

量子符号化・復号の

非局所性の定量化

山崎隼汰 村尾美緒

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

- H. Yamasaki & M. Murao, “Distributed Encoding and Decoding of Quantum Information over Networks,” arXiv:1807.11483.
- H. Yamasaki & M. Murao, “Quantum state merging for arbitrarily-small-dimensional systems,” arXiv:1806.07875.

物理における符号化

量子系

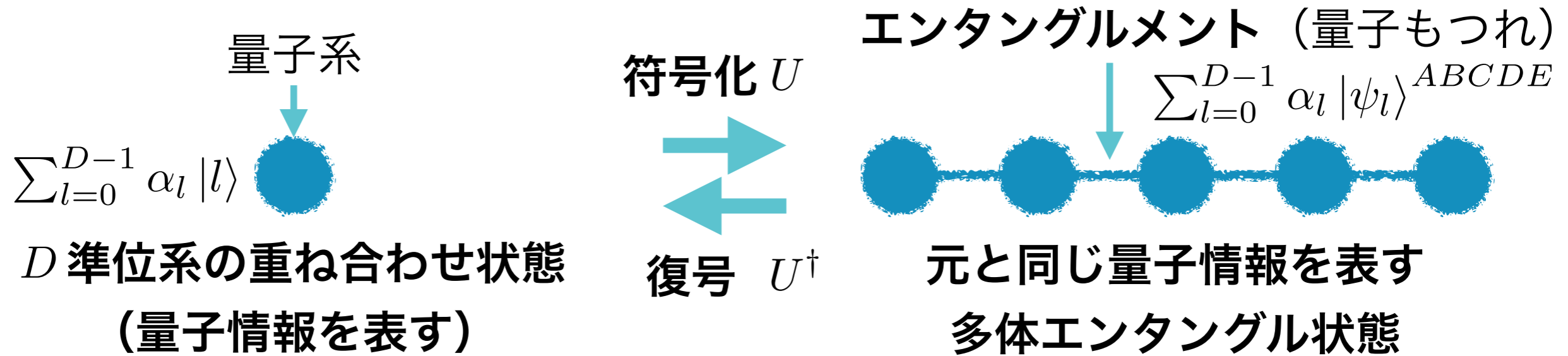


$$\sum_{l=0}^{D-1} \alpha_l |l\rangle$$

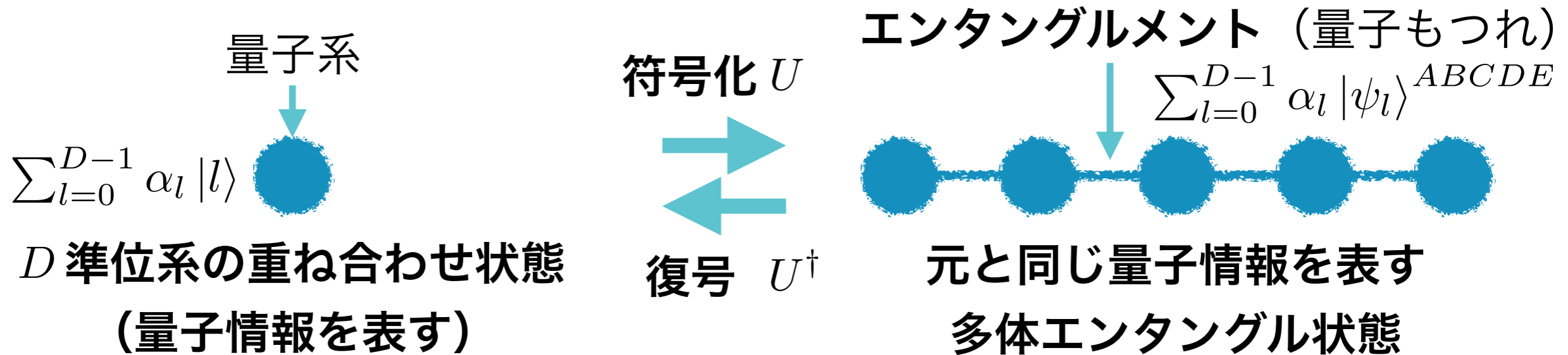


D 準位系の重ね合わせ状態
(量子情報を表す)

物理における符号化

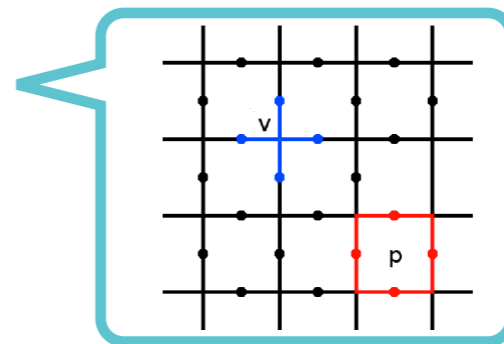


物理における符号化



大自由度な多体量子系の部分空間で「量子情報」が表されている例

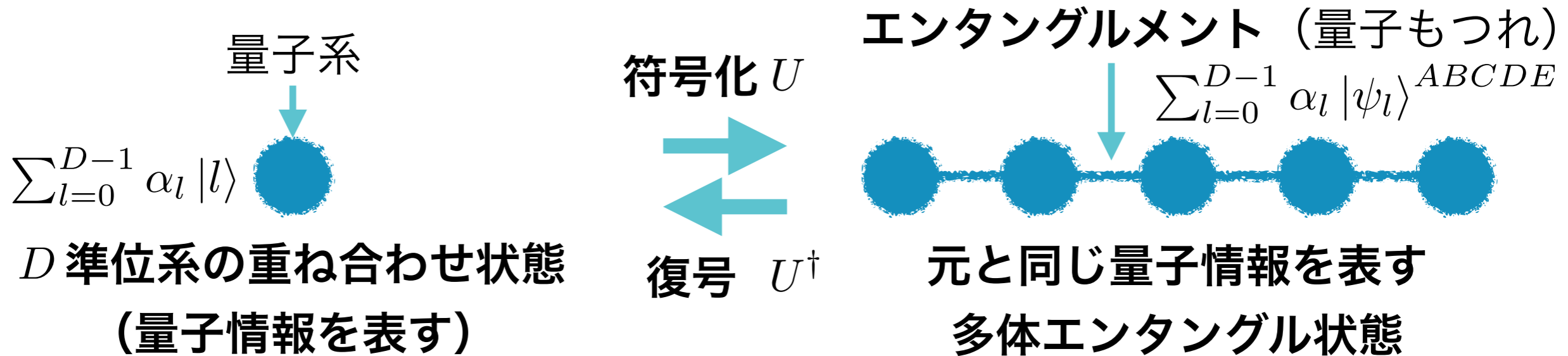
- toric codeの縮退した基底状態 [1]
- AdS/CFT対応 (のtoy model) [2]



[1] A. Y. Kitaev, Ann. Phys. 303, 2 (2003); picture from Wikipedia.

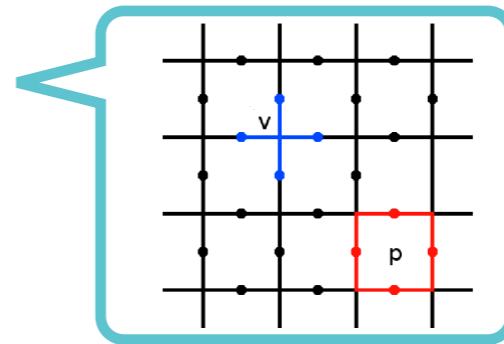
[2] F. Pastawski, B. Yoshida, D. Harlow, & J. Preskill, JHEP 06, 149 (2015).

物理における符号化



大自由度な多体量子系の部分空間で「量子情報」が表されている例

- toric codeの縮退した基底状態 [1]
- AdS/CFT対応 (のtoy model) [2]



- 符号化, 復号はisometry U, U^\dagger (補助系を用いたunitary) として記述される
- 符号化, 復号は量子情報処理にも必要不可欠

例：量子誤り訂正 & 分散量子情報処理 (多者間の量子秘密共有など)

[1] A. Y. Kitaev, Ann. Phys. 303, 2 (2003); picture from Wikipedia.

[2] F. Pastawski, B. Yoshida, D. Harlow, & J. Preskill, JHEP 06, 149 (2015).

分散量子情報処理における符号化

- 小・中規模な量子コンピュータの時代の到来が予想される
- さらにスケールアップする方法：**分散量子情報処理**

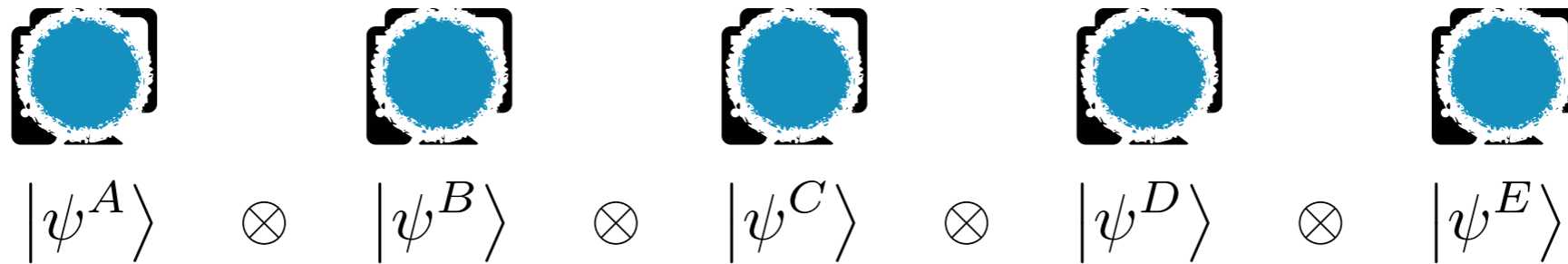
小・中規模な量子コンピュータを連携させる



分散量子情報処理における符号化

- 小・中規模な量子コンピュータの時代の到来が予想される
- さらにスケールアップする方法：**分散量子情報処理**

小・中規模な量子コンピュータを連携させる

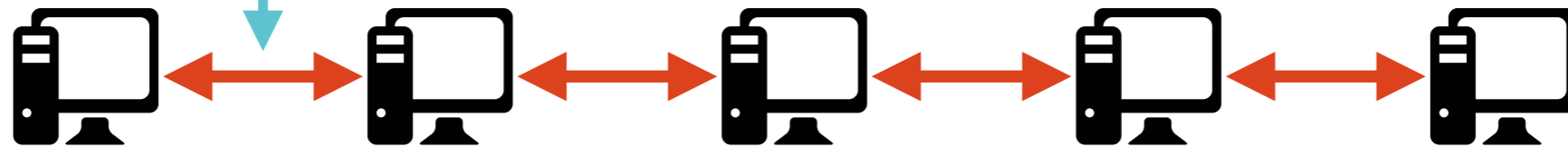


分散量子情報処理における符号化

- 小・中規模な量子コンピュータの時代の到来が予想される
- さらにスケールアップする方法：**分散量子情報処理**

小・中規模な量子コンピュータを連携させる

量子状態の通信（量子通信）のためのネットワーク

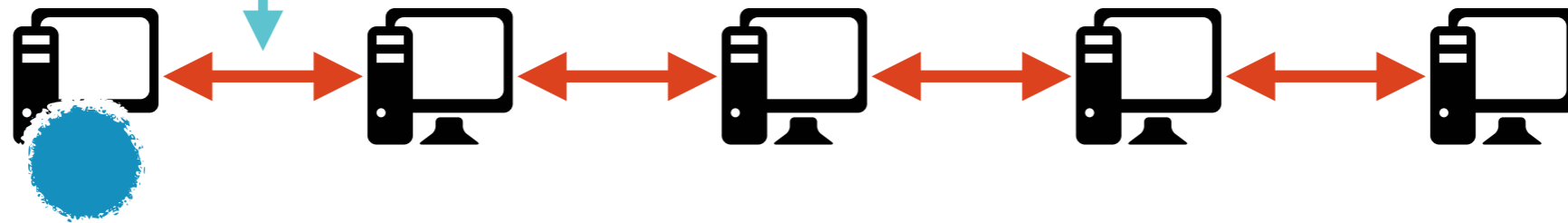


分散量子情報処理における符号化

- 小・中規模な量子コンピュータの時代の到来が予想される
- さらにスケールアップする方法：**分散量子情報処理**

小・中規模な量子コンピュータを連携させる

量子状態の通信（量子通信）のためのネットワーク



量子情報を表す状態

分散量子情報処理における符号化

- ・ 小・中規模な量子コンピュータの時代の到来が予想される
- ・ さらにスケールアップする方法：**分散量子情報処理**

小・中規模な量子コンピュータを連携させる

量子状態の通信（量子通信）のためのネットワーク

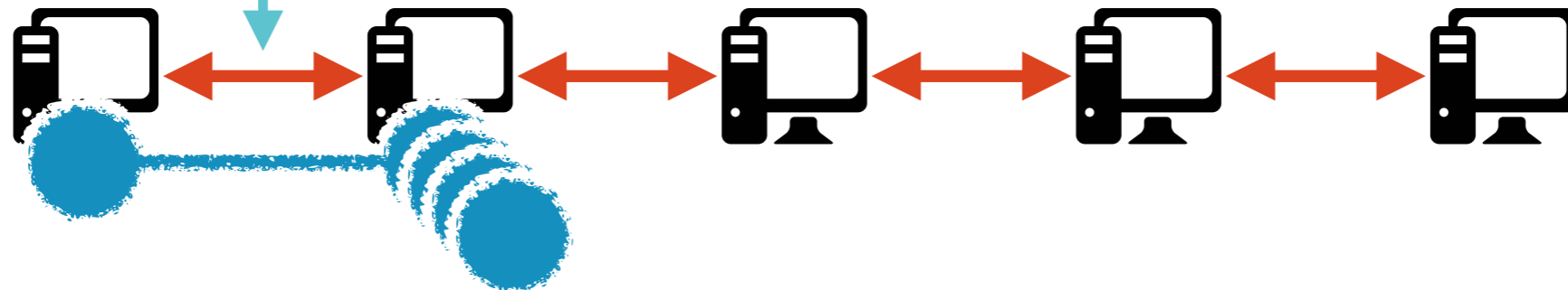


分散量子情報処理における符号化

- ・ 小・中規模な量子コンピュータの時代の到来が予想される
- ・ さらにスケールアップする方法：**分散量子情報処理**

小・中規模な量子コンピュータを連携させる

量子状態の通信（量子通信）のためのネットワーク



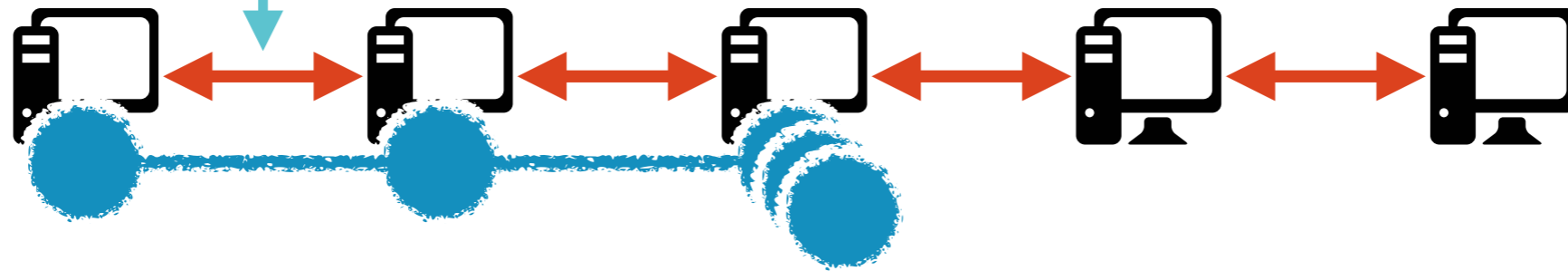
多体エンタングル状態に符号化

分散量子情報処理における符号化

- ・ 小・中規模な量子コンピュータの時代の到来が予想される
- ・ さらにスケールアップする方法：**分散量子情報処理**

小・中規模な量子コンピュータを連携させる

量子状態の通信（量子通信）のためのネットワーク



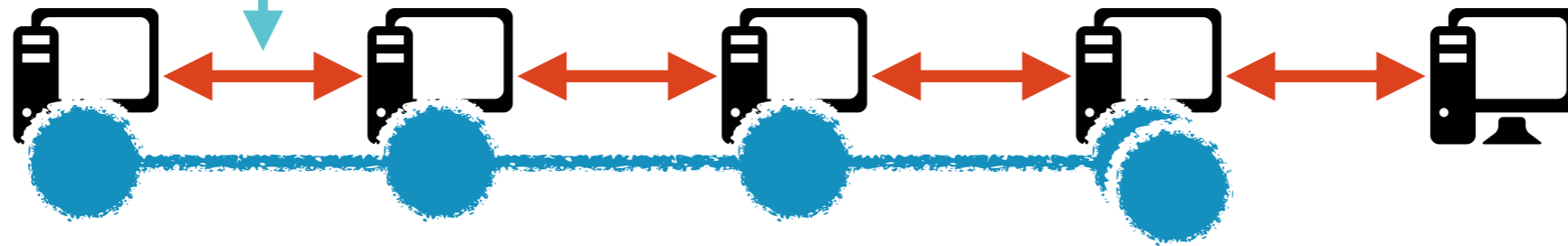
多体エンタングル状態に符号化

分散量子情報処理における符号化

- ・ 小・中規模な量子コンピュータの時代の到来が予想される
- ・ さらにスケールアップする方法：**分散量子情報処理**

小・中規模な量子コンピュータを連携させる

量子状態の通信（量子通信）のためのネットワーク



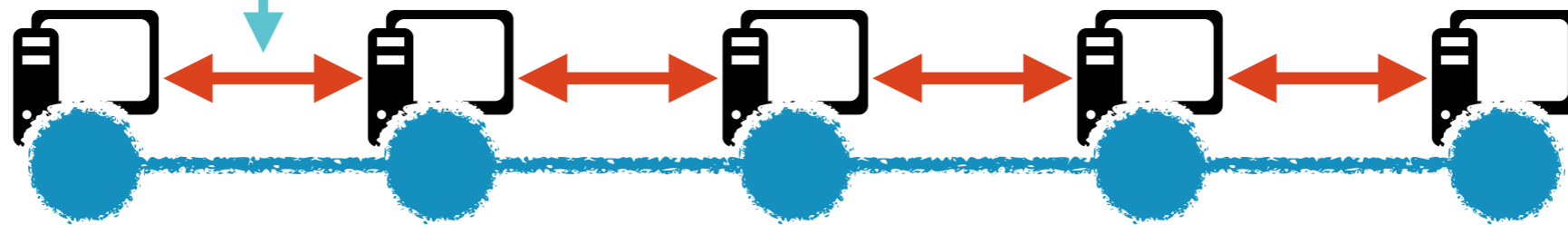
多体エンタングル状態に符号化

分散量子情報処理における符号化

- ・ 小・中規模な量子コンピュータの時代の到来が予想される
- ・ さらにスケールアップする方法：**分散量子情報処理**

小・中規模な量子コンピュータを連携させる

量子状態の通信（量子通信）のためのネットワーク



多体エンタングル状態に符号化

分散量子情報処理における符号化

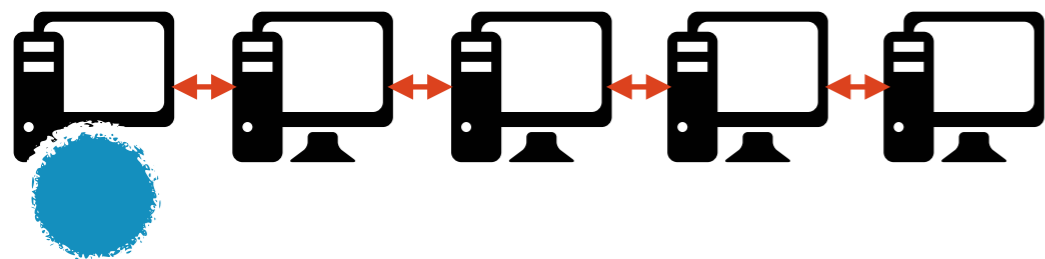
- ・ 小・中規模な量子コンピュータの時代の到来が予想される
- ・ さらにスケールアップする方法：**分散量子情報処理**

