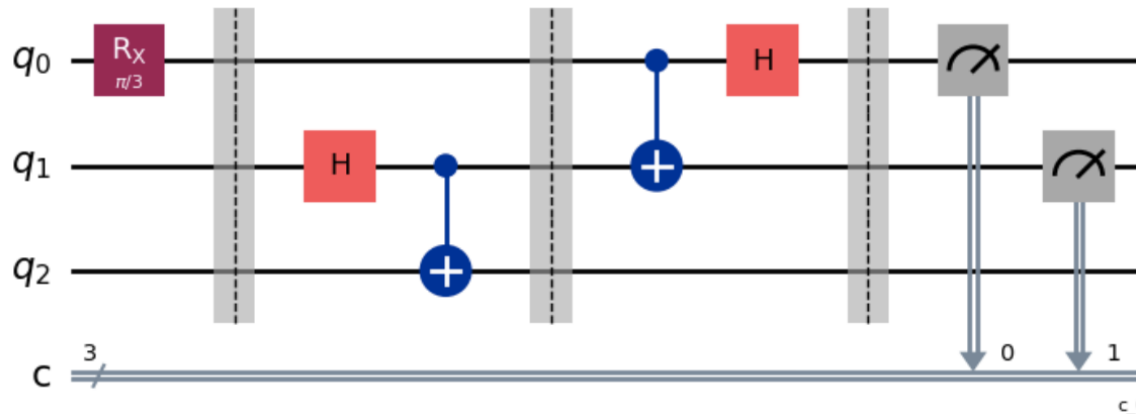


量子テレポーテーション

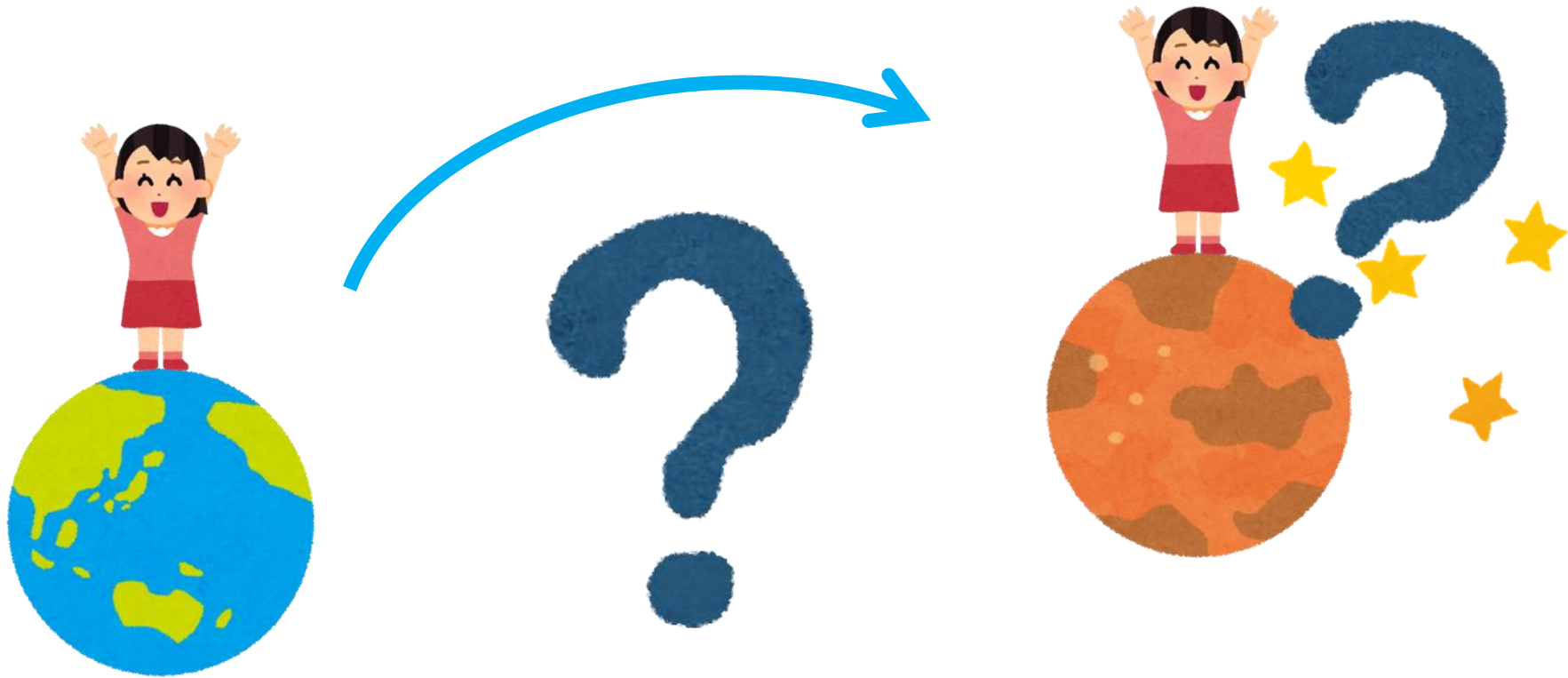
Sep 29, 2025

沼田祈史
Kifumi Numata
IBM Quantum

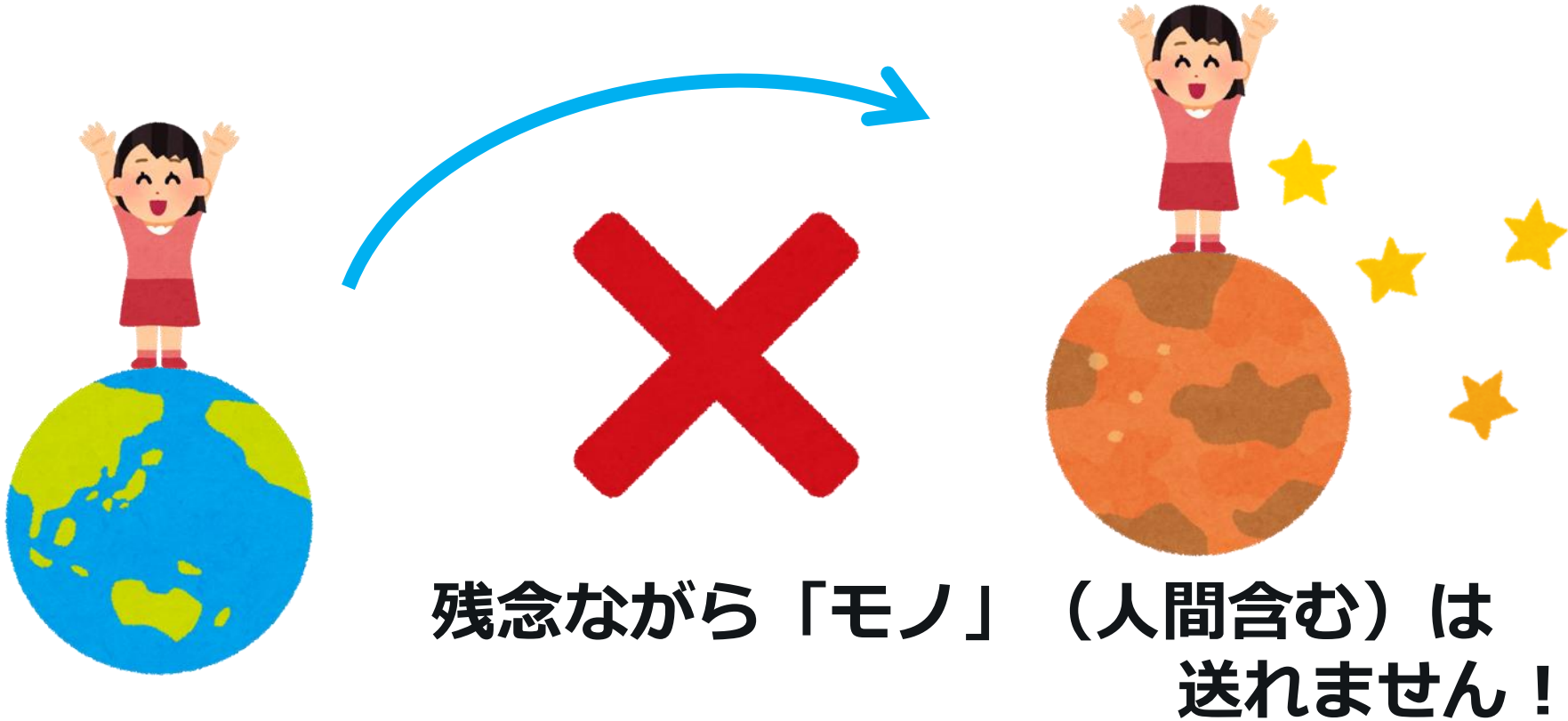


はじめに：
量子テレポーテーションとは何だと思いますか？
(予想)

