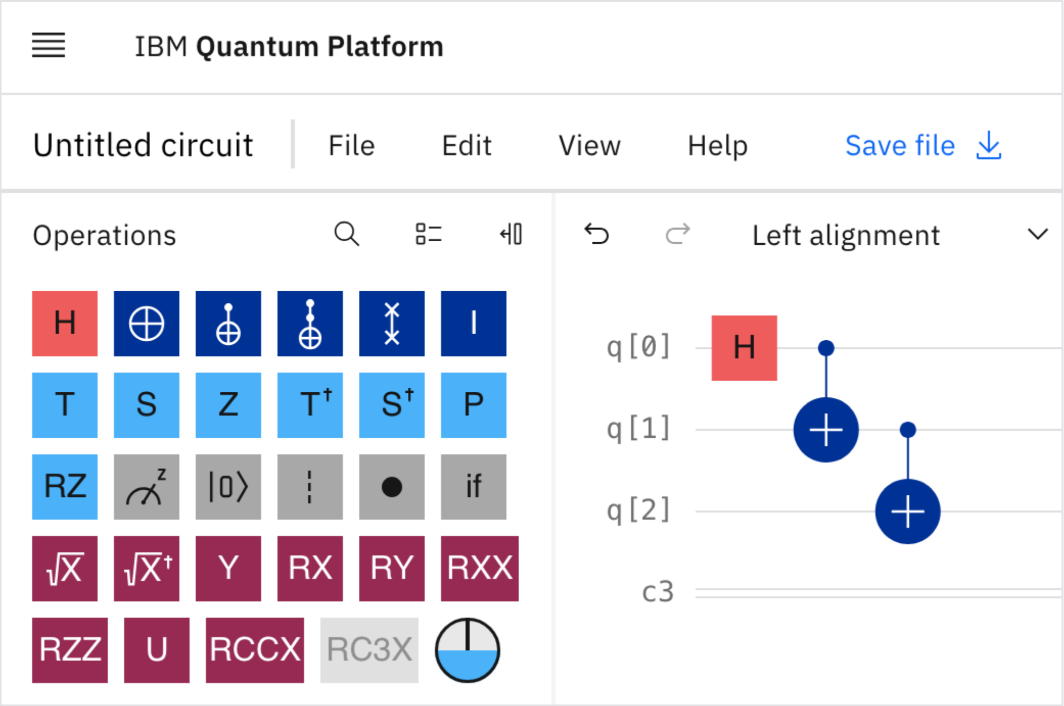
量子情報入門
IBM Quantum Composer



Sep 29, 2025

沼田祈史
Kifumi Numata
IBM Quantum

IBM Quantum

IBM Quantum © 2025 IBM Corporation

いつも使っている
コンピューターのビット

0 または 1

どちらか

量子コンピューターの
量子ビット

0 と 1

両方の重ね合わせ

いつも使っている
コンピューターのビット

0 または 1

どちらか

コイン

おもて

コイン

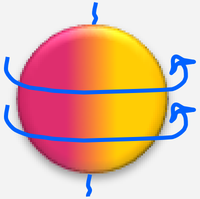
うら

量子コンピューターの
量子ビット

0 と 1

両方の重ね合わせ

くるくる回っているコイン（イメージ）



測定すると表か裏にバシッと決まる

いつも使っている
コンピューターのビット

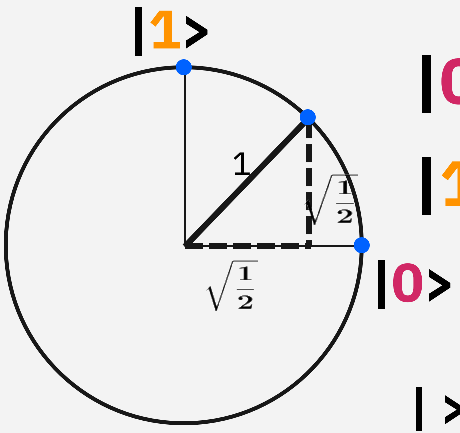
0 または **1**

どちらか

量子コンピューターの
量子ビット

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

０と１の「重ね合わせ」



$$|0\rangle = 1 \times |0\rangle + 0 \times |1\rangle$$

$$|1\rangle = 0 \times |0\rangle + 1 \times |1\rangle$$

| >:量子ビットを表す記号

量子コンピューターの計算方法

$$|0\rangle \rightarrow \boxed{X} \rightarrow |1\rangle$$

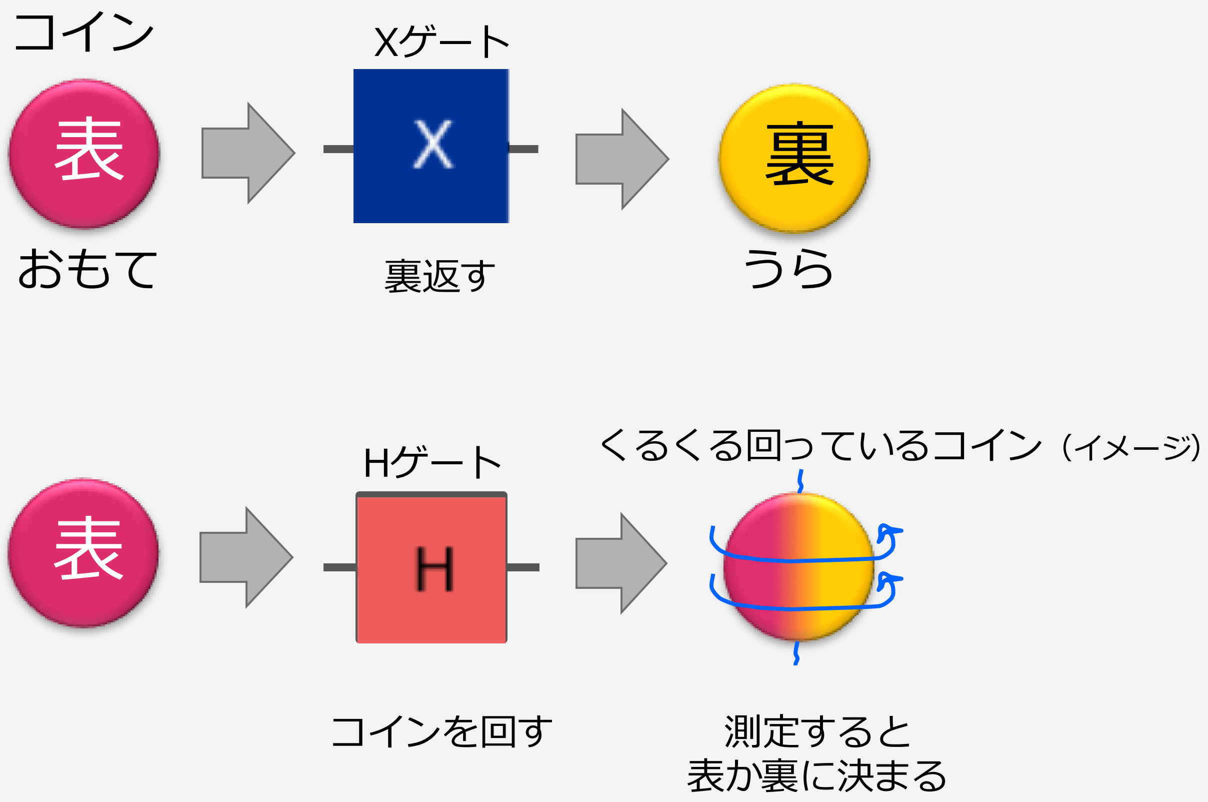
ノット（反転）ゲート

アダマールゲート

$$|0\rangle \rightarrow \boxed{H} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{2}} \times |0\rangle + \sqrt{\frac{1}{2}} \times |1\rangle$$

重ね合わせをつくる

量子コンピューターの計算方法



量子コンピューターと数学

量子コンピューターの世界 （量子力学）	数学の世界	計算上の表現
量子状態 （計算に使うデータ）	ベクトル	$\begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$: 縦ベクトル
量子状態（データ）に 対する操作（ゲート）	行列	$\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}$

線形代数の復習1：ベクトル・行列の足し算・引き算

ベクトル・行列は、同じ成分同士を足し引きすることが可能です。
構造が同じ者同士でしか、演算はできません。

縦ベクトル：$\begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 + w_1 \\ \vdots \\ v_n + w_n \end{pmatrix}$

例）$\begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+2 \\ 3+5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 8 \end{pmatrix}$