小・中規模な量子コンピュータを連携させる

量子状態の通信（量子通信）のためのネットワーク



本研究の状況設定

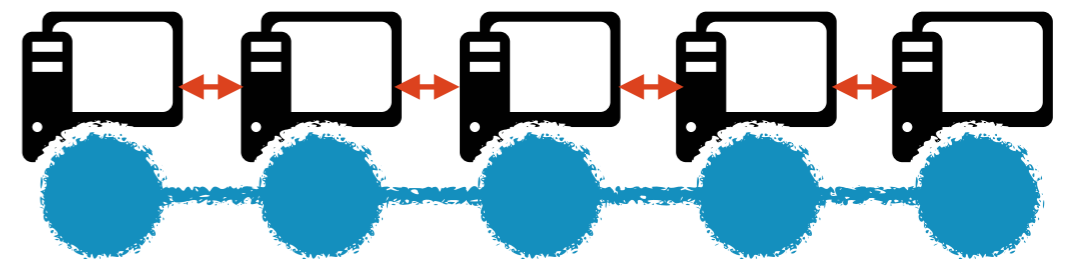


量子情報を表す状態

分散符号化



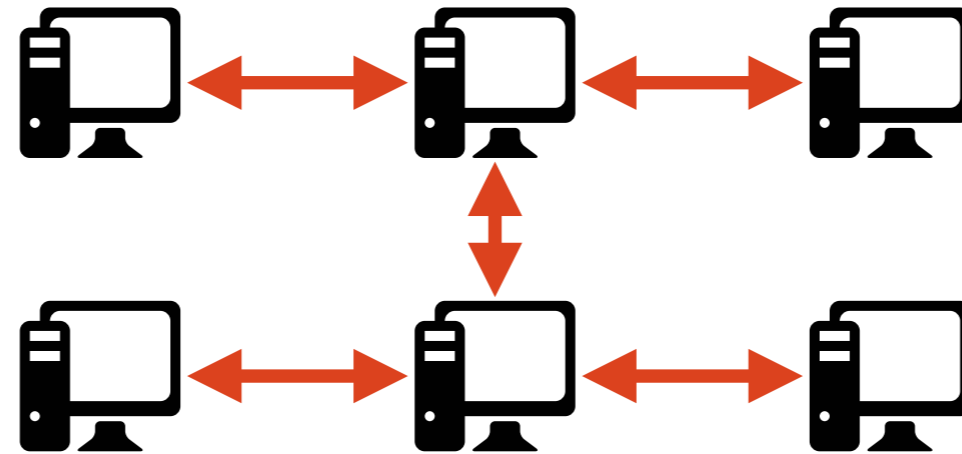
分散復号



元と同じ量子情報を表す
多体エンタングル状態

本研究の結果の概要

任意のツリー形ネットワーク・任意の符号化, 復号について
分散符号化・分散復号に必要な 量子通信コスト を解析

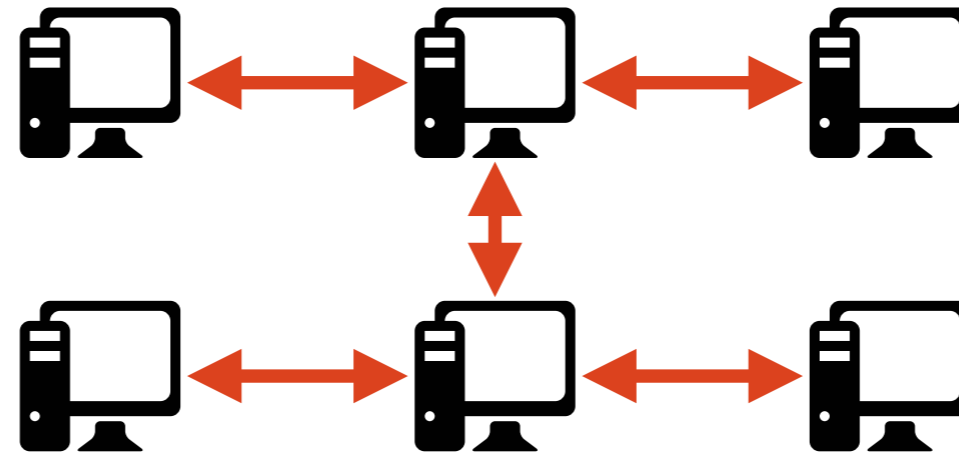


(ノイズのない) 量子通信路のツリー形ネットワーク
= 多者間を**最少の量子通信路**でつなぐ形 (閉路なし)

本研究の結果の概要

任意のツリー形ネットワーク・任意の符号化, 復号について
分散符号化・分散復号に必要な **量子通信コスト** を解析

量子通信コストの最小値は符号化・復号の非局所性を定量化している



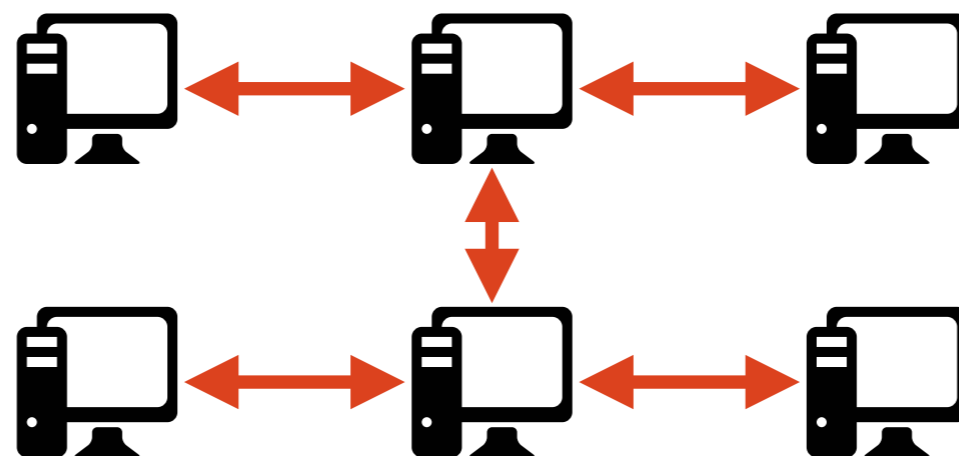
(ノイズのない) 量子通信路のツリー形ネットワーク
= 多者間を**最少の量子通信路**でつなぐ形 (閉路なし)

本研究の結果の概要

任意のツリー形ネットワーク・任意の符号化, 復号について

分散符号化・分散復号に必要な **量子通信コスト** を解析

量子通信コストの最小値は**符号化・復号の非局所性**を定量化している



(ノイズのない) 量子通信路のツリー形ネットワーク

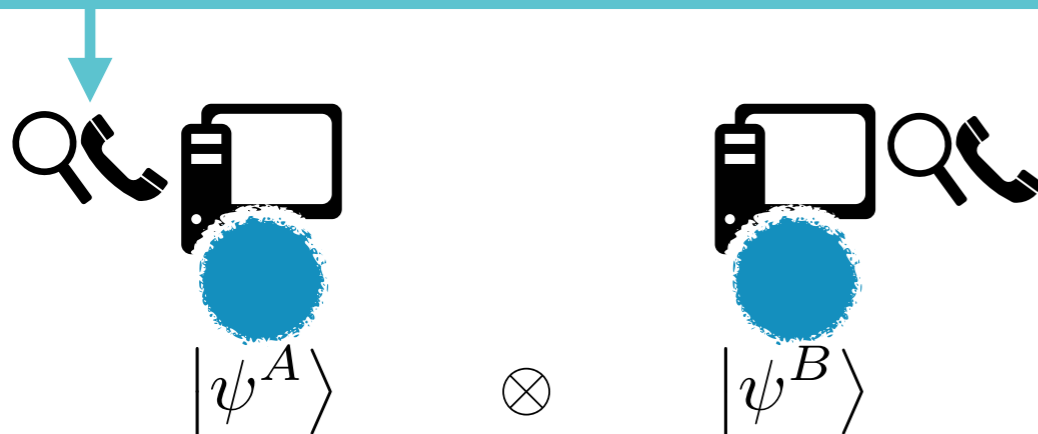
= 多者間を**最少の量子通信路**でつなぐ形 (閉路なし)

- ・ <結果1：分散符号化>：分散符号化手順を構成 + **コスト最小**であると証明
 - ・ <結果2：分散復号>：分散符号化より**省コスト**な分散復号手順を構成
- **符号化・復号の非局所性の差**を定量的に特徴づけるboundを導出

局所操作・古典通信 (LOCC)

= エンタングルメントの定量化に用いられる状況設定

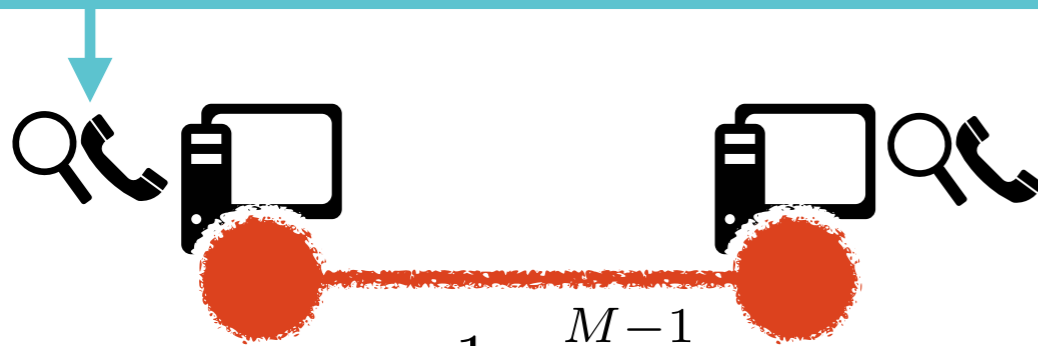
- 各量子系に任意の操作が可能 (測定結果の古典通信も自由)
= Local Operations and Classical Communication (**LOCC**) が自由
- LOCCでは離れた量子系の間にはエンタングルメントを新たに作れない



局所操作・古典通信 (LOCC)

= エンタングルメントの定量化に用いられる状況設定

- 各量子系に任意の操作が可能 (測定結果の古典通信も自由)
= Local Operations and Classical Communication (LOCC) が自由
- LOCCでは離れた量子系の間にはエンタングルメントを新たに作れない



$$|\Phi_M\rangle := \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{l=0}^{M-1} |l\rangle \otimes |l\rangle$$

M 準位系の最大エンタングル状態 (あらかじめ共有させる)

局所操作・古典通信 (LOCC)

= エンタングルメントの定量化に用いられる状況設定

- 各量子系に任意の操作が可能 (測定結果の古典通信も自由)
= Local Operations and Classical Communication (LOCC) が自由
- LOCCでは離れた量子系の間エンタングルメントを新たに作れない



M 準位系の最大エンタングル状態 (あらかじめ共有させる)

→ **量子テレポーテーション**により M 準位系の状態の量子通信が可能

本研究の方法

- LOCCは自由
- **量子通信量は最大エンタングル状態の準位数をもって量る**

量子通信量に基づく定量化手法

例：2体状態 $|\psi\rangle$ のエンタングルメント量 := $|\psi\rangle$ の生成に必要な最小の量子通信量



M 準位系の最大エンタングル状態 (→ 量子通信により $|\psi\rangle$ を生成)

量子通信量に基づく定量化手法

例：2体状態 $|\psi\rangle$ のエンタングルメント量 $:= |\psi\rangle$ の生成に必要な最小の量子通信量



M 準位系の最大エンタングル状態 (→ 量子通信により $|\psi\rangle$ を生成)

難

定量化したい性質	2体	多体 (3体以上)
エンタングルメント (状態の非局所性)	2体状態の生成に必要な量子通信量 [3]	多体状態の生成に必要な量子通信量 [4]
変換の非局所性	2体変換の分散実行に必要な量子通信量 [5]	本研究：分散符号化・復号に必要な量子通信量 [6]

難

[3] C. H. Bennett et al., Phys. Rev. A 54, 3824 (1996). など

[4] **H. Yamasaki**, A. Soeda, & M. Murao Phys. Rev. A 96, 032330 (2017). など

[5] M. A. Nielsen et al., Phys. Rev. A 67, 052301 (2003). など

[6] **H. Yamasaki** & M. Murao, arXiv:1807.11483.

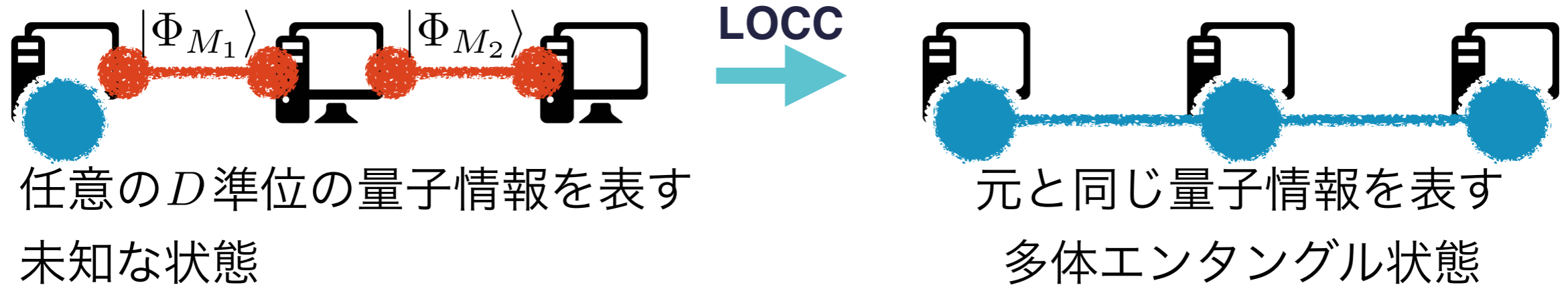
分散符号化・分散復号

タスク1：分散符号化

タスク2：分散復号

分散符号化・分散復号

タスク1：分散符号化



任意の D 準位の量子情報を表す
未知な状態

元と同じ量子情報を表す
多体エンタングル状態

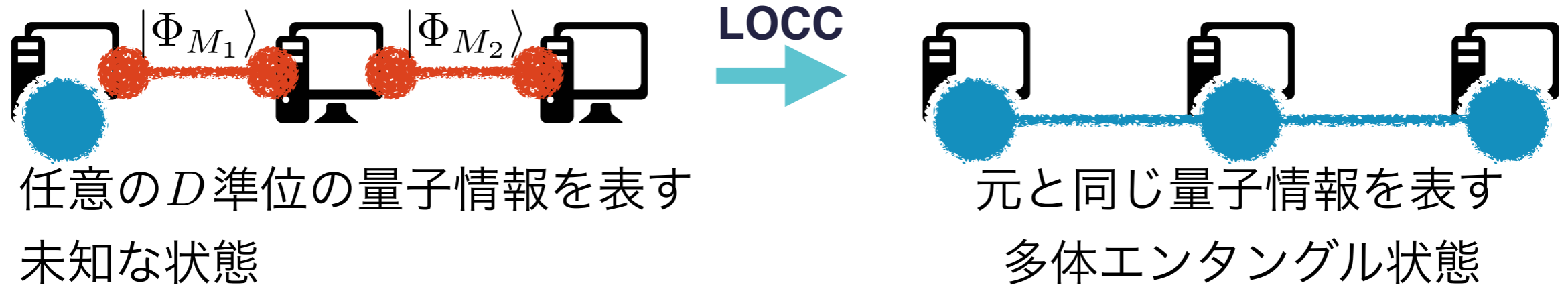
任意のツリー形ネットワークと任意の符号化（を表す isometry）が与えられた時

- ・ 一箇所に入力された任意の未知な状態を多体エンタングル状態に符号化して共有
- ・ **量子通信の総量を最小化** → **最小値 =: 符号化の非局所性の定量化**

タスク2：分散復号

分散符号化・分散復号

タスク1：分散符号化



任意のツリー形ネットワークと任意の符号化（を表す isometry）が与えられた時

- 一箇所に入力された任意の未知な状態を多体エンタングル状態に符号化して共有
- 量子通信の総量を最小化 → **最小値 =: 符号化の非局所性の定量化**

タスク2：分散復号



分散符号化と等価な状態変換タスク



任意の D 準位の量子情報を表す
未知な状態 (← 解析が難しい)

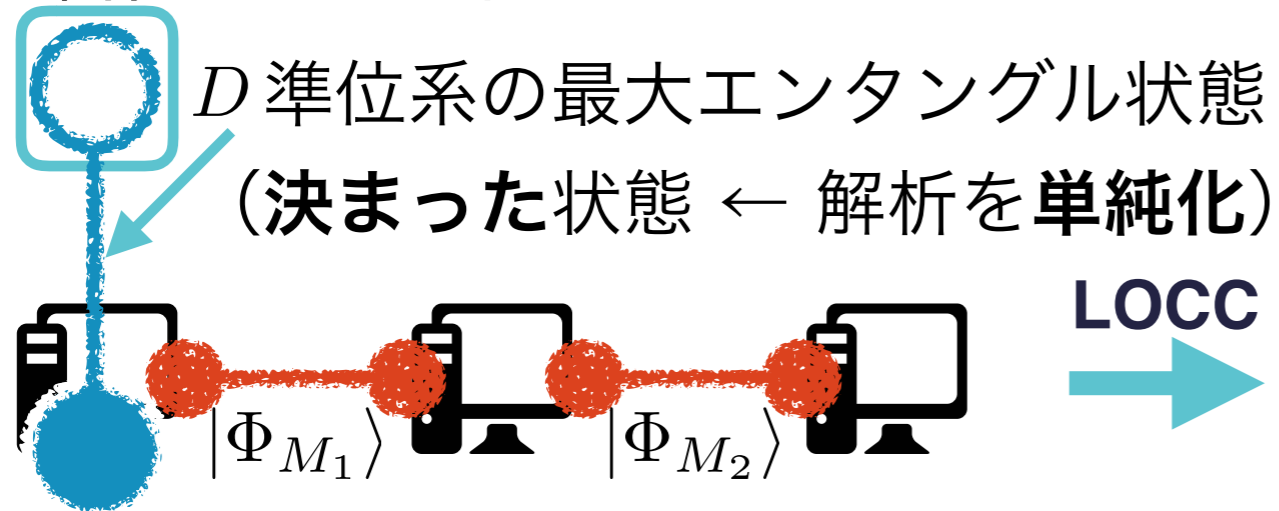
分散符号化と等価な状態変換タスク



任意の D 準位の量子情報を表す
未知な状態 (← 解析が難しい)

等価 \Updownarrow

操作できない系



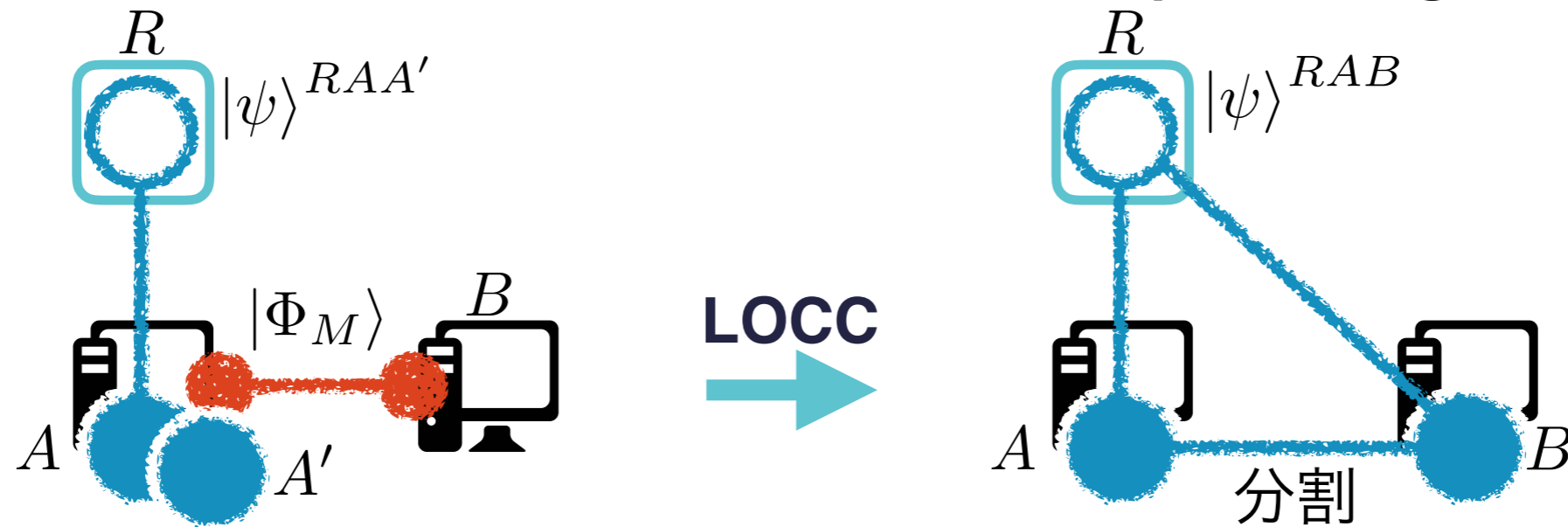
D 準位系の最大エンタングル状態
(決まった状態 ← 解析を単純化)