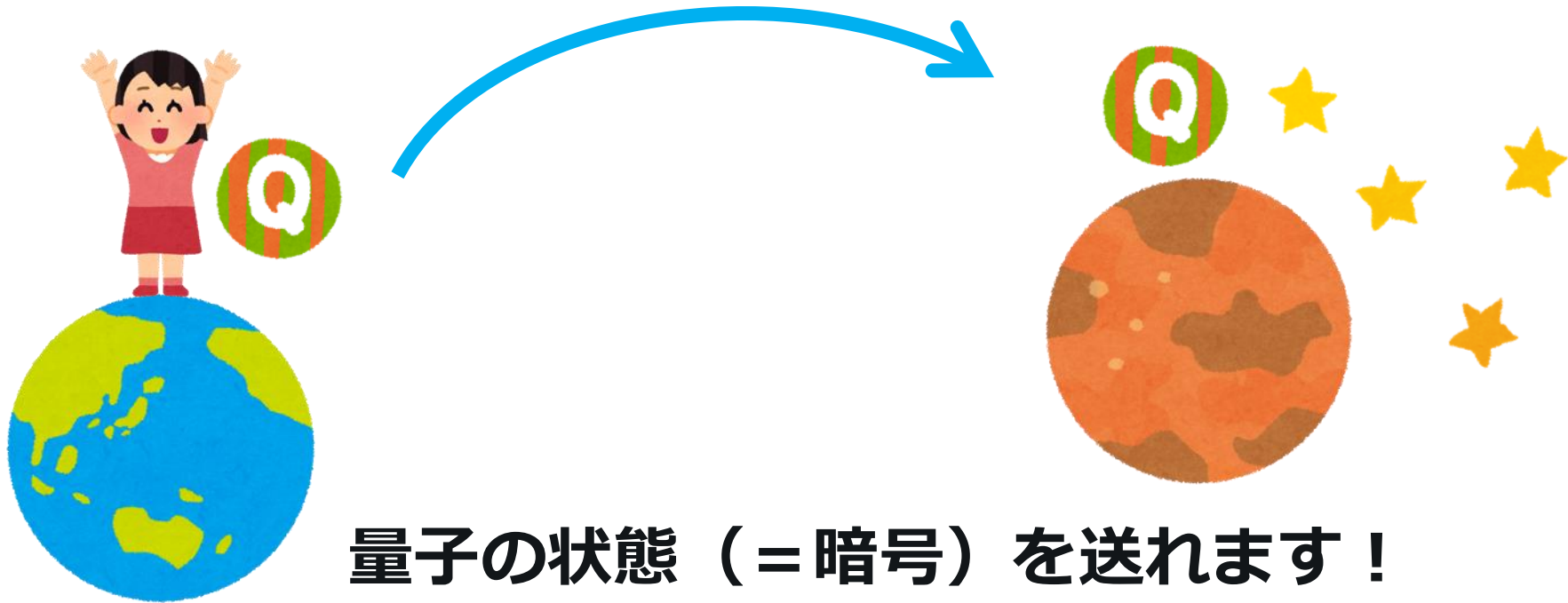
量子テレポーテーションとは？



量子テレポーテーションとは？



量子テレポーテーションとは？

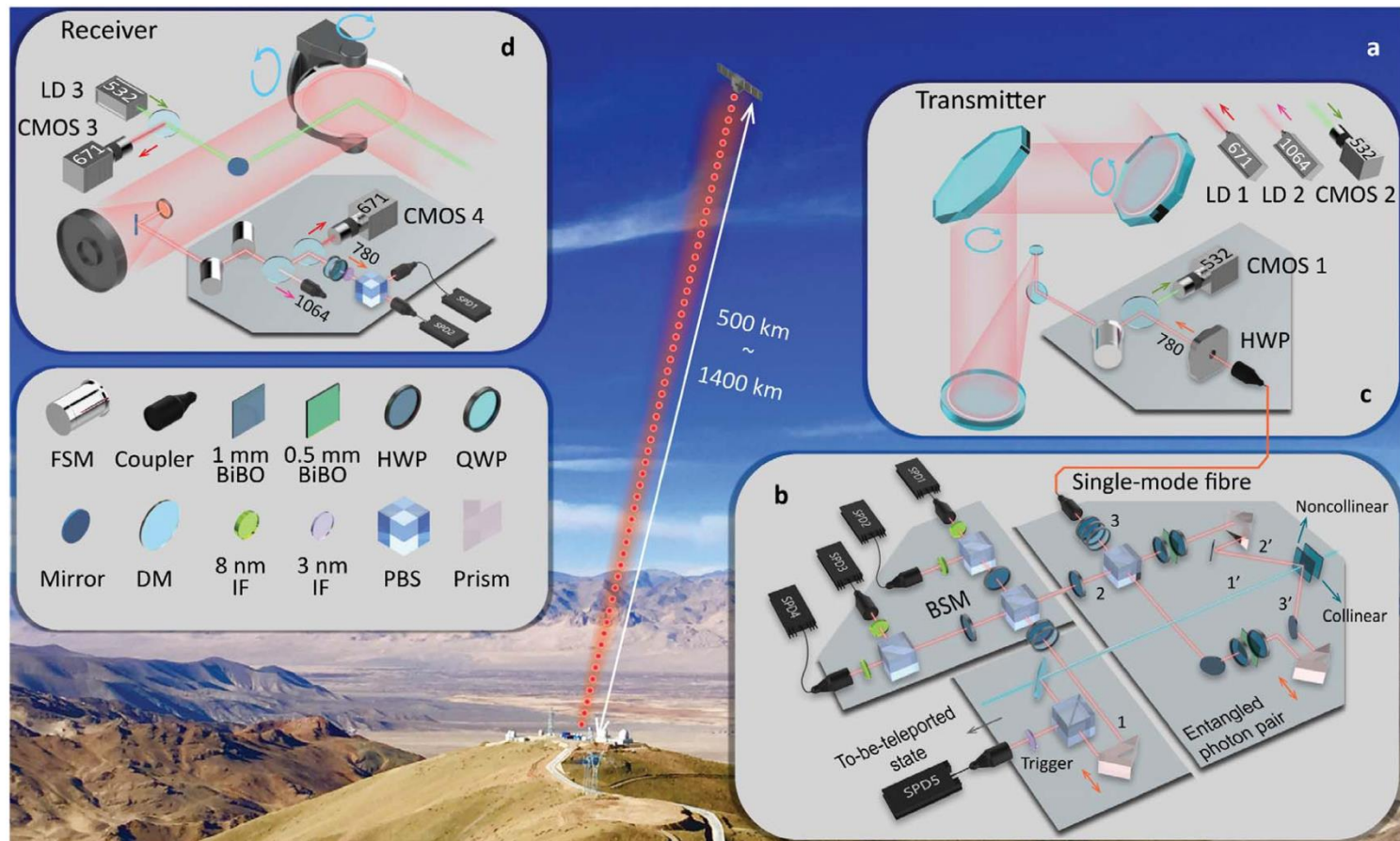


量子テレポーテーションとは？



人工衛星に送った実験があります。

地上と通信衛星間の量子テレポーテーションの例



暗号をコピーして送ればいいのでは？

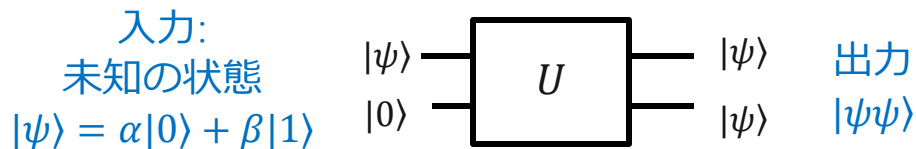


量子状態はコピーできないので無理です。

：量子複製不可能定理（No-cloning theorem）

量子複製不可能定理 (No-cloning theorem)

ユニタリー演算子 U が量子状態 $|\psi\rangle$ のコピーを作成できると仮定すると、



U は未知の量子状態 $|\psi\rangle$ だけでなく $|0\rangle$ や $|1\rangle$ にも適用できるので、

$$U|0\rangle|0\rangle = |00\rangle, \quad U|1\rangle|0\rangle = |11\rangle$$

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \text{ とすると、 } U|\psi\rangle|0\rangle = \alpha U|0\rangle|0\rangle + \beta U|1\rangle|0\rangle = \alpha|00\rangle + \beta|11\rangle$$

一方、 U は $|\psi\rangle$ をコピーするので

$$U|\psi\rangle|0\rangle = |\psi\rangle|\psi\rangle = \alpha^2|00\rangle + \alpha\beta|01\rangle + \alpha\beta|10\rangle + \beta^2|11\rangle$$