横ベクトル：$(v_1 \ \cdots \ v_m) + (w_1 \ \cdots \ w_m) = (v_1 + w_1 \ \cdots \ v_m + w_m)$

行列：$\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & \cdots & a_{1n} + b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} + b_{m1} & \cdots & a_{mn} + b_{mn} \end{pmatrix}$

引き算についても同様です。

例）$\begin{pmatrix} -2 & 4 \\ 3 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 3 & 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2-1 & 4+1 \\ 3+3 & 1+6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 & 5 \\ 6 & 7 \end{pmatrix}$

線形代数の復習2：ベクトル・行列のかけ算

ベクトルと行列の定数倍

– 全ての成分を定数倍するだけ

$$c\begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cv_1 \\ \vdots \\ cv_n \end{pmatrix} \qquad c\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ca_{11} & \cdots & ca_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ca_{m1} & \cdots & ca_{mn} \end{pmatrix}$$

例）2*$\begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}$=$\begin{pmatrix} 2*1 \\ 2*3 \end{pmatrix}$=$\begin{pmatrix} 2 \\ 6 \end{pmatrix}$

行列と縦ベクトルの積

– 黄色の行と青色の列の成分を１つずつかけて、全てたし合わせて、ベクトルの一つの成分（緑色）となる。

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}v_1 + & \cdots & +a_{1n}v_n \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1}v_1 + & \cdots & +a_{mn}v_n \end{pmatrix}$$

行列同士の積

– 行列とベクトルのかけ算と同じ計算をして、行列の一つの成分（緑色）となる。

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}c_{11} + \cdots + a_{1n}c_{n1} & \cdots & a_{11}c_{1k} + \cdots + a_{1n}c_{nk} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}c_{11} + \cdots + a_{mn}c_{n1} & \cdots & a_{m1}c_{1k} + \cdots + a_{mn}c_{nk} \end{pmatrix}$$

例）$\begin{pmatrix} -2 & 4 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 3 & 6 \end{pmatrix}$=$\begin{pmatrix} -2*(-1)+4*3 & -2*1+4*6 \\ 3*(-1)+1*3 & 3*1+1*6 \end{pmatrix}$=$\begin{pmatrix} 2+12 & -2+24 \\ -3+3 & 3+6 \end{pmatrix}$=$\begin{pmatrix} 14 & 22 \\ 0 & 9 \end{pmatrix}$

11

量子ビット

量子ビットの状態は $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の重ね合わせで表します。
任意の量子ビットは、

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

ここで、αとβは、$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ を満たす複素数です。

$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ と $|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ と表すと、

$$|\psi\rangle = \alpha \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$

とも表すことができ、$|\psi\rangle$ は状態ベクトルとも呼びます。

量子演算子

量子状態はユニタリー演算子Uによって状態を移ります： $|\psi'\rangle = U|\psi\rangle$

NOT ゲート

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$ より

$$X\,|0\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = |1\rangle$$

量子演算子

量子状態はユニタリー演算子Uによって状態を移ります： $|\psi'\rangle = U|\psi\rangle$

アダマールゲート

$$|0\rangle \Rightarrow \boxed{\mathrm{H}} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

$H = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ より

$$H\,|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

$|0\rangle$ と $|1\rangle$ が1/2の確率で測定される状態

量子コンピューターの計算方法

$|0\rangle \Rightarrow \boxed{X} \Rightarrow |1\rangle$

ノット（反転）ゲート

アダマールゲート

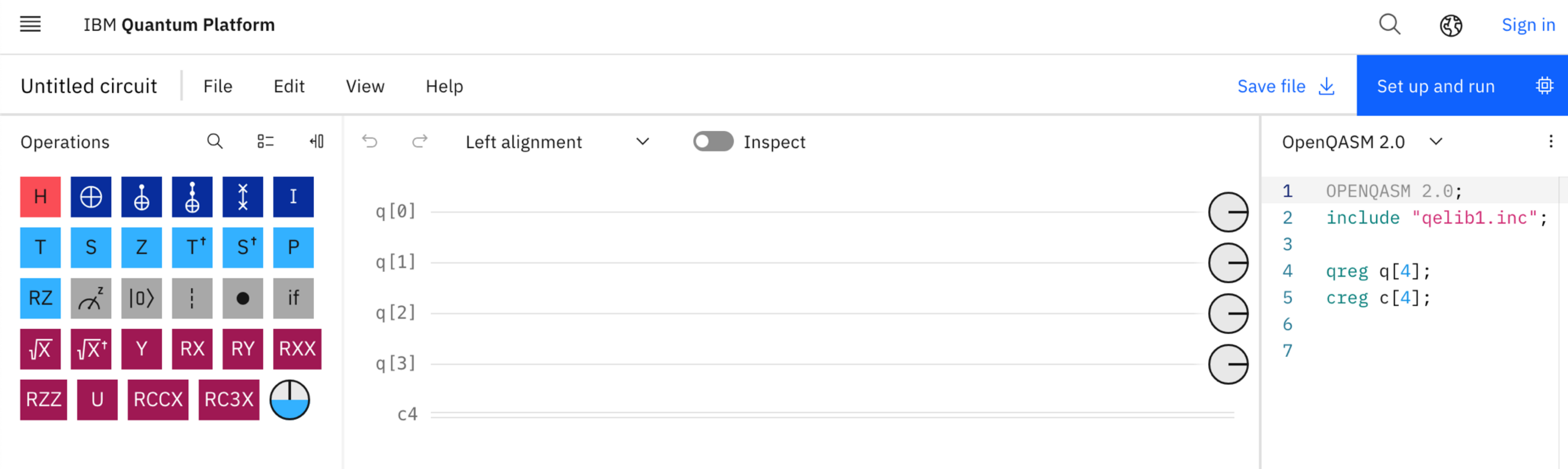
$|0\rangle \Rightarrow \boxed{H} \Rightarrow \sqrt{\frac{1}{2}} \times |0\rangle + \sqrt{\frac{1}{2}} \times |1\rangle$

