



参加にあたって

- 事前準備：IBM Quantum Experienceへのログイン
(<https://quantum-computing.ibm.com/>)
- 持ち物：ノート、筆記用具、カメラ（自由研究用写真撮影のため）
- 最後に集合写真を撮るためにWebEXのカメラをオンにする準備をお願いします。



IBM Family Day 2020

デジタルで「つ・な・が・る」.....♪

夏休みの自由研究

『量子テレポーテーションの実験』

IBM Quantum, IBM Research Tokyo

沼田 きふみ、小林 ゆり

Webex 操作ボタンのご案内

マイク：一番左のボタンを押します。(赤の時、消音の状態です)



自分のビデオを
開始



コンテンツを
共有



レコーダー



参加者



チャット



他の
オプション



ミーティングを
終了



カメラ：左から2番目を押します。(赤の時、ご自身がビデオに映りません)

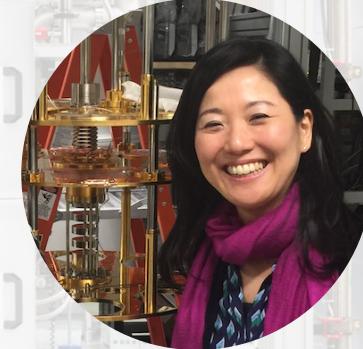
チャット：右から3番目の「吹き出し」がチャットウィンドウ表示です



夏休みの自由研究「量子テレポーテーション」 担当しようかい



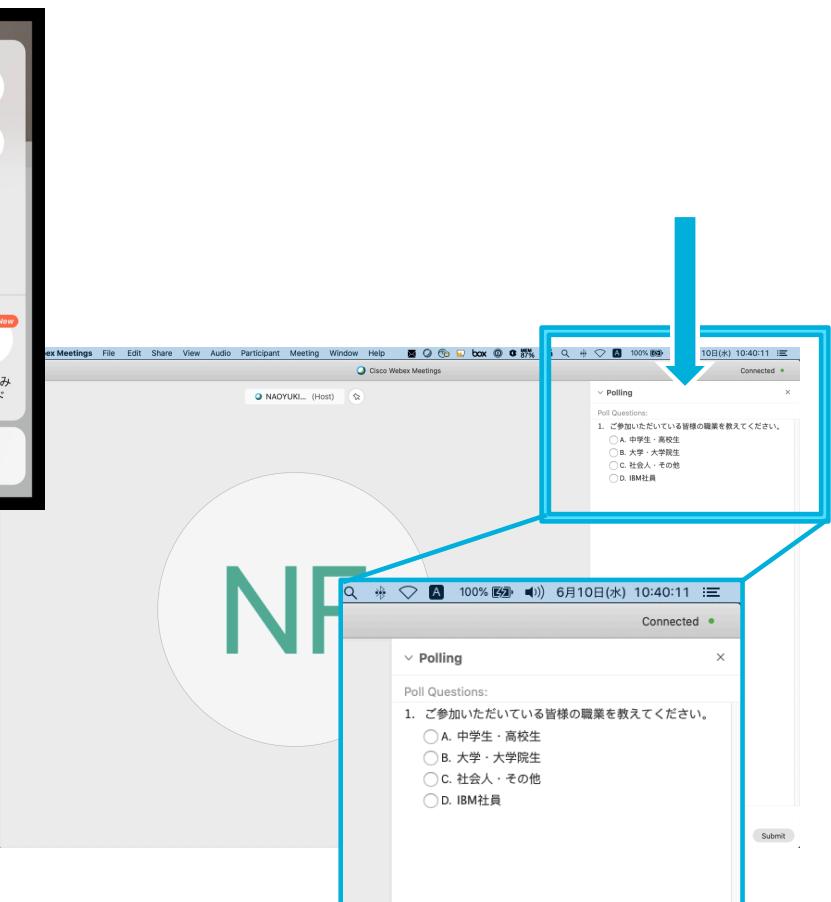
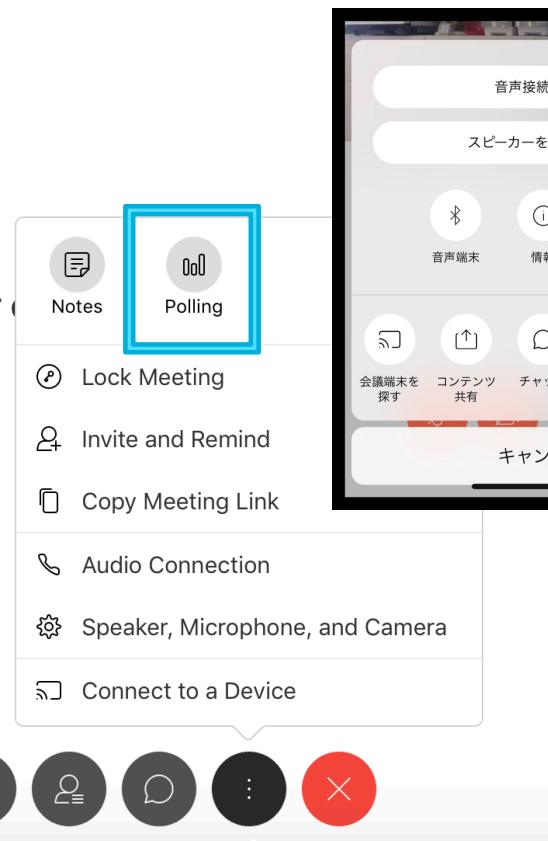
沼田きふみ
講師



小林ゆり
ナビゲーター



これから投票機能をつかって質問をします





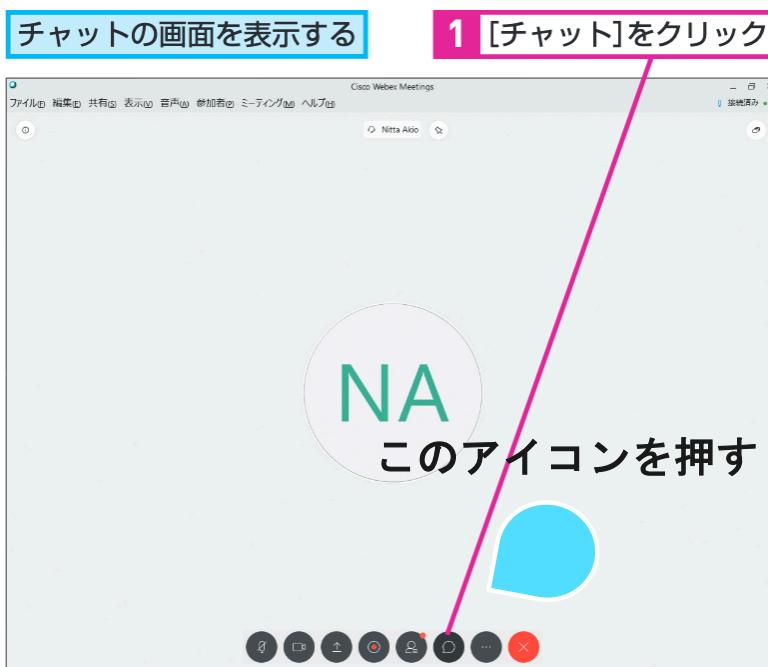
みなさんについて教えてください

1. 中学生・高校生
2. 大学・大学院生
3. 社会人・その他
4. IBM社員



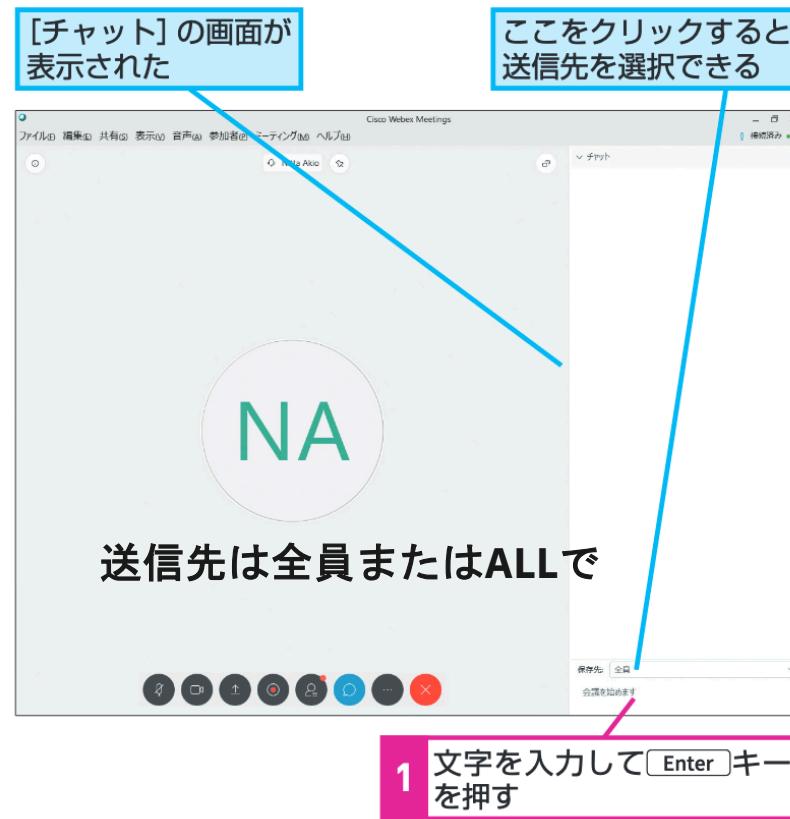
質問は「チャット」で送ってください

1. チャットの画面を表示する



チャット・アイコンが見当たらない時は
…を押すと表示される

2. 質問を入力して送信する





もくじ

- **はじめに：量子テレポーテーションとは**
- **実験：回路を作って量子コンピューターで実験**
- **結果と考察**
- **感想**
- **写真撮影**