- 最大エンタングル状態の片方を符号化し共有
- 操作できない系とのエンタングルメントを保持

解析手法：分散符号化と等価な状態変換タスクを解析

状態分割を用いた分散符号化手順

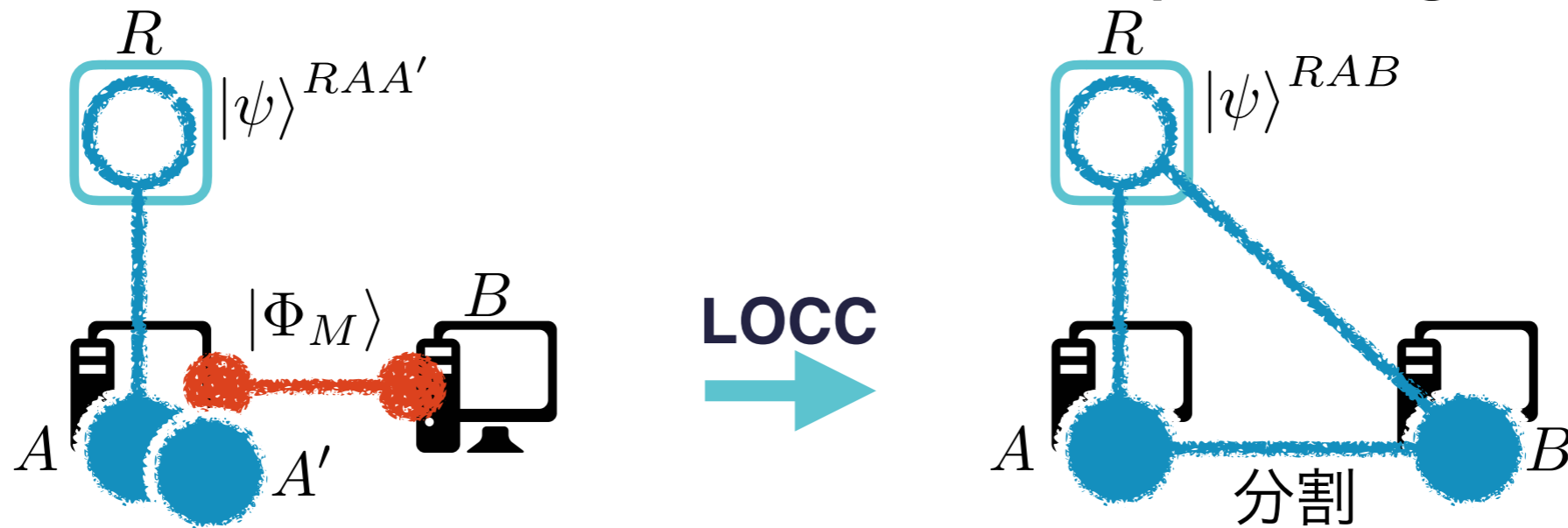
2者間の状態分割 (state splitting)



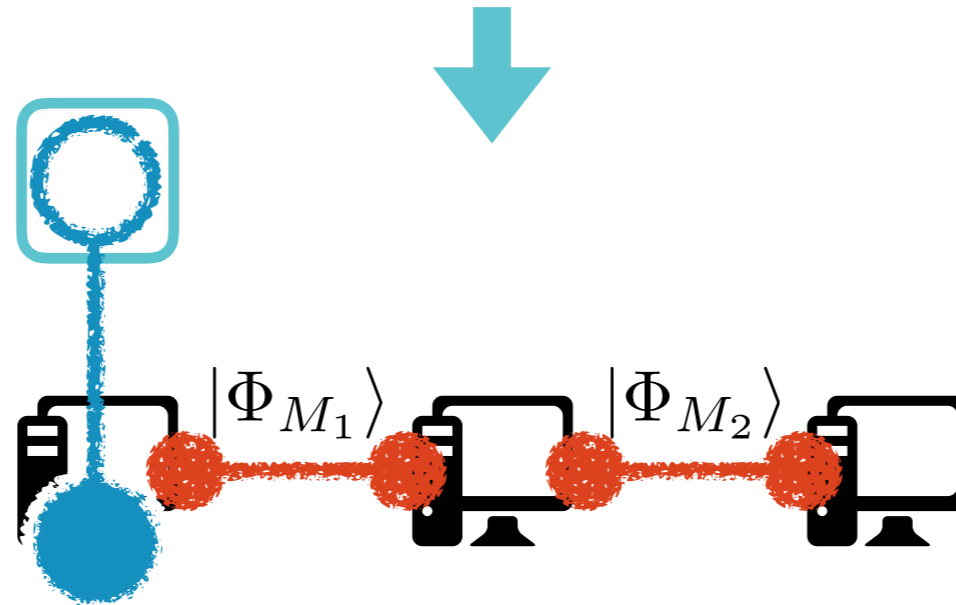
量子テレポーテーションより少ない量子通信で状態分割を行う手順を構成 [7]

状態分割を用いた分散符号化手順

2者間の状態分割 (state splitting)



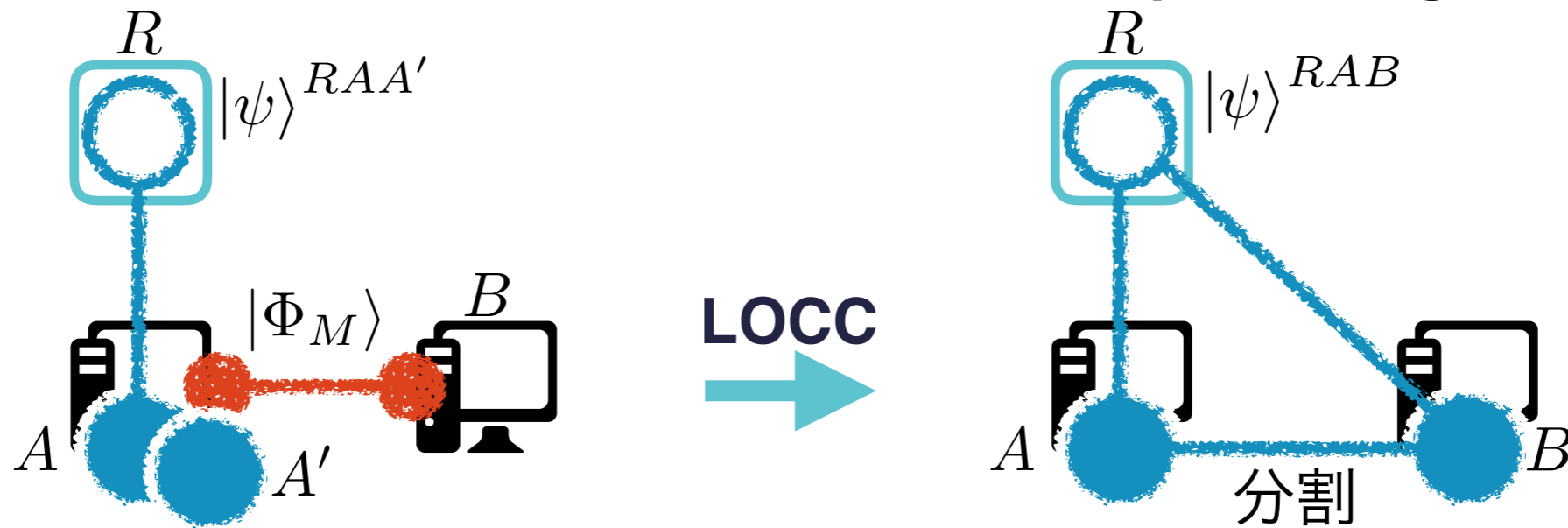
量子テレポーテーションより少ない量子通信で状態分割を行う手順を構成 [7]



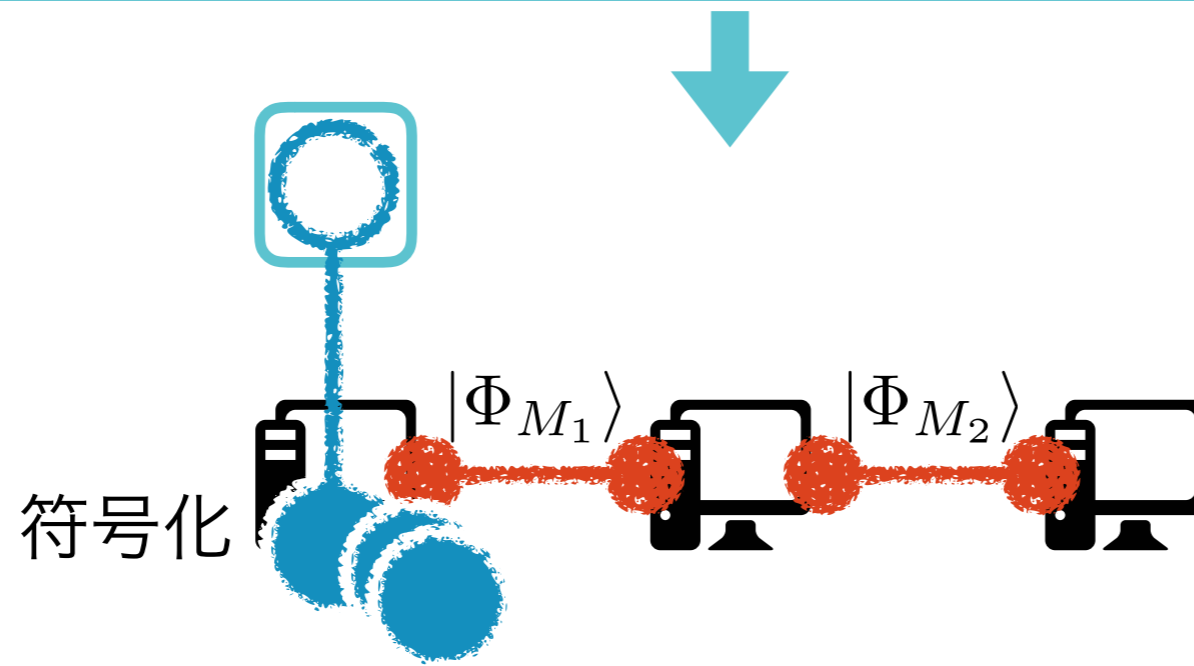
2者による状態分割を繰り返すことで分散符号化を実行可能

状態分割を用いた分散符号化手順

2者間の状態分割 (state splitting)



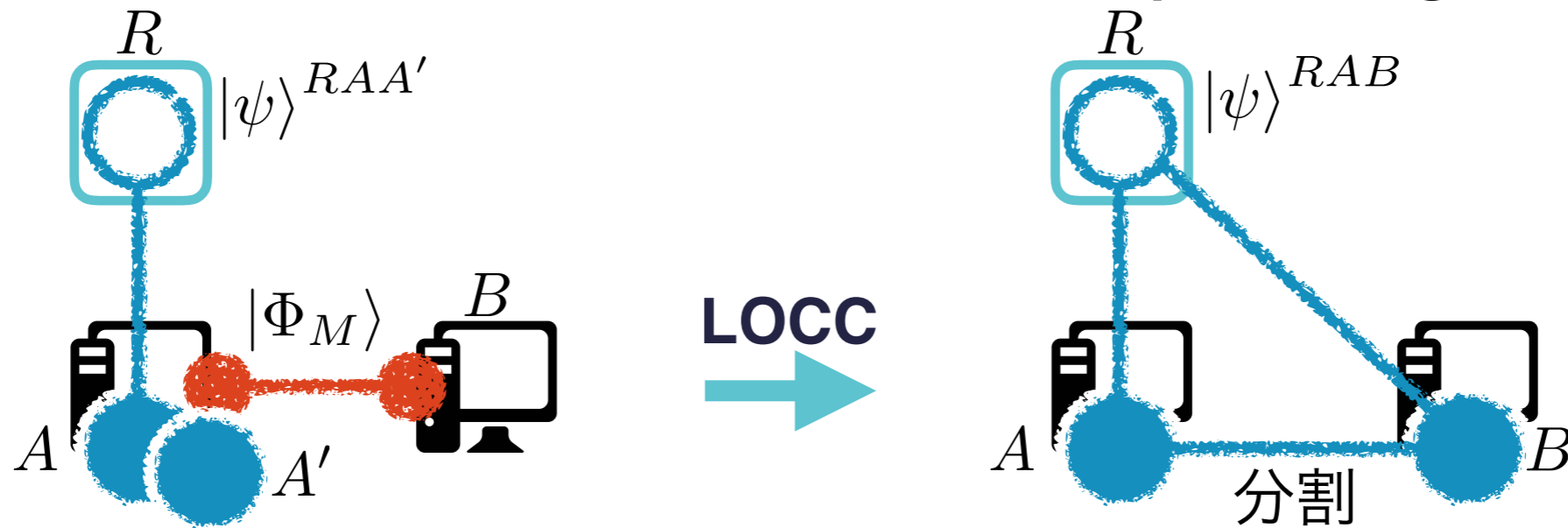
量子テレポーテーションより少ない量子通信で状態分割を行う手順を構成 [7]



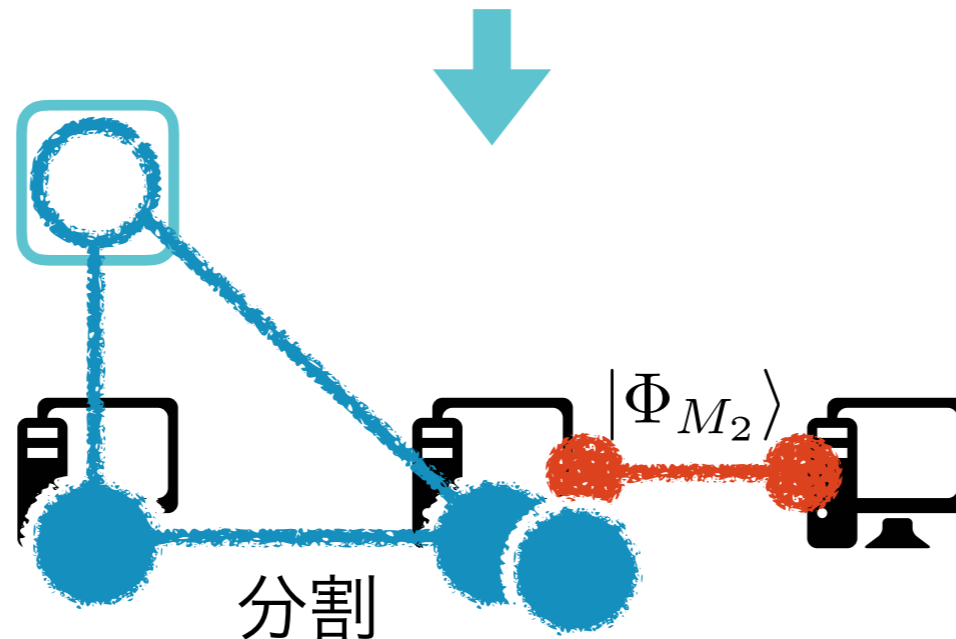
2者による状態分割を繰り返すことで分散符号化を実行可能

状態分割を用いた分散符号化手順

2者間の状態分割 (state splitting)



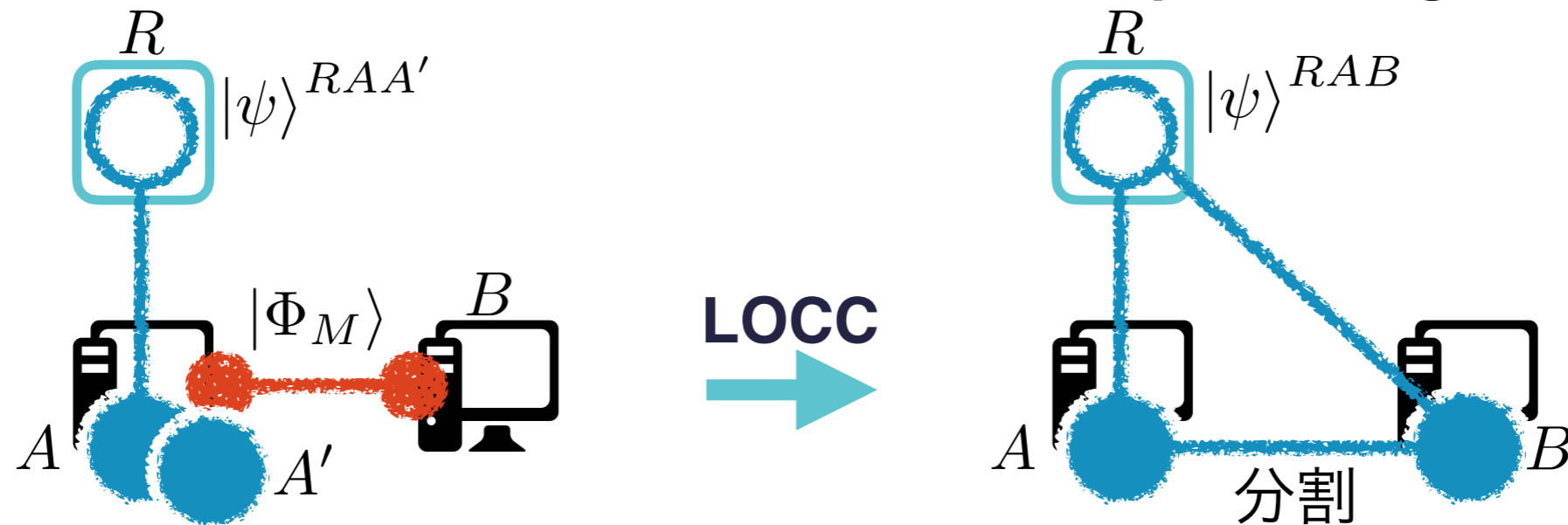
量子テレポーテーションより少ない量子通信で状態分割を行う手順を構成 [7]



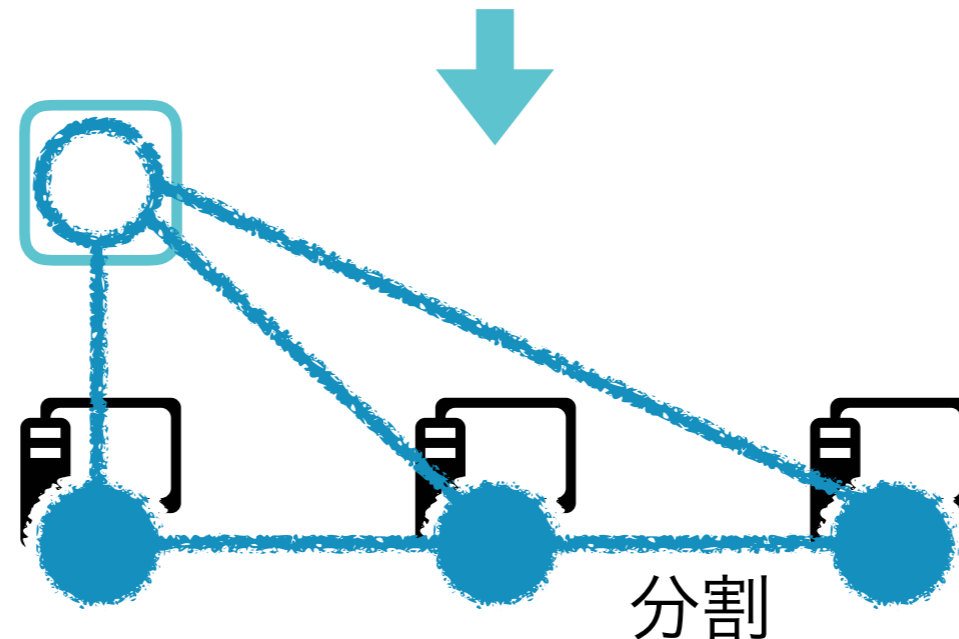
2者による状態分割を繰り返すことで分散符号化を実行可能

状態分割を用いた分散符号化手順

2者間の状態分割 (state splitting)



量子テレポーテーションより少ない量子通信で状態分割を行う手順を構成 [7]



2者による状態分割を繰り返すことで分散符号化を実行可能

結果1：コスト最小な分散符号化

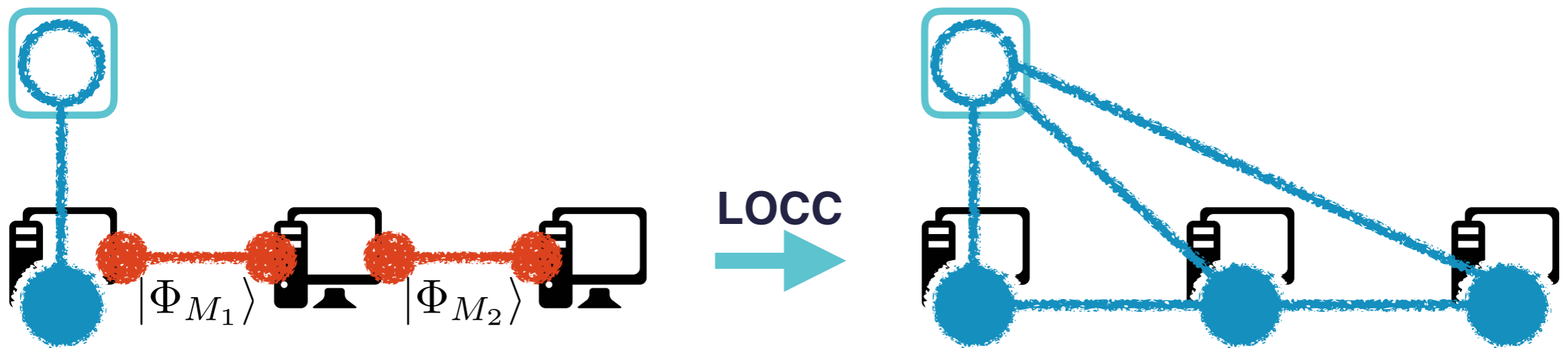
Theorem：コスト最小な分散符号化

任意のツリー形ネットワークと任意の符号化について、分散符号化に必要な最小の量子通信量はシュミット数 (Schmidt number) で特徴づけられる

Lemma：2体状態のシュミット分解 (Schmidt decomposition)