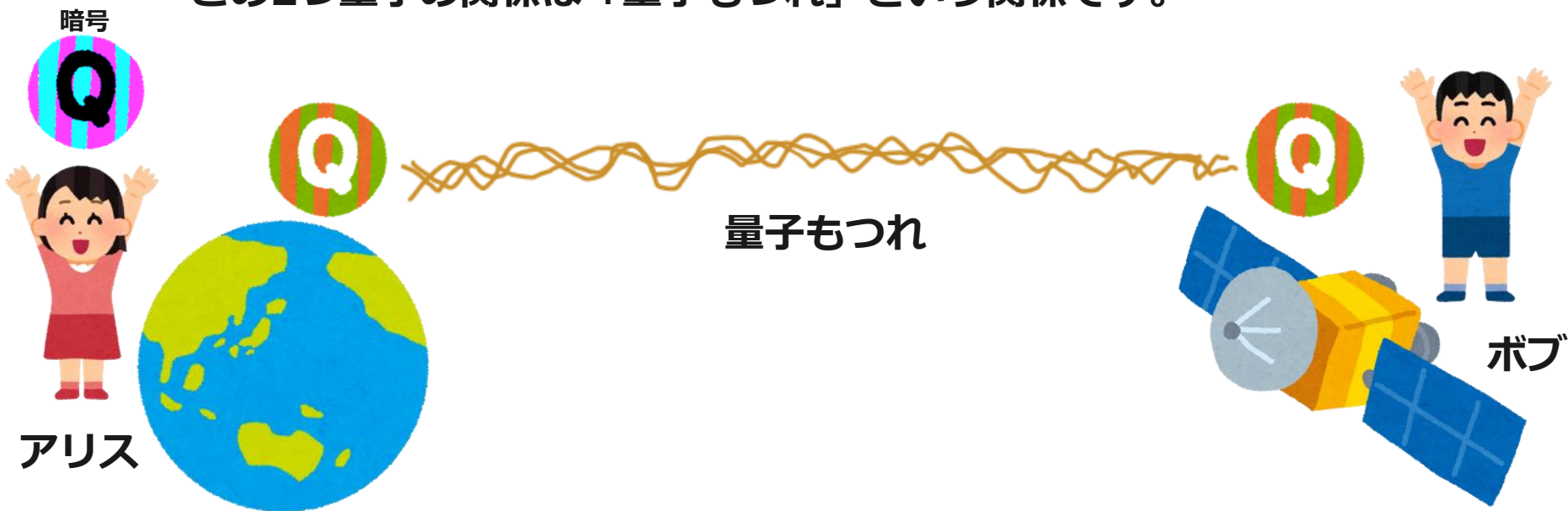
これら2つの状態を満たす (α, β) は $(0,0)$, $(0,1)$, $(1,0)$ 以外存在しないが、 α, β は任意であるため矛盾する。