重ね合わせをつくる

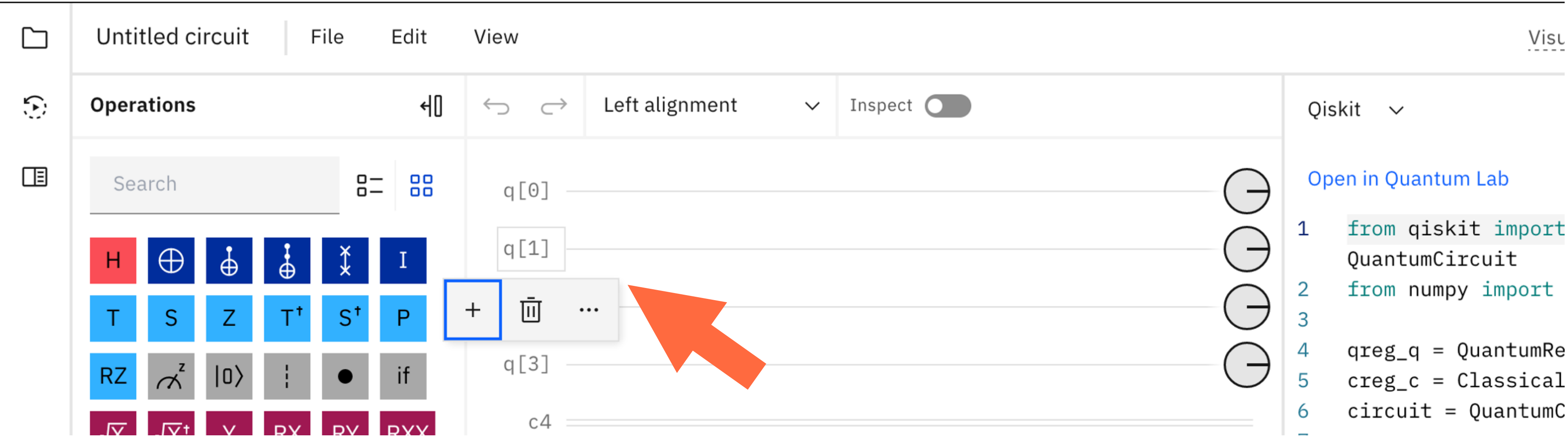
ハンズオン: IBM Quantum Composer

https://quantum.cloud.ibm.com/composer

短縮URL: ibm.biz/cmpsr25

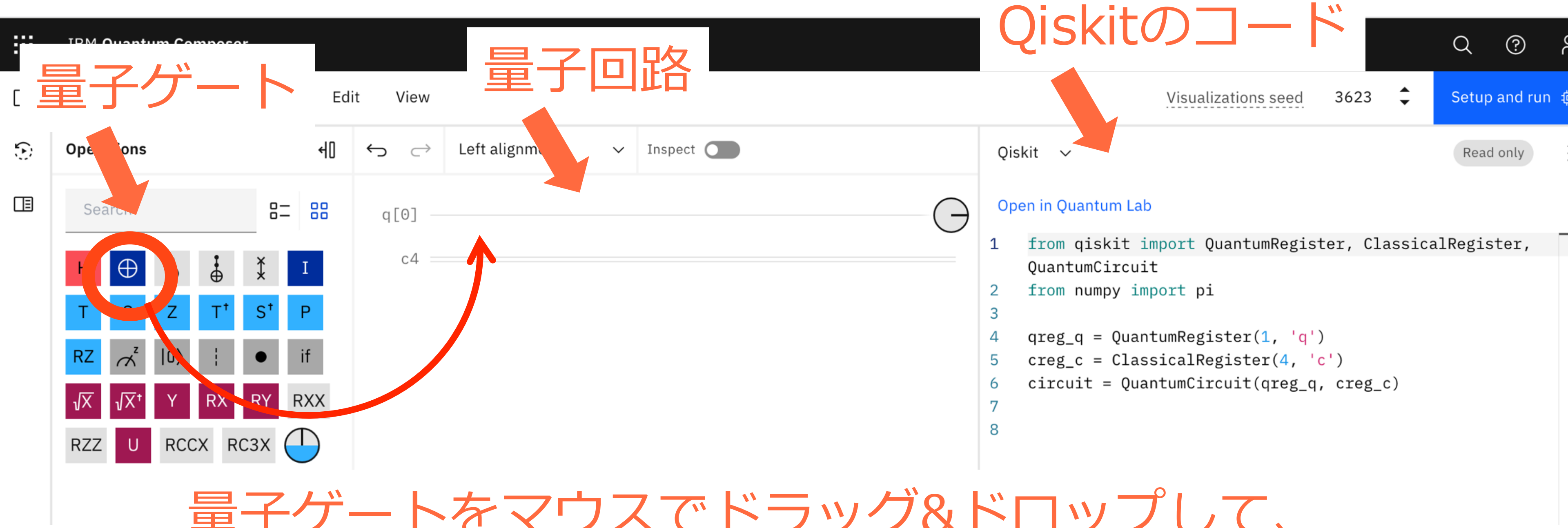


1量子ビット回路



マウスでq[1]をクリックするとゴミ箱マークが出てくるので、クリックして消します。
q[0]だけにして、1量子ビット回路の準備をします。

1量子ビット回路



量子ゲートをマウスでドラッグ&ドロップして、

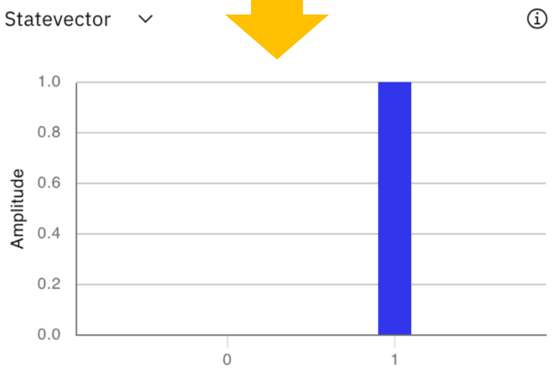
量子回路を作ります。

右側には、Qiskitのコードが自動生成されます。

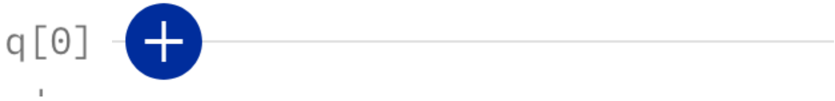
1. Xゲート(NOTゲート)

図の回路を作ってみてください。
下に表示される棒グラフの変化を確認しましょう。

左下のグラフは青棒の「Statevector」表示にしてください。



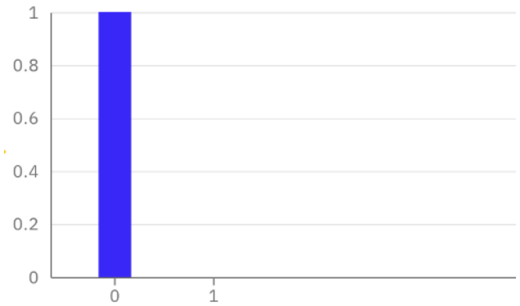
1-1)



1-2)

1-3)

初期状態は|0>



棒グラフ (Statevector 表示) は量子ビットの状態

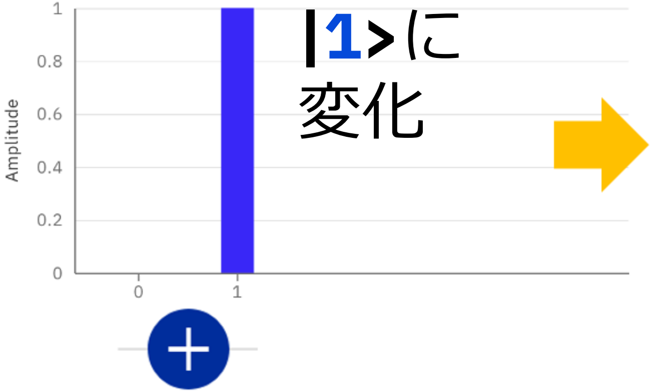
$$\alpha \times |0\rangle + \beta \times |1\rangle$$

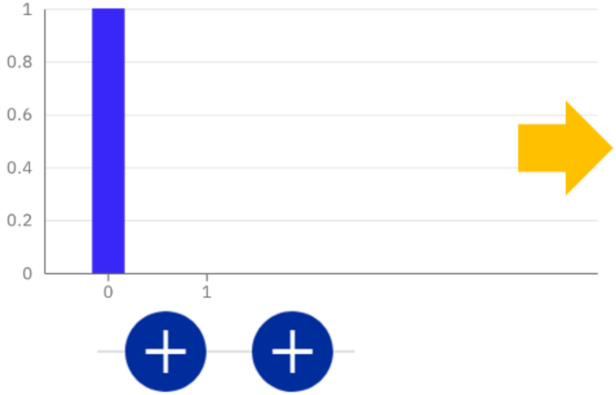
の α, β (確率振幅)です。

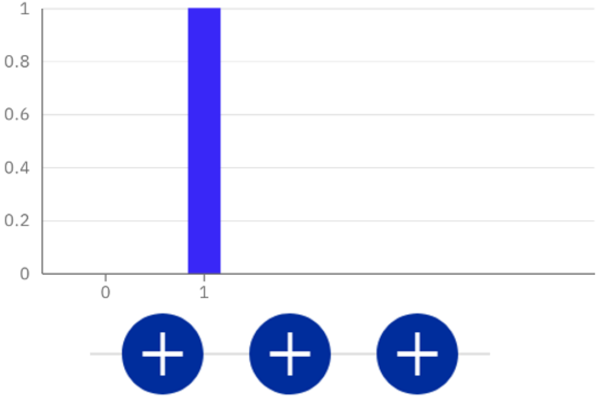
$$|0\rangle = 1 \times |0\rangle + 0 \times |1\rangle$$

$$|1\rangle = 0 \times |0\rangle + 1 \times |1\rangle$$

|1>に
変化







量子コンピューターの計算方法

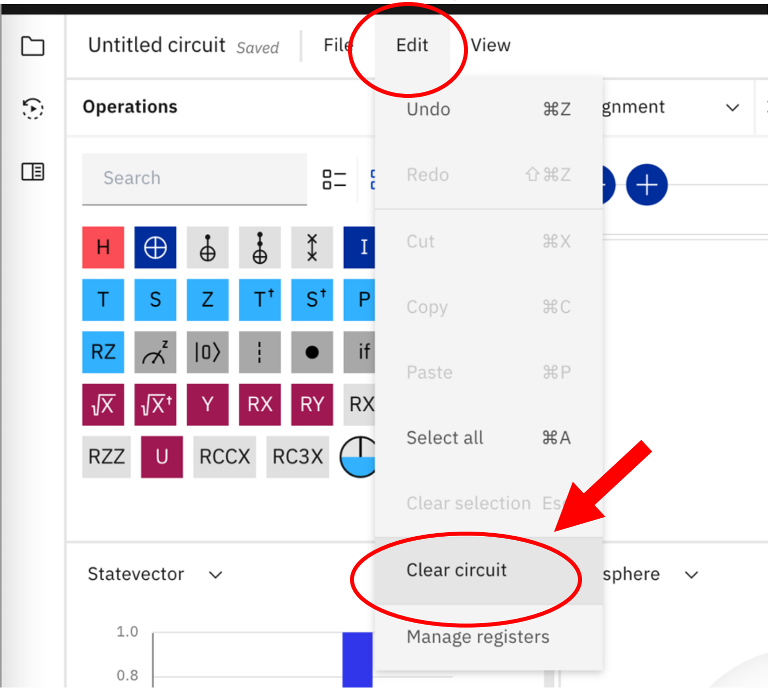
$$|0\rangle \rightarrow \oplus \rightarrow |1\rangle$$

