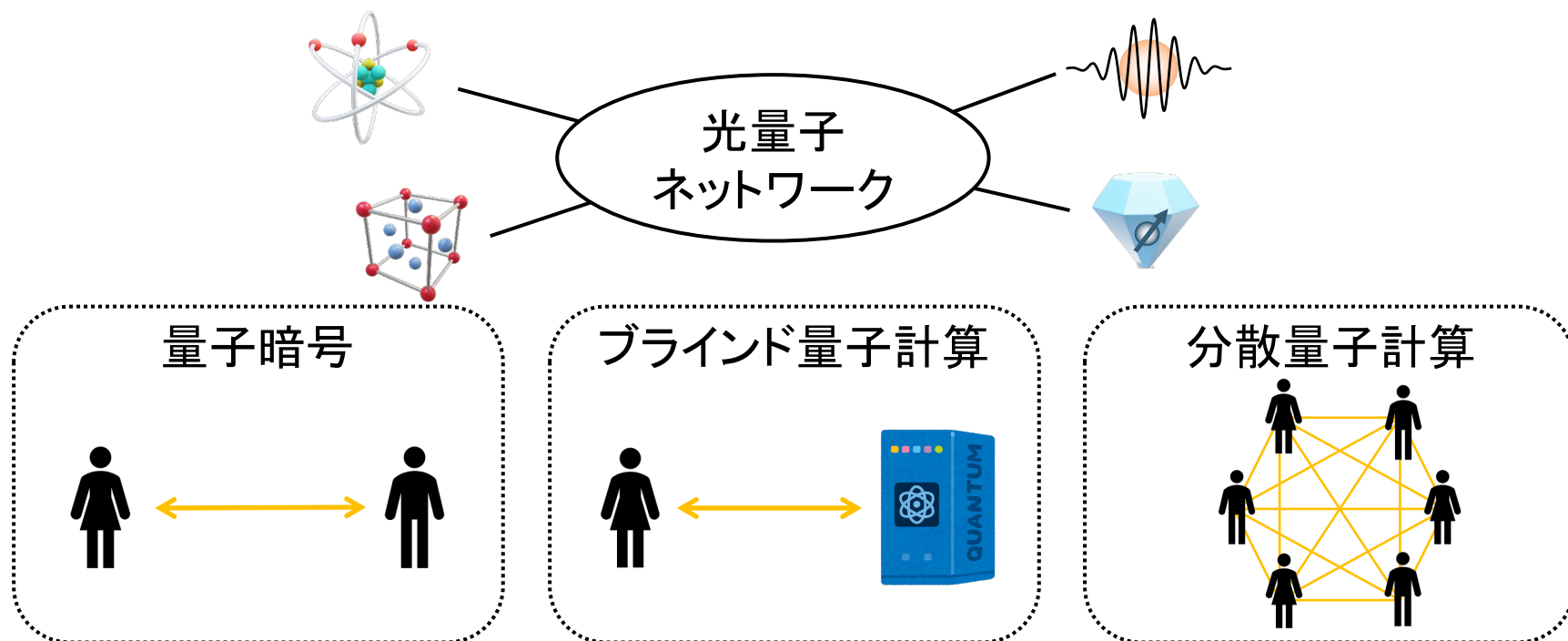
量子通信

大阪大学
生田 力三

$|0\rangle + |1\rangle$

1. 導入

- 情報通信では、(役割の異なる)複数の人物が登場する
送信者と受信者、クライアントとサーバ、マルチユーザ、盗聴者
- 光は量子情報を遠方に伝送できる唯一の物理系 (武田先生の講義参照)
- 量子通信により、「ビット」ではなく「量子ビット」の情報ネットワークへ