よって、未知の量子状態のコピーを作成することはできない。

量子テレポーテーションの Protokol

(1) 地球のアリスがある量子  (暗号) を持っています。

(2) 特別な関係にあるふたごの量子  が地球と人工衛星の上にあります。
この2つ量子の関係は「量子もつれ」という関係です。



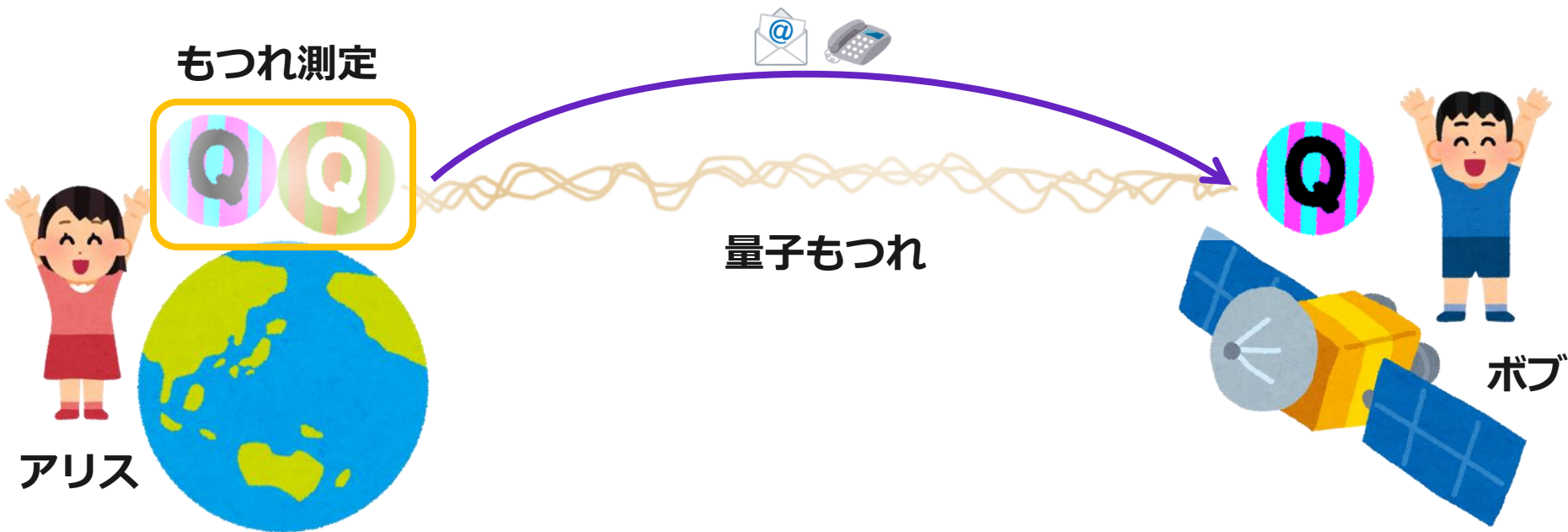
量子テレポーテーションの Protokol

(3) 地球のアリスが地上の2つの量子に特殊な測定（もつれ測定）をします。
（量子もつれ状態にあるボブの量子の状態が瞬時に変わります。）

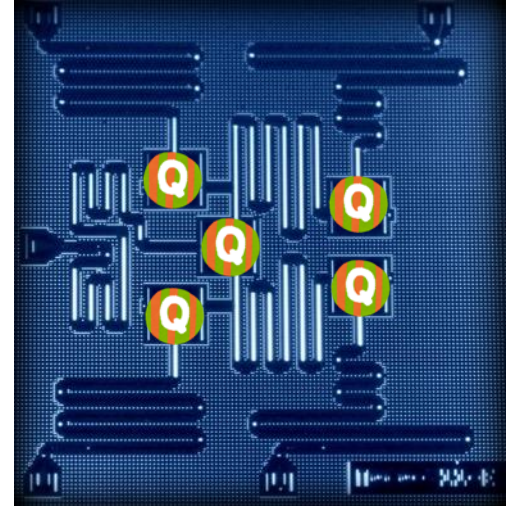
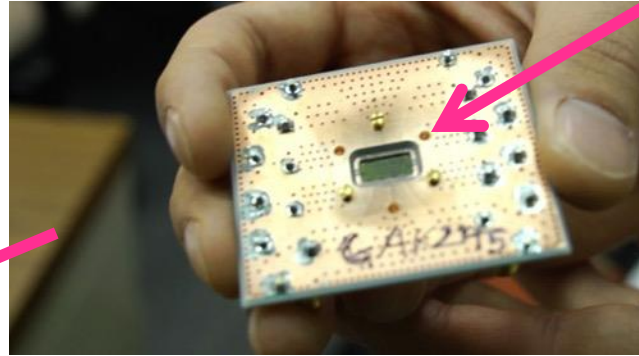
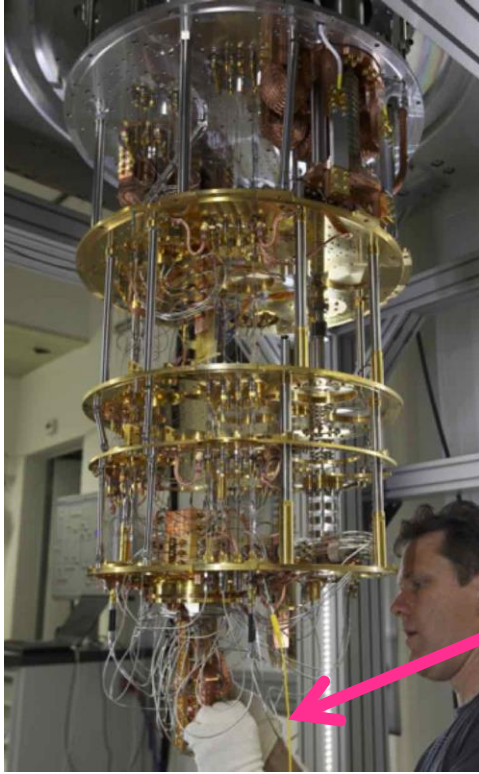