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？ (予想例)





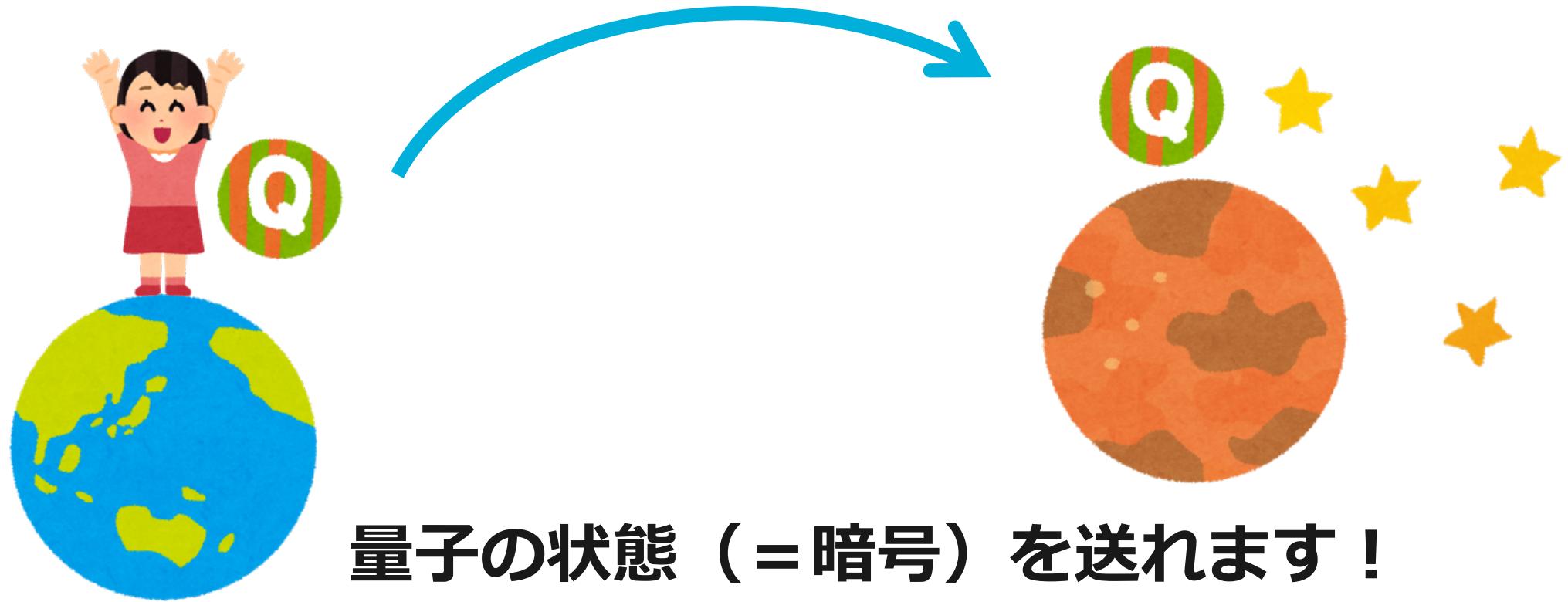
量子テレポーテーションとは



残念ながら「モノ」（人間含む）は
送れません！

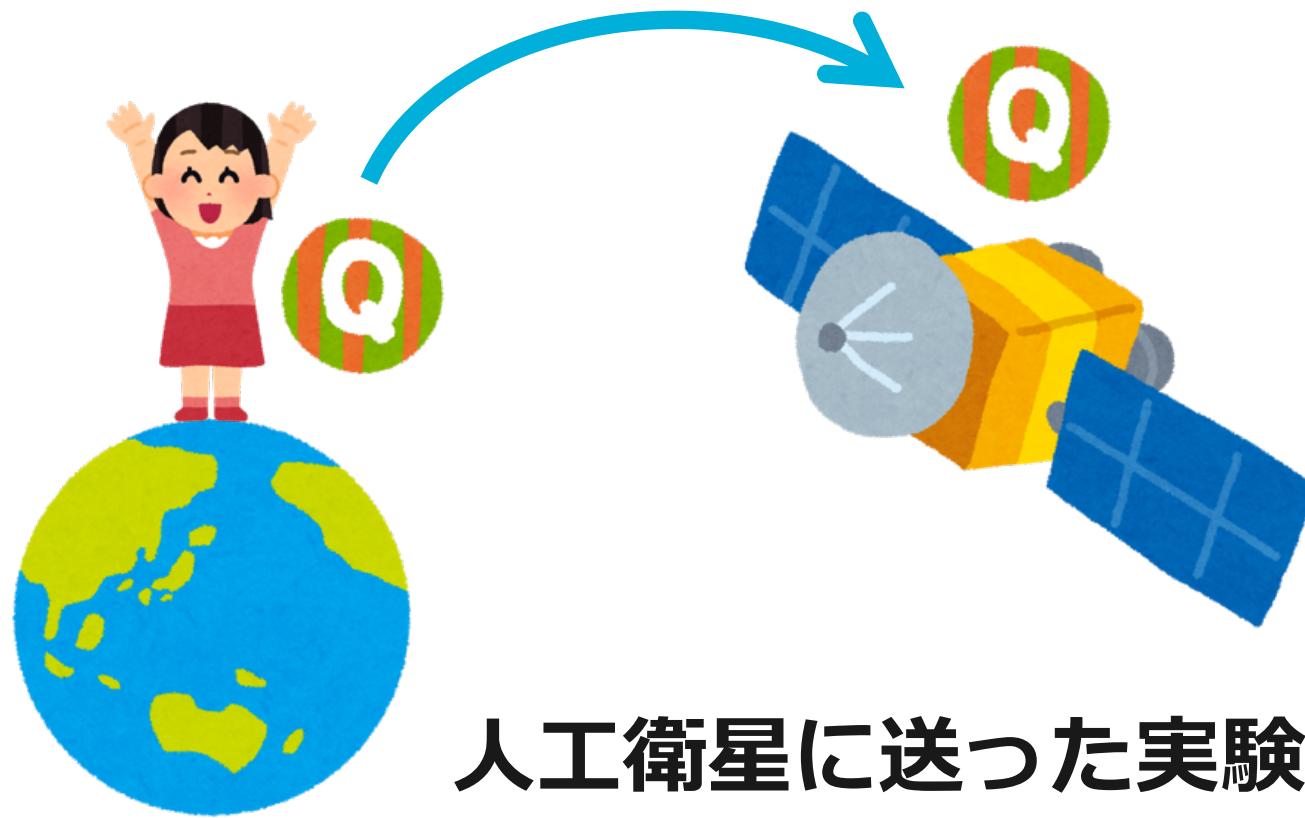


量子テレポーテーションとは





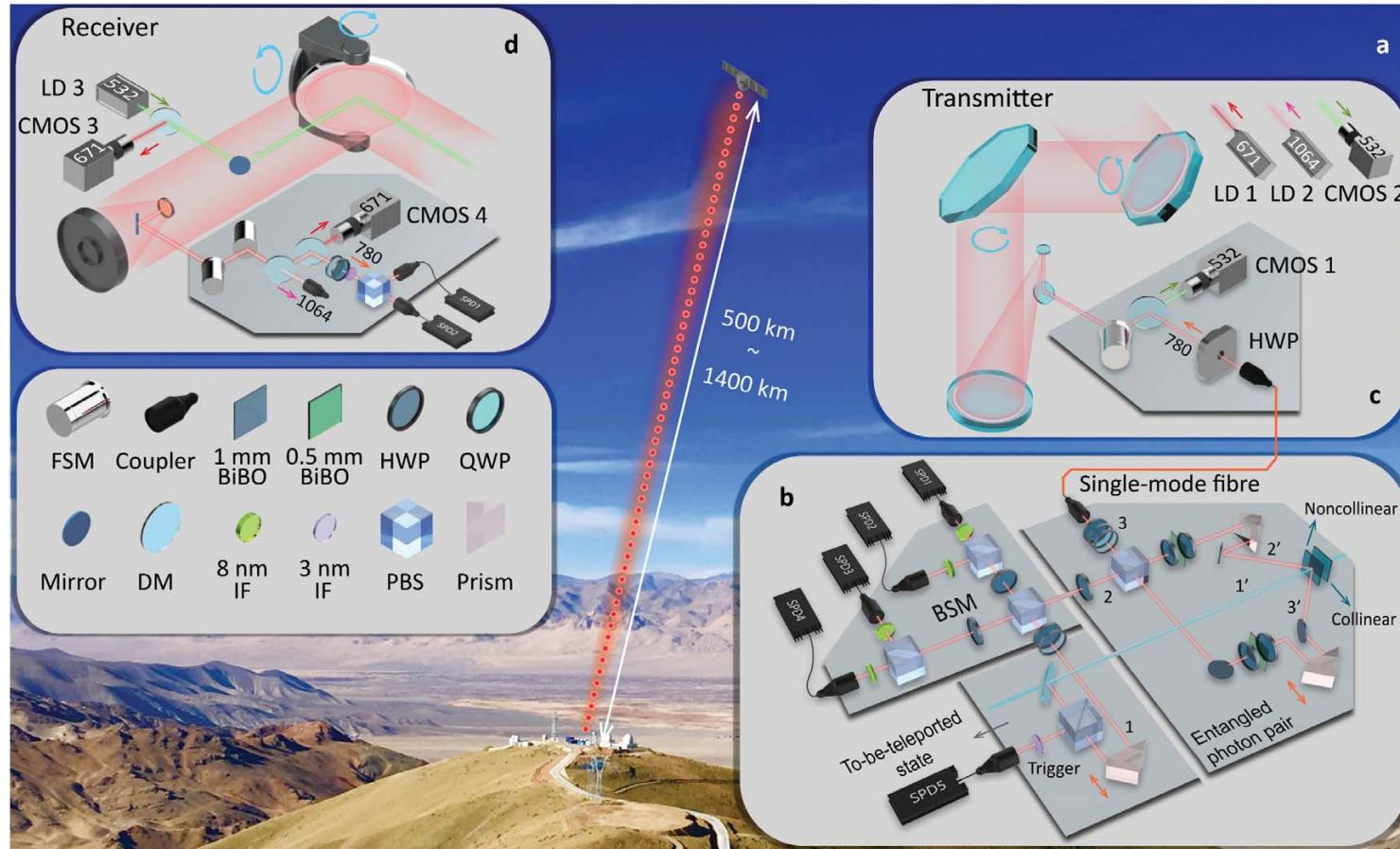
量子テレポーテーションとは



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





量子とは？



あらゆるものは、「原子」からできています。



直径1万3000km

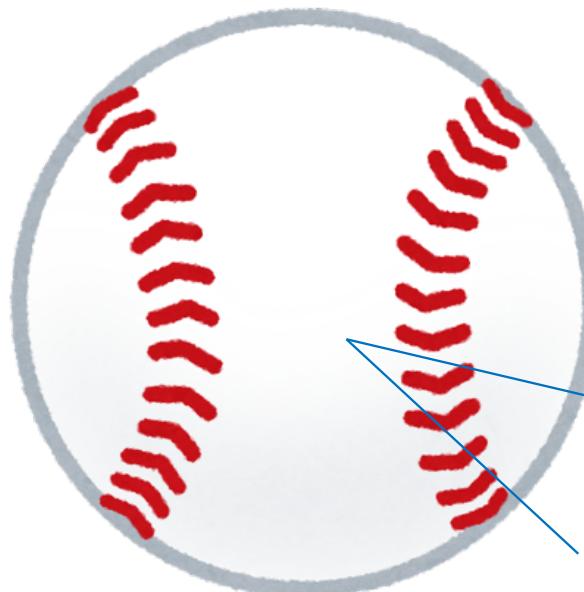


直径1cm

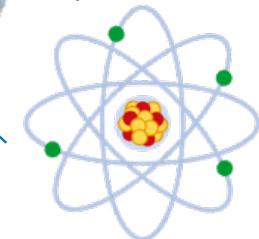
同じ比率



ビー玉



直径7cm



原子

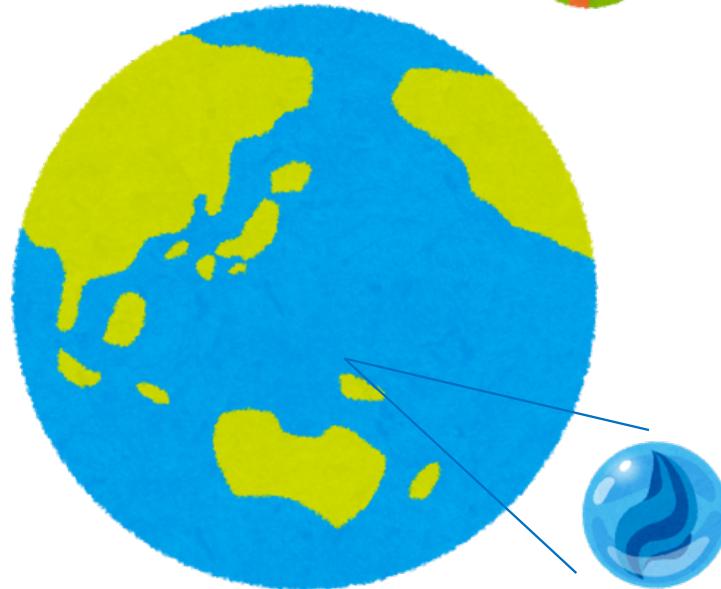
直径0.1nm

ナノメートル



量子とは？ Q

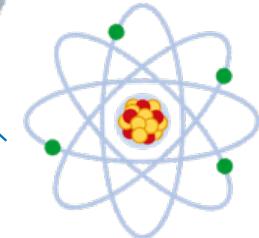