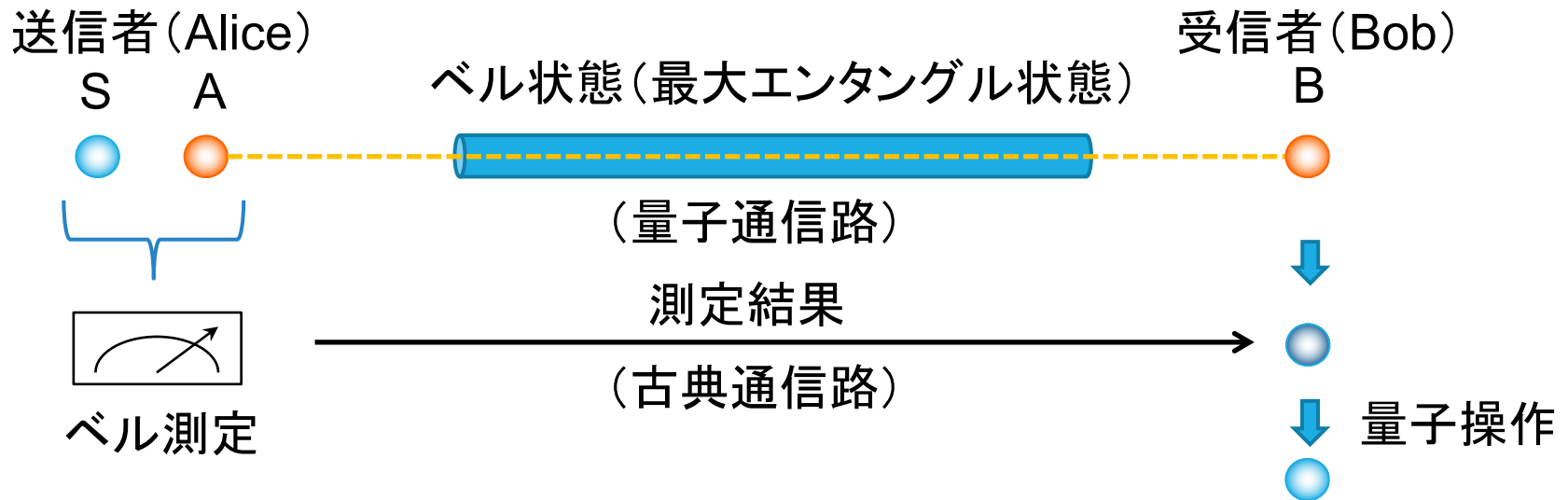


1. 導入

- 未知の量子情報は複製できないため光増幅器が使えない



- 量子テレポーテーションに基づく量子ビット転送



エンタングル状態を共有するためのシステム構築を目指す

2. 量子ビット

- Single-rail, Dual-rail 量子ビット (武田先生の講義参照)
- Dual-rail 量子ビット: $|0_L\rangle = |1\rangle_H|0\rangle_V$, $|1_L\rangle = |0\rangle_H|1\rangle_V$
- 誤解がない場合、単に $|0_L\rangle = |H\rangle$, $|1_L\rangle = |V\rangle$ と表記することも
- さらに付加的なラベルを併記することもある: $|H\rangle_A|V\rangle_B$

	偏光	経路	Time-bin	周波数
基底	$\{ H\rangle, V\rangle\}$	$\{ path_A\rangle, path_B\rangle\}$	$\{ e\rangle, l\rangle\}$	$\{ \omega_A\rangle, \omega_B\rangle\}$

以降では主に偏光量子ビットで議論

- A-B 間で共有された偏光自由度の最大エンタングル状態

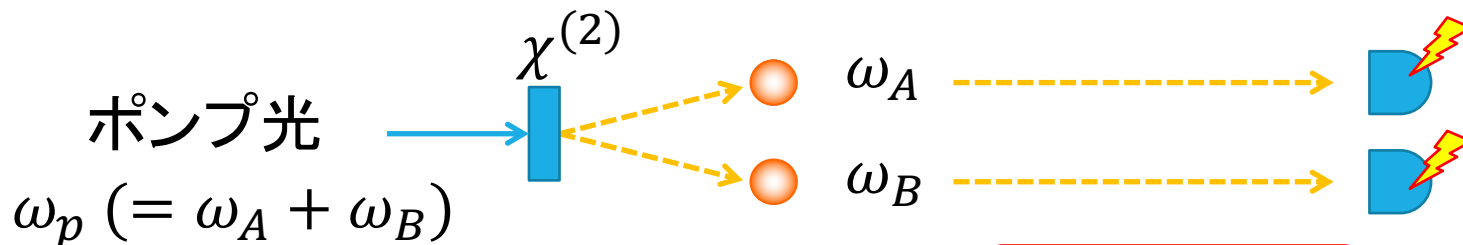


$$|\phi^+\rangle_{AB} = (|H\rangle_A|H\rangle_B + |V\rangle_A|V\rangle_B)/\sqrt{2}$$

3. 初期化

光子／光子対の生成：非線形光学効果（武田先生の講義参照）

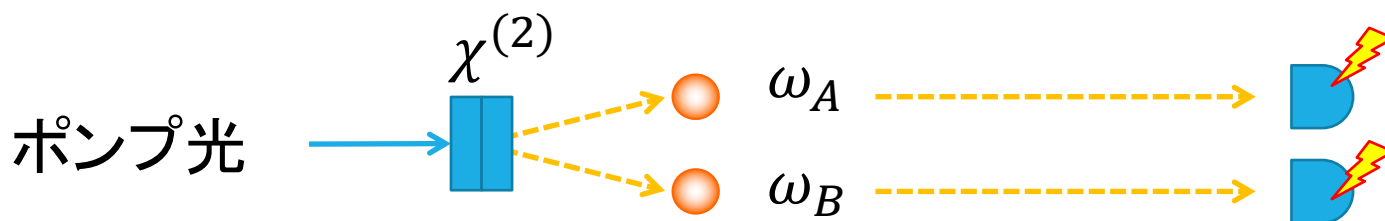
- 典型手法：自発的パラメトリック下方変換（SPDC）



$$|0\rangle_{H,A}|0\rangle_{H,B} + \boxed{\varepsilon|1\rangle_{H,A}|1\rangle_{H,B}} + O(\varepsilon^2)$$