任意の2体状態 $|\psi\rangle^{AB}$ は $|\psi\rangle^{AB} = \sum_{m=0}^{r-1} \sqrt{\lambda_l} |m\rangle^A \otimes |m\rangle^B$ の形に一意に分解可能
シュミット数： r

↑ ↑ ↑
正 正規直交基底



- ・ 状態分割を繰り返すことで分散符号化を行う手順を具体的に構成
- ・ コスト最小なことも証明 ← シュミット数の性質から (LOCCで単調非増加)

結果1：コスト最小な分散符号化

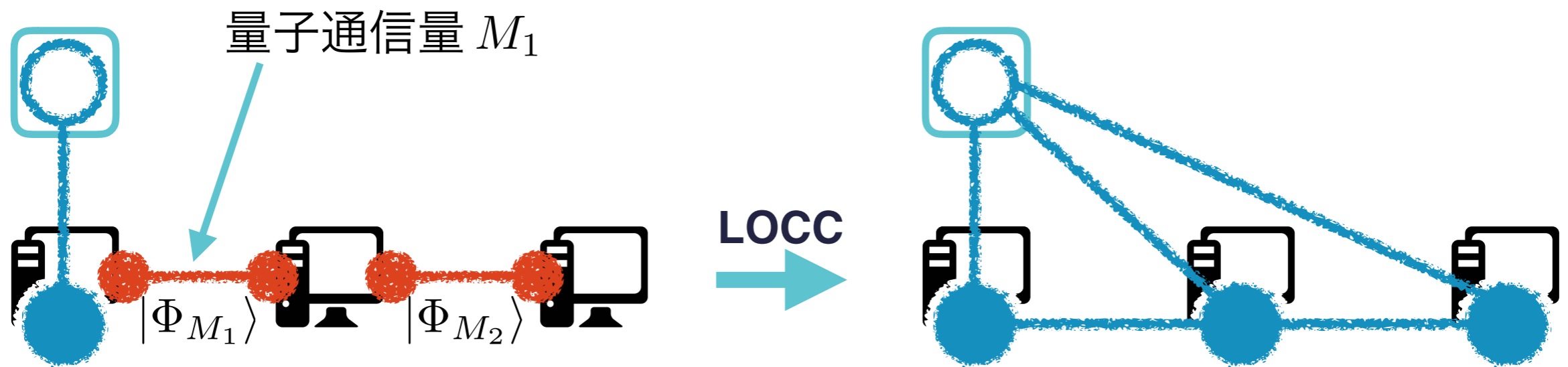
Theorem：コスト最小な分散符号化

任意のツリー形ネットワークと任意の符号化について、分散符号化に必要な最小の量子通信量はシュミット数 (Schmidt number) で特徴づけられる

Lemma：2体状態のシュミット分解 (Schmidt decomposition)

任意の2体状態 $|\psi\rangle^{AB}$ は $|\psi\rangle^{AB} = \sum_{m=0}^{r-1} \sqrt{\lambda_l} |m\rangle^A \otimes |m\rangle^B$ の形に一意に分解可能
シュミット数： r

↑ ↑ ↑
正 正規直交基底



- ・ 状態分割を繰り返すことで分散符号化を行う手順を具体的に構成
- ・ コスト最小なことも証明 ← シュミット数の性質から (LOCCで単調非増加)

結果1：コスト最小な分散符号化

Theorem：コスト最小な分散符号化

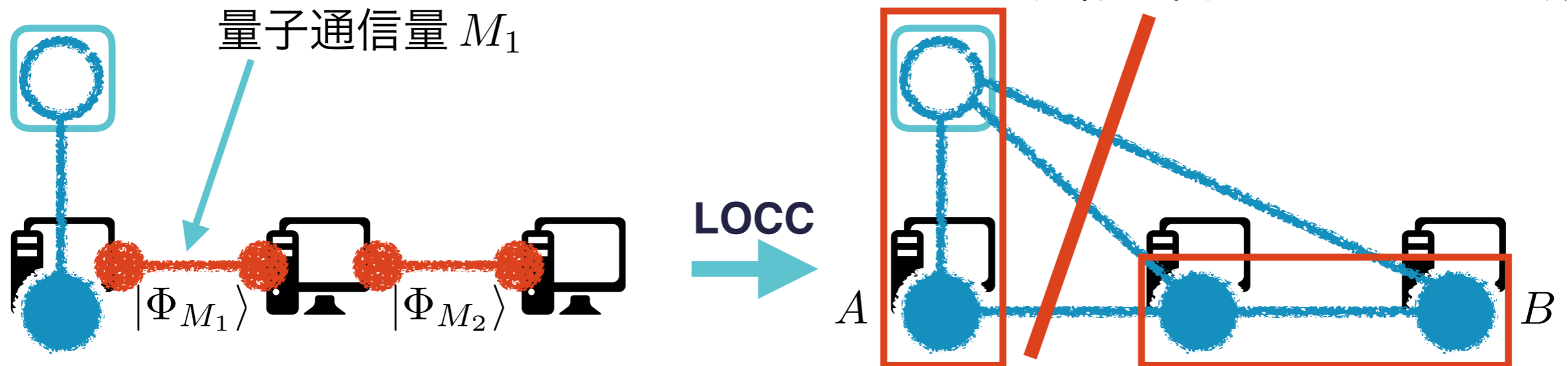
任意のツリー形ネットワークと任意の符号化について、分散符号化に必要な最小の量子通信量はシュミット数 (Schmidt number) で特徴づけられる

Lemma：2体状態のシュミット分解 (Schmidt decomposition)

任意の2体状態 $|\psi\rangle^{AB}$ は $|\psi\rangle^{AB} = \sum_{m=0}^{r-1} \sqrt{\lambda_l} |m\rangle^A \otimes |m\rangle^B$ の形に一意に分解可能
シュミット数： r

↑ ↑ ↑
正 正規直交基底

$M_1 =$ この2分割に関するシュミット数



- ・ 状態分割を繰り返すことで分散符号化を行う手順を具体的に構成
- ・ コスト最小なことも証明 ← シュミット数の性質から (LOCCで単調非増加)

結果1：コスト最小な分散符号化

Theorem：コスト最小な分散符号化

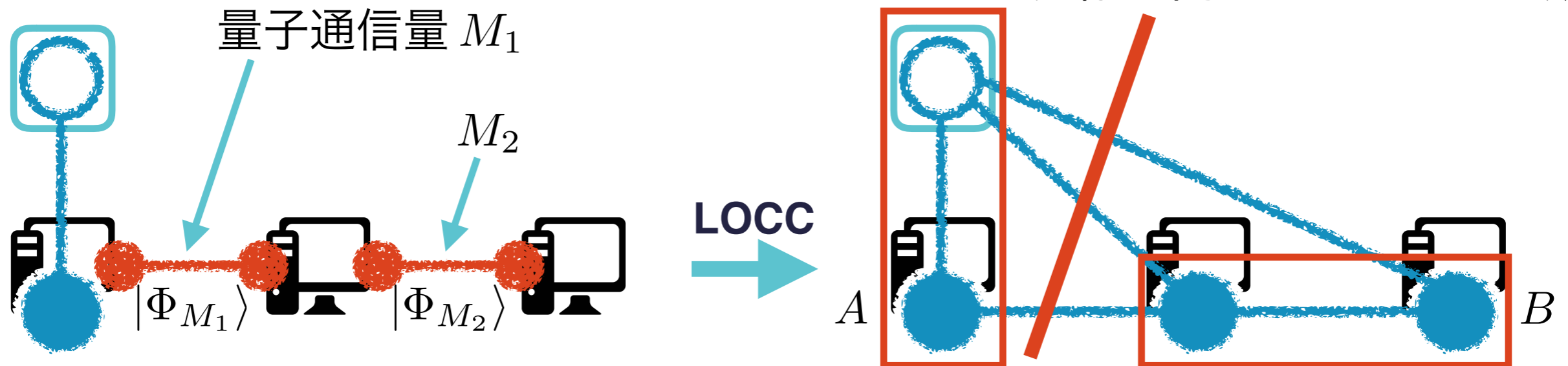
任意のツリー形ネットワークと任意の符号化について、分散符号化に必要な最小の量子通信量はシュミット数 (Schmidt number) で特徴づけられる

Lemma：2体状態のシュミット分解 (Schmidt decomposition)

任意の2体状態 $|\psi\rangle^{AB}$ は $|\psi\rangle^{AB} = \sum_{m=0}^{r-1} \sqrt{\lambda_l} |m\rangle^A \otimes |m\rangle^B$ の形に一意に分解可能
シュミット数： r

↑ ↑ ↑
正 正規直交基底

$M_1 =$ この2分割に関するシュミット数



- 状態分割を繰り返すことで分散符号化を行う手順を具体的に構成
- コスト最小なことも証明 ← シュミット数の性質から (LOCCで単調非増加)

結果1：コスト最小な分散符号化

Theorem：コスト最小な分散符号化

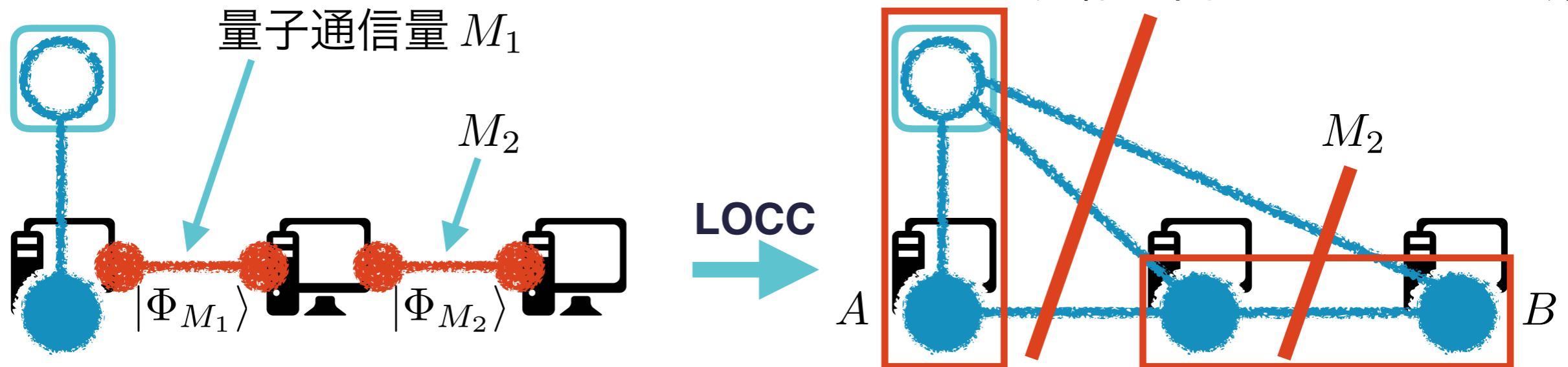
任意のツリー形ネットワークと任意の符号化について、分散符号化に必要な最小の量子通信量はシュミット数 (Schmidt number) で特徴づけられる

Lemma：2体状態のシュミット分解 (Schmidt decomposition)

任意の2体状態 $|\psi\rangle^{AB}$ は $|\psi\rangle^{AB} = \sum_{m=0}^{r-1} \sqrt{\lambda_l} |m\rangle^A \otimes |m\rangle^B$ の形に一意に分解可能
シュミット数： r

↑ ↑ ↑
正 正規直交基底

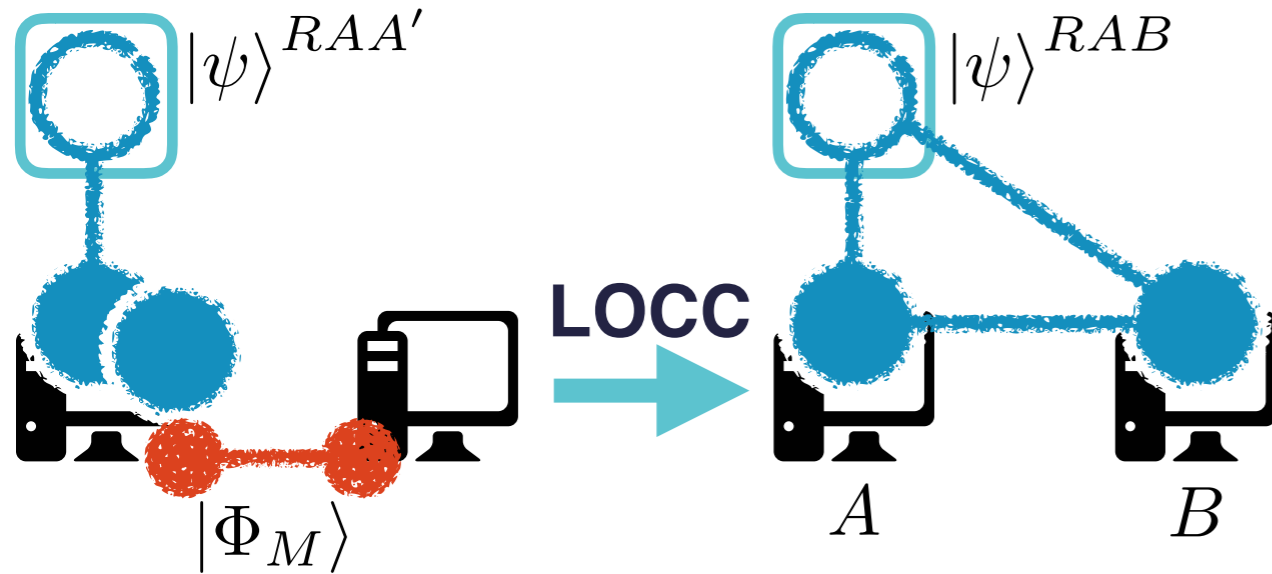
$M_1 =$ この2分割に関するシュミット数



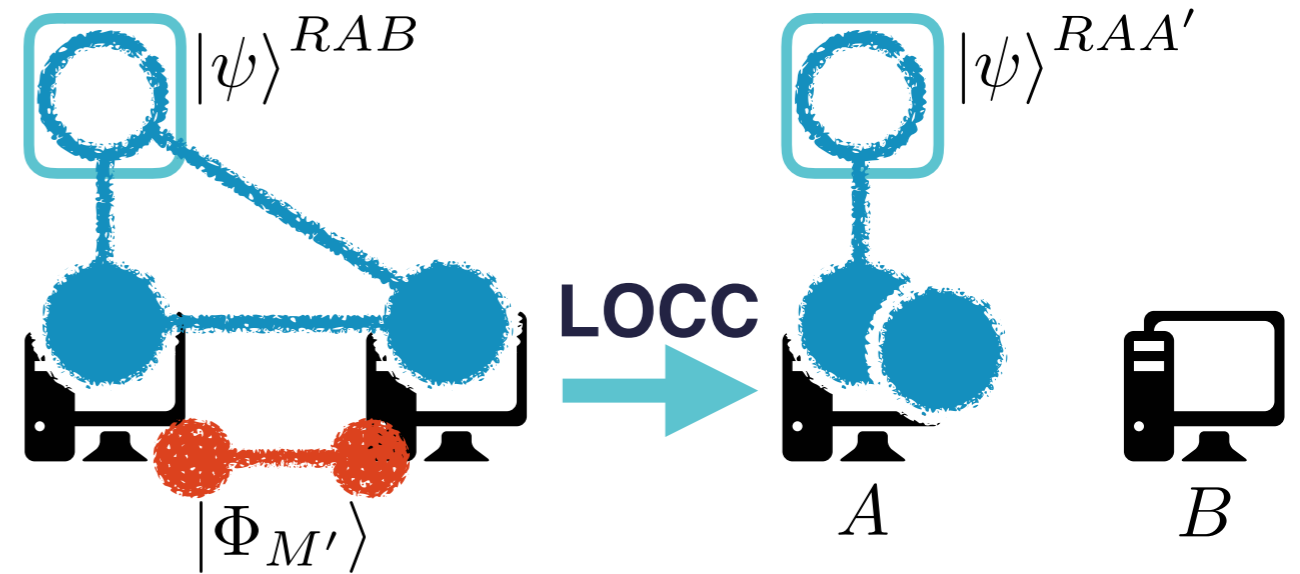
- ・ 状態分割を繰り返すことで分散符号化を行う手順を具体的に構成
- ・ コスト最小なことも証明 ← シュミット数の性質から (LOCCで単調非増加)

状態分割と状態合併

状態分割



状態合併 (state merging)

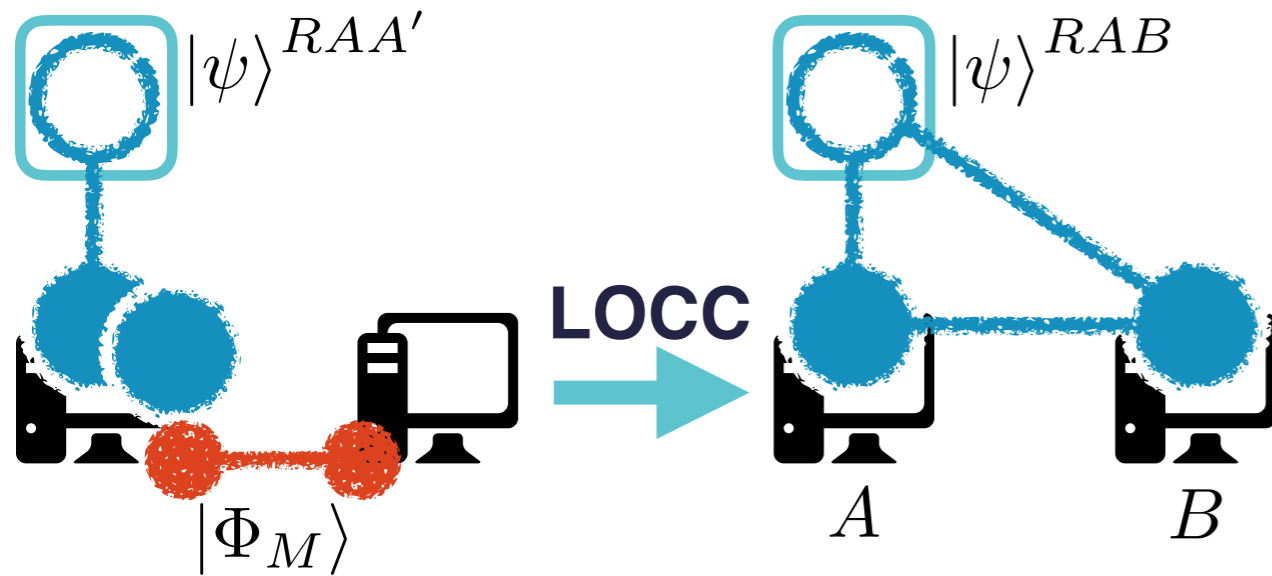


[7] [H. Yamasaki](#) & M. Murao, arXiv:1806.07875.