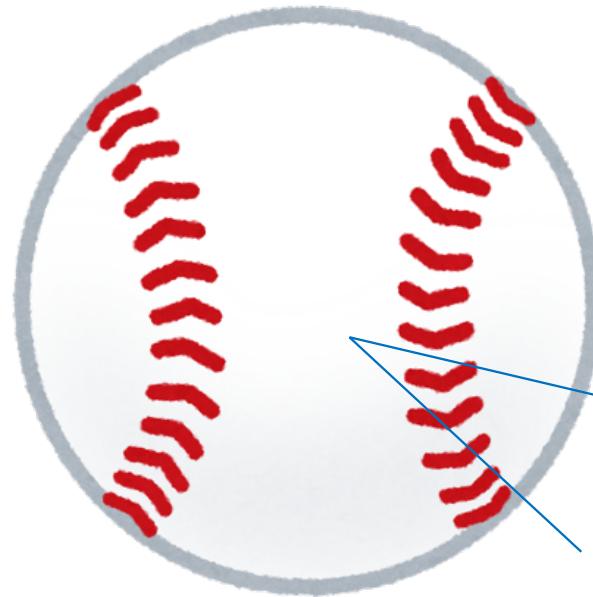
あらゆるものは、「原子」からできています。



同じ比率



ビー玉



原子

ミクロな世界

原子や原子より小さい物質を量子と呼びます。
このミクロな物質は、私たちの常識では説明できない、
不思議なふるまいをします。



量子の不思議な現象：量子重ね合わせ

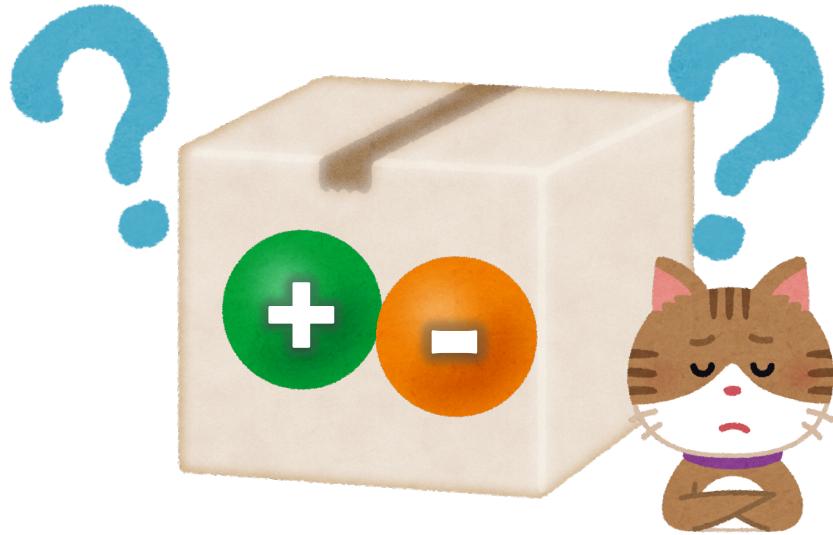
量子は1つしかなくとも、たくさんの状態を同時にとることができます。





量子の不思議な現象：量子重ね合わせ

量子は1つしかなくとも、たくさんの状態を同時にとることができます。

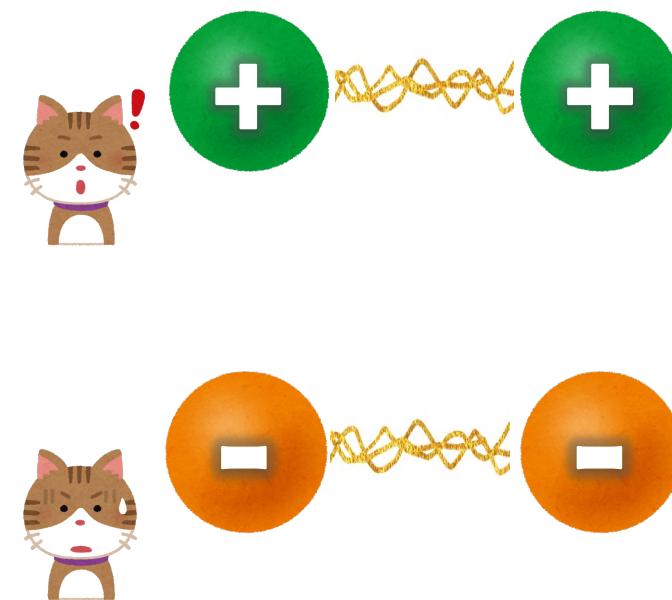
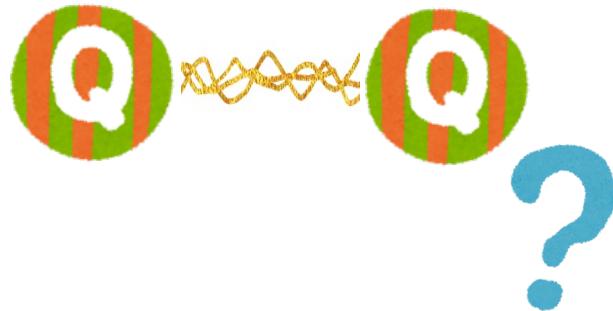


例えば、+と-の2つの状態が共存していて、観測するとどちらかの状態に決まります。（分らなくて大丈夫です！量子とは直感では理解できないものです！）



量子の不思議な現象：量子もつれ

「量子もつれ」という特別な関係のふたごの量子は、
片方の状態を測定すると、もう片方の状態が瞬時に分かります。
(片方しか測定していないのに！)