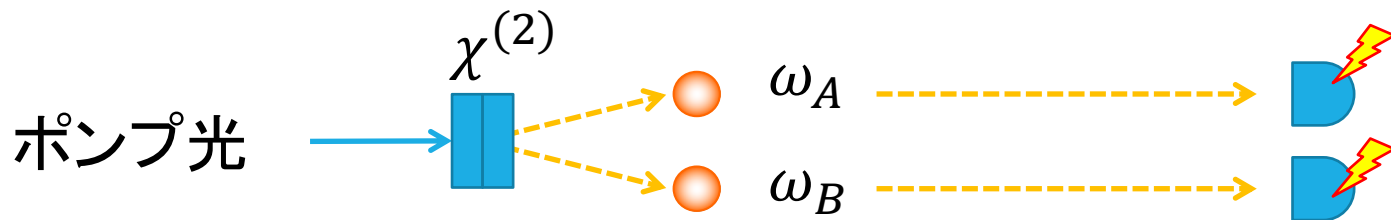
A-B間に特定の偏光モード(H)の光子対を生成 ($\varepsilon \ll 1$)

- 直交する偏光2モードのSPDCの重ね合わせ [PRA(R) **60**, R773 (1999)]



$$|0\rangle_A|0\rangle_B + \boxed{\varepsilon|H\rangle_A|H\rangle_B + \varepsilon|V\rangle_A|V\rangle_B} + O(\varepsilon^2)$$

3. 初期化



- モード B の光子検出により、モード A に単一の偏光光子を準備

$$(\alpha\langle H|_B + \beta\langle V|_B)|\phi^+\rangle_{AB} \rightarrow \alpha|H\rangle_A + \beta|V\rangle_A$$

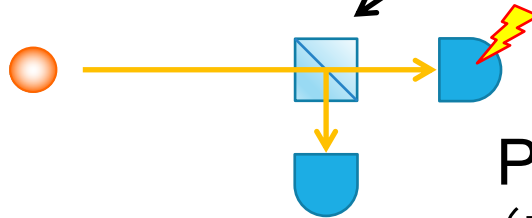
伝令付単一光子

- A, Bに光子が検出された元では、初期状態が $|\phi^+\rangle_{AB}$ に準備(初期化)され、それが量子通信路を經由し、最終的に光子検出された、という見方もできる → 事後選択
- (特に)事後選択に基づく初期化の場合、期待する初期化ができていないかを注意深くチェックする必要がある

4. 測定

- $\sigma_Z = |H\rangle\langle H| - |V\rangle\langle V|$ の射影測定

$$\alpha|H\rangle + \beta|V\rangle$$



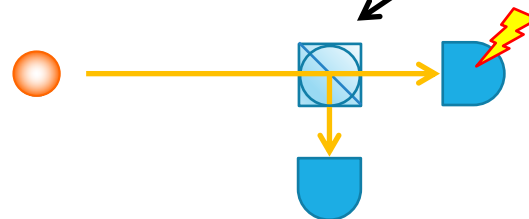
偏光ビームスプリッター(PBS)
Hを透過、Vを反射

PBS と on/off 検出器
(検出器は武田先生の講義参照)

- $\sigma_X = |+\rangle\langle +| - |-\rangle\langle -|$ ($= |H\rangle\langle V| + |V\rangle\langle H|$)

$$(\text{ただし } |\pm\rangle = (|H\rangle \pm |V\rangle)/\sqrt{2})$$

$$\alpha|+\rangle + \beta|-\rangle$$



斜め偏光に対する PBS
+を透過、-を反射

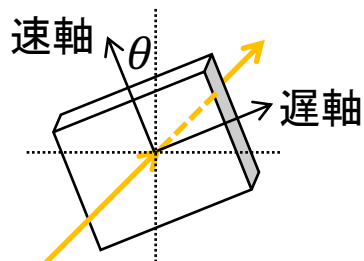
(実現方法は後述)

- $\sigma_Y = |R\rangle\langle R| - |L\rangle\langle L|$ ($= -i|H\rangle\langle V| + i|V\rangle\langle H|$) も同様

$$(\text{ただし } |R\rangle = (|H\rangle + i|V\rangle)/\sqrt{2}, |L\rangle = (|H\rangle - i|V\rangle)/\sqrt{2})$$