[8] M. Berta et al., IEEE Trans. Inf. Theory, 62, 3, 1425 (2016) など

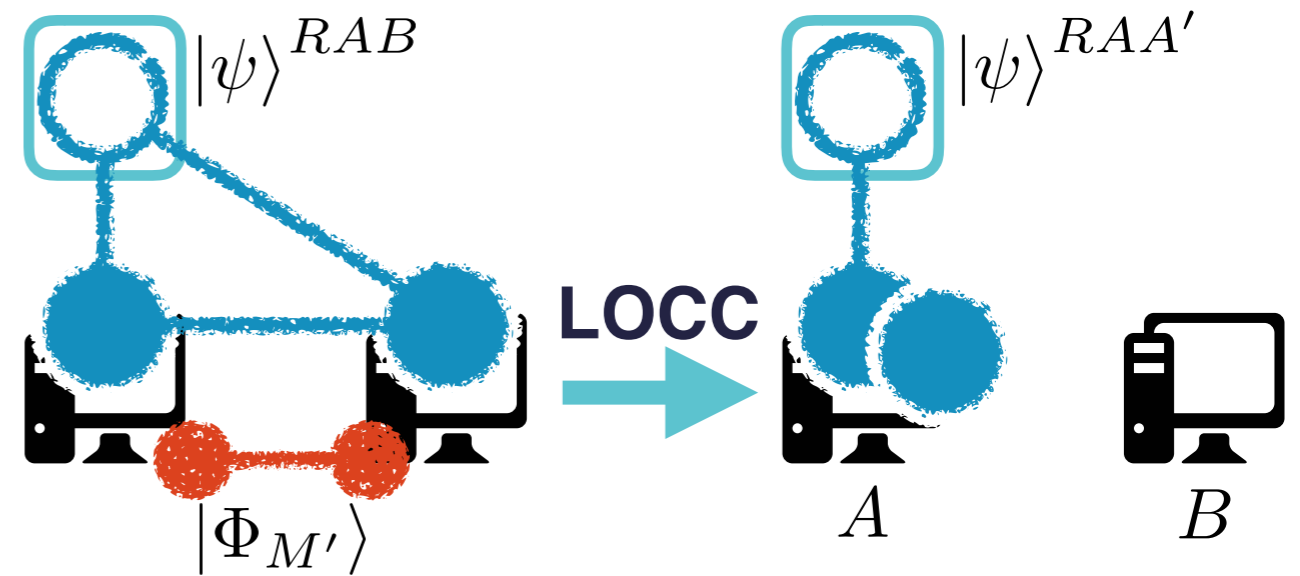
状態分割と状態合併

状態分割



AB間にエンタングルメントができる

状態合併 (state merging)



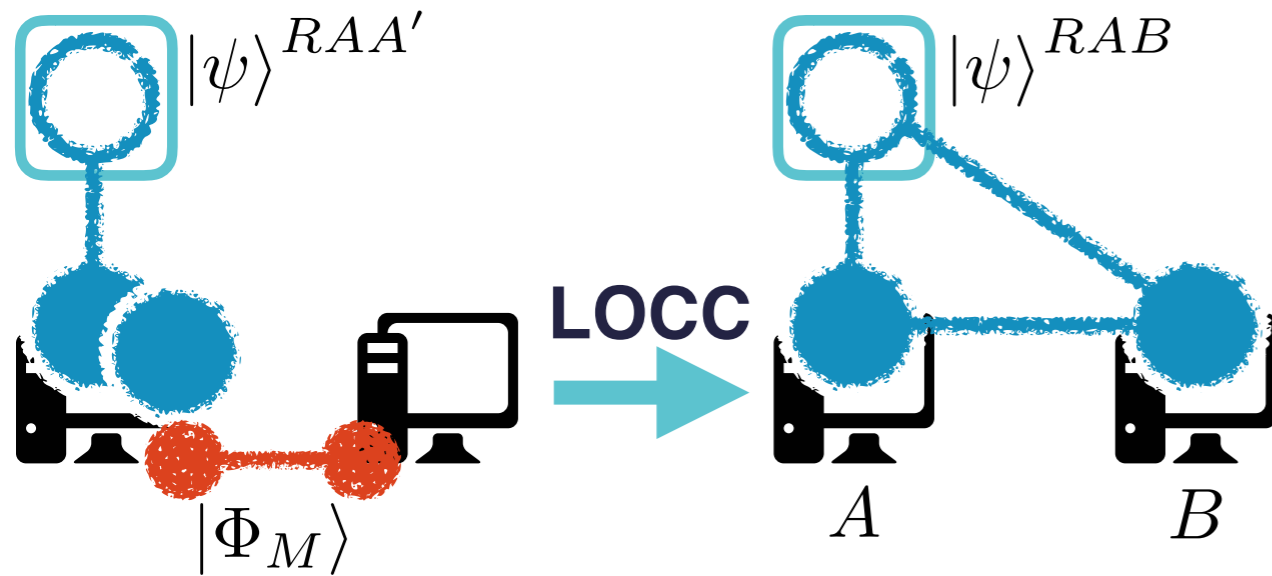
AB間のエンタングルメントがなくなる
→ $|\psi\rangle^{RAB}$ 自身のエンタングルメントを
使うことで量子通信を節約可能

[7] [H. Yamasaki](#) & M. Murao, arXiv:1806.07875.

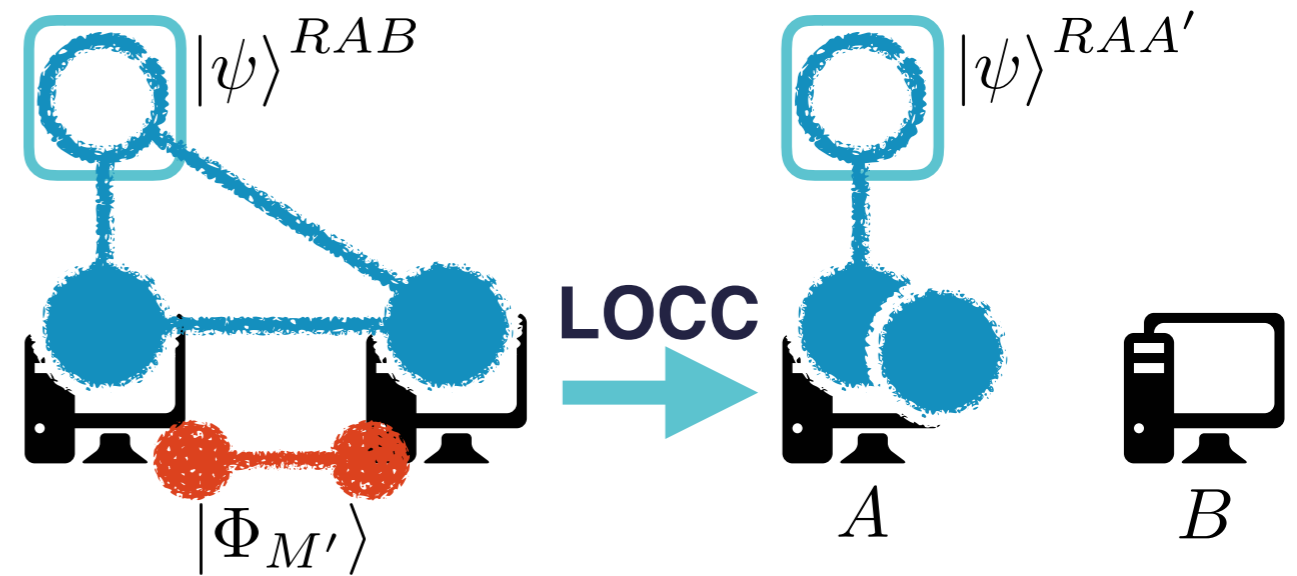
[8] M. Berta et al., IEEE Trans. Inf. Theory, 62, 3, 1425 (2016) など

状態分割と状態合併

状態分割



状態合併 (state merging)



先行研究の問題点 [8]

- 小規模な系で量子通信コスト大
- 正確に実行できない

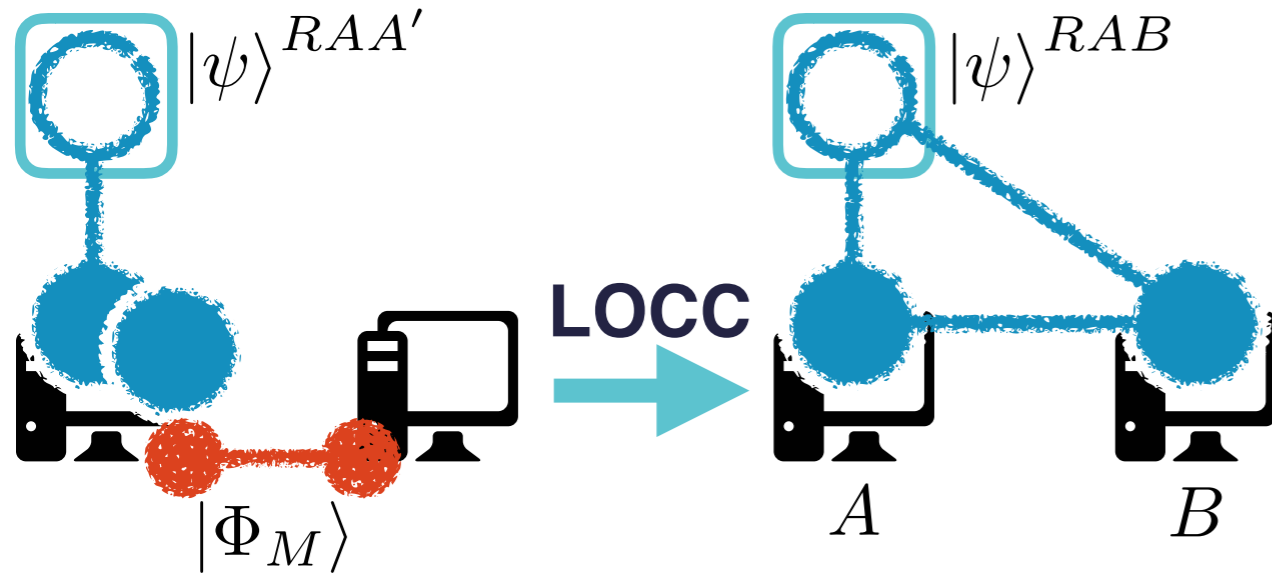
AB間のエンタングルメントがなくなる
→ $|\psi\rangle^{RAB}$ 自身のエンタングルメントを
使うことで量子通信を節約可能

[7] [H. Yamasaki](#) & M. Muraio, arXiv:1806.07875.

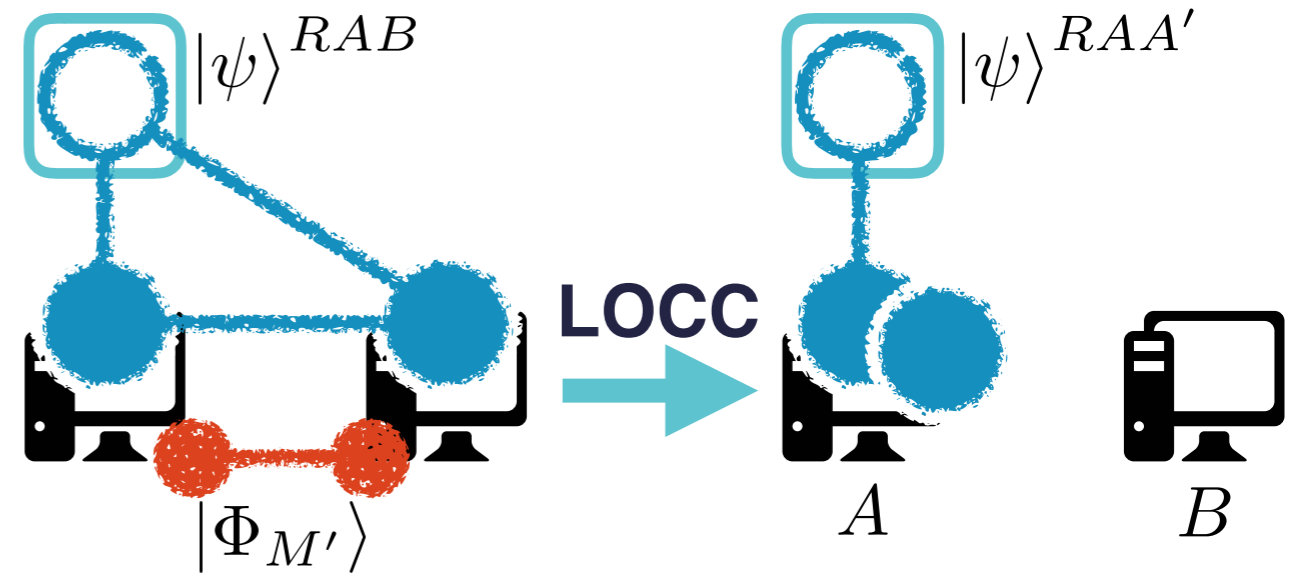
[8] M. Berta et al., IEEE Trans. Inf. Theory, 62, 3, 1425 (2016) など

状態分割と状態合併

状態分割



状態合併 (state merging)



先行研究の問題点 [8]

- 小規模な系で量子通信コスト大
- 正確に実行できない

AB間のエンタングルメントがなくなる
→ $|\psi\rangle^{RAB}$ 自身のエンタングルメントを
使うことで量子通信を節約可能

(小規模の系の状態を含む) 任意の状態について、状態分割と同じか、
状態分割より少ない量子通信で状態合併を行う手順を構成 [7]

(ここでの量子通信量はLOCCが自由な時の最大エンタングル状態の準位数)

[7] H. Yamasaki & M. Murao, arXiv:1806.07875.

[8] M. Berta et al., IEEE Trans. Inf. Theory, 62, 3, 1425 (2016) など

結果2：省コストな分散復号

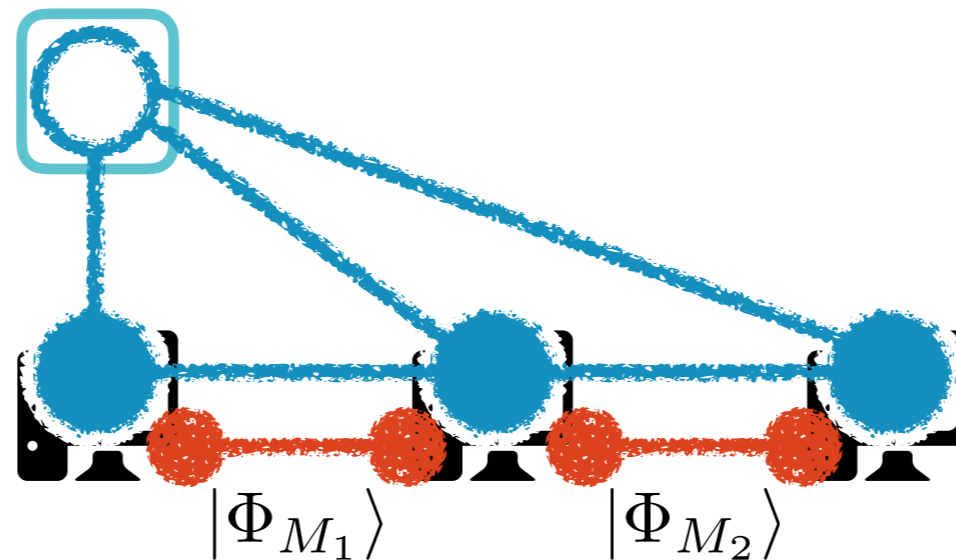
Theorem：分散符号化より省コストな分散復号

任意のツリー形ネットワークと任意の復号について、分散符号化と同じか、分散符号化より少ない量子通信で分散復号を行う手順が存在する

結果2：省コストな分散復号

Theorem：分散符号化より省コストな分散復号

任意のツリー形ネットワークと任意の復号について、分散符号化と同じか、分散符号化より少ない量子通信で分散復号を行う手順が存在する

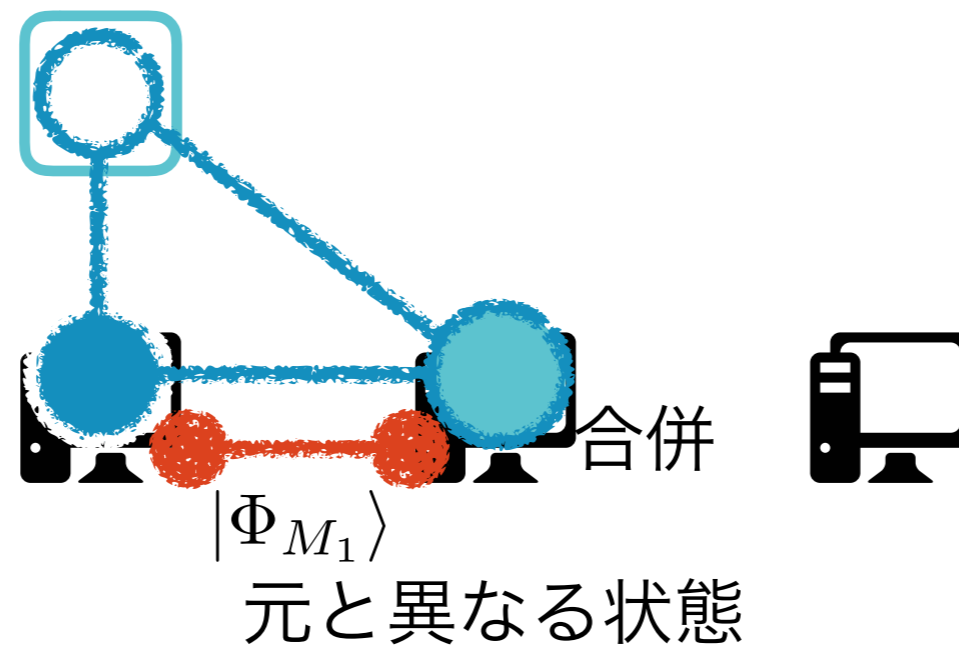


- 分散復号（と等価な状態変換タスク）を行う手順を具体的に構成
- 分散復号に必要な量子通信が分散符号化より少ない（または等しい）と証明

結果2：省コストな分散復号

Theorem：分散符号化より省コストな分散復号

任意のツリー形ネットワークと任意の復号について、分散符号化と同じか、分散符号化より少ない量子通信で分散復号を行う手順が存在する

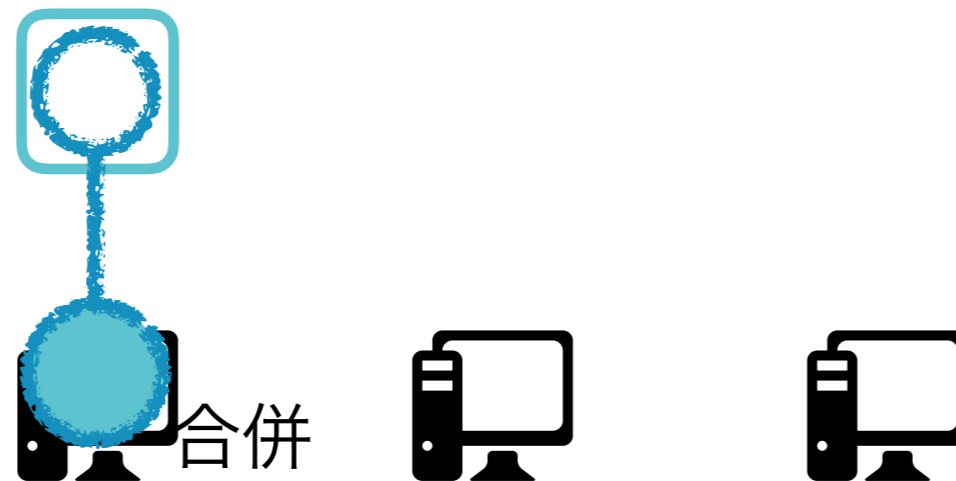


- 分散復号（と等価な状態変換タスク）を行う手順を具体的に構成
- 分散復号に必要な量子通信が分散符号化より少ない（または等しい）と証明

結果2：省コストな分散復号

Theorem：分散符号化より省コストな分散復号

任意のツリー形ネットワークと任意の復号について、分散符号化と同じか、分散符号化より少ない量子通信で分散復号を行う手順が存在する



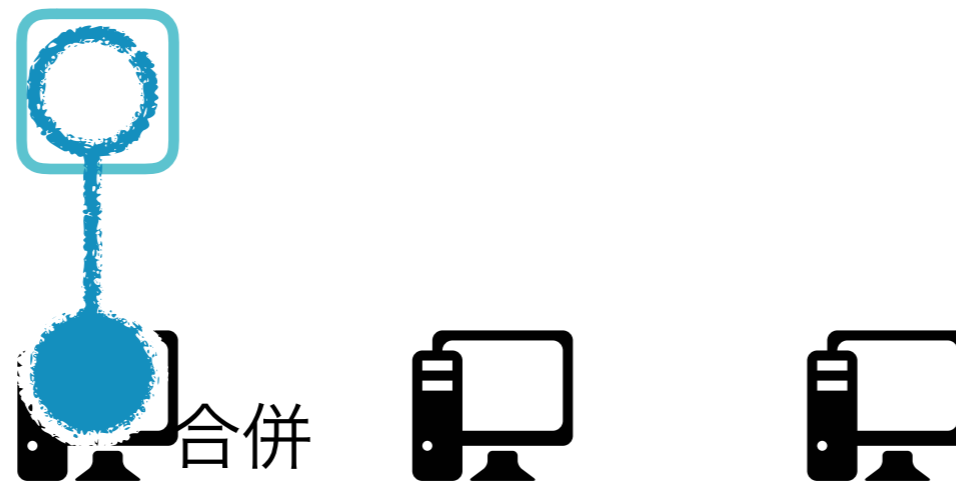
元と異なる状態

- ・ 分散復号（と等価な状態変換タスク）を行う手順を具体的に構成
- ・ 分散復号に必要な量子通信が分散符号化より少ない（または等しい）と証明

結果2：省コストな分散復号

Theorem：分散符号化より省コストな分散復号

任意のツリー形ネットワークと任意の復号について、分散符号化と同じか、分散符号化より少ない量子通信で分散復号を行う手順が存在する



元の量子情報を表す状態に変換

- ・ 分散復号（と等価な状態変換タスク）を行う手順を具体的に構成
- ・ 分散復号に必要な量子通信が分散符号化より少ない（または等しい）と証明

分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]