ノット（反転）ゲート

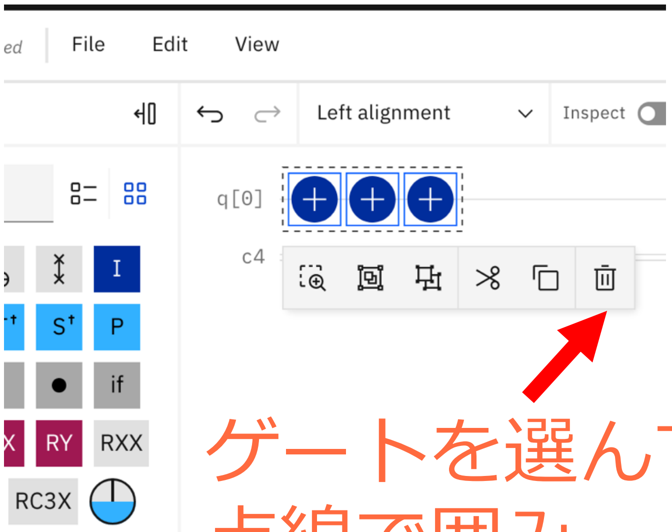
$$|0\rangle \rightarrow \boxed{H} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{2}} \times |0\rangle + \sqrt{\frac{1}{2}} \times |1\rangle$$

重ね合わせをつくる

置いたゲートを取り除く



または

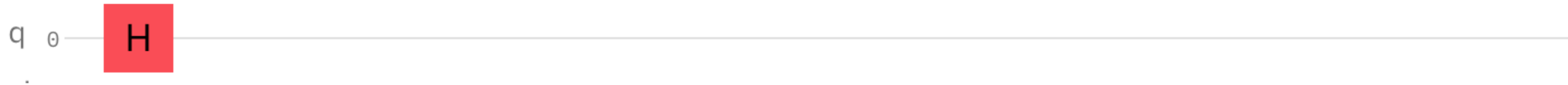


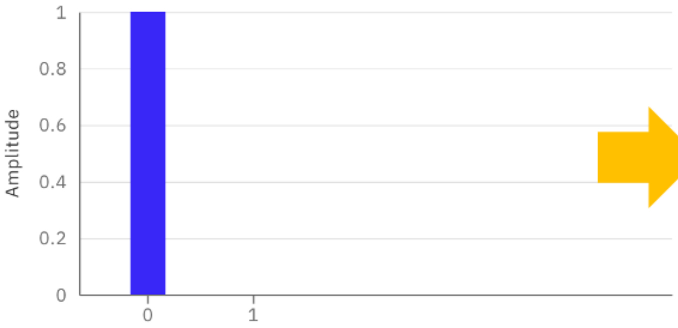
ゲートを選んで点線で囲み、ゴミ箱マークをクリック

2. Hゲート

図の回路を作ってみてください。下に表示される棒グラフの変化を確認しましょう。

2-1)





重ね合わせ

例えば1000回同じ状態を作って、測定すると約500回は0が観測され、約500回は1が観測される状態。

$$|0\rangle = 1 \times |0\rangle + 0 \times |1\rangle$$

$$0.707 \times |0\rangle + 0.707 \times |1\rangle$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \times |0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} \times |1\rangle$$

2. Hゲート

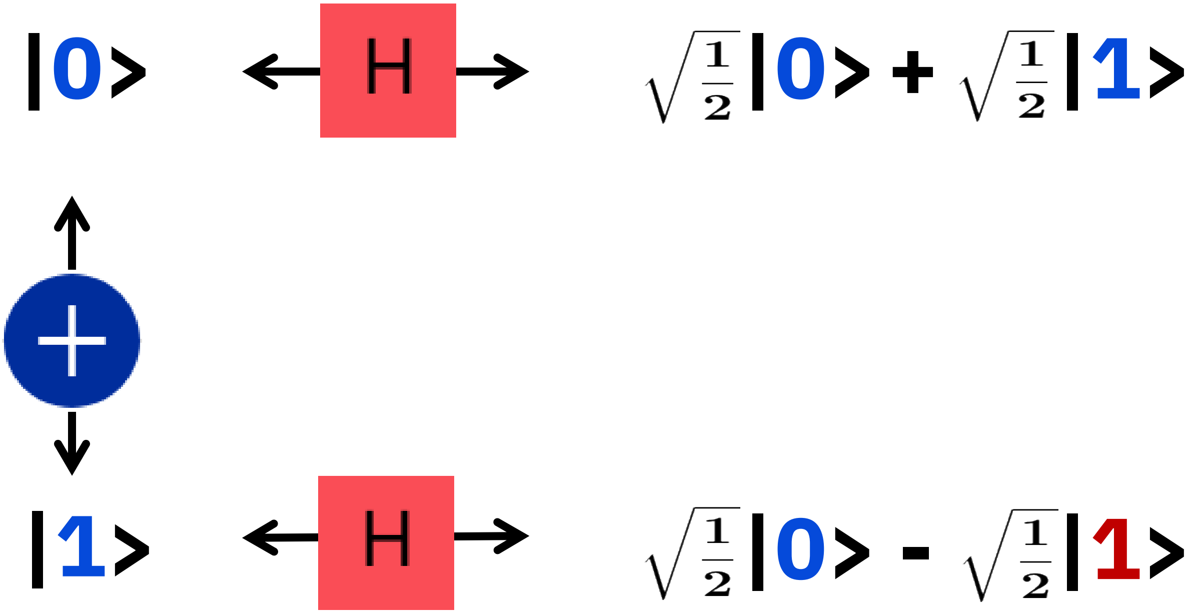
図の回路を作ってみてください。下に表示される棒グラフの変化を確認しましょう。

2-1)

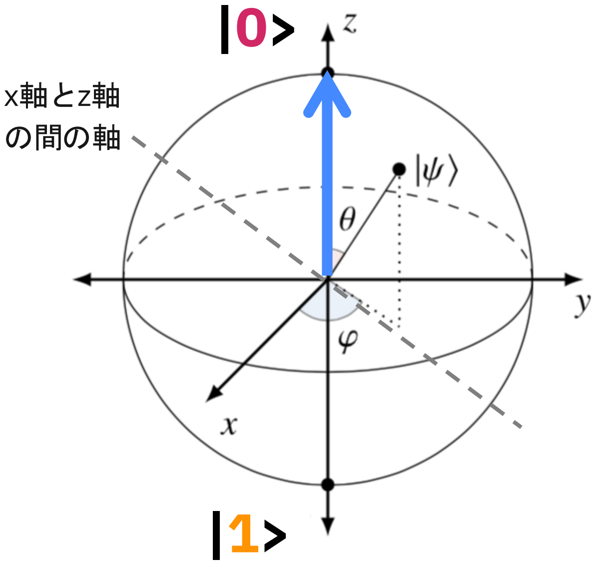
2-2)

2-3)

