

第12回 Technology at a glance

今度は友達と一緒に！

量子コンピューター入門

Introduction to Quantum Computing

Yuri Kobayashi

東京基礎研究所

IBM Quantum Developer Community

2020/06/10

本日のコンテンツ

量子コンピューターとは？

量子コンピューターの原理

通常のコンピューターとの計算方法の違い

グローバーのアルゴリズム

本物の量子コンピューターで解いてみよう

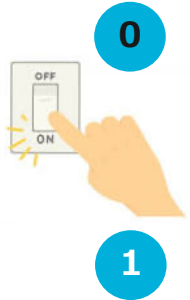
まとめ

コンピューターは今や生活を支える基盤に



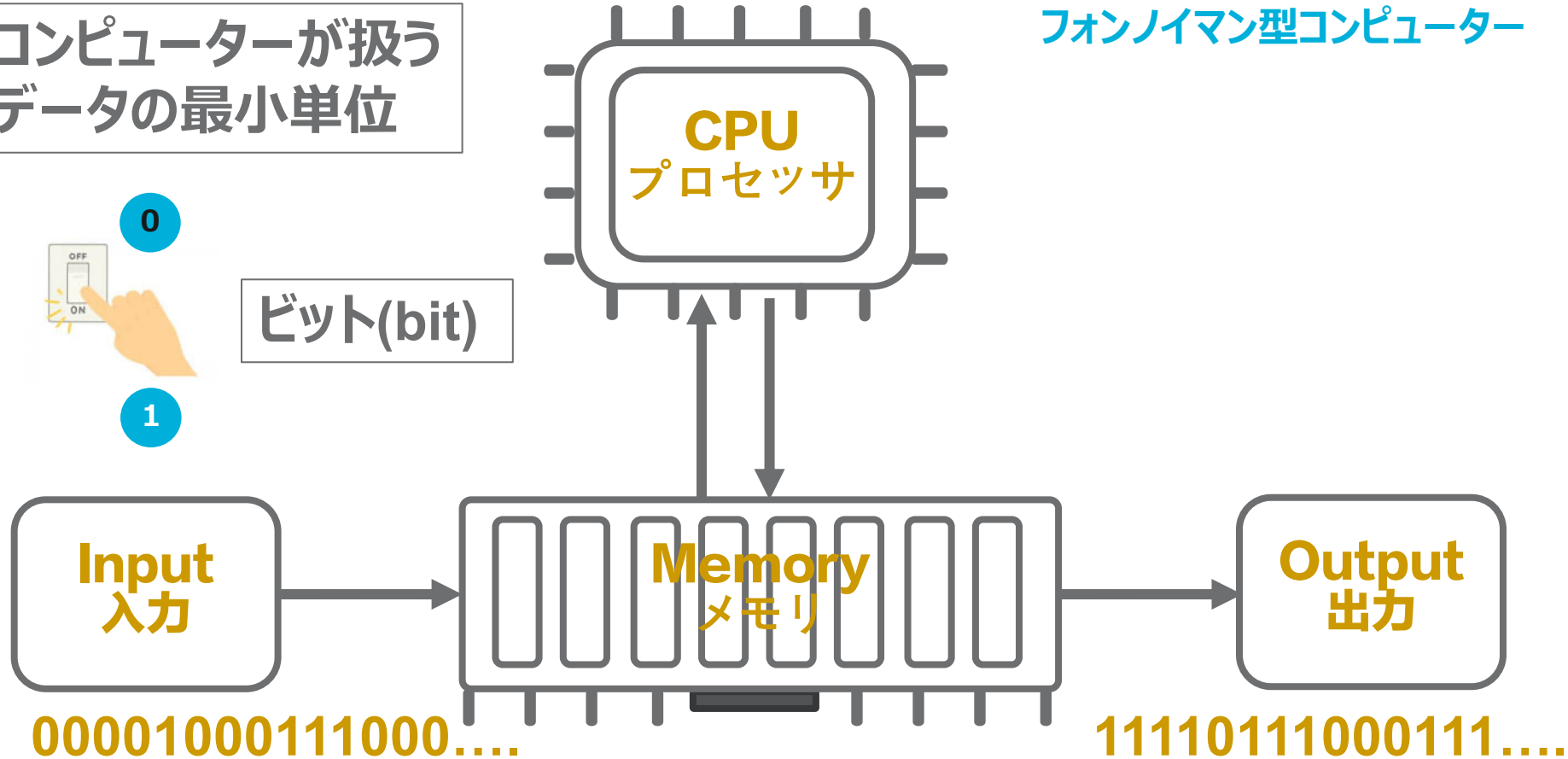
70年以上変わらない コンピューターの基本構成

コンピューターが扱う
データの最小単位



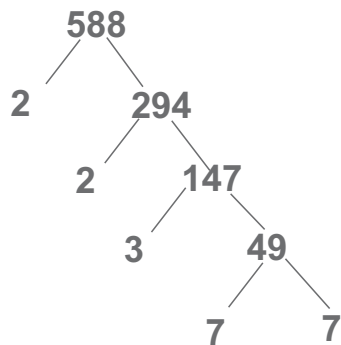
ビット(bit)