分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション
符号化



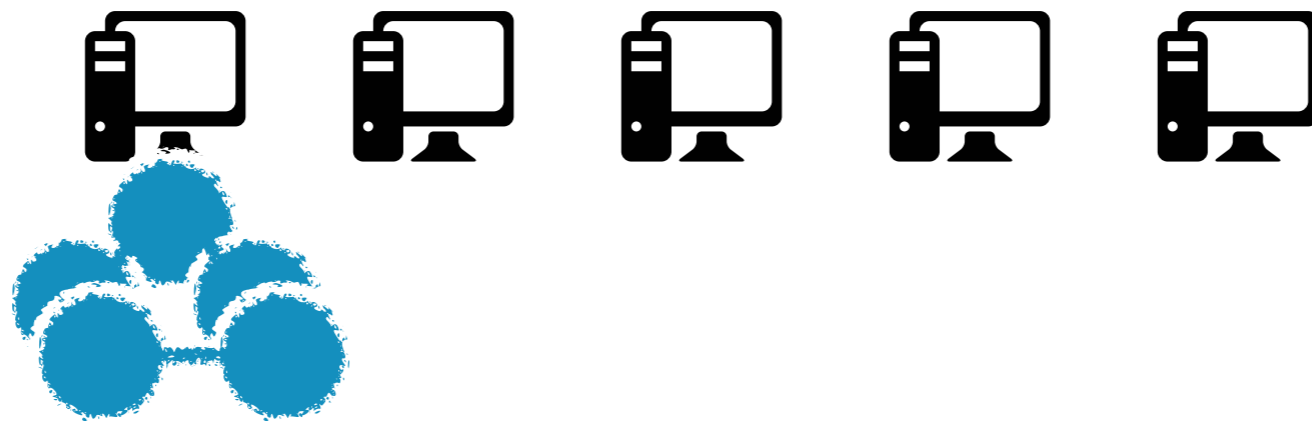
本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]



分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション
符号化



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

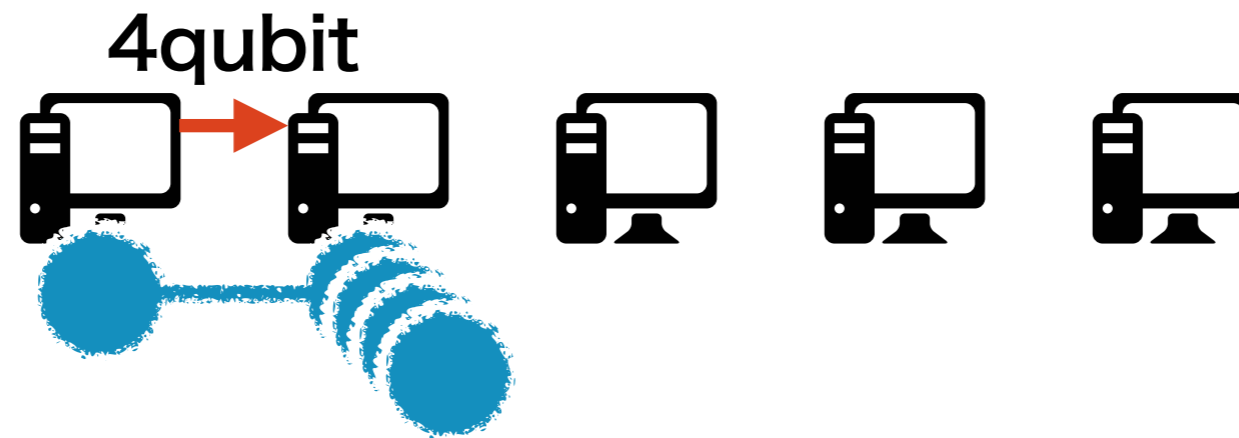


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

符号化



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

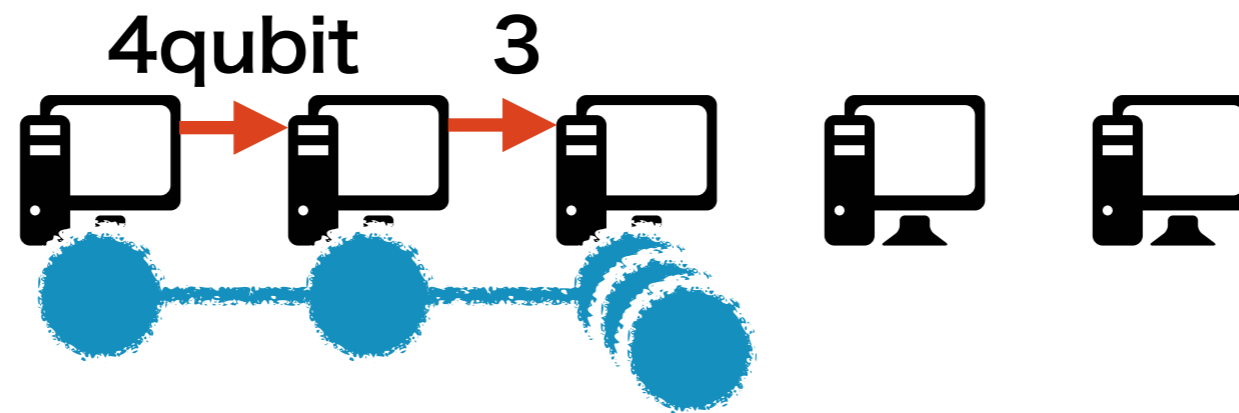


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

符号化



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

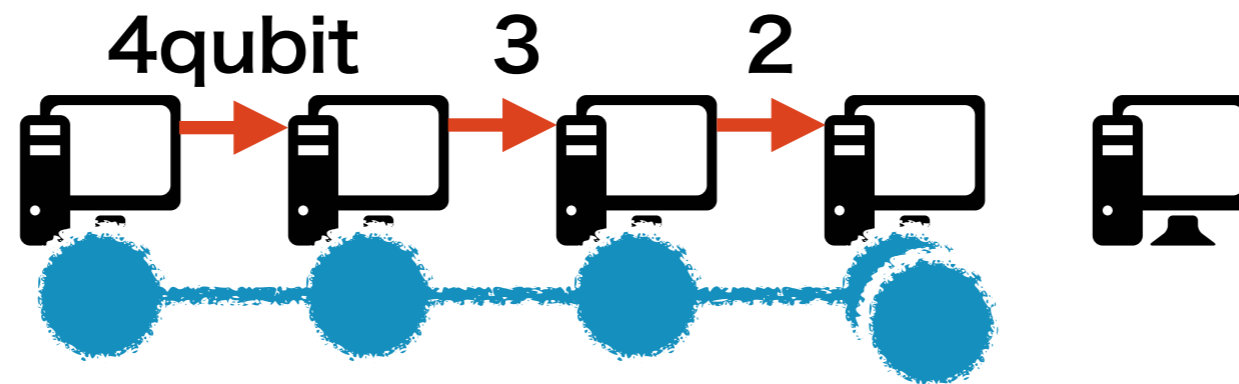


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

符号化



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

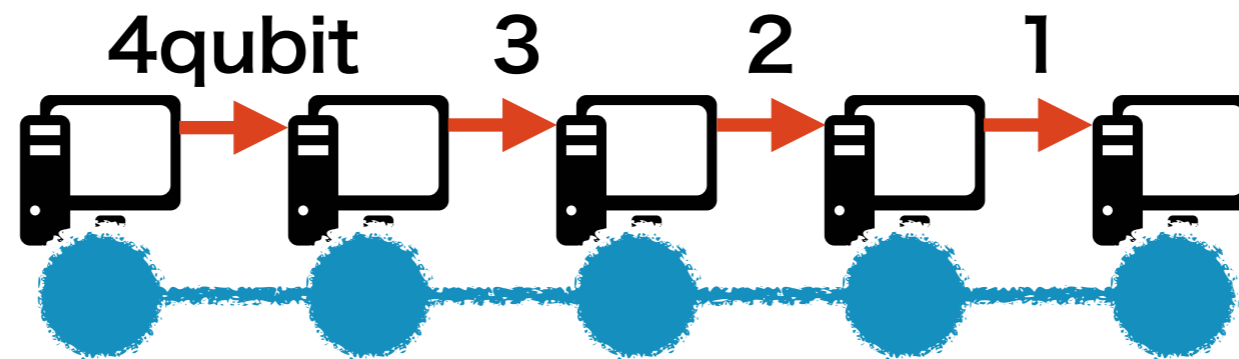


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

符号化



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

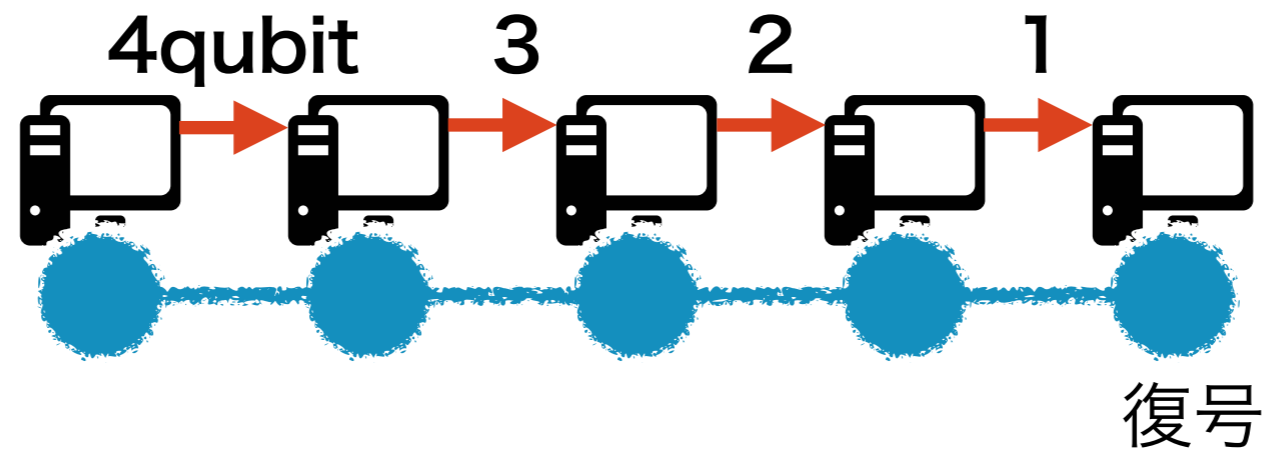


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

符号化



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

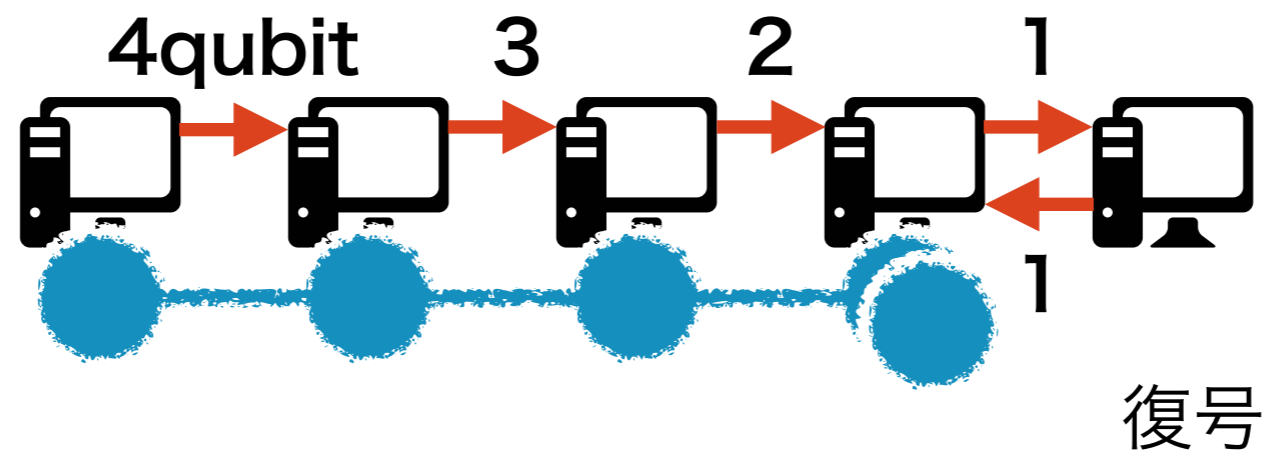


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

符号化



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

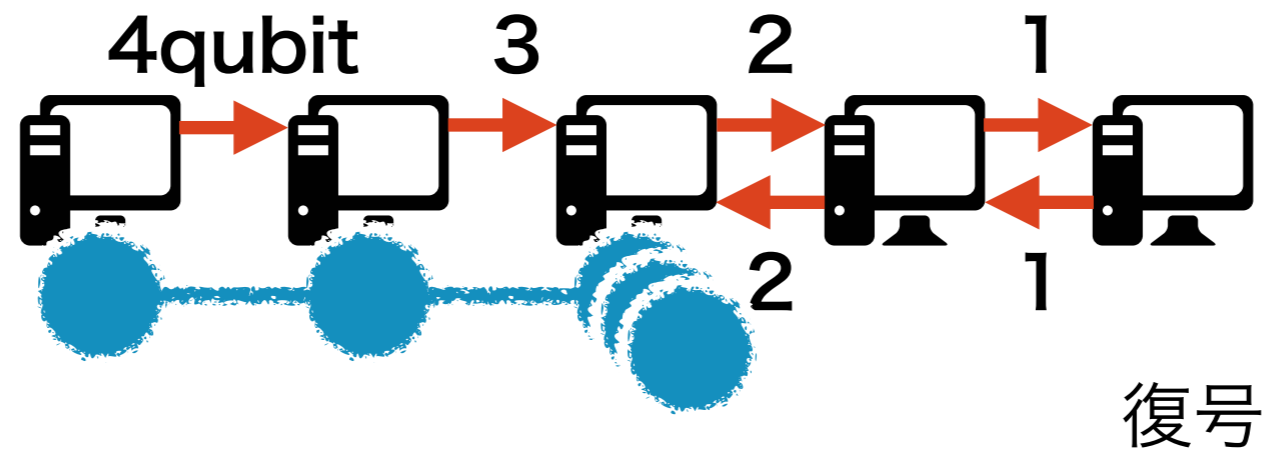


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

符号化



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

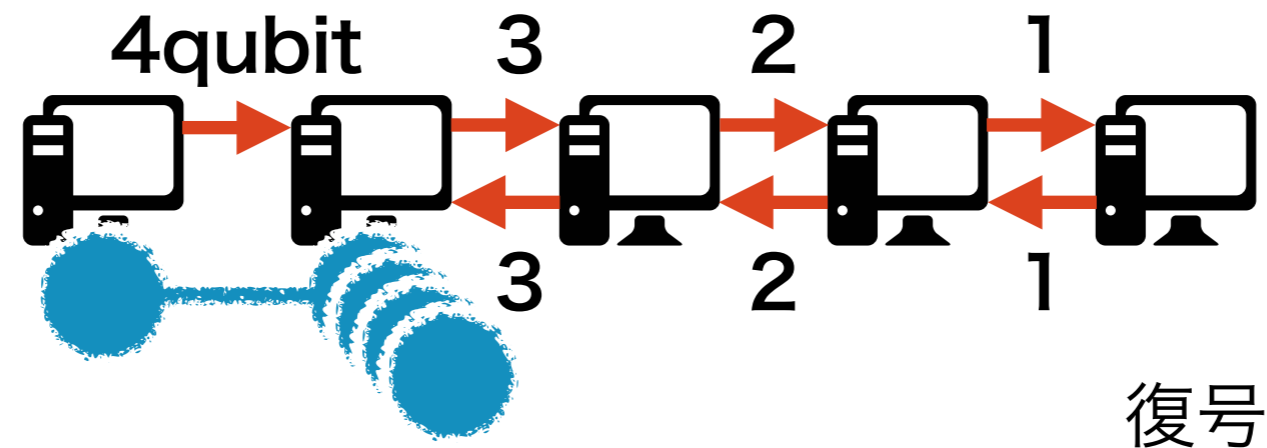


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

符号化



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

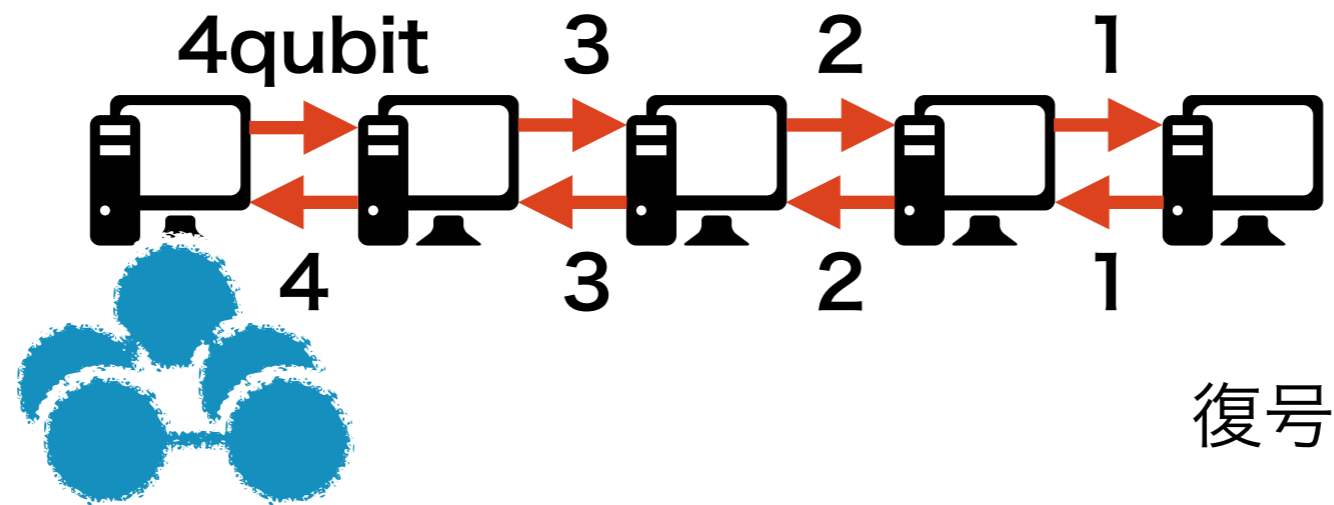


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

符号化



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

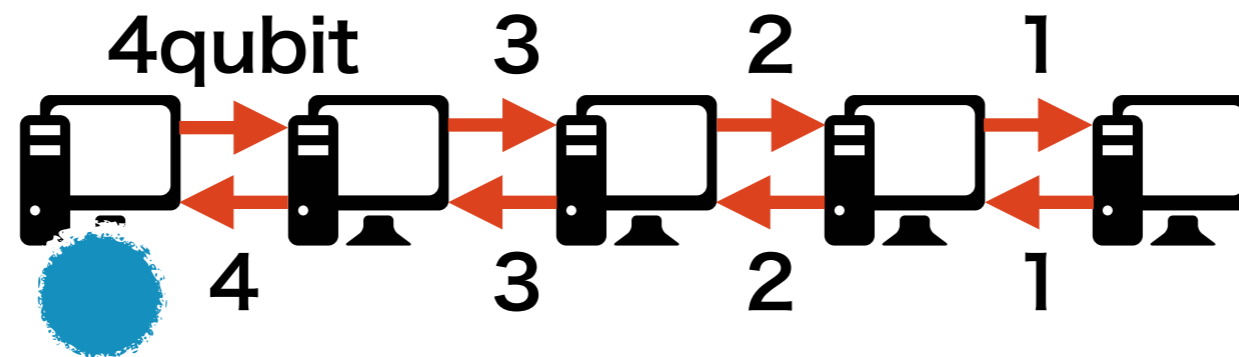


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

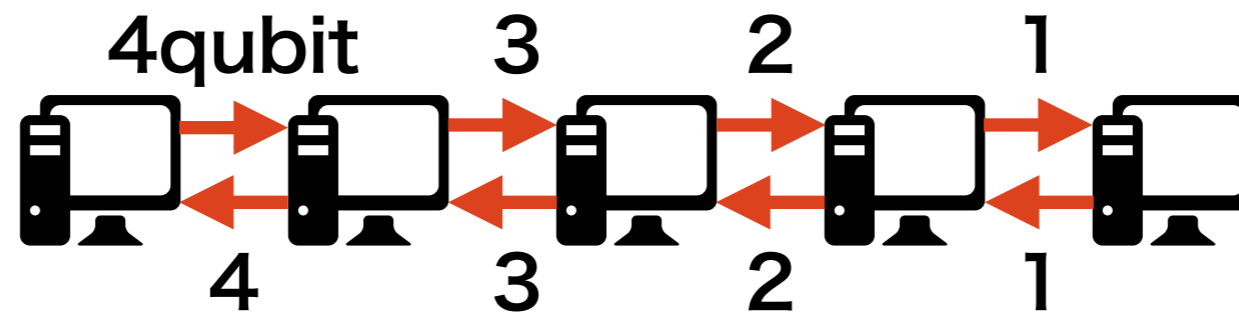


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

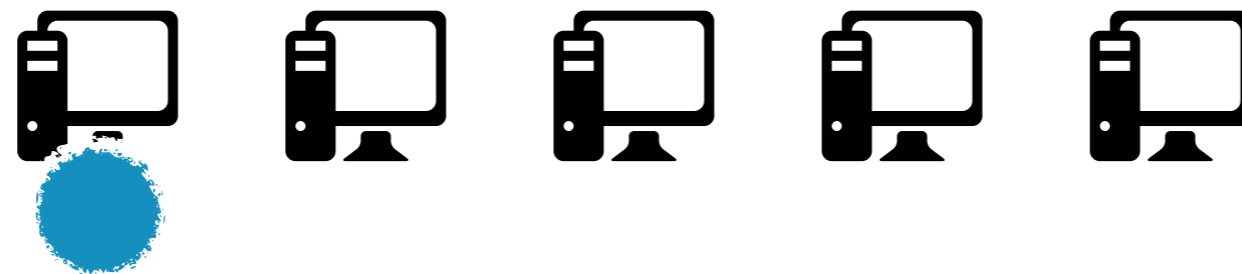
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