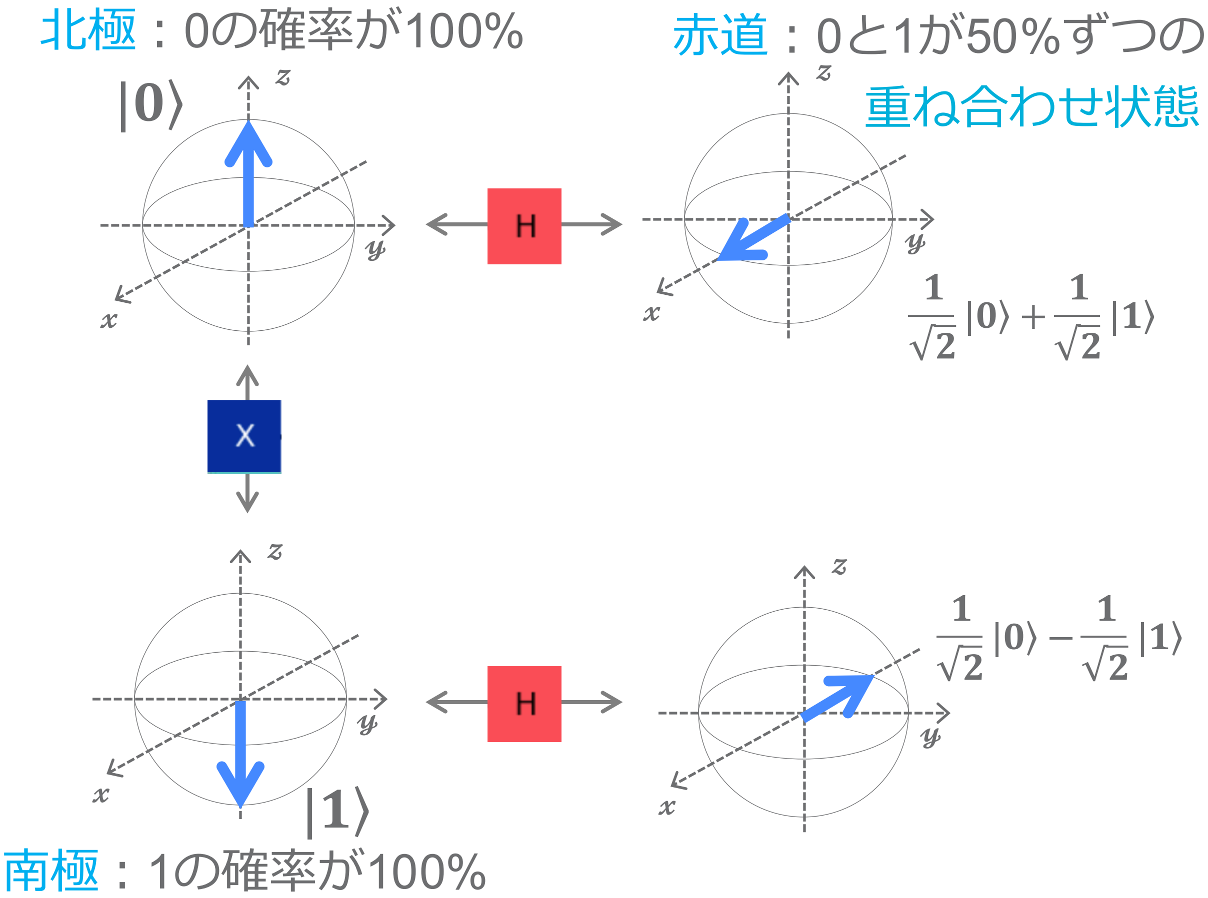
量子コンピューターの計算方法



ブロッホ球



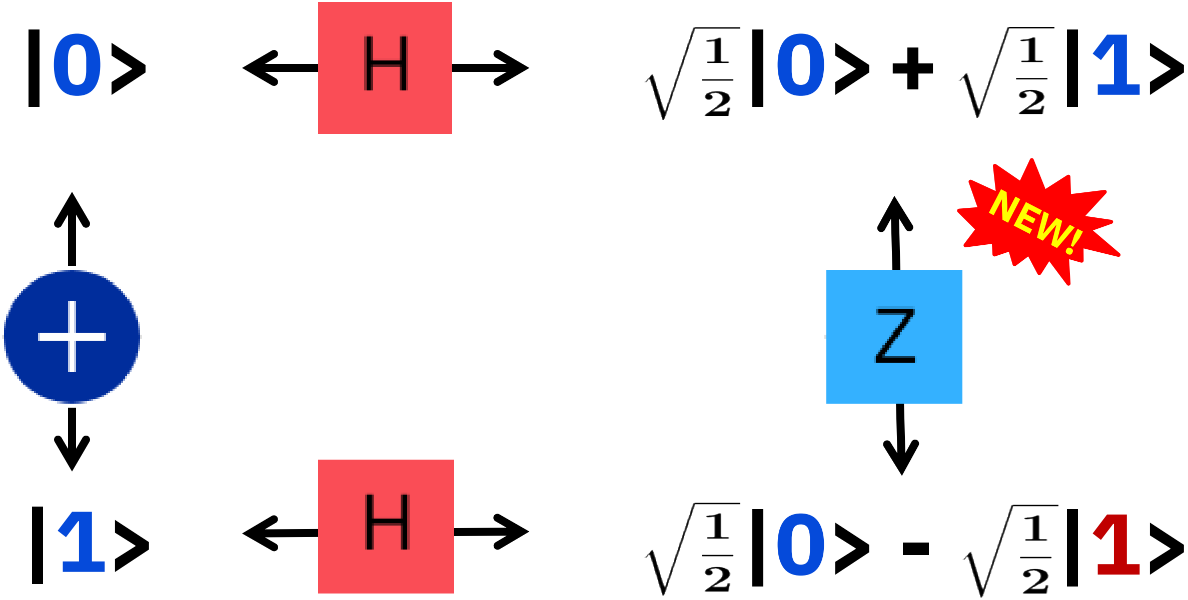
|0>
z
x軸とz軸
の間の軸
|ψ⟩
θ
φ
y
x
|1>



北極：0の確率が100%
|0⟩
赤道：0と1が50%ずつの
重ね合わせ状態
H
X
$\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$
$\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$
|1⟩
南極：1の確率が100%

量子コンピューターの計算方法

Qiskit



3. Zゲート

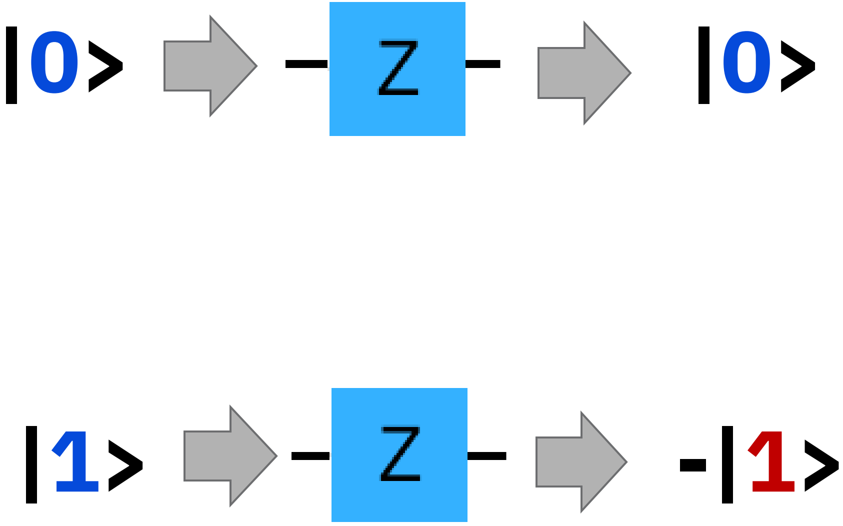
図の回路を作ってみてください。下に表示される棒グラフの変化を確認しましょう。

3-1)

3-2)

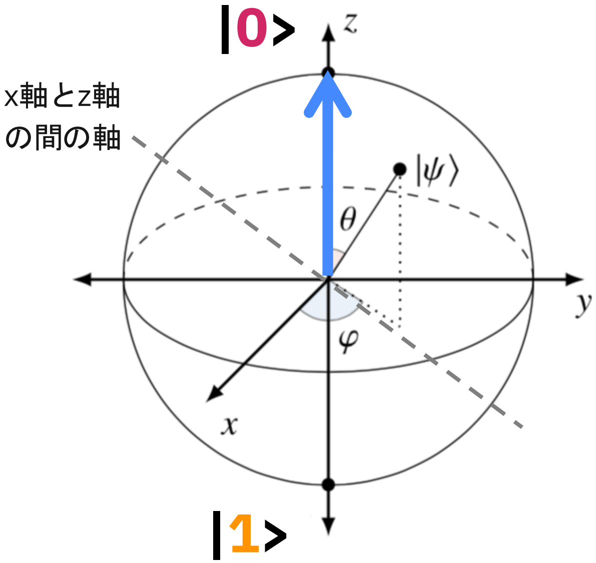
3-3)