5. 制御方法

- 1量子ビット操作: 波長板(複屈折性媒質)の利用



入力状態 $\propto \alpha|\text{slow}\rangle + \beta|\text{fast}\rangle$

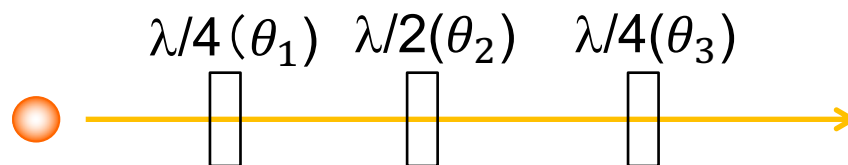
速軸と遅軸に沿った偏光成分間に位相差がつく

$$\lambda/4 \text{ 板 (QWP)} : \alpha|\text{slow}\rangle + e^{i\pi/2}\beta|\text{fast}\rangle$$

$$\lambda/2 \text{ 板 (HWP)} : \alpha|\text{slow}\rangle + e^{i\pi}\beta|\text{fast}\rangle$$

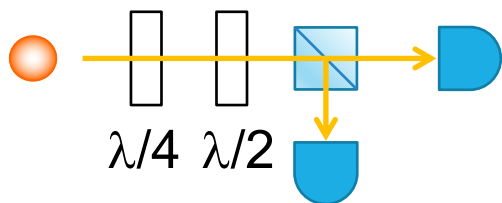
角度 θ 回転させた波長板 = 偏光回転

- 複数の波長板による任意の偏光回転 [Phys. Lett. A **143**, 165 (1990)]



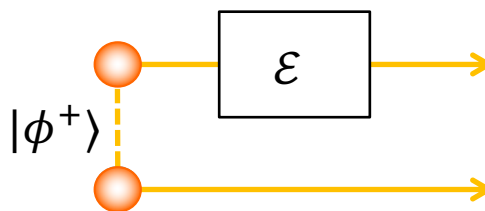
- σ_Z の射影測定との組み合わせで任意の軸での射影測定が可能

量子状態トモグラフィ



[PRA **64**, 052312 (2001)]

量子プロセストモグラフィ

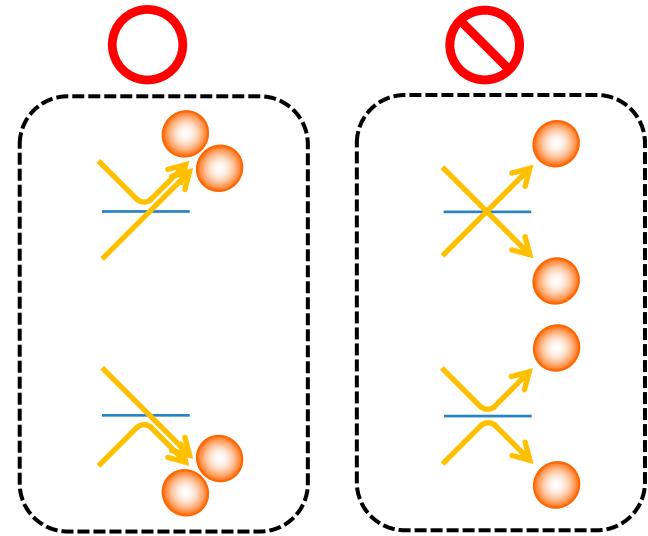
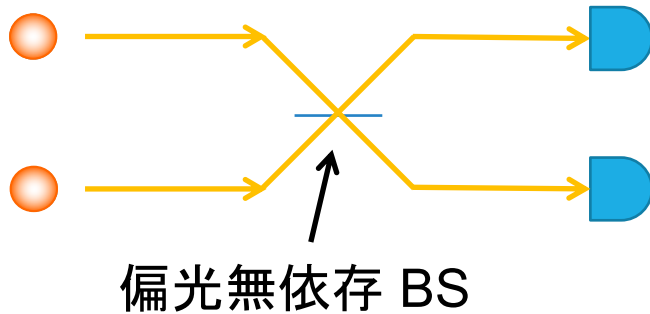


[PRA **71**, 062310 (2005)]

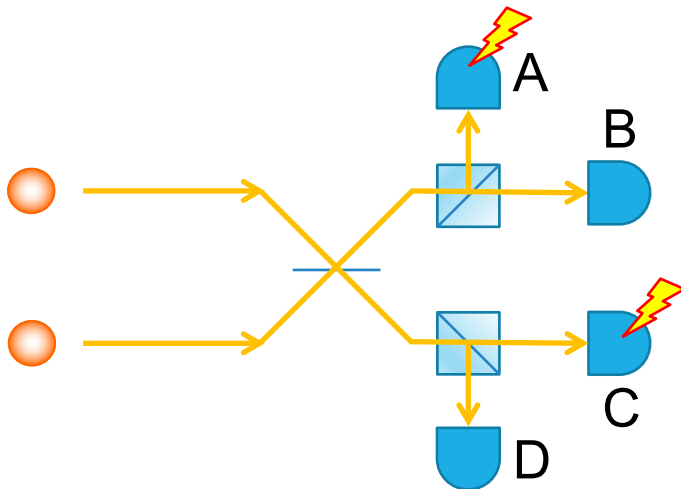
6. 量子ビット間相互作用

- 2光子干渉 (HOM 干渉)