符号化

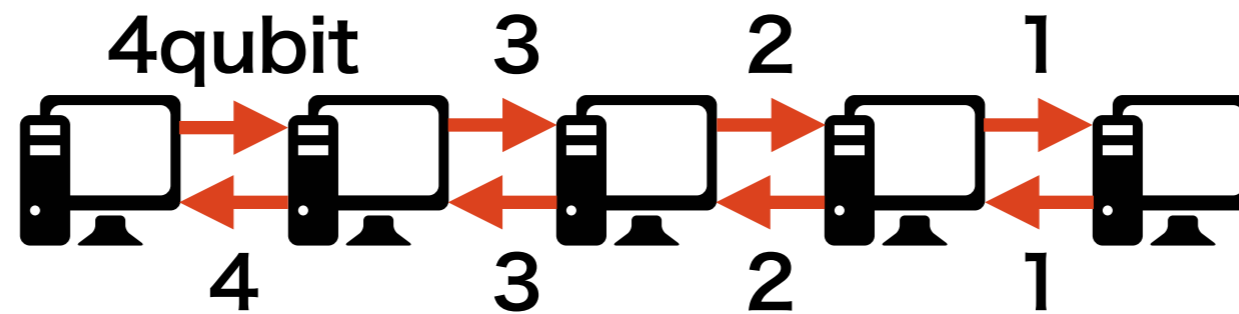


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

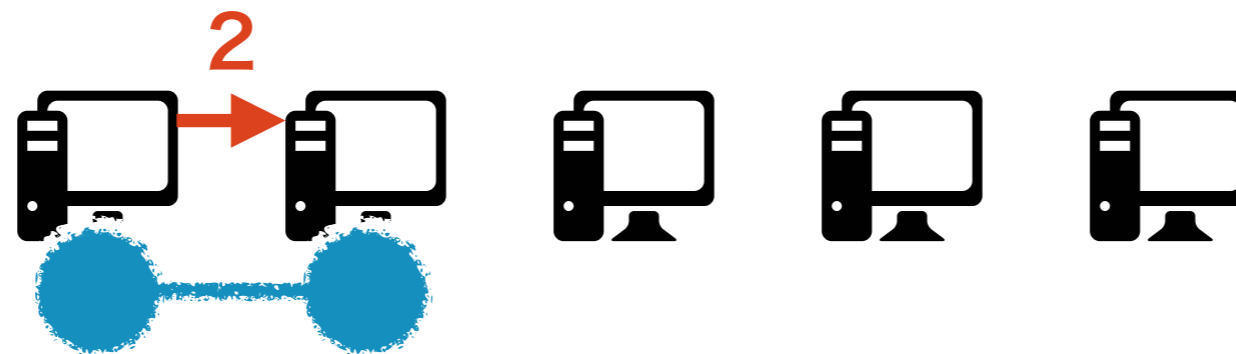
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

符号化

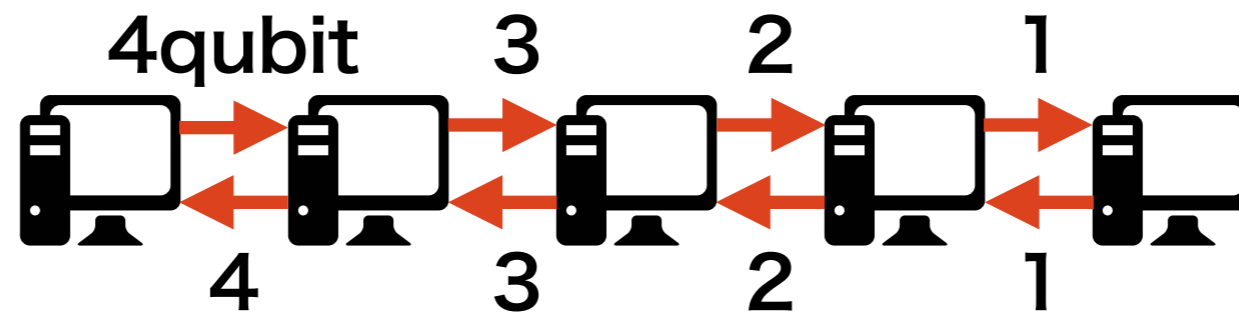


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

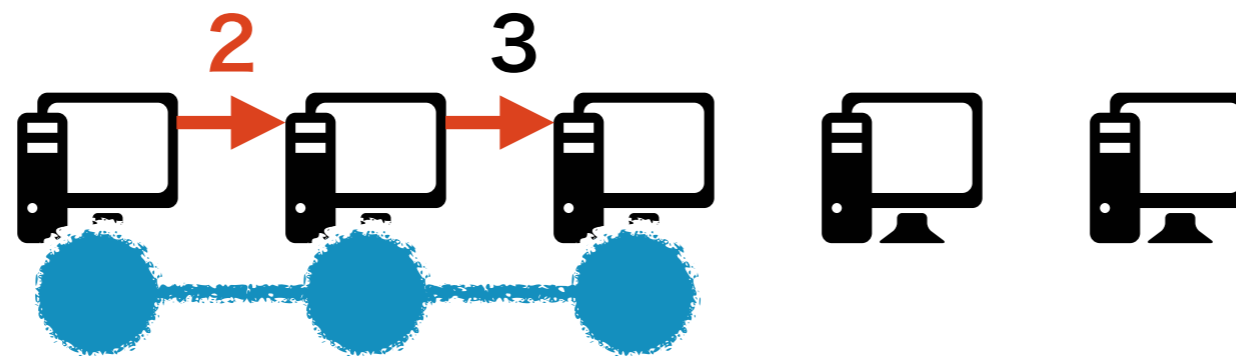
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

符号化

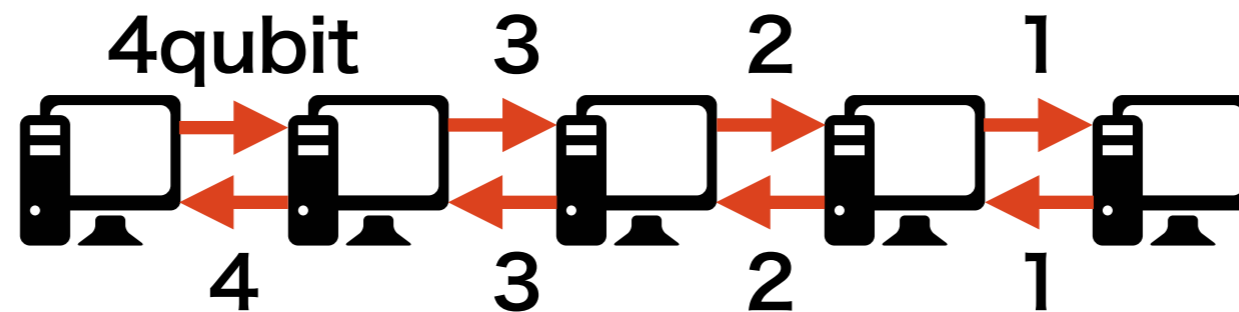


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

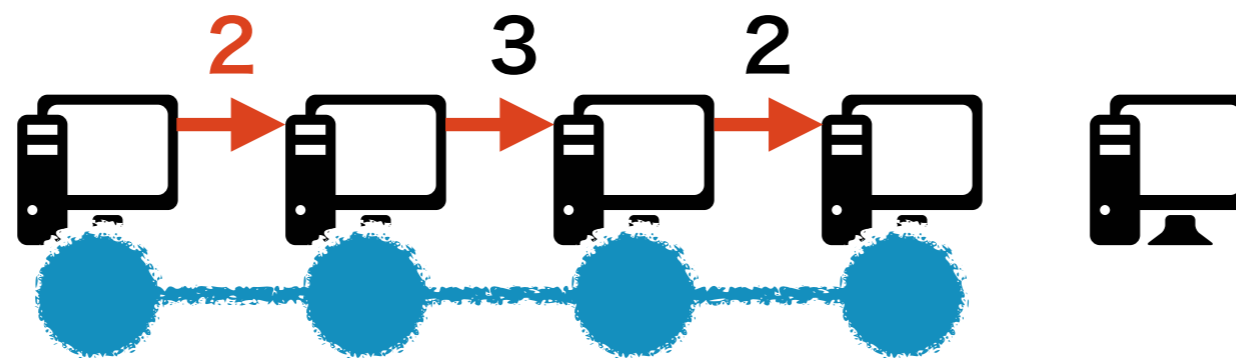
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

符号化

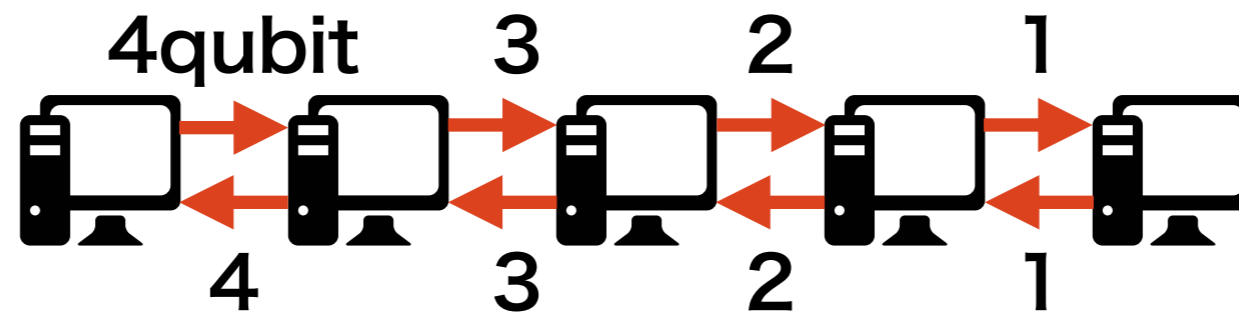


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

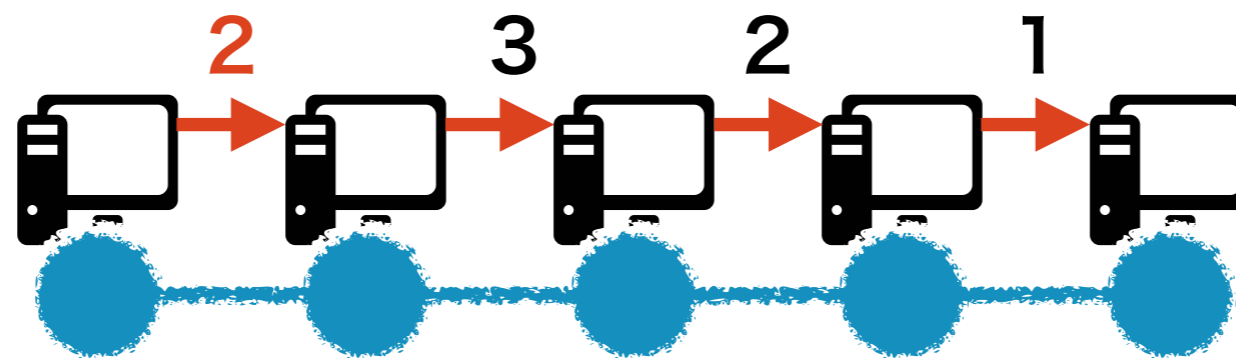
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

符号化

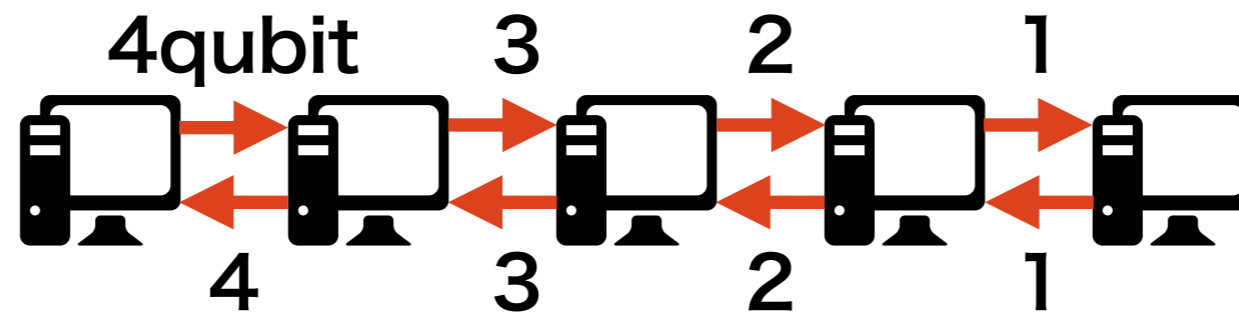


分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

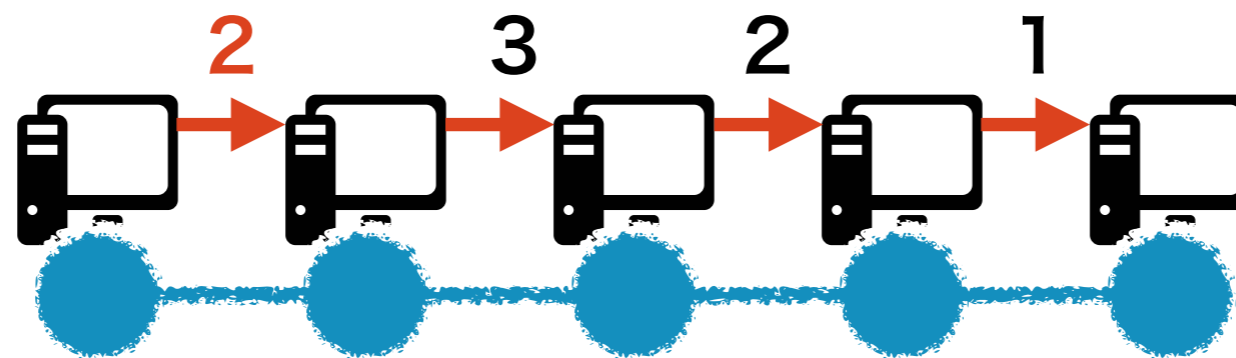
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

符号化



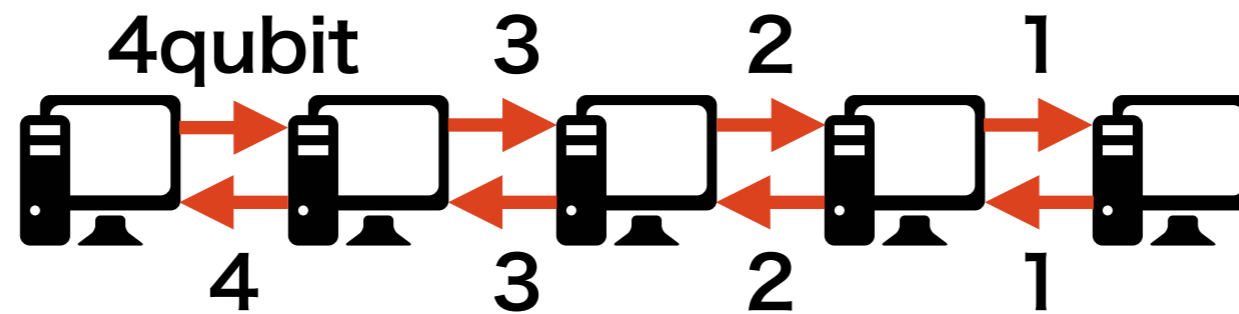
復号

分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

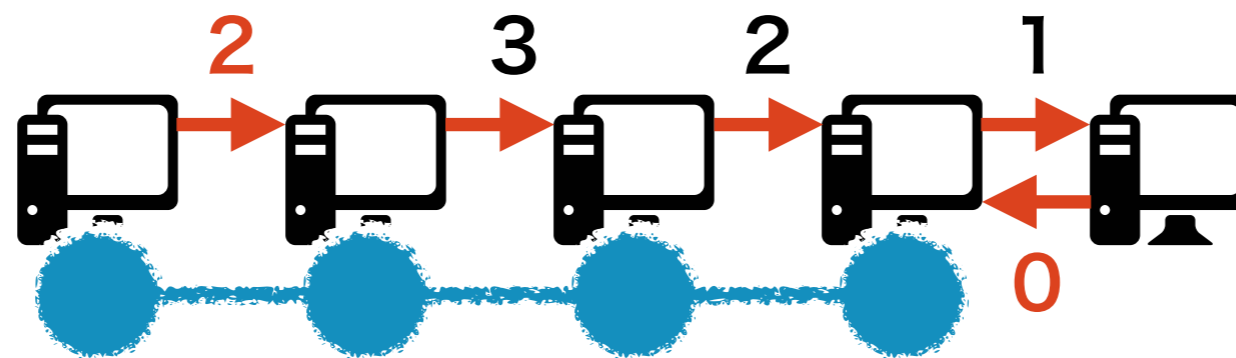
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

符号化



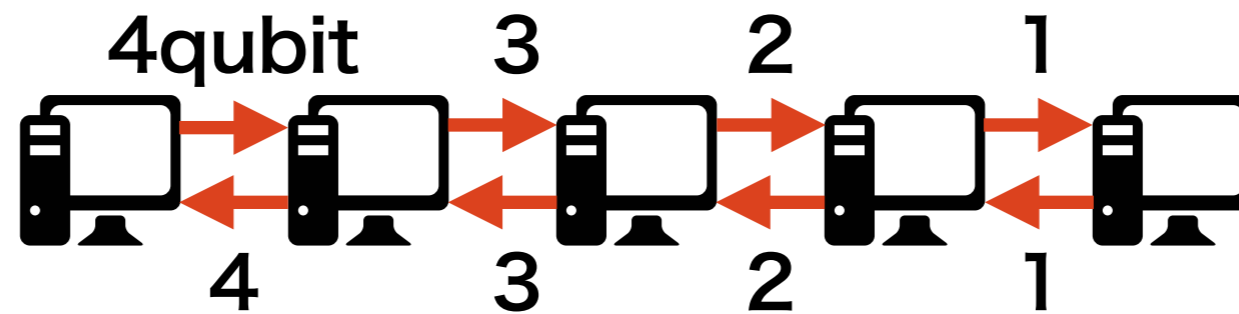
復号

分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

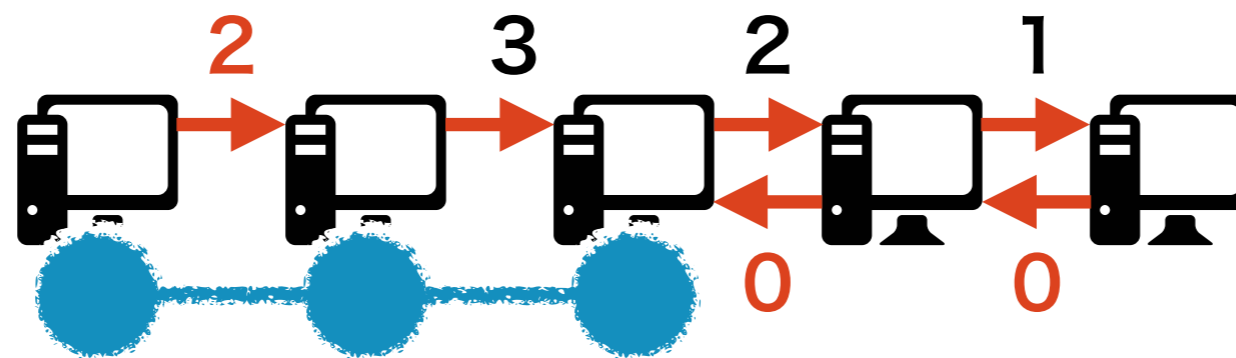
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