量子テレポーテーションの Protokol

- (4) アリスが測定結果をメールや電話でボブに送り、
ボブはもらった結果をもとに自分の量子を補正します。
ボブの量子がアリスの持っていた暗号に変化します！

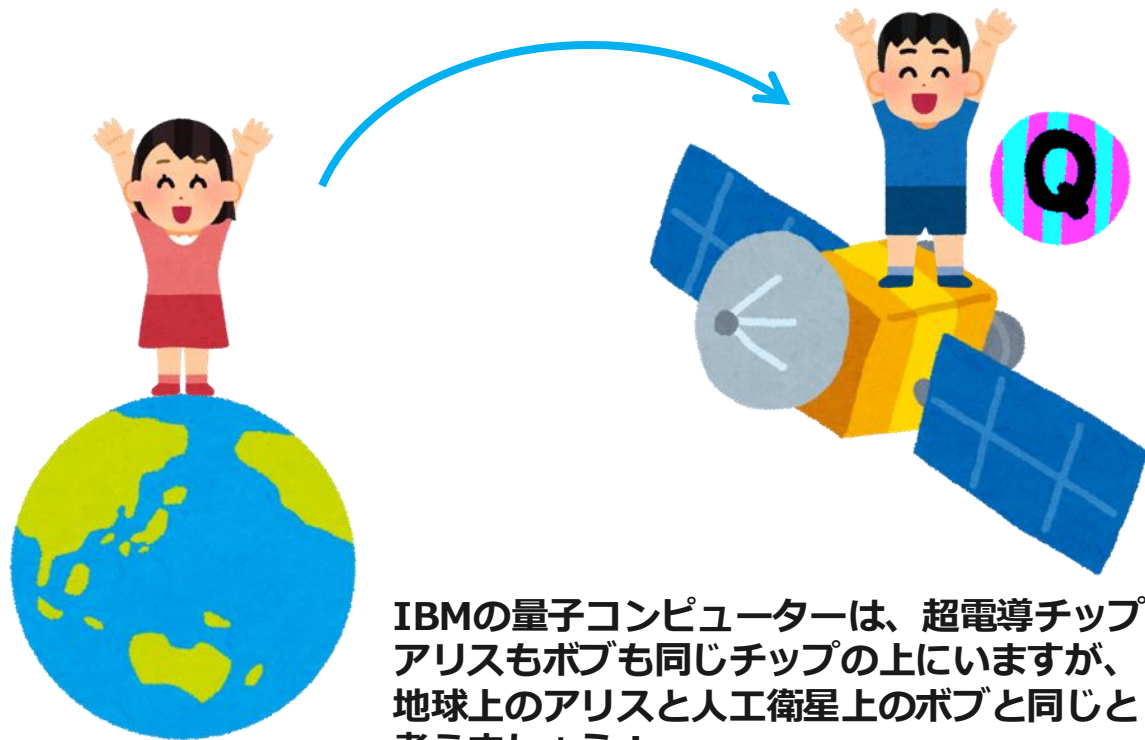


IBMの量子コンピューター



ケルビン
約-273℃ (0.015K)の低温で量子状態を実現

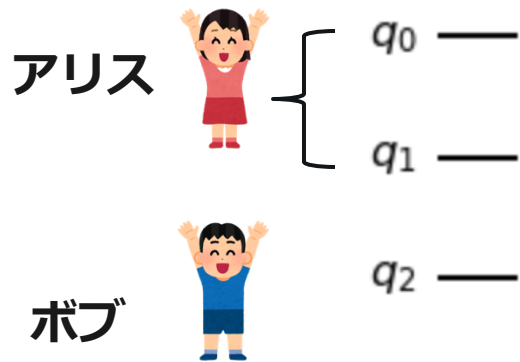
アリスからボブに暗号（量子状態）を送ります



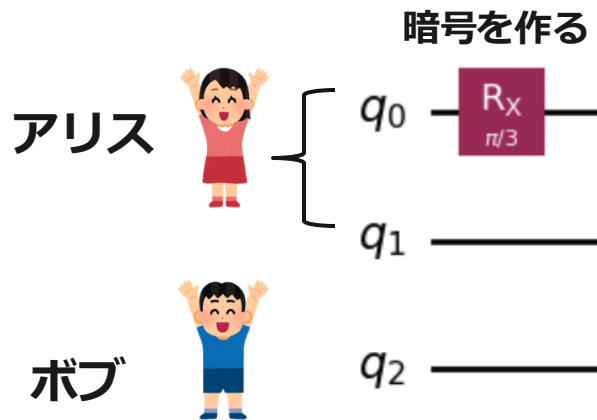
IBMの量子コンピューターは、超電導チップなのでアリスもボブも同じチップの上にはいますが、地球上のアリスと人工衛星上のボブと同じと考えましょう！