量子コンピューターの計算方法

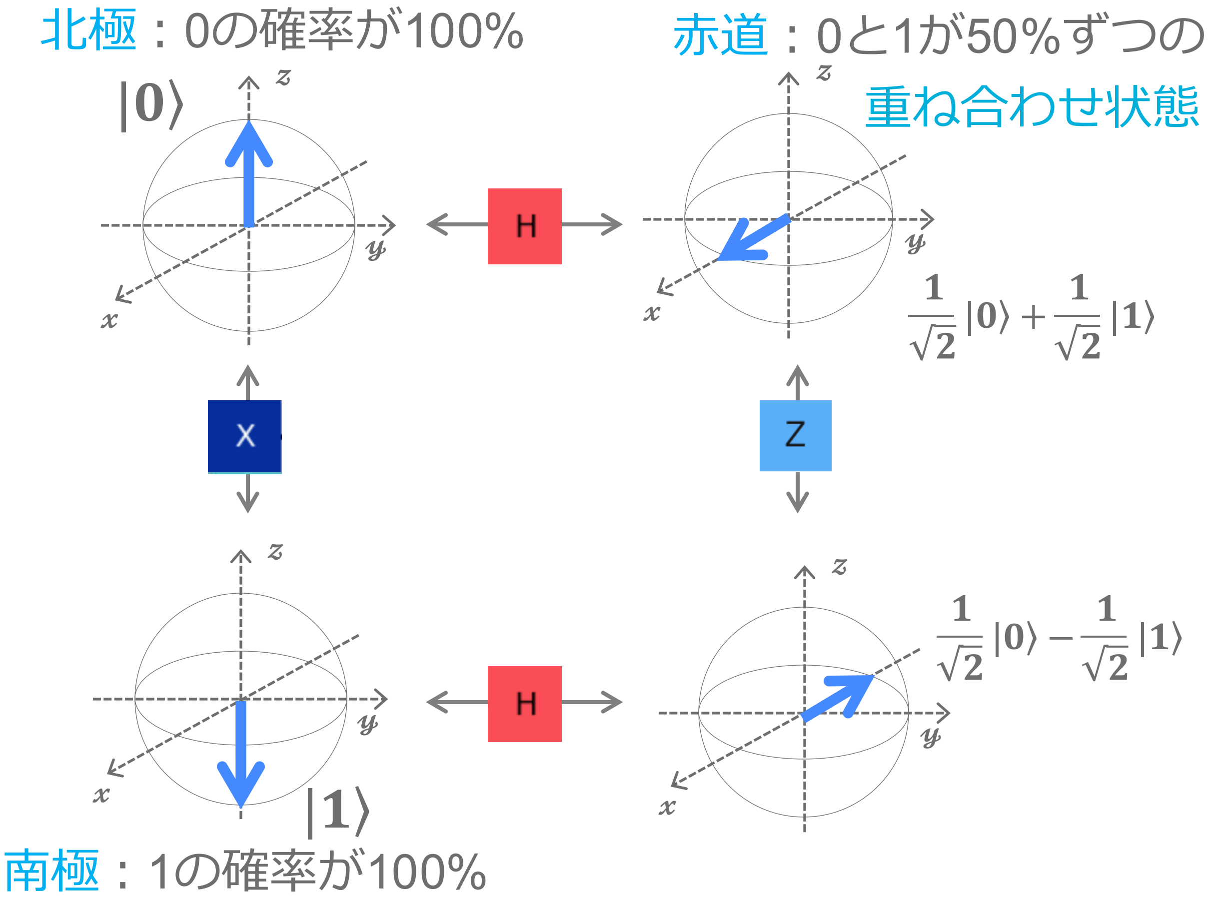


１の符号を反転する

ブロッホ球



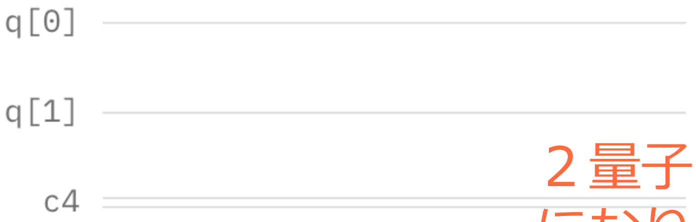
|0>
z
x軸とz軸
の間の軸
$|\psi\rangle$
θ
φ
y
x
|1>



北極：0の確率が100%
$|0\rangle$
赤道：0と1が50%ずつの
重ね合わせ状態
H
X
Z
H
$\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$
$\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$
$|1\rangle$
南極：1の確率が100%

4. 量子重ね合わせ

q[0]をクリックして、さらに「+」マークをクリックして、２量子ビットの回路を準備します。



２量子ビット回路になります

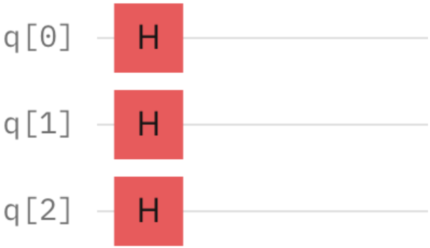
図の回路を作ってみてください。下に表示される棒グラフの変化を確認しましょう。

4-1)

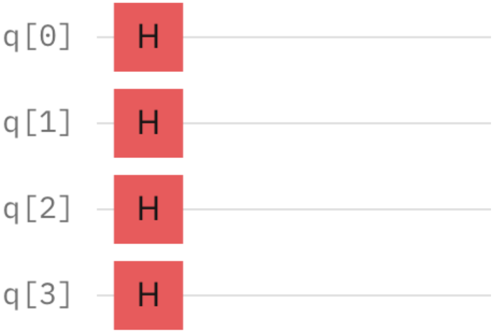
さらにq[1]をクリックして、さらに「+」マークをクリックして、３量子ビット、４量子ビット、５量子ビットの時の重ね合わせ状態を確認します。

今回は重ね合わせ状態は表示されません

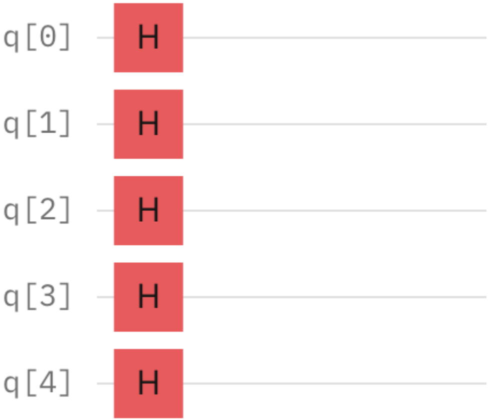
4-2)



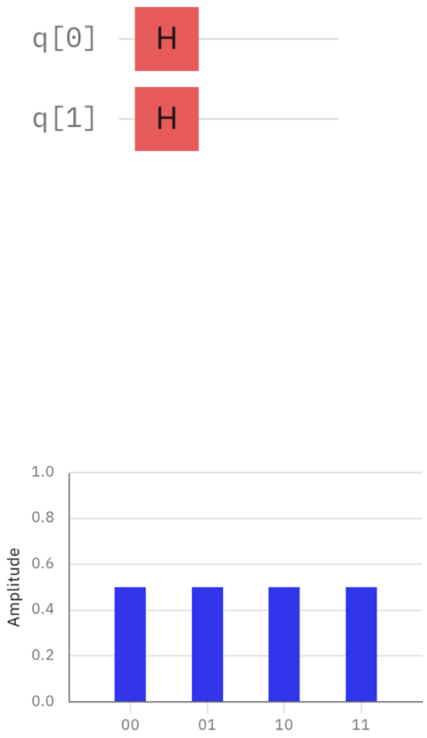
4-3)



4-4)

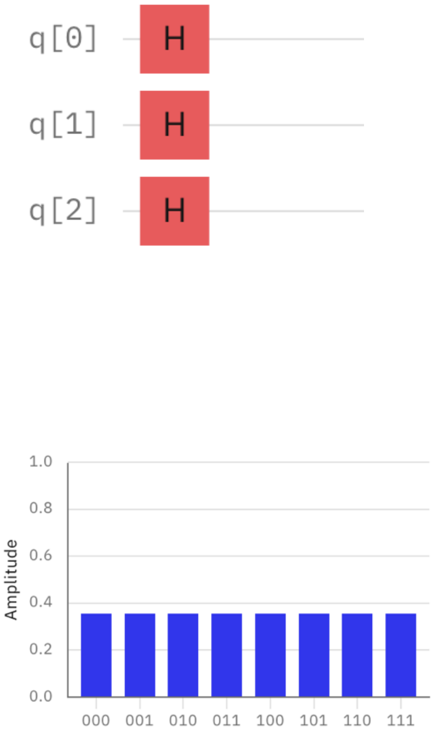


4-1)