フォンノイマン型コンピューター



なぜ注目されているのか？

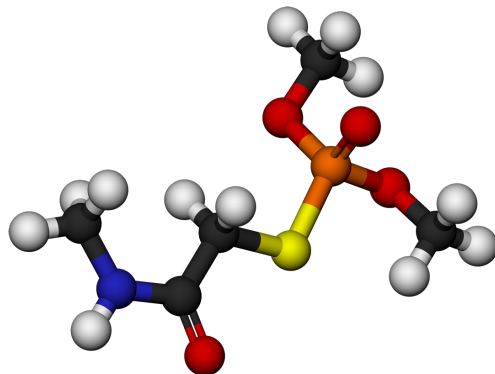
従来のコンピューターが苦手とする分野



素因数分解



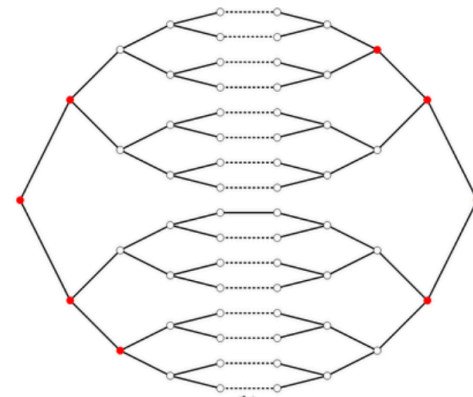
新しいセキュリティー技術



化学シミュレーション



創薬、新しい材料研究



乱択アルゴリズム



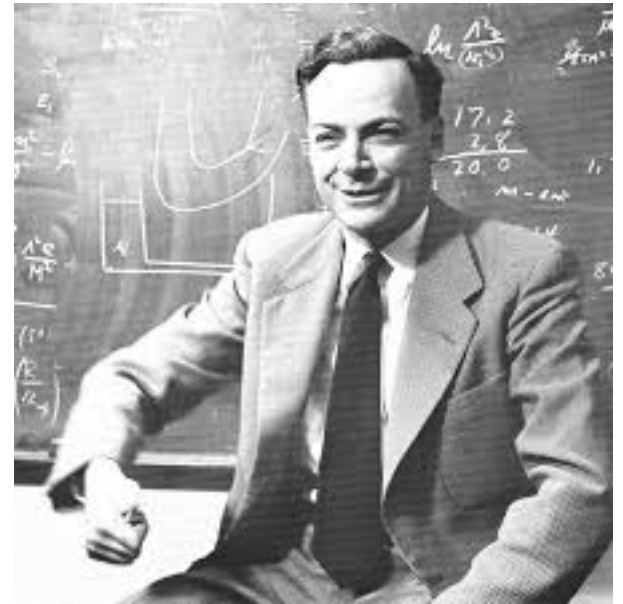
探索、決定問題への応用



量子コンピューターという着想

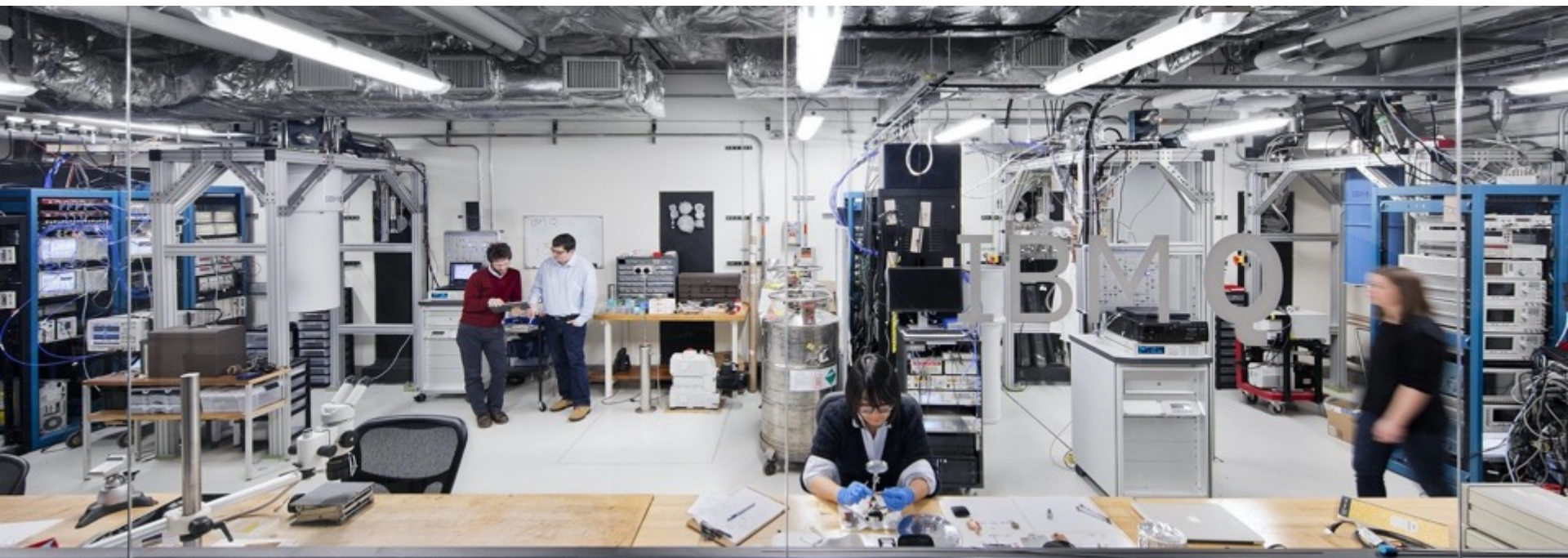
自然をシミュレーションしたければ、
量子力学の原理でコンピューターを作らなくてはならない

“Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy.”