[PRL 59, 2044 (1987)]



- (確率的な) ベル測定



- $|\psi^-\rangle = (|HV\rangle - |VH\rangle)/\sqrt{2}$
(A or B) and (C or D)
- $|\psi^+\rangle = (|HV\rangle + |VH\rangle)/\sqrt{2}$
(A and B) or (C and D)

× $|\phi^\pm\rangle = (|HH\rangle \pm |VV\rangle)/\sqrt{2}$

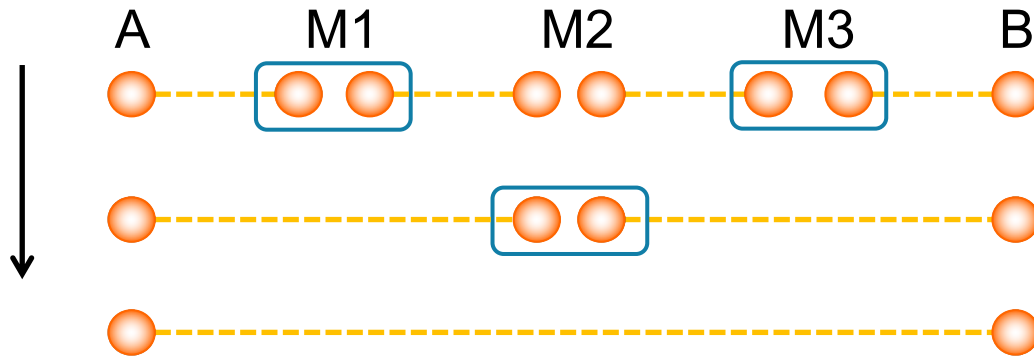
成功確率 $\leq 50\%$

[Appl. Phys. B 72, 67 (2001)]