符号化



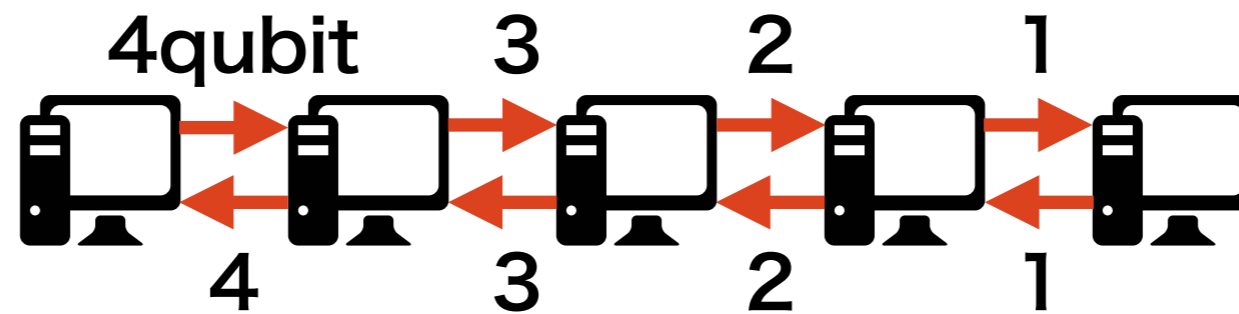
復号

分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

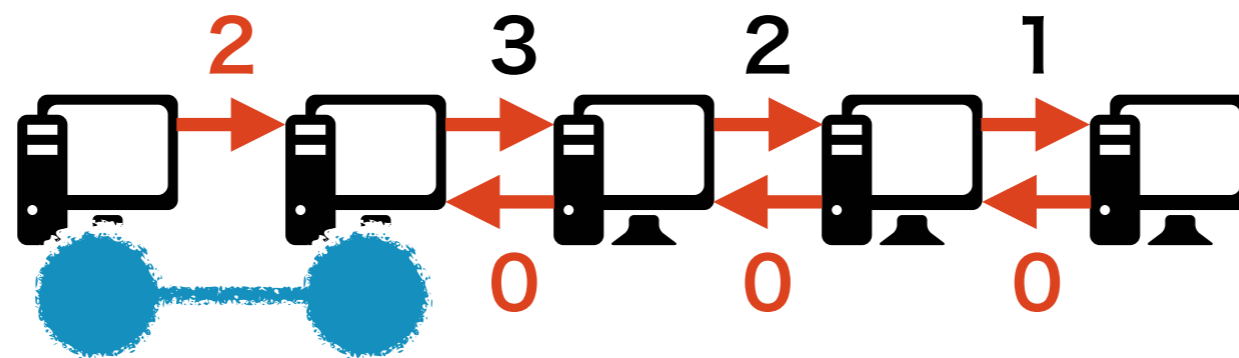
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

符号化



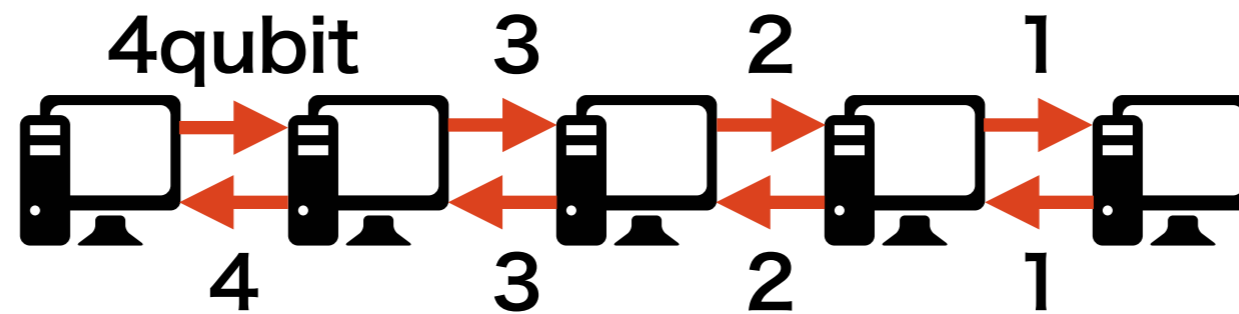
復号

分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

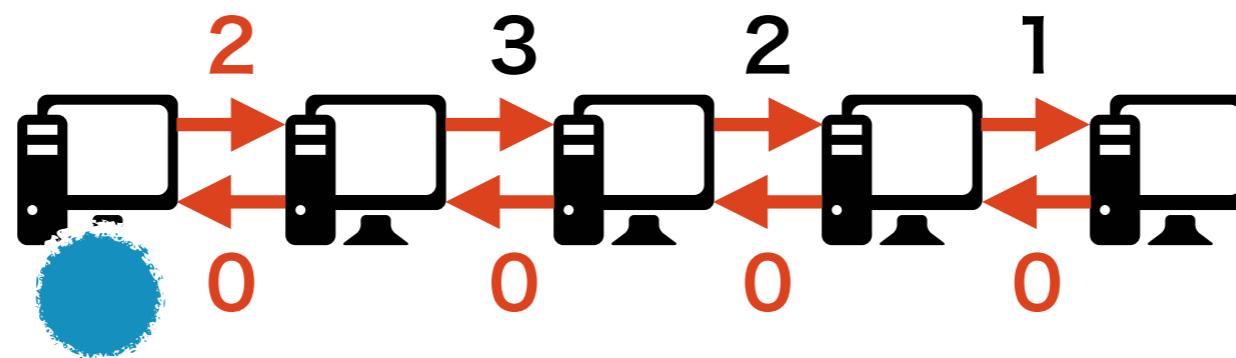
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

符号化



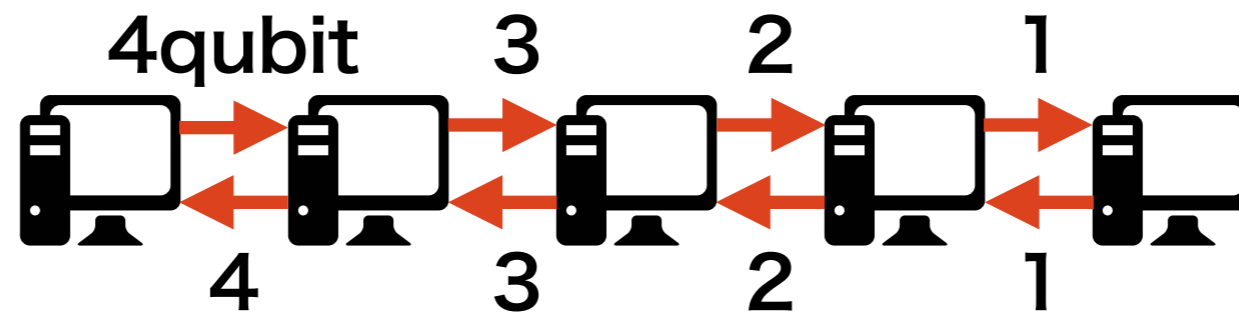
復号

分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

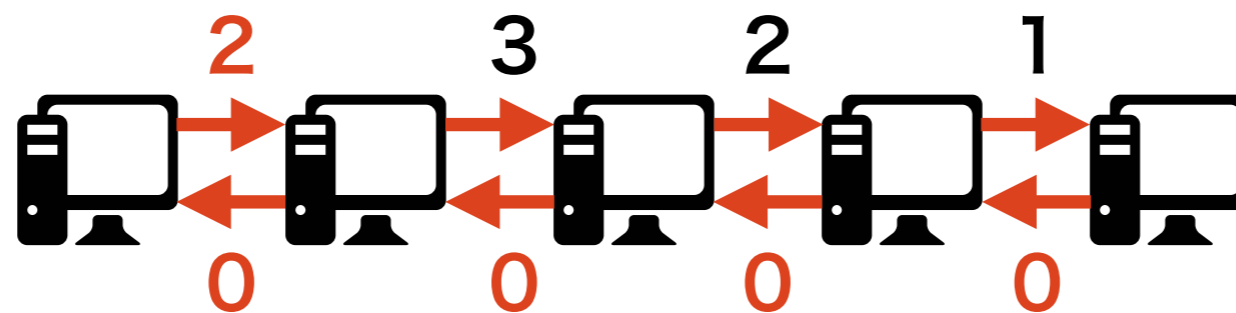
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

符号化



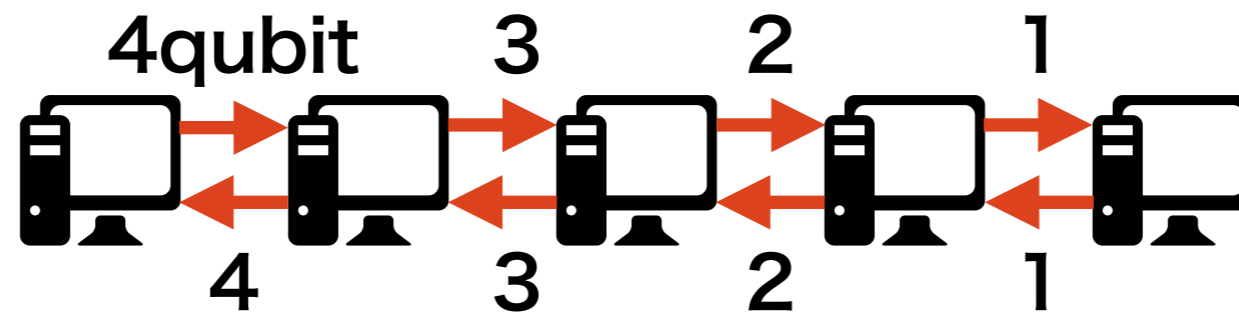
復号

分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

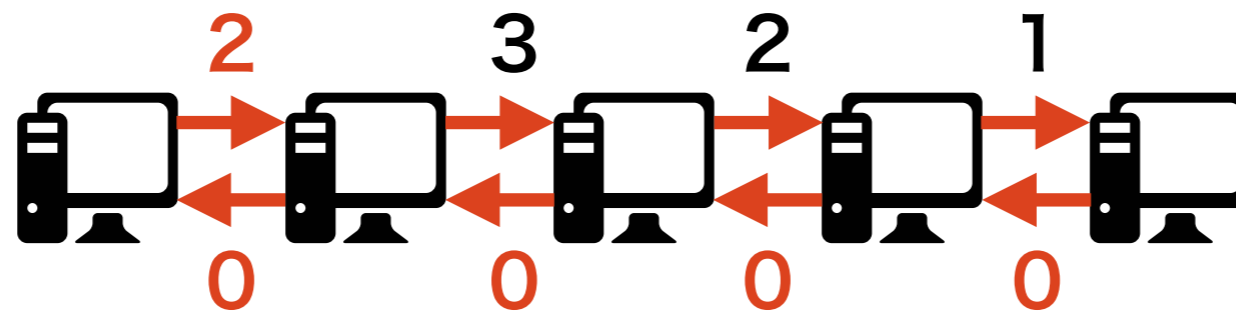
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

<結果1：分散符号化> コスト最小



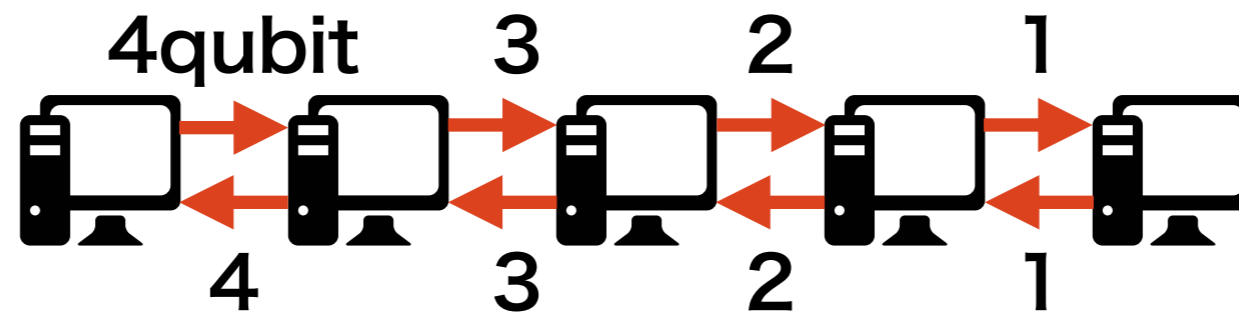
復号

分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

trivialな手順：量子テレポーテーション

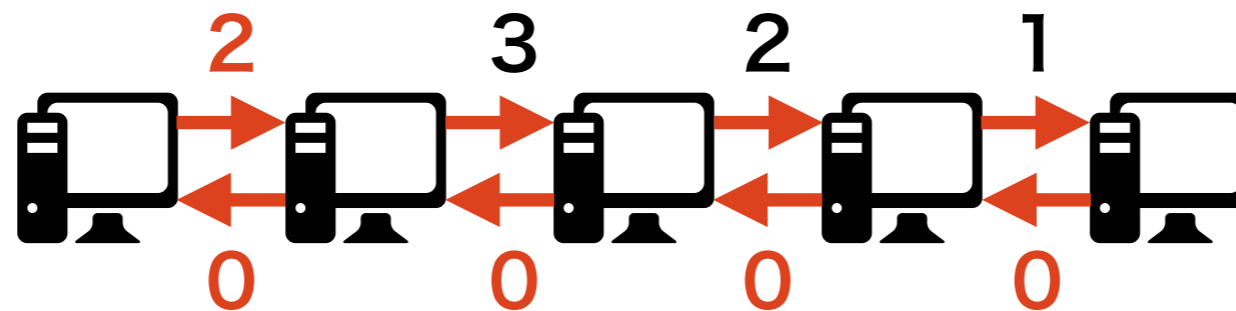
符号化



復号

本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

<結果1：分散符号化> コスト最小



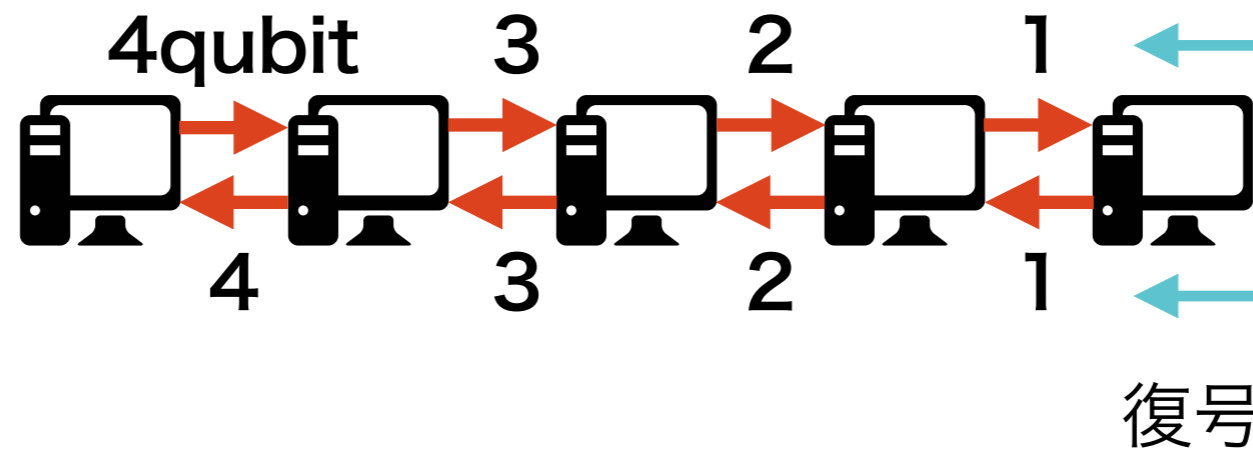
<結果2：分散復号> 分散符号化よりさらに省コスト

分散符号化・分散復号の差

例：5量子ビット誤り訂正符号

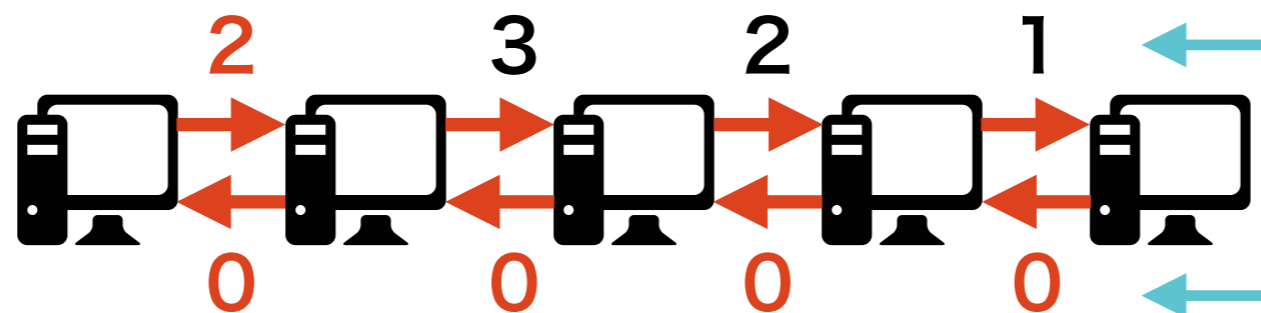
trivialな手順：量子テレポーテーション

符号化



本研究の分散符号化・分散復号手順 [6]

<結果1：分散符号化> コスト最小



<結果2：分散復号> 分散符号化よりさらに省コスト

まとめ

- 符号化・復号の**非局所性を定量的に論じる手法**を定式化
- 符号化・復号の**非局所性に表れる差**を定量的に特徴づけるboundを導出
- <意義：基礎>：符号化に基づいた多体量子系の**定量的解析の基礎**
- <意義：応用>：符号化・復号の**省コストな実行手順を提案**

文献

- H. Yamasaki & M. Murao, “Distributed Encoding and Decoding of Quantum Information over Networks,” arXiv:1807.11483.
- H. Yamasaki & M. Murao, “Quantum state merging for arbitrarily-small-dimensional systems,” arXiv:1806.07875.

Looking for a postdoc position from April 2019

This work was supported by Grant-in-Aid for JSPS Research Fellow and JSPS KAKENHI Grant Numbers 26330006, 15H01677, 16H01050, 17H01694, 18H04286, and 18J10192.

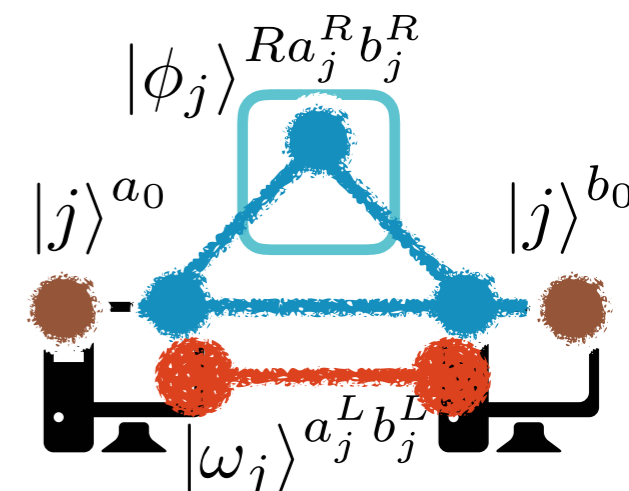
本研究の状態合併手順

Theorem : 状態合併

任意の状態について状態分割以下の量子通信量で状態合併を行う手順が存在

Lemma : 小芦・井元分解

任意の $|\psi\rangle^{RAB}$ について局所変換 ν^A, ν^B により以下の形に一意に分解可能

$$\left(\mathbb{1}^R \otimes \nu^A \otimes \nu^B\right) |\psi\rangle^{RAB} = \sum_{j=0}^{J-1} \sqrt{p(j)} \underbrace{|j\rangle^{a_0} \otimes |j\rangle^{b_0}}_{\text{古典的}} \otimes \underbrace{|\omega_j\rangle^{a_j^L b_j^R}}_{\text{冗長}} \otimes \underbrace{|\phi_j\rangle^{Ra_j^R b_j^R}}_{\text{量子的}} = \sum_{j=0}^{J-1} \sqrt{p(j)}$$


状態合併の手順を具体的に構成

- **冗長な部分** → “controlled” エンタングルメント蒸留
 - **量子的部分** → “controlled” 量子テレポーテーション
 - **古典的部分** → 測定 + 測定結果の古典通信により合併
- } $|j\rangle^{a_0}, |j\rangle^{b_0}$ を control とする測定 & unitary