1982年 リチャード・ファインマン

IBMは2016年5月、量子コンピューターを
世界にさきがけてクラウド上に公開しました



公開直後より世界中からアクセスをされています

IBM Quantum

IBM Cloudを通じた量子コンピューターのユーザー数
全世界で20万人以上

Quantum Chips

130k

Quantum Simulators

72k

Users

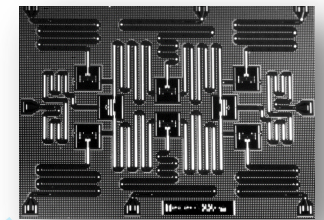
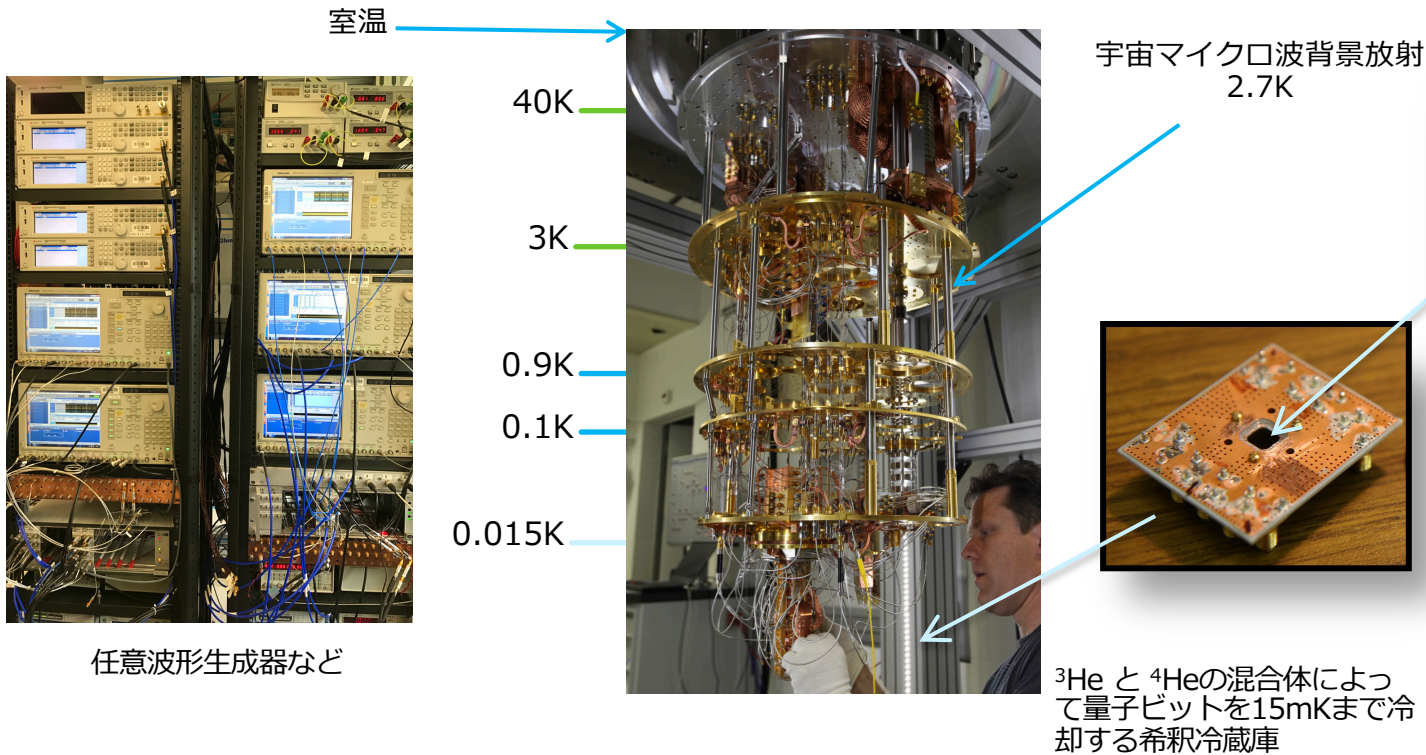
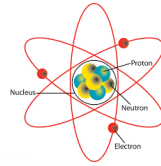
0.0

Top countries

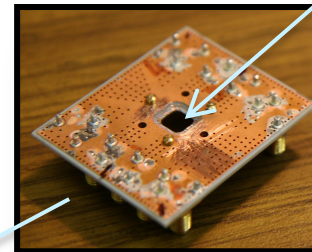
New countries

140k
130k
120k
110k
100k
90k
80k
70k

IBMの量子コンピューターの構造