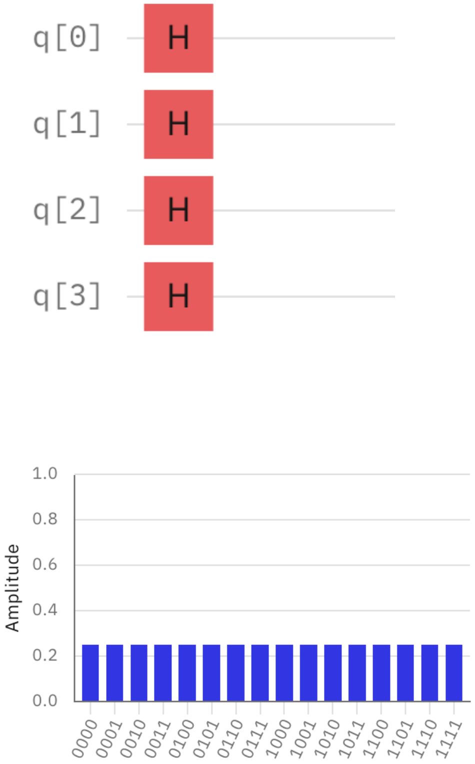
4個

4-2)



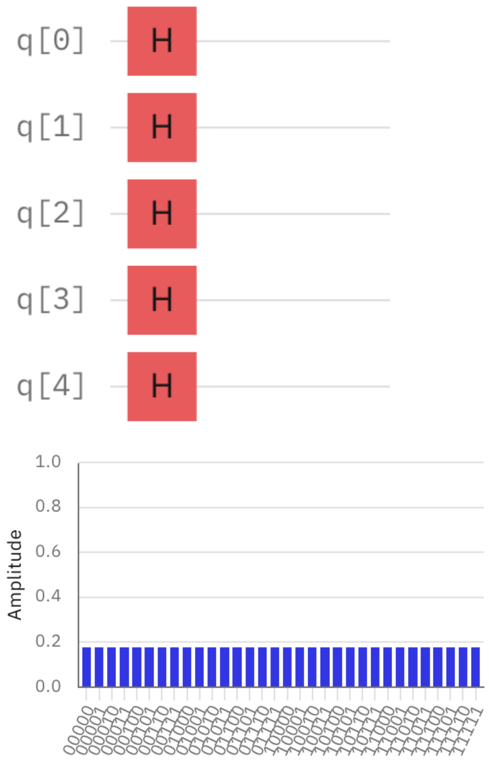
8個

4-3)



16個

4-4)

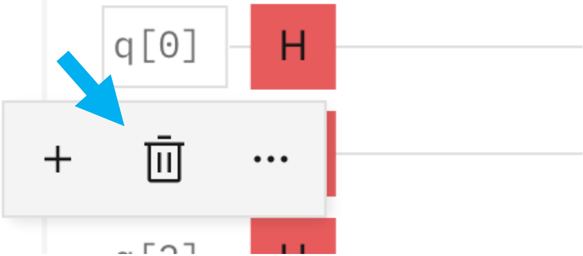


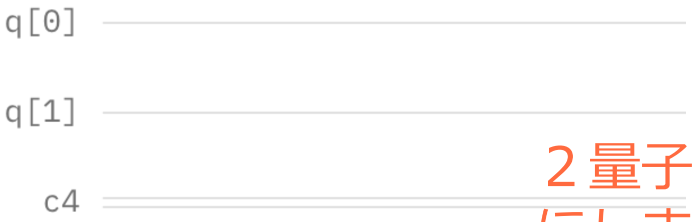
32個

量子ビット数(n)が増えるにつれて、量子状態が倍々に(2^n個に)増えていくことがわかります。

2量子ビット・2古典ビットの状態を作る

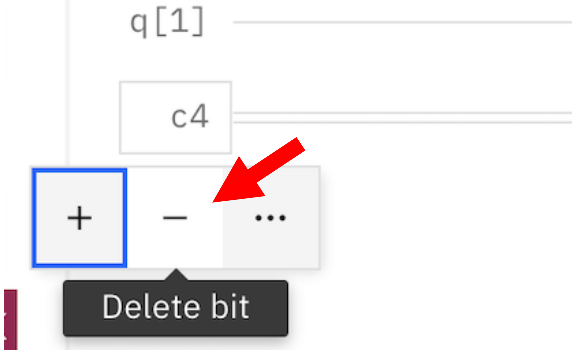
q[0]をクリックして、さらに「ゴミ箱」マークをクリック、を繰り返して、２量子ビットの回路を準備します。





２量子ビット回路にします

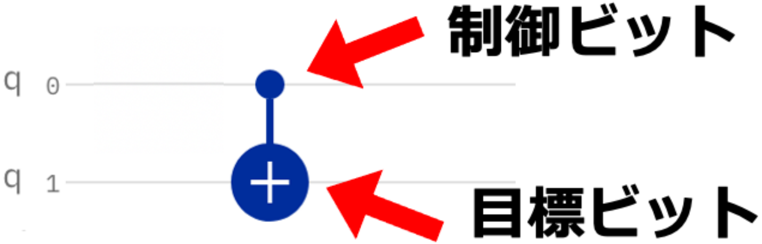
次に、c4をクリックして、「-」マークをクリックするを2回繰り返して、２古典ビットにします。



２古典ビットになります

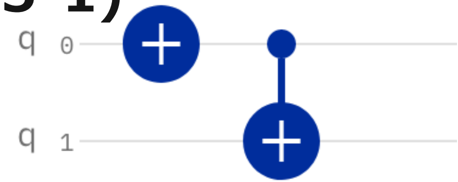
5. CNOTゲート(制御Xゲート)

制御ビットが|1⟩のときのみ、目標ビットを反転（NOT）するゲートです。

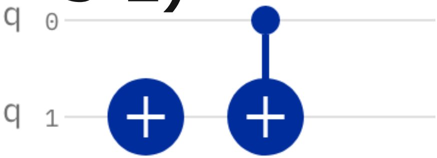


入力		出力	
目標ビット	制御ビット	目標ビット	制御ビット
0	0	0	0
1	0	1	0
0	1	**1**	**1**
1	1	**0**	**1**

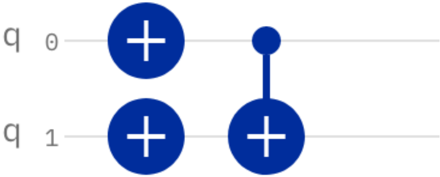
5-1)



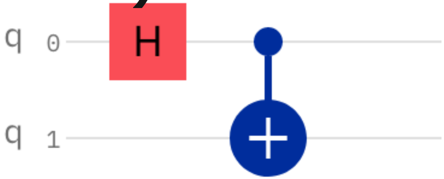
5-2)



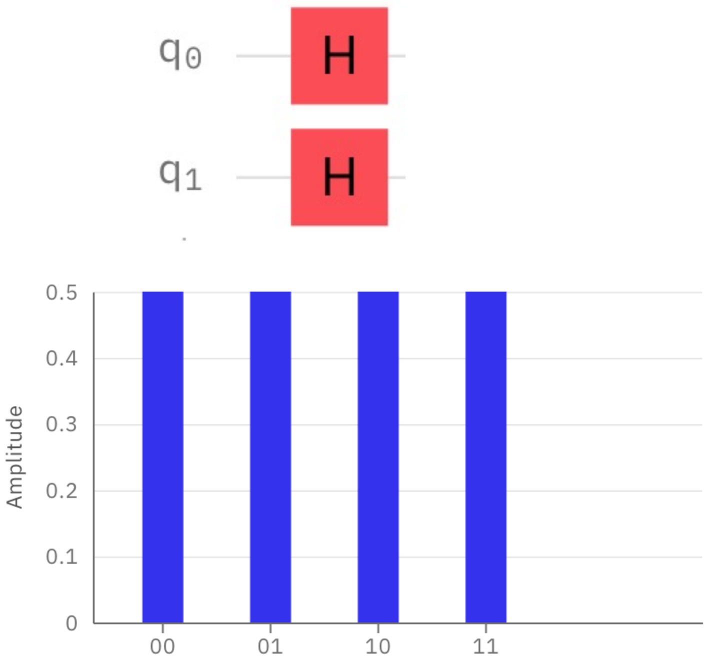
5-3)