テレポーテーションの量子回路

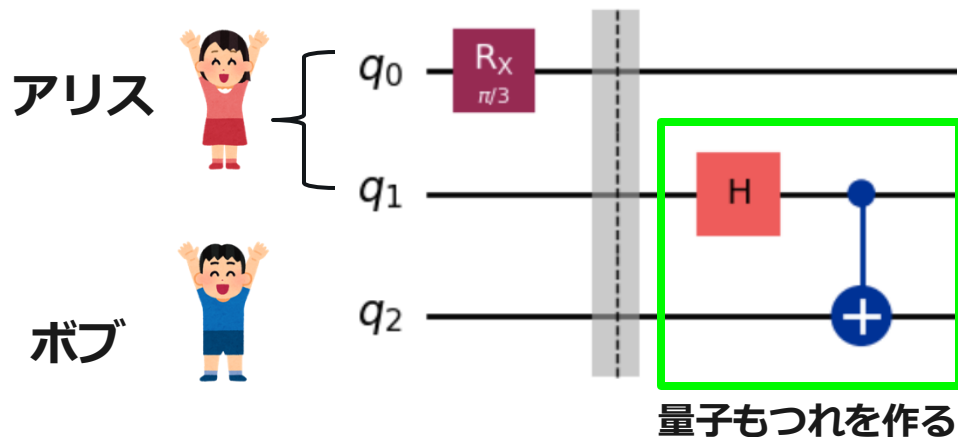


テレポーテーションの量子回路

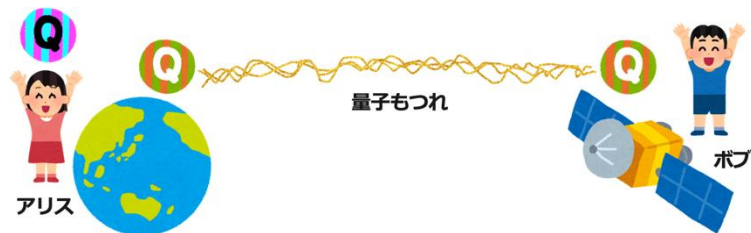


(1) 地球のアリスがある量子  (暗号) を持っています。

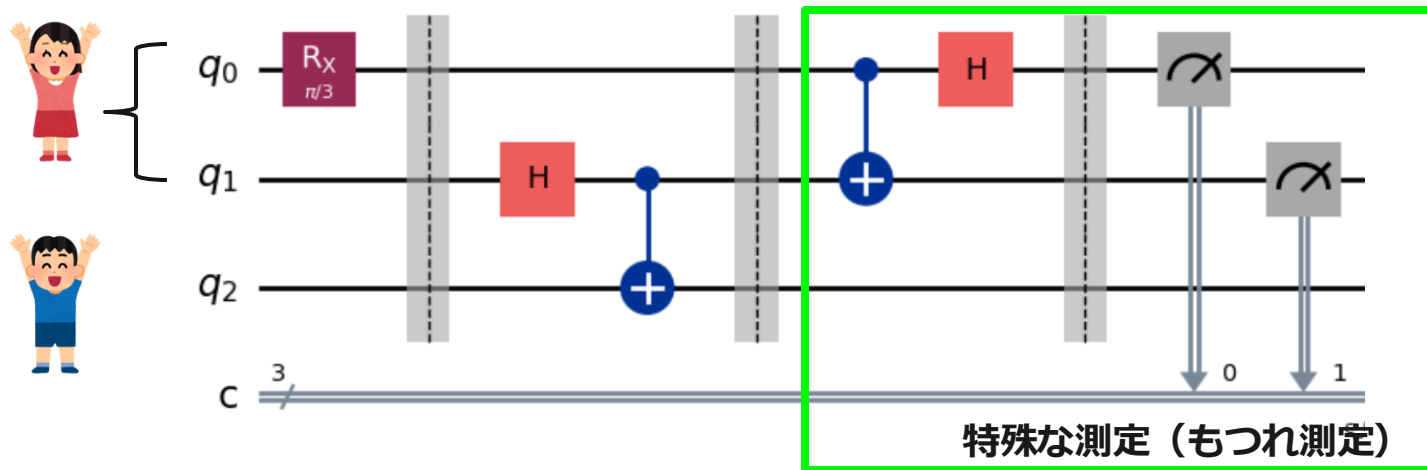
テレポーテーションの量子回路



(2) 特別な関係にあるふたごの量子 **Q** が地球と人工衛星の上にあります。
この2つ量子の関係は「量子もつれ」という関係です。



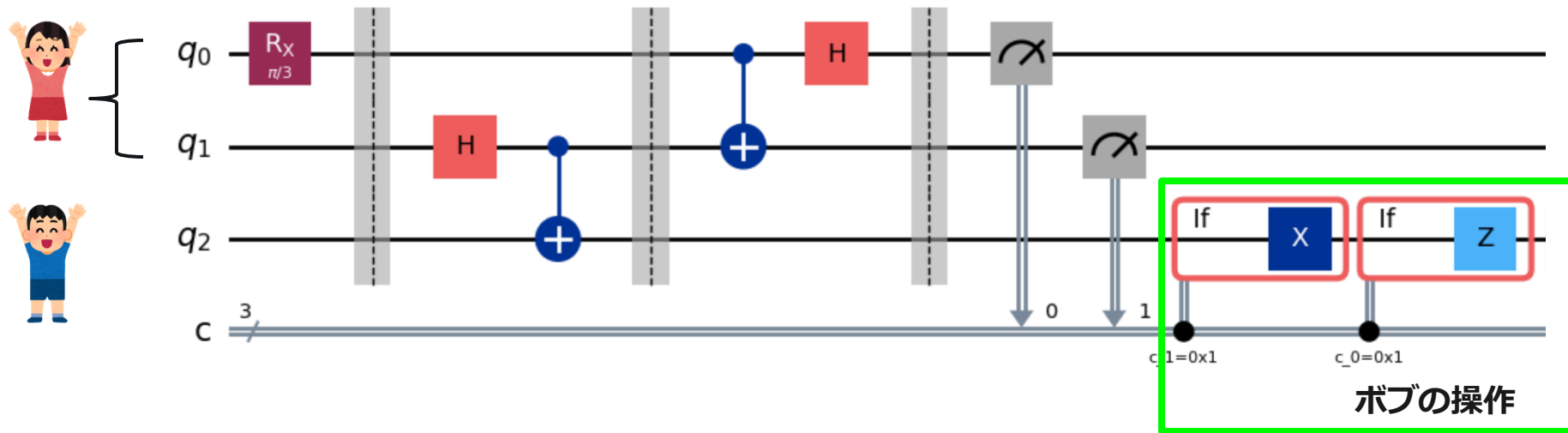
テレポーテーションの量子回路



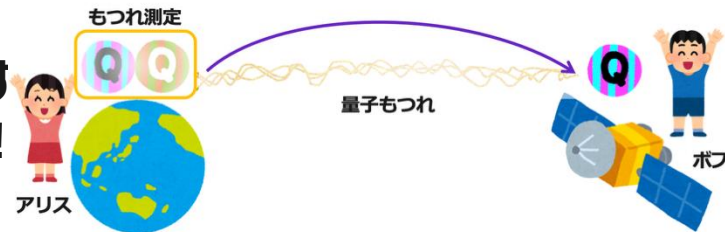
(3) 地球のアリスが地上の2つの量子に特殊な測定（もつれ測定）をします。
(量子もつれ状態にあるボブの量子の状態が瞬時に変わります。)



テレポーテーションの量子回路



(4) アリスが測定結果をボブに送り、
ボブはもらった結果をもとに自分の量子を補正します
ボブの量子がアリスの持っていた暗号に変化します！



量子テレポーテーションアルゴリズムの詳細

Qiskitではビットの並びが|q2 q1 q0>です

$$|\psi_0\rangle = |00\rangle \otimes (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)$$

Aliceの持っている暗号

$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \otimes (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)$$

エンタングルメント