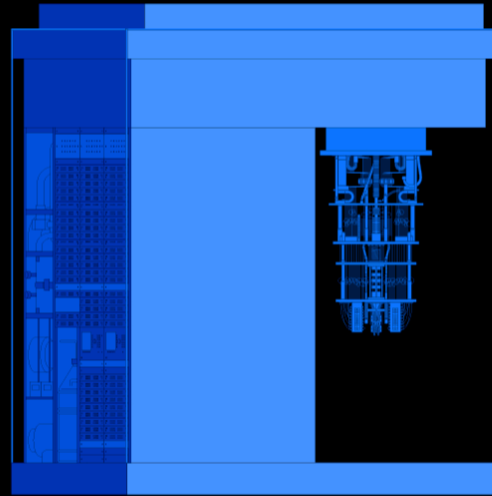


超電導量子ビットと
共振器のチップ



量子ビットチップの搭載さ
れた基板は15mKの温度で
複数のシールドによって
保護されている。

手元のPCからアクセス



IBM Q

Qt

量子コンピューターの原理

量子力学の原理って？

そもそも量子は、粒子と波の性質をあわせ持つとても小さな物質やエネルギーの単位。（原子やさらに小さな電子・中性子・陽子などの総称）

ミクロな世界では「重ね合わせ」「もつれ」といった量子力学の性質がこれらは古典計算で利用できない量子コンピューターならではの特徴

量子重ね合わせ
Superposition



1量子ビット足す毎に
データを指数関数的に
保持して計算できる

$$2^n$$

量子もつれ
Entanglement



もつれを利用した干渉で効率よく解を
導き出すことができます

2ⁿのパワー

①	②②	③③③			

30日後...