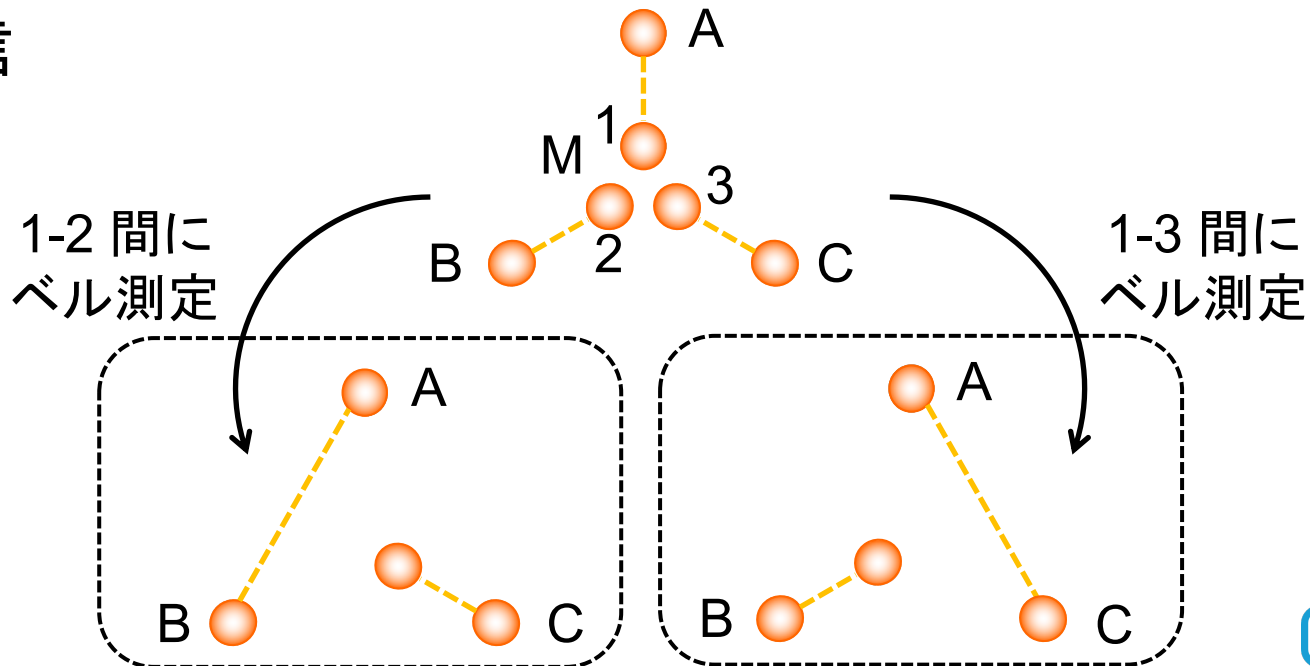
6. 量子ビット間相互作用

- 量子テレポーテーションの応用（エンタングルメントスワッピング）

長距離通信



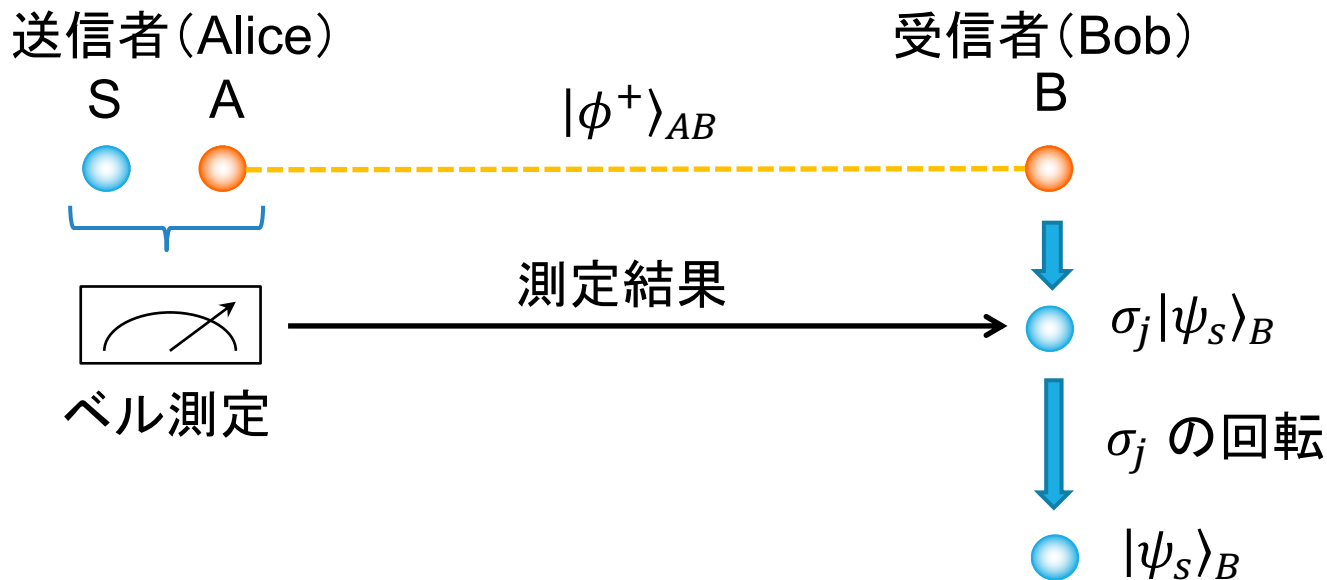
多者間通信



7. 制御時間

- 量子ビットの制御に要する時間
= ① 光子の回路伝搬時間 + ② 検出結果に応じた光子操作時間
- ローカル操作の場合については武田先生の講義参照
- ②で、検出結果を古典通信路で送信しなければならない場合もある

光の伝搬時間は距離100kmでミリ秒オーダー



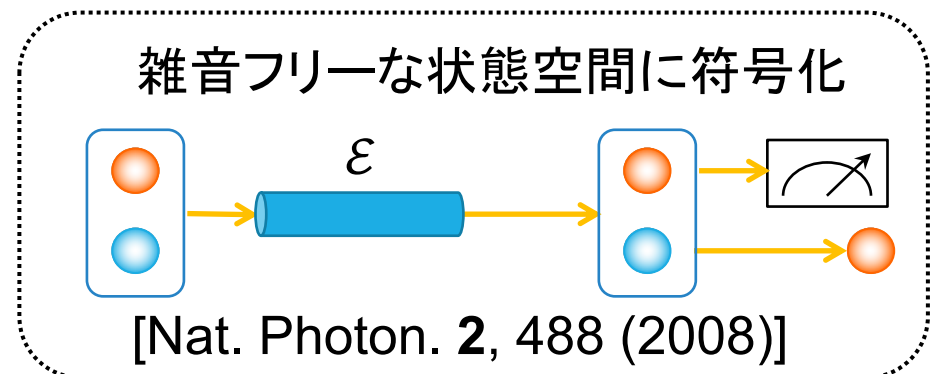
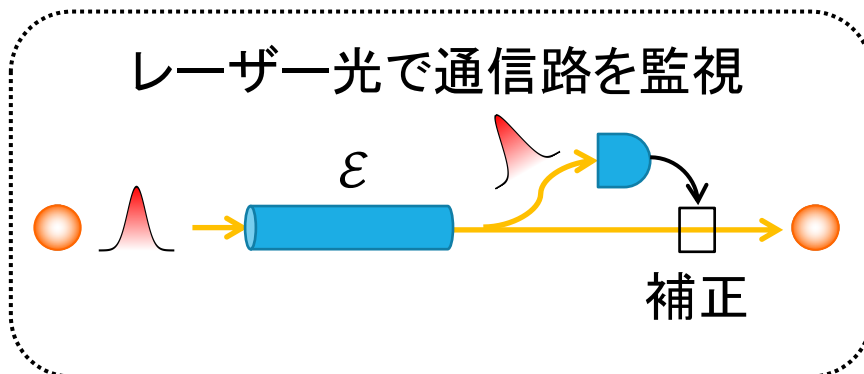
8. コヒーレンス時間