量子の不思議な現象：量子もつれ

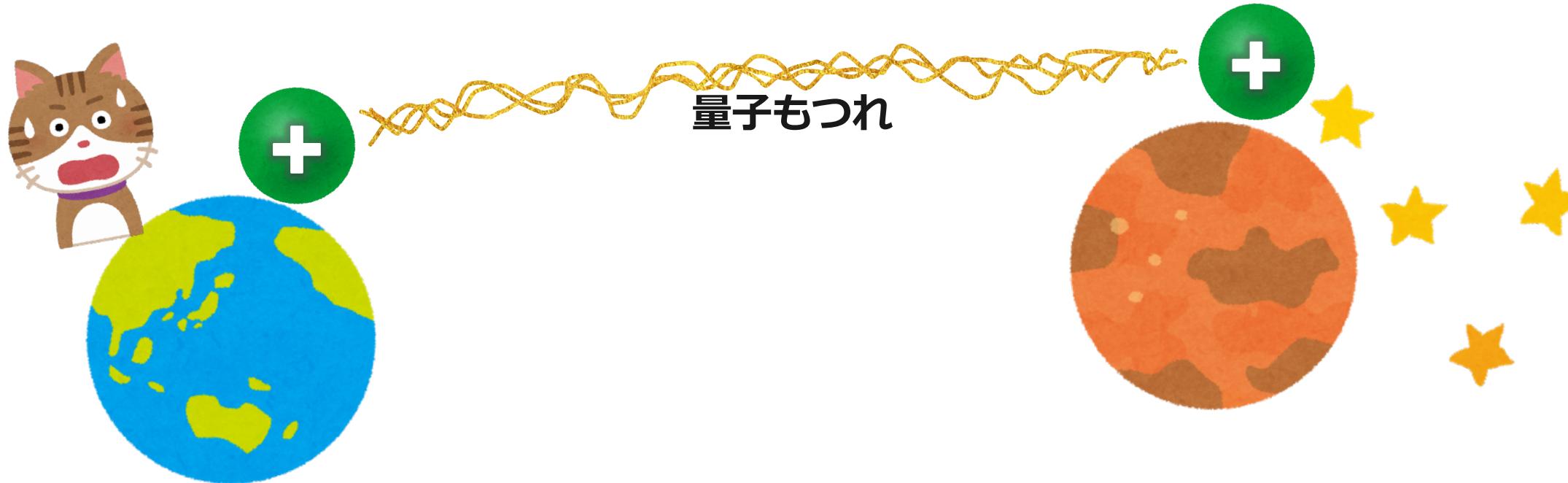
「量子もつれ」状態のふたごの量子を離れ離れにします。
地球の量子を測定して「+」と判明したら、火星の量子の状態はどうなるでしょうか？





量子の不思議な現象：量子もつれ

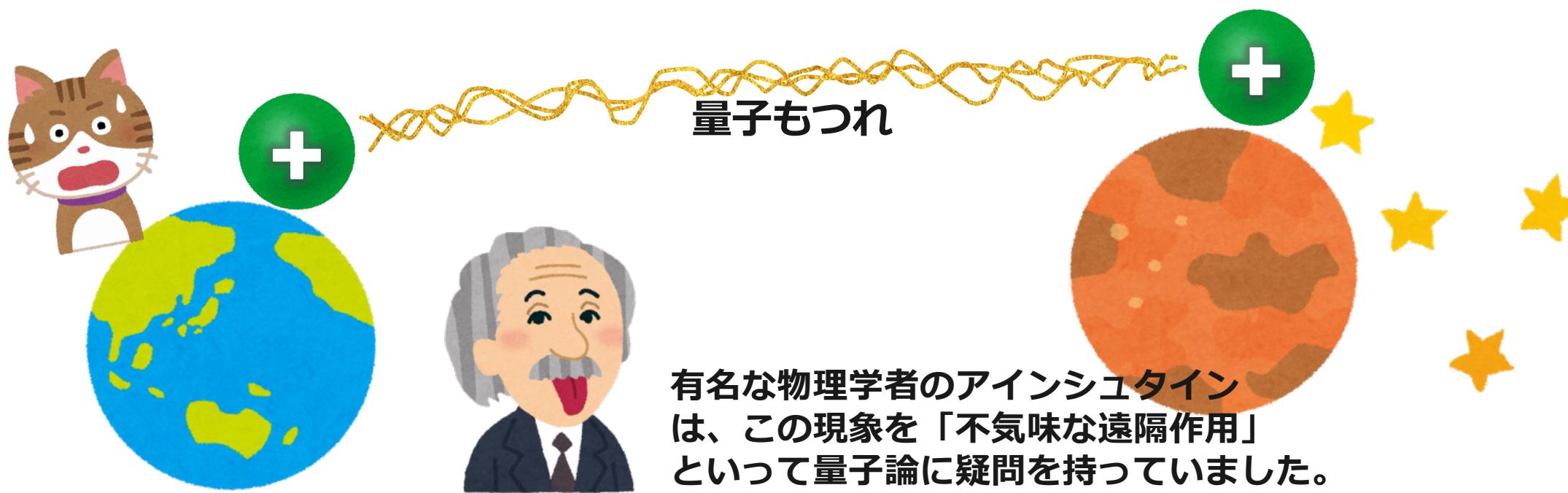
「量子もつれ」状態のふたごの量子を離れ離れにしても
片方を測定するだけで、遠く離れたもう片方の量子の状態が瞬時に分かります！





量子の不思議な現象：量子もつれ

「量子もつれ」状態のふたごの量子を離れ離れにしても
片方を測定するだけで、遠く離れたもう片方の量子の状態が瞬時に分かります！

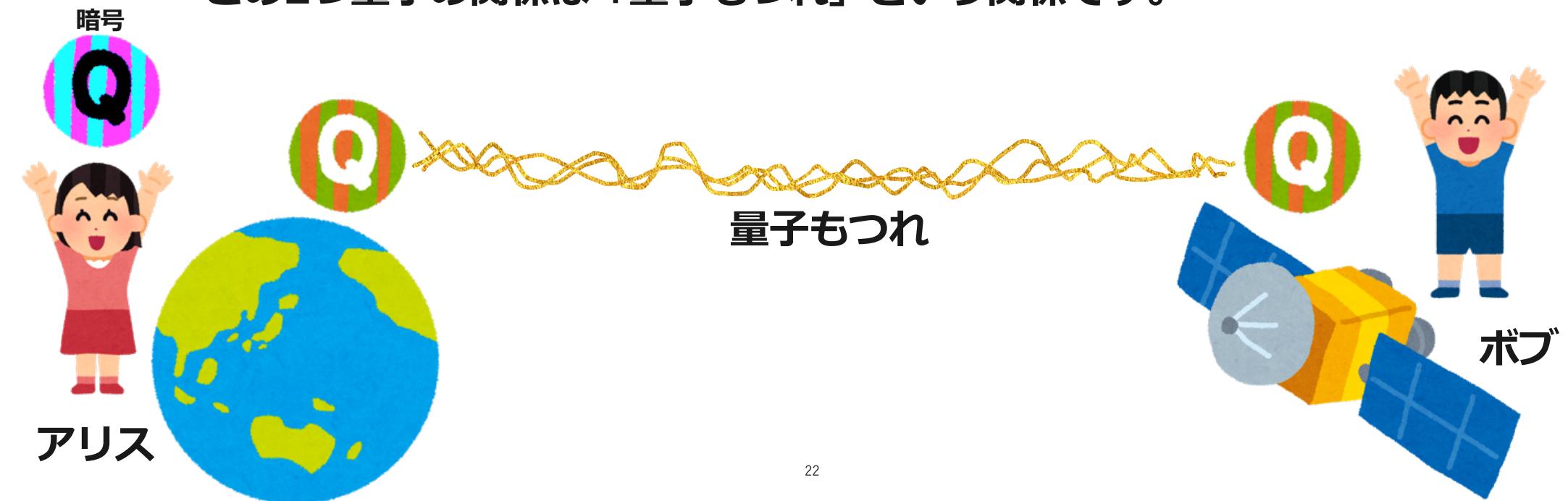




量子テレポーテーションとは

(1) 地球のアリスがある量子 **Q** (暗号) を持っています。

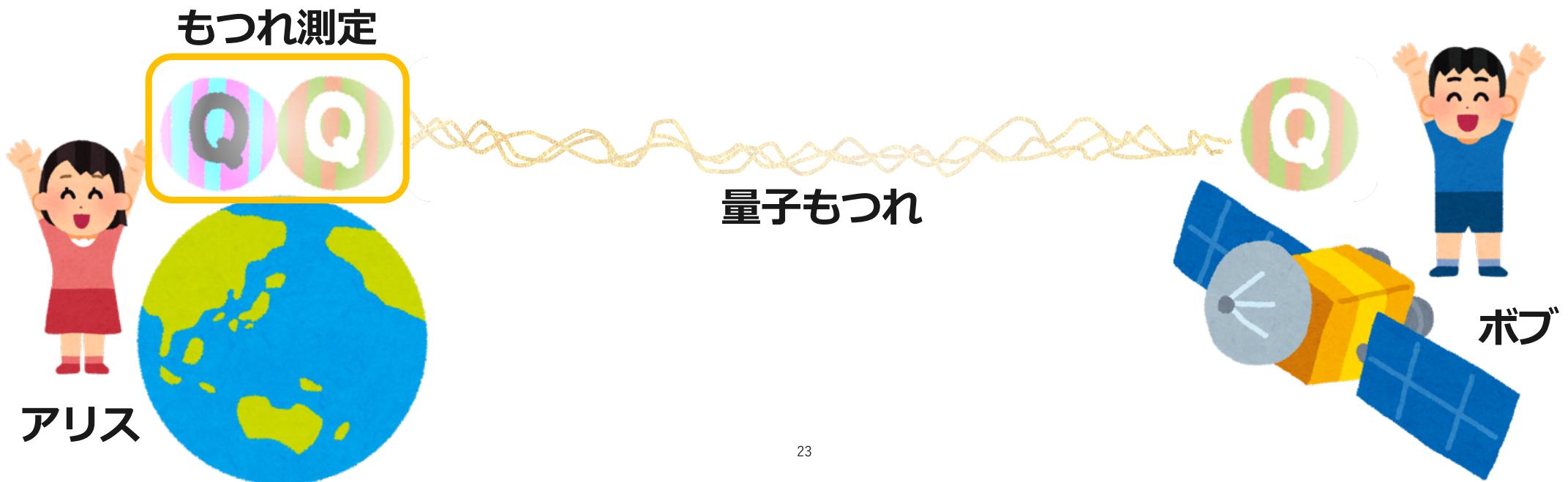
(2) 特別な関係にあるふたごの量子 **Q** が地球と人工衛星の上にあります。この2つ量子の関係は「量子もつれ」という関係です。