400俵！



「一日目に米粒を一粒。」
「二日目にはその倍の二粒。」
「三日目にその倍の四粒。」
「それを三十日間いただきたく...。」

他の褒美に変わろう！
えさせてくれ！

なんだ、そんな程度
でいいのか...



スマホで**2の30乗**を検索してみましょう。
その値を1俵（**2,666,666粒**）で割ってみてください。

量子計算と通常のコンピューターの違い

例) 4ビットで暗号をつくってみましょう

0000 0001 0010 0011

0100 0101 0110 0111

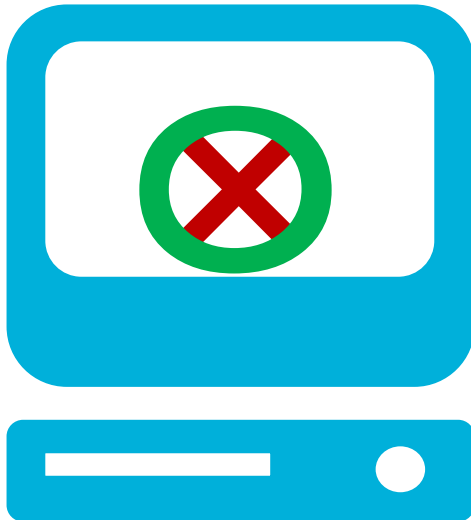
1000 1001 1010 1011

1100 1101 1110 1111

例)ふつうのコンピューターで解読する場合

0000	0001	0010	0011
0100	0101	0110	0111
1000	1001	1010	1011
1100	1101	1110	1111

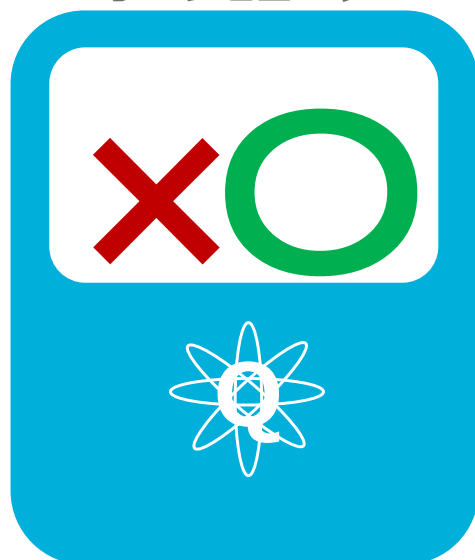
ふつうのコンピューター



例) 量子コンピューターで解読する場合

0000	0001	0010	0011
0100	0101	0110	0111
1000	1001	1010	1011
1100	1101	1110	1111

量子コンピューター



0011

そもそも優れたアルゴリズムとは？



問合せ量（Query Complexity）

ある問題を解くのに途中で関数を呼ぶ回数が少ないほうが
全体の計算量が少なく、速く問題を解くことにつながる

優れたアルゴリズムというのはより少ない問合せ量で答えを
導くことのできるアルゴリズム

グローバーのアルゴリズム

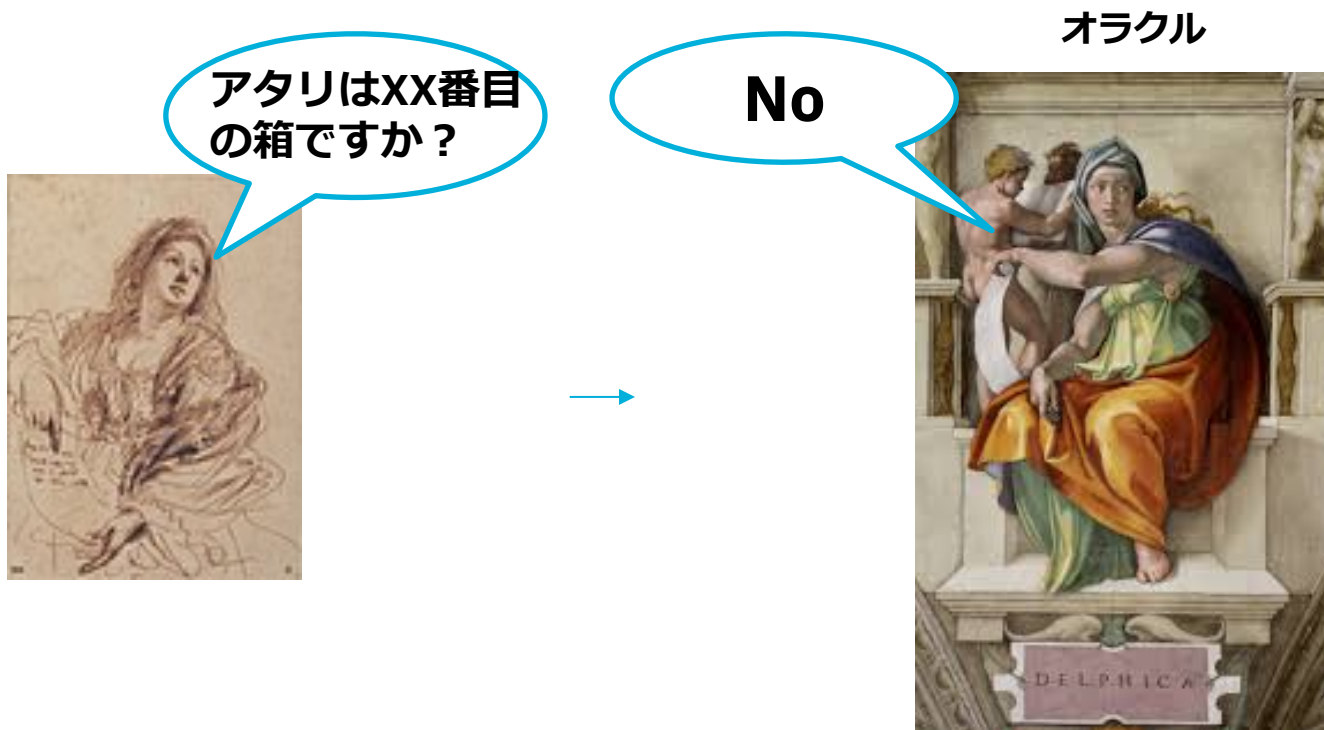
グローバーのアルゴリズムとは？

- Grover のアルゴリズムは、非構造化データベースの中から求めている解を探索したりある条件を満たしているかどうかを判断する問題を解くための代表的な量子アルゴリズム。
- N 個の組合せからアタリを見つけたい場合、古典アルゴリズムだと総当たりで探索するしかない。1回でみつかる確率は平均 $1/N$ 回。
- Grover のアルゴリズムを使うと \sqrt{N} ステップの問合せ量で探索可能。



オラクル

- オラクル：実態は関数。中身はブラックボックスで正しい答えを唯一知っている存在のため「オラクル（神の存在）」と名付けられているユーザーからのクエリ（問合せ）に対してYesかNoでしか答えない。



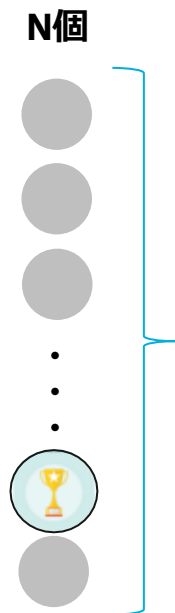
$$U_f |x\rangle = (-1)^{f(x)} |x\rangle \rightarrow$$

●	$ x\rangle$	NO
●	$- x\rangle$	YES

グローバーのアルゴリズムに組み込む

- 最初にすべての通りの重ね合わせをつかってオラクルにかけ、答えの確率振幅を高めて結果を測定します。

Step 1.
重ね合わせをつくる

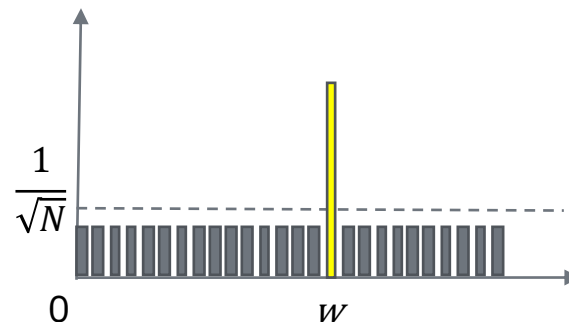


Step 2.
オラクルにかける

オラクル



Step 3.
答えの確率振幅を高める



Step 4.
結果を測定



量子コンピューターで
解いてみましょう

量子状態を表してくれるブロッホ球

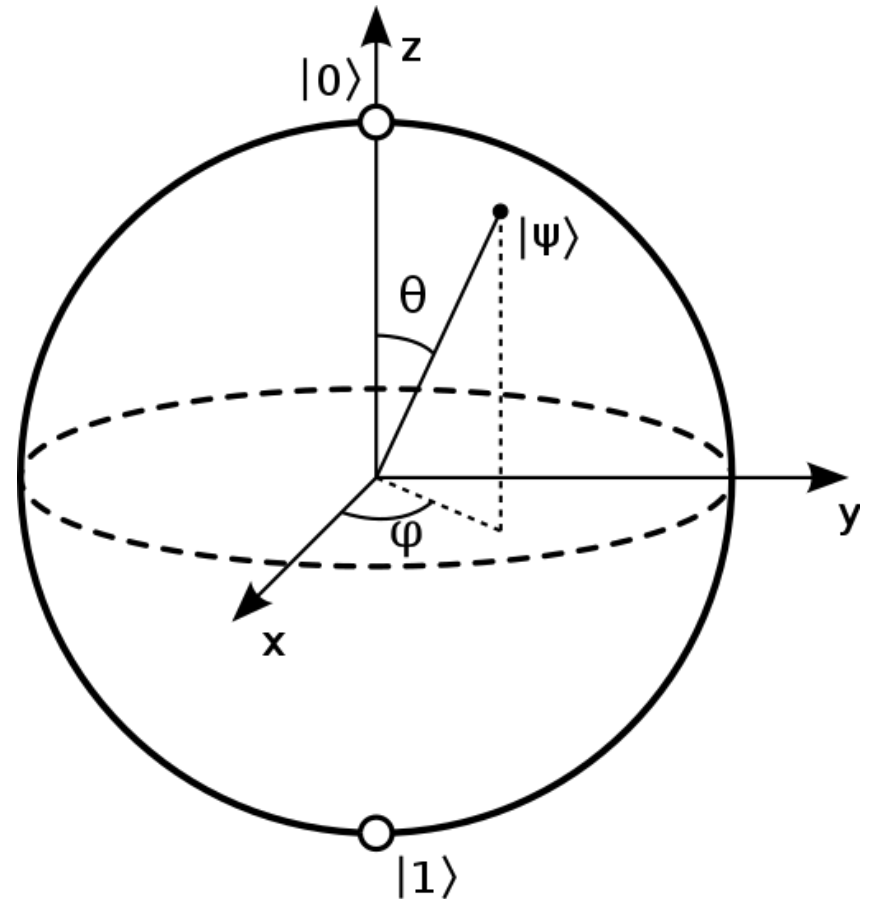
量子状態：量子力学の原理にもとづいた
特殊なデータの持ち方を実現してくれる

通常のコンピューターのビット(0と1)以外の
データの状態を実現できる

0、1 とそれ以外のデータを3次元の球上に
ベクトルとして表現→ブロッホ球

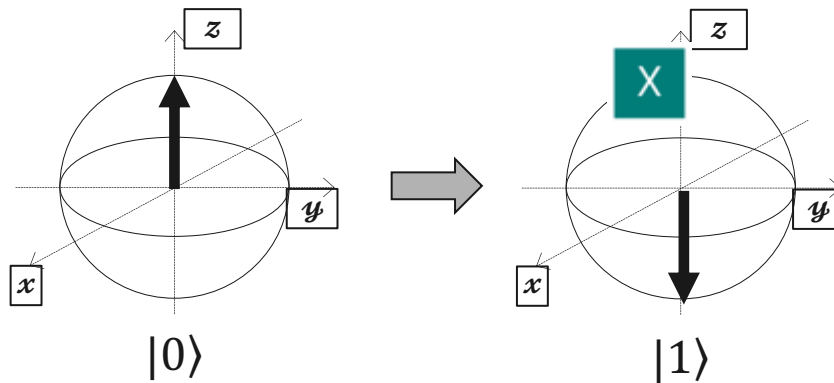
このデータの持ち方を「状態ベクトル」と呼ぶ

測定結果を確率分布として示してくれる