- 光子のエネルギー \gg 環境の熱雑音 (武田先生の講義参照)
- 光のデコヒーレンス = ① 光のロス + ② 量子ビット空間上の緩和
- ① ロス要因については武田先生の講義参照

Dual-rail 量子ビットでは符号空間上のデコヒーレンスではない
→ 事後選択で(偏光無依存、雑音混入なしのとき)排除可能

- ② Dual-rail 量子ビット上の緩和

光回路／通信路の複屈折揺らぎ、光路長揺らぎ、など



9. 拡張性

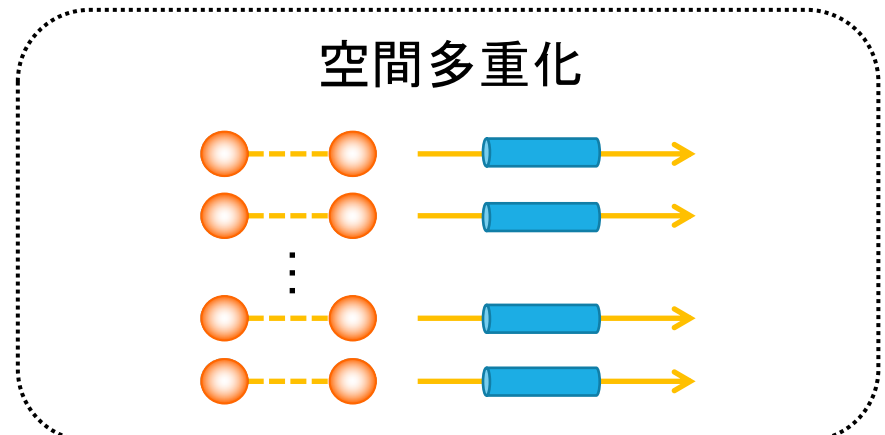
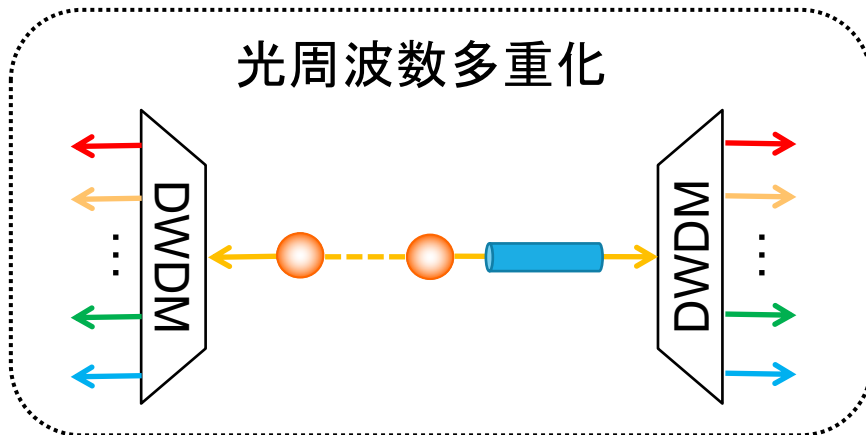
- 距離の拡張: 量子中継

直接配送方式では光子は距離に対して指数関数的減衰
量子中継器により、距離に対して多項式的減衰に改善

物質量子メモリを中継地点に配置する方式 [Rev. Mod. Phys. **83**, 33 (2011)]