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha|000\rangle + \alpha|110\rangle + \beta|001\rangle + \beta|111\rangle)$$

$$|\psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha|000\rangle + \alpha|110\rangle + \beta|011\rangle + \beta|101\rangle)$$

q0が1の時のみq1にXを操作

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha(|00\rangle + |11\rangle)|0\rangle + \beta(|01\rangle + |10\rangle)|1\rangle)$$

αとβでまとめる

$$|\psi_3\rangle = \frac{1}{2}(\alpha(|00\rangle + |11\rangle)(|0\rangle + |1\rangle) + \beta(|01\rangle + |10\rangle)(|0\rangle - |1\rangle))$$

q0にHを操作

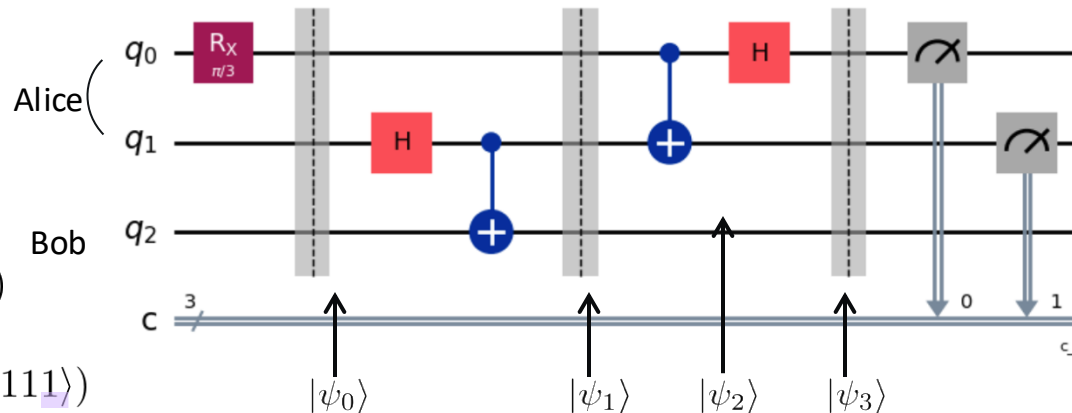
$$= \frac{1}{2}((\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)|00\rangle + (\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle)|10\rangle + (\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle)|01\rangle + (\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle)|11\rangle)$$

q2にそのまま暗号が
現れている

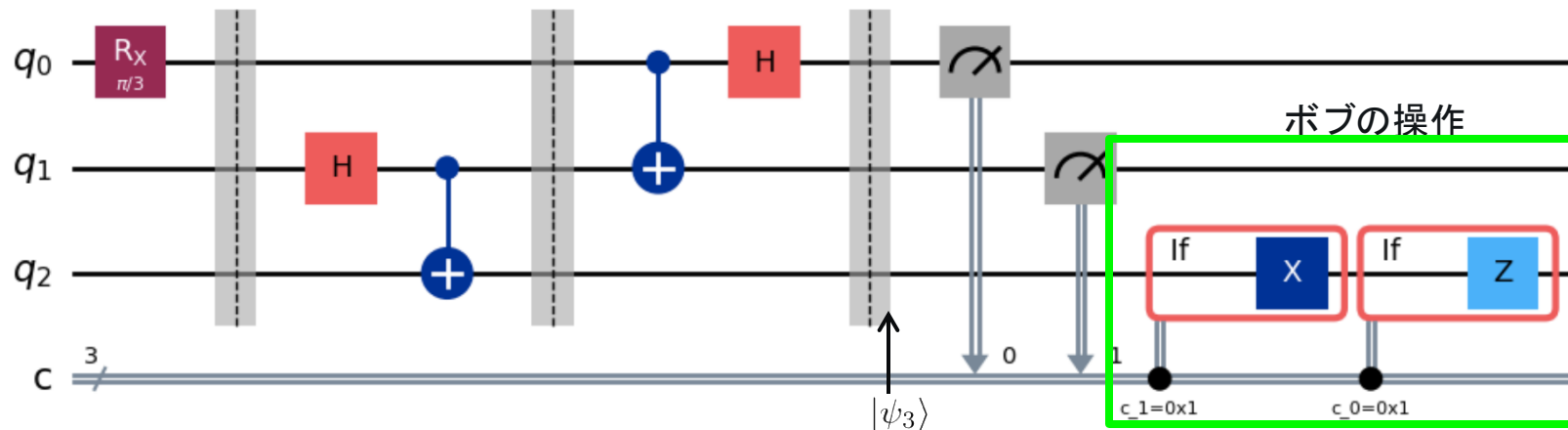
q1が1の時は
q2にXゲートをかける

q0が1の時は
q2にZゲートをかける

q0とq1が1の時は
q2にXゲートとZゲートをかける



ボブの操作



$$|\psi_3\rangle = \frac{1}{2} \left(((\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)|00\rangle + (\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle)|10\rangle + (\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle)|01\rangle + (\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle)|11\rangle) \right)$$

測定結果が00の時
q2にそのまま暗号が現れている

測定結果が10の時
q1が1の時は
q2にXゲートをかける

測定結果が01の時
q0が1の時は
q2にZゲートをかける

測定結果が11の時
q0とq1が1の時は
q2にXゲートとZゲートをかける

$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

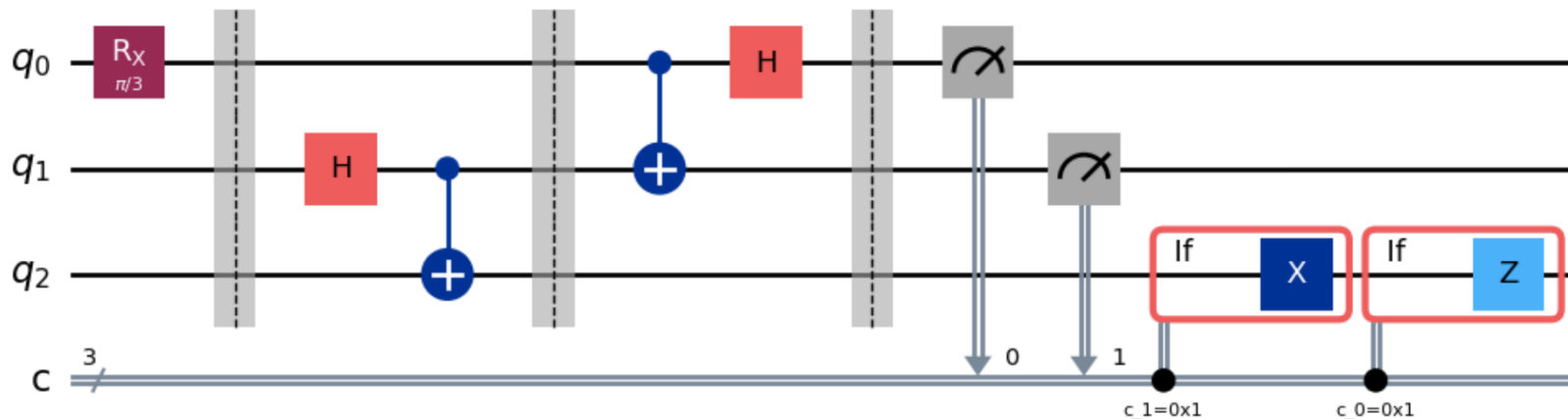
$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

$\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle$

$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

量子テレポーテーション まとめ

EPRペアを共有することで、量子状態を離れた場所に転送します。



Q: 量子テレポーテーションは、光よりも速く量子状態を送ることができるのでしょうか？

A: アリスはボブに測定結果を古典的な方法で伝えないといけいないので、光より速くはありません。