量子テレポーテーションとは

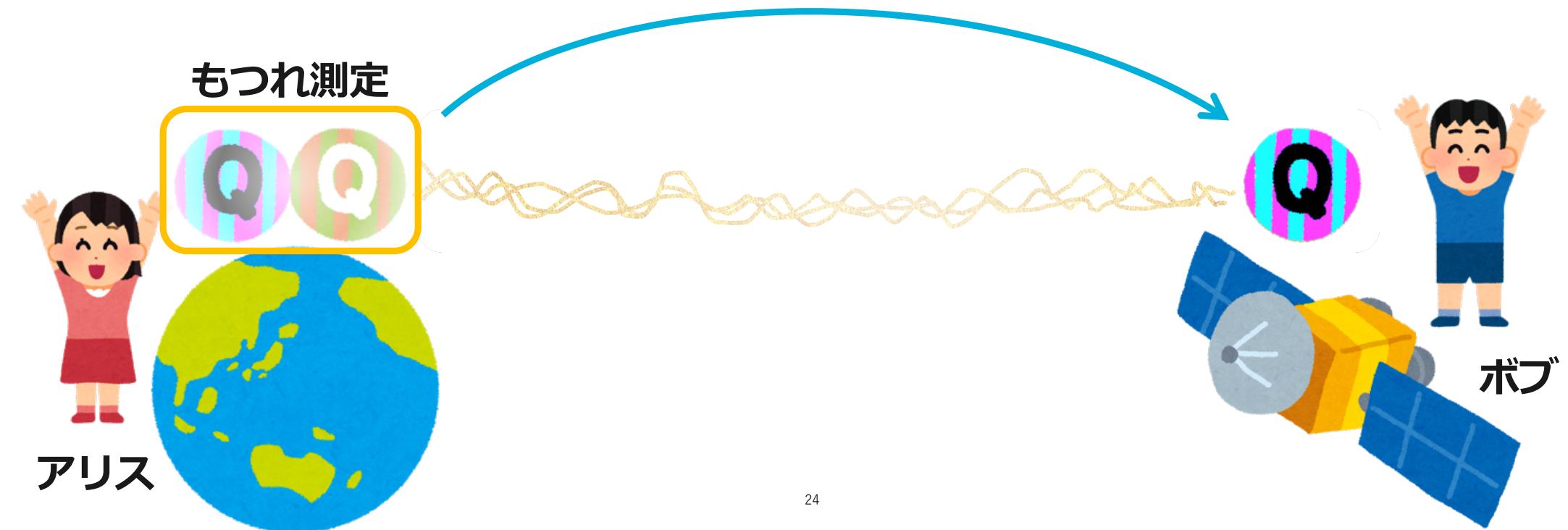
(3) 地球のアリスが地上の2つの量子に特殊な測定（もつれ測定）をします。
(量子もつれ状態にあるボブの量子の状態が瞬時に変わります。)





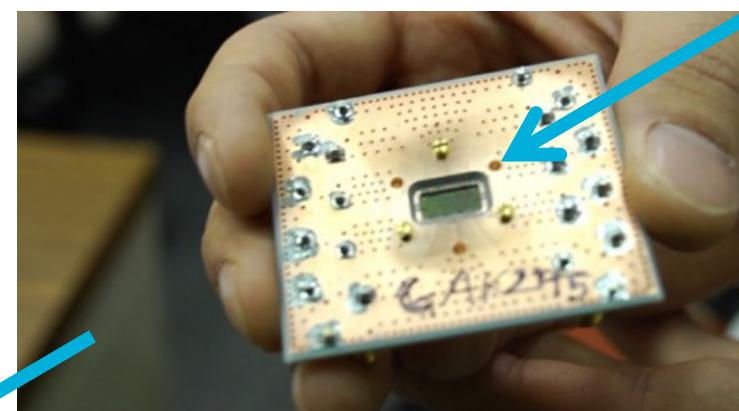
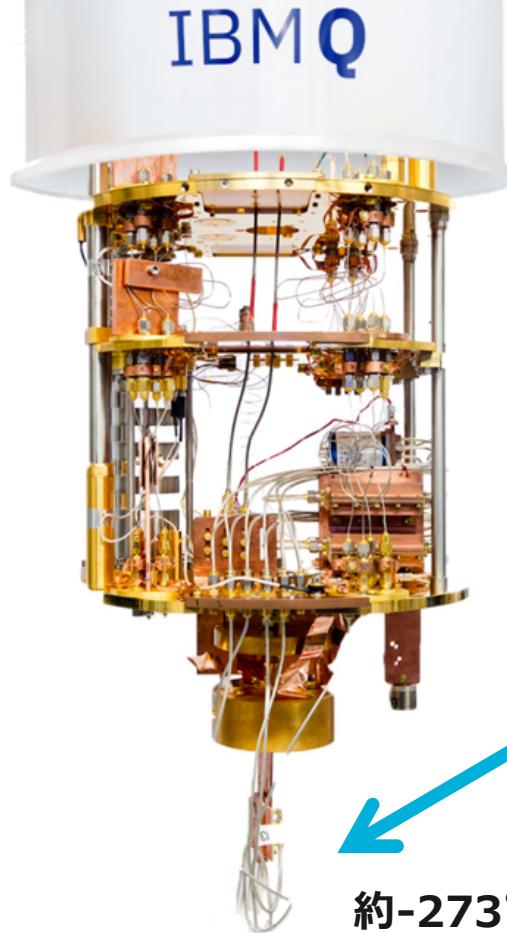
量子テレポーテーションとは

(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！

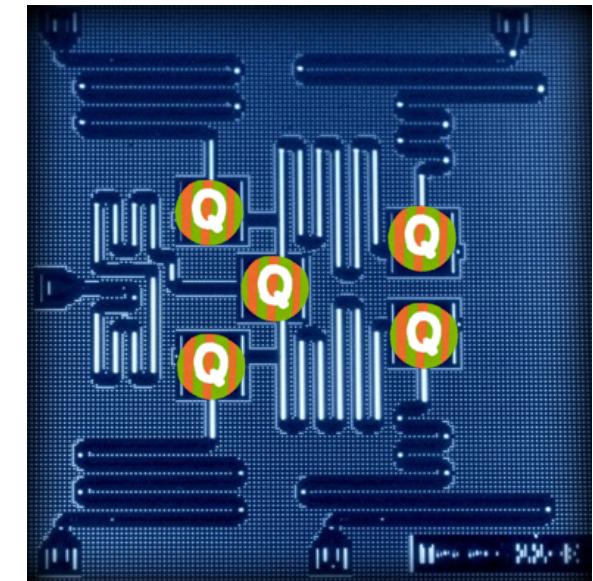




IBMの量子コンピューター

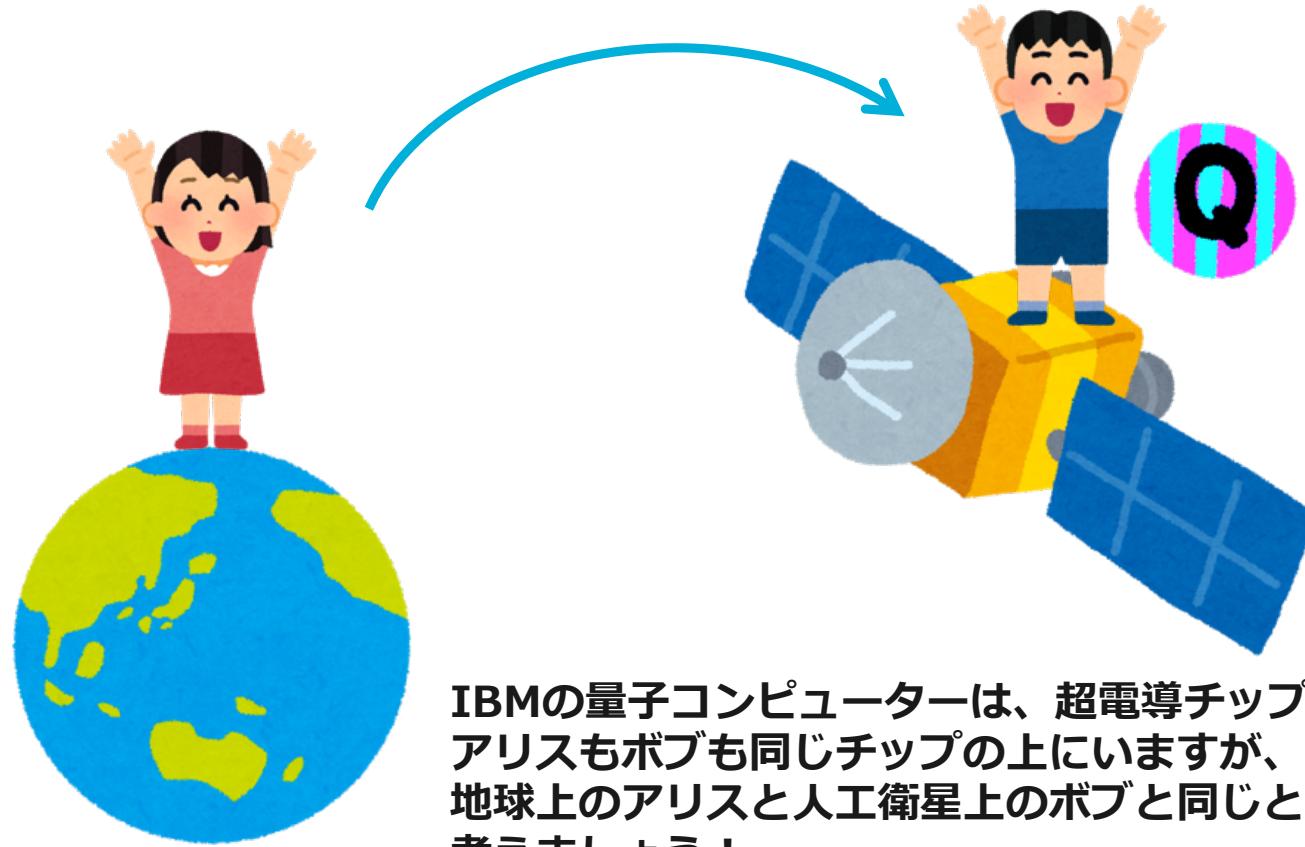


約-273°C (0.015K)^{ケルビン}の低温で量子状態を実現

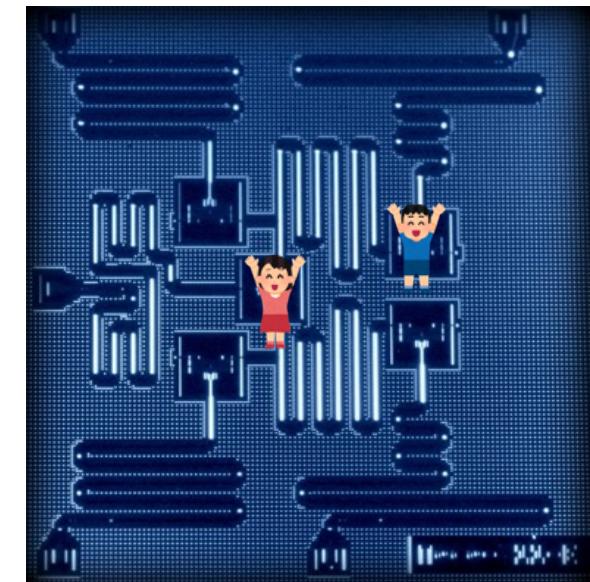




アリスからボブに暗号（量子状態）を送ります



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！

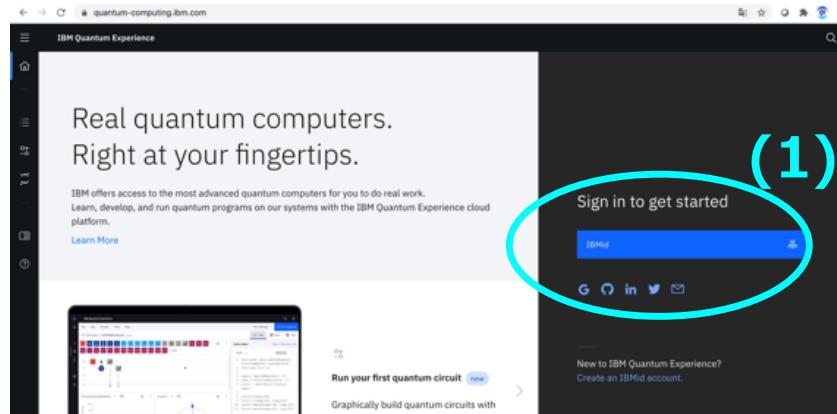




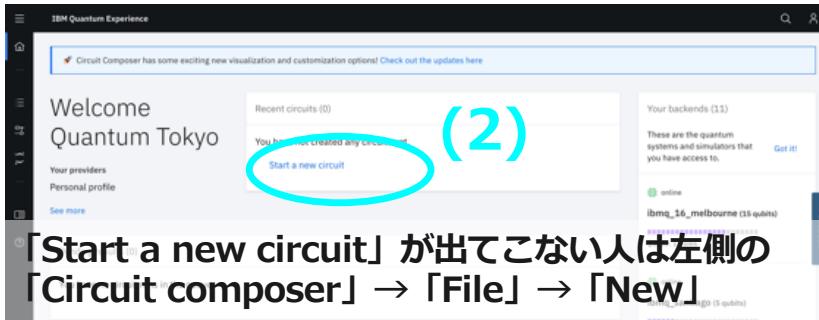
量子回路を作ってみましょう

(1) IBM Quantum Experienceにログインします。

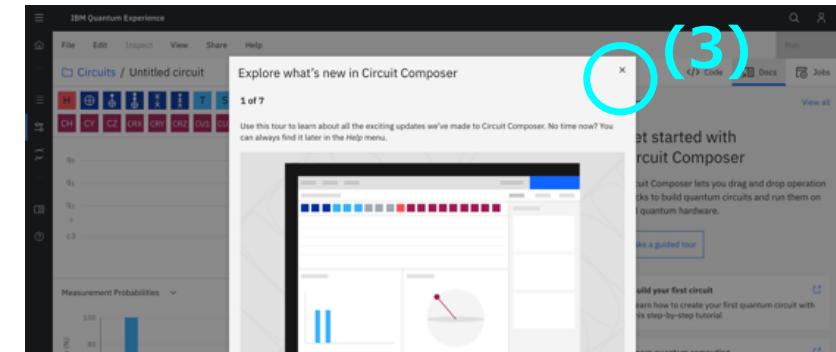
URL: <https://quantum-computing.ibm.com/>



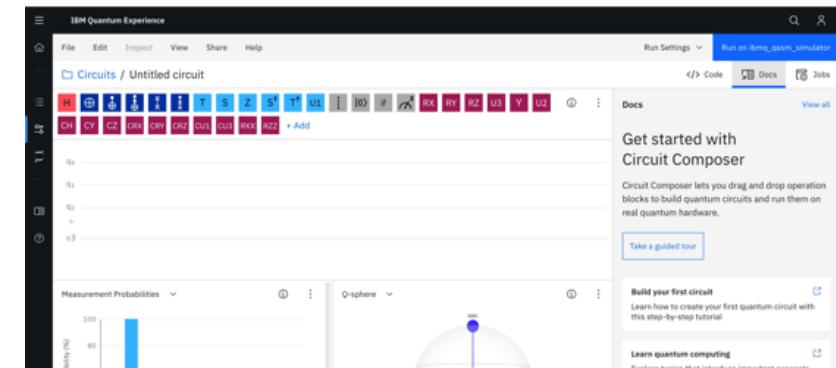
(2) 青文字の「Start a new circuit」をクリック。



(3) ポップアップウィンドウの右上「x」をクリックして、閉じます。



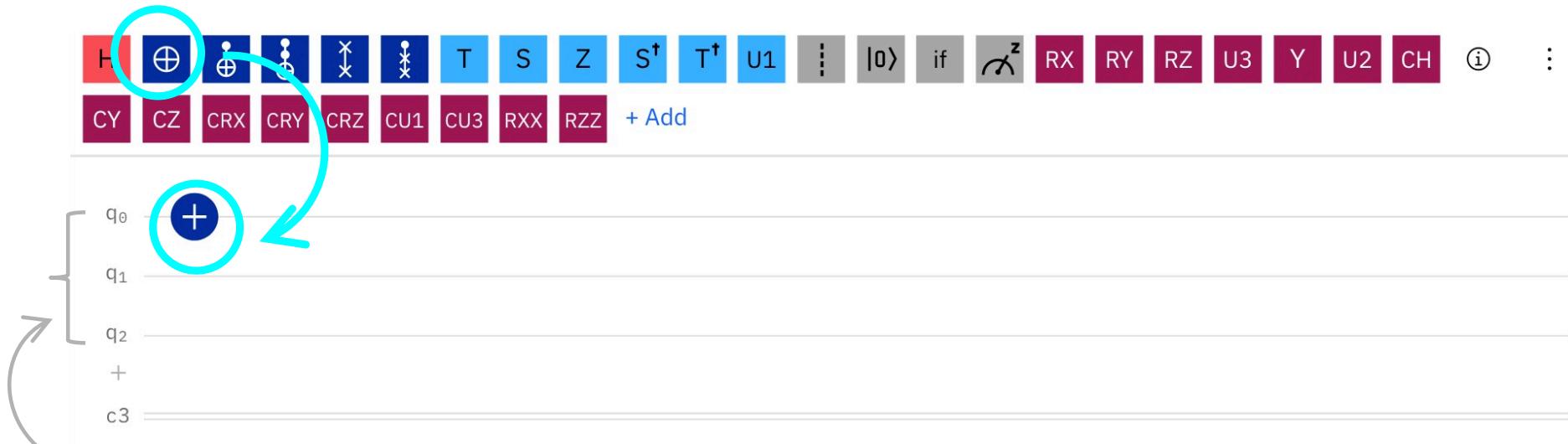
(4) この画面になつたら準備完了です。





量子回路の作り方

上側のブロック(量子ゲート)をマウスでつかんで、下の線上にドラッグ&ドロップして量子回路を作ります。



量子が3つの状態です。



量子テレポーテーションの回路を作ってみよう



アリスの暗号量子



アリスの量子



ボブの量子



+

c3



3分で！



2

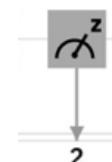
- : (1) アリスは暗号を作ります。
(今回は「1」を暗号とします。)
- : 回路を見やすくするためのゲート です。

- : (2) 量子もつれを作ります。

- : (3) アリスはもつれ測定をします。



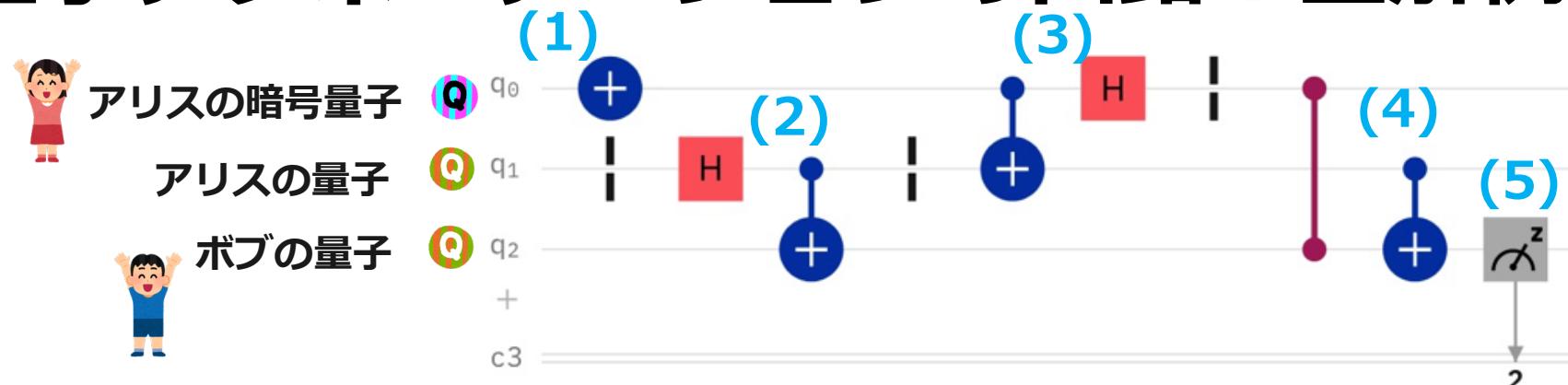
- : (4) アリスの測定結果をボブに送り、
ボブは自分の量子を補正します。
ヒント: を使います。



- : (5) ボブの量子を測定します。



量子テレポーテーションの回路：正解例



 : (1) アリスは暗号を作ります。
(今回は「1」を暗号とします。)
 : 回路を見やすくするためのゲート  です。

: (2) 量子もつれを作ります。

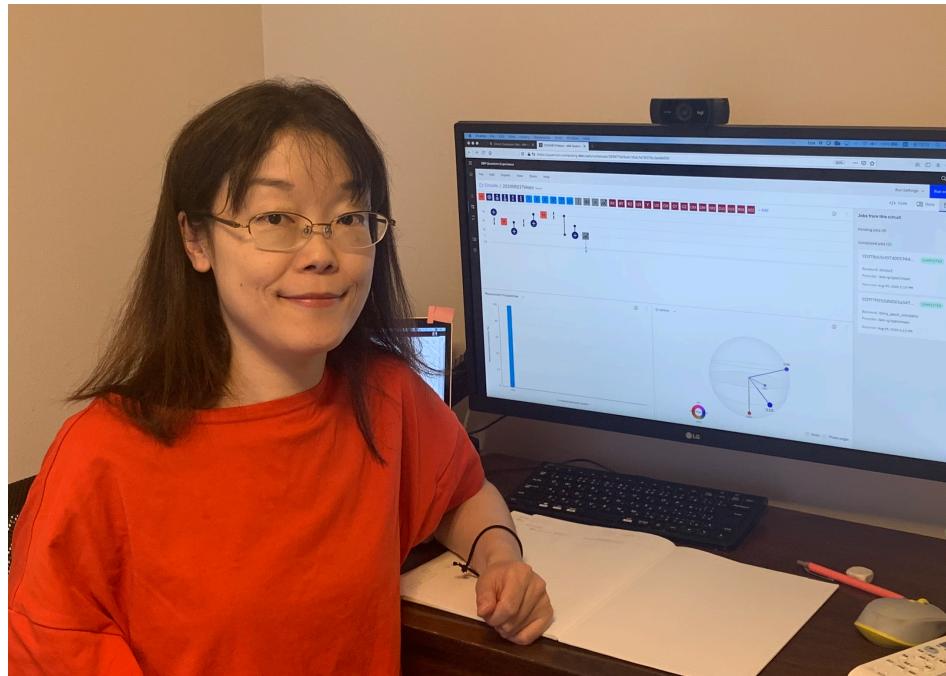
H : (3) アリスはもつれ測定をします。

: (4) アリスの測定結果をボブに送り、
ボブは自分の量子を補正します。
ヒント: CZ を使います。

:(5) ボブの量子を測定します。



自由研究用に写真を撮ってみましょう！





実験します：量子シミュレーター

IBM Quantum Experience

File Edit Inspect View Help

Job run settings Backend: 32q - ibmq_qasm_simulator Provider: ibm-q/open/main Shots (max 8192): 8192 Job limit: 5 remaining

Circuits / 20200809Telepo Saved

Code editor Open in Quantum Lab

QASM

```

1 OPENQASM 2.0;
2 include "qelib1.inc";
4 qreg q[3];
6 barrier q[1];
8 x q[1]; q[2];
10 h q[0];
12 barrier q[1];
14 cz q[0],q[2];
16 cx q[1],q[2];
17 measure q[2] -> c[2];

```

(1) 「Run Settings」をクリックします。

(2) 「Backend:」をクリックして「32q-ibmq_qasm_simulator」を選びます。

(3) 「Shots(max 8192):」を8192にセットします。

(4) 「Run on ibmq_qasm_simulator」をクリックして実行します。

The screenshot shows the IBM Quantum Experience interface. At the top, there are navigation menus (File, Edit, Inspect, View, Help) and a search bar. Below that is a toolbar with various quantum gate icons like H, CNOT, T, S, Z, etc. A dropdown menu 'Backend:' is highlighted with a cyan circle, showing '32q - ibmq_qasm_simulator' selected. To its right, 'Provider:' is set to 'ibm-q/open/main'. The 'Shots (max 8192):' dropdown is also highlighted with a cyan circle, showing '8192'. On the far right, there are tabs for 'Code', 'Docs', and 'Jobs', with 'Code' currently active. The main workspace shows a quantum circuit with four qubits (q0, q1, q2, q3) and one classical register (c3). The circuit consists of several gates: a CNOT between q0 and q1, a T gate on q2, a CNOT between q1 and q2, another CNOT between q0 and q1, and a final CNOT between q0 and q1. The circuit ends with a measurement on q2. Below the circuit, a bar chart titled 'Measurement Probabilities' shows a single bar at 100% for state |100>. To the right, there's a 'Q-sphere' visualization showing the state vector on aBloch sphere. The code editor on the right contains QASM code corresponding to the circuit diagram.



結果を見ます

The screenshot shows the IBM Quantum Experience interface. On the left, a quantum circuit is displayed with four qubits (q₀, q₁, q₂, q₃) and one classical bit (c₃). The circuit consists of various gates: H, CNOT, T, S, S^{dagger}, U1, RXX, and RZZ. Below the circuit, a bar chart titled 'Measurement Probabilities' shows a single peak at state |100> with 100% probability. To the right, a 'Q-sphere' visualization shows the state vector on aBloch sphere, with points labeled |100>, |110>, and |111>. The top navigation bar includes 'Run Settings' and 'Run on ibmq_qasm_simulator'. The 'Jobs' tab is highlighted with a blue border. The 'Completed jobs' section shows one job with the ID '5f2f77ff252dfd001a34...' in a 'COMPLETED' status.

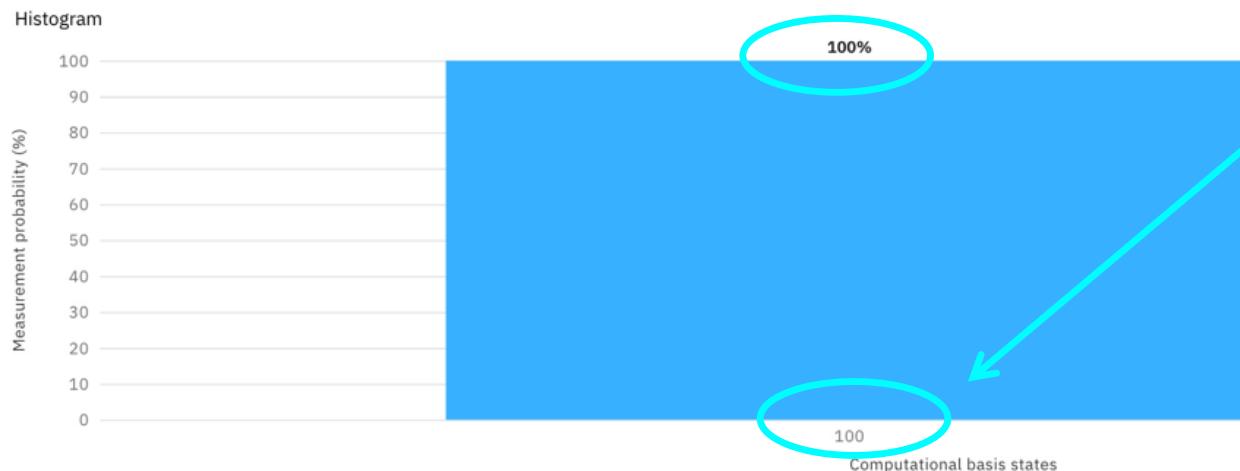
(1) 「Jobs」をクリックします。

(2) 緑色の文字の「COMPLETED(完了)」をクリックして結果を見ます。



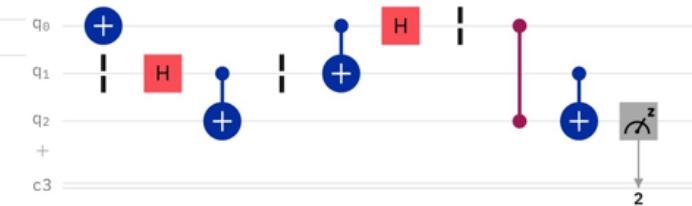
結果と考察：量子シミュレーターの場合

Result



結果：

「100」が100%になりましたか？
8192回の実験を行なった結果、100% 「100」だったということです。
「100」は、「 $q_2 q_1 q_0$ 」の順に並んで いるので、測定した q_2 の値は「1」だった という意味です。



考察：アリスの暗号「1」がボブに100%テレポートされたことが分かります！

シミュレーションは、理想的な量子状態を計算をするので、理論的に予想される結果が100%観測されました。



本物で実験

アメリカ ニューヨークにあるIBMトマスワトソン研究所内の量子コンピューターに実験をリクエストします。

The screenshot shows the IBM Quantum Experience web interface. At the top, there's a navigation bar with File, Edit, Inspect, View, Help, and a search bar. Below it is a "Job run settings" section with "Backend: 5q - ibmqx2", "Provider: ibm-q/open/main", "Shots (max 8192): 8192", and "Job limit: 5 remaining". There are also "Run Settings" and "Run on ibmqx2" buttons. The main area displays a quantum circuit with four qubits (q0, q1, q2, q3) and various gates like H, T, S, Z, RX, RY, RZ, U3, Y, U2, CH, CY, CZ, CRX, CRY, CRZ, CU1, CU3, RXX, RZZ, and an "Add" button. Below the circuit is a "Measurement Probabilities" chart showing a single bar at 100% for state |100>. To the right is a "Q-sphere" visualization showing points on a 3D sphere representing different quantum states.

- (1) 「Run Settings」がクリックされた状態で、
- (2) 「Backend:」をクリックして「5q-ibmqx2」を選びます。
- (3) 「Shots(max 8192):」を8192にセットします。
- (4) 「Run on ibmqx2」をクリックして実行します。



結果を待ちます：本物の量子コンピューター

IBM Quantum Experience

File Edit Inspect View Share Help

Backend: 5q - ibmqx2 Provider: ibm-q/open/main Shots (max 8192): 8192 Job limit: 4 remaining

Circuits / Untitled circuit Saved

Jobs from this circuit

Pending jobs (1)

5f3894911da1d8001262... QUEUED

Backend: ibmqx2 Provider: ibm-q/open/main Expected to run: in 2 minutes

Completed jobs (1)

5f388f37f1bf7c00135f6... COMPLETED

Backend: ibmq_qasm_simulator Provider: ibm-q/open/main Returned: Aug 16, 2020 10:43 AM

Measurement Probabilities Computational basis states

Q-sphere

Phase angle

Computational basis states

青色の文字の「QUEUED(待ち状態)」の間は、実行待ちです。

世界中の研究者がIBMの量子コンピューターで実験をしているため結果が出てくるまで時間がかかります。

緑色の文字の「COMPLETED(完了)」になったら、クリックして結果を見ます。

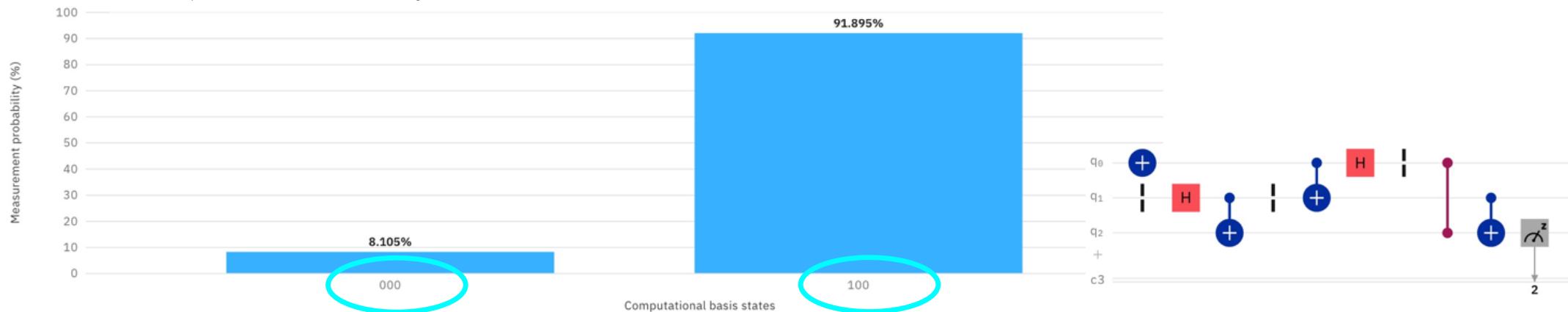


結果と考察：本物の場合 (結果がまだの場合は後で確認してください)

Result

参考結果：「100」は91.9%、「000」が8.1%です。「 $q_2 q_1 q_0$ 」の順に並んでいるので、測定した q_2 の値は、8192回の実験を行なった結果、7528回は「1」、664回は「0」が観測されたということです。

Histogram



考察：アリスの暗号「1」は91.9%の確率でボブにテレポーテーションが成功したことが分かります。本物の量子コンピューターには、まだ誤差があります。誤差を減らす研究を行うとともに、誤差があっても使える計算方法(アルゴリズム)の研究も行われています。



まとめ



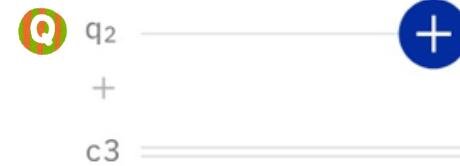
アリスの暗号量子



アリスの量子



ボブの量子



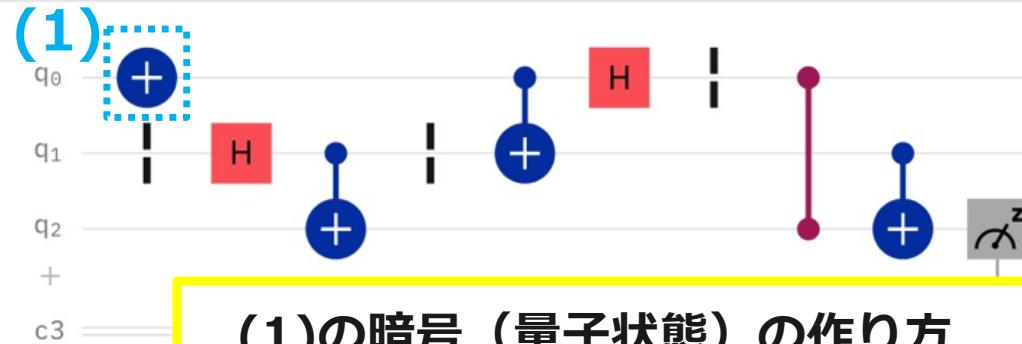
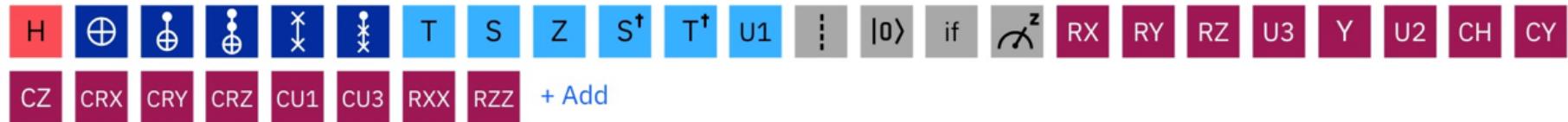
量子テレポーテーションの実験を本物の量子コンピューターで実験してみたところ、アリスからボブに暗号が約90%の確率で転送されました！

量子コンピューターは将来大活躍するコンピューターです。

学生の皆さんには、IBMの量子コンピューターを使って、ぜひ量子プログラミングの練習をしてみてくださいね！



(量子テレポーテーションの回路：応用編)



(1)の暗号（量子状態）の作り方



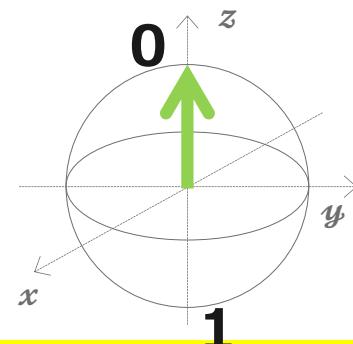
1が100%



0が50%と1が50%

X軸回転
RX
Y軸回転
RY

0と1の割合を角度で
変えられます

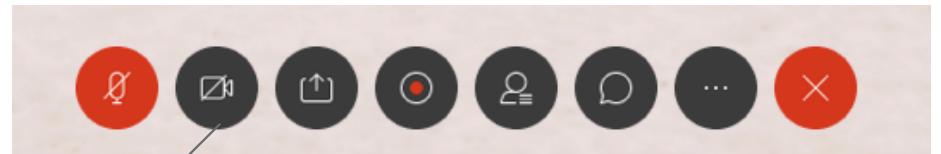




感想



集合写真タイム（WebEXのカメラをオンにしてください）



左から2番目を押さえて黒になったことを確認してください。

IBM
®