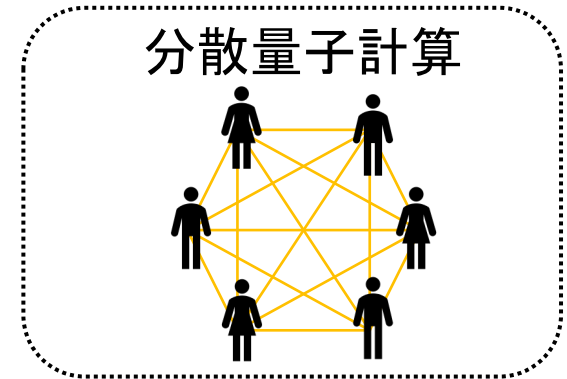
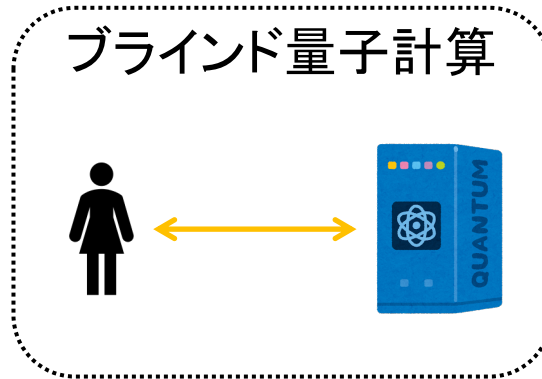
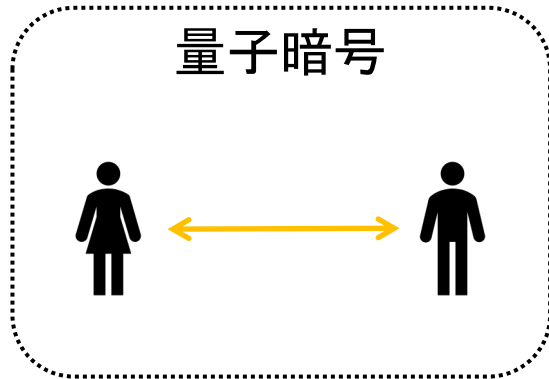
物質量子メモリなしの全光方式 [Nat. Commun. **6**, 6787 (2015)]

- 伝送密度の拡張: 光多重化



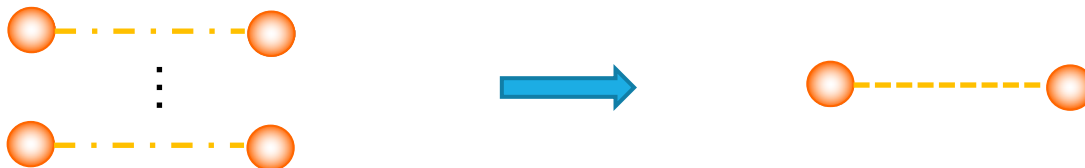
10. 応用およびその課題

- 幅広い量子技術への応用（武田先生の講義参照）



- 課題

- 効率的なベル状態の共有（生成、配送、検出）
- エンタングルメント蒸留 [PRA **54**, 3824 (1996), Science **356**, 928 (2017)]



複数の弱いエンタングルメント

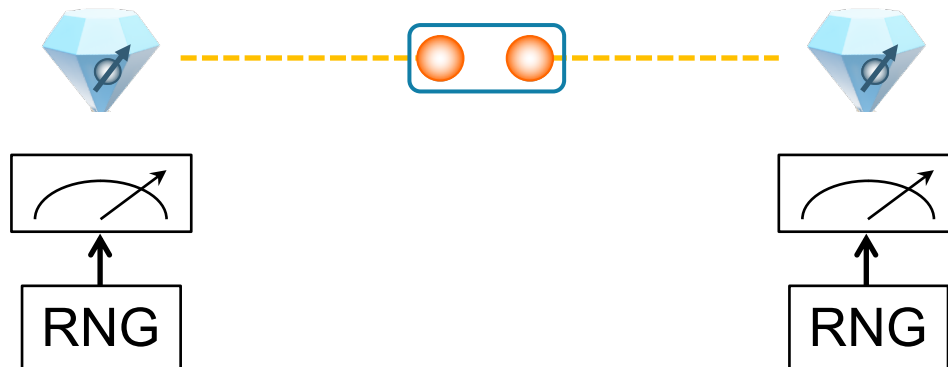
少数のより強いエンタングルメント

11. 他の分野とのつながり

- 他量子系とのつながり: 量子インターネット [Nature **453**, 1023 (2008)]
- 光量子と物質量子からなるハイブリッド量子系
- 量子通信を介した遠隔地点の(異種)量子系の接続



- 基礎物理とのつながり: Loophole-free ベル不等式の破れ [Nature **526**, 682 (2015)]



12. より深く勉強したい方向けの文献

基本的には武田先生の講義資料の文献リストを参照してください

その他:

- 線形光学量子計算についてのレビュー論文、光学回路の具体例が多い
P. Kok *et al.*, “Linear optical quantum computing with photonic qubits,” *Rev. Mod. Phys.* **79**, 135 (2007); arXiv:quant-ph/0512071 (2006).
- 物質量子メモリを用いた量子中継のレビュー論文
N. Sangouard *et al.*, “Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics,” *Rev. Mod. Phys.* **83**, 33 (2011); arXiv: 0906.2699 (2009).
- 光エレクトロニクス全般の教科書（和訳本もあります）
A. Yariv & P. Yeh, “*Photonics: Optical Electronics in Modern Communication*,” (OUP 第6版, 2006)
- 量子光学の基礎のほか量子情報の話題も扱っている教科書（和訳本もあります）
M. Fox, “*Quantum Optics: An Introduction*,” (OUP, 2006)
- Koki Morita (京都大) から私へ (ダイレクトメッセージ) (1:53 午後)