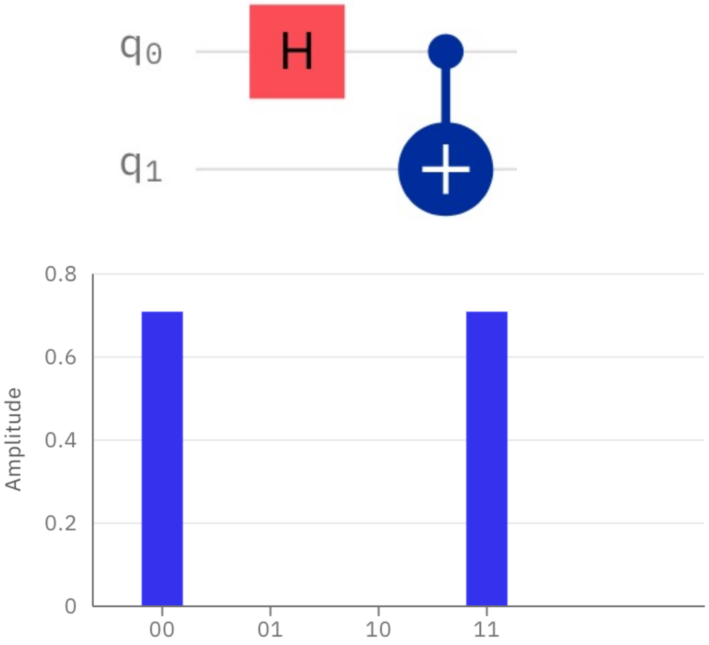
5-4)



量子重ね合わせ

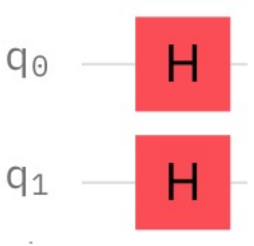


量子もつれ（エンタングルメント）



CNOTゲートは、
エンタングルメントを作ります。

量子重ね合わせ



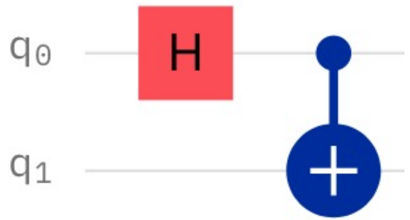
00 ••• 25%

01 ••• 25%

10 ••• 25%

11 ••• 25%

量子もつれ（エンタングルメント）



00 ••• 50%

01 ••• 0%

10 ••• 0%

11 ••• 50%

1量子ビット目が0だと分かったら
2量子ビット目も0

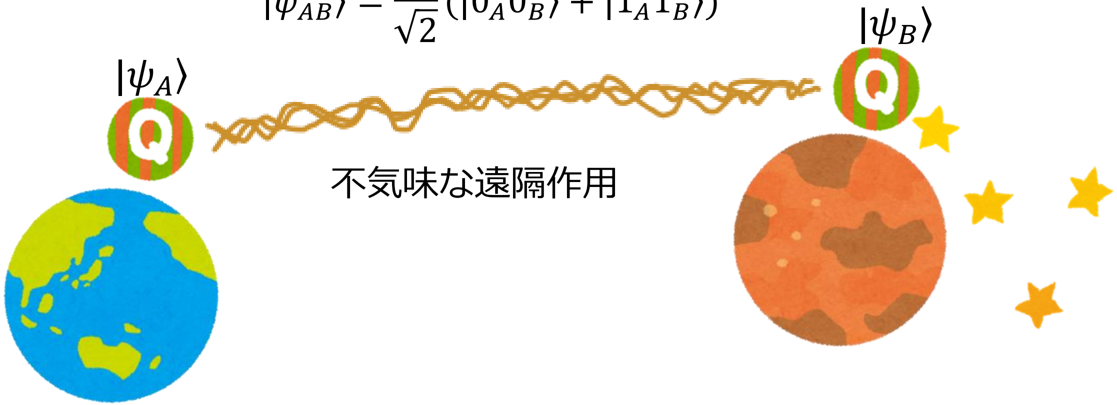
EPRペア（Einstein-Podolsky-Rosen Pair）

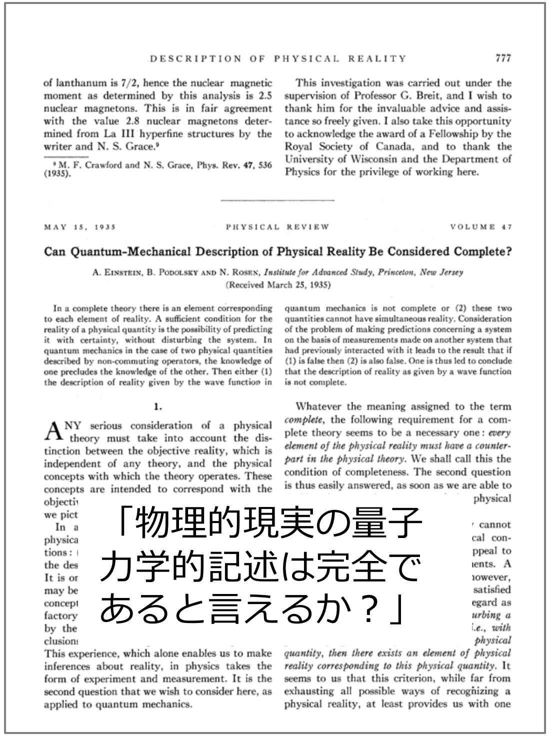
$$\text{EPRペア: } |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

2つの量子もつれ状態は、EPRパラドックスにちなんで
EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) ペアと呼ばれます。

EPRパラドックス：
量子もつれ対を離れ離れにして、片方を測定します。
何が起こるでしょうか？

$$|\psi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A 0_B\rangle + |1_A 1_B\rangle)$$





DESCRIPTION OF PHYSICAL REALITY 777

of lanthanum is 7/2, hence the nuclear magnetic moment as determined by this analysis is 2.5 nuclear magnetons. This is in fair agreement with the value 2.8 nuclear magnetons determined from La III hyperfine structures by the writer and N. S. Grace.[9]

[9] M. F. Crawford and N. S. Grace, Phys. Rev. **47**, 536 (1935).

This investigation was carried out under the supervision of Professor G. Breit, and I wish to thank him for the invaluable advice and assistance so freely given. I also take this opportunity to acknowledge the award of a Fellowship by the Royal Society of Canada, and to thank the University of Wisconsin and the Department of Physics for the privilege of working here.

MAY 15, 1935 PHYSICAL REVIEW VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*
(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

1.

ANY serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objecti…

This experience, which alone enables us to make inferences about reality, in physics takes the form of experiment and measurement. It is the second question that we wish to consider here, as applied to quantum mechanics.

Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: *every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory*. We shall call this the condition of completeness. The second question is thus easily answered, as soon as we are able to … physical …

quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity. It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one

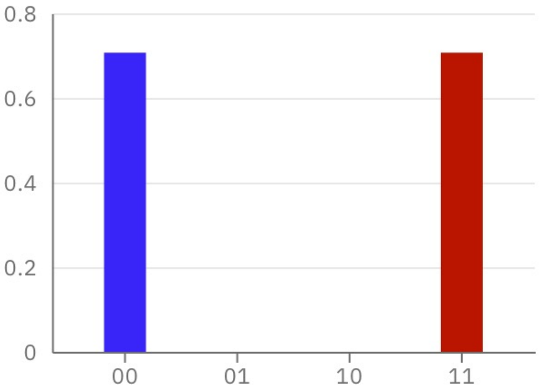
「物理的現実の量子力学的記述は完全であると言えるか？」

doi:10.1103/PhysRev.47.777 (1935)

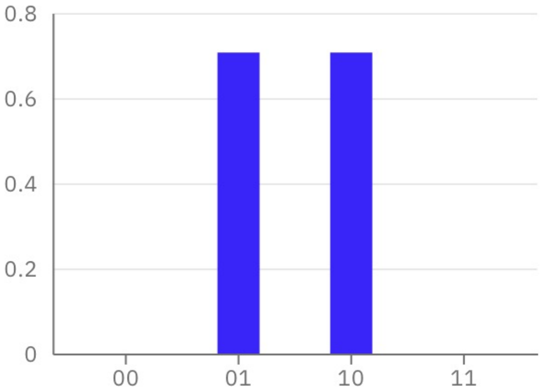
演習問題

２量子ビットのエンタングル状態を作ってみましょう。
答えは一つではないので、どんな作り方でもOKです。

（１） $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle)$



（２） $\frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$



（３） $\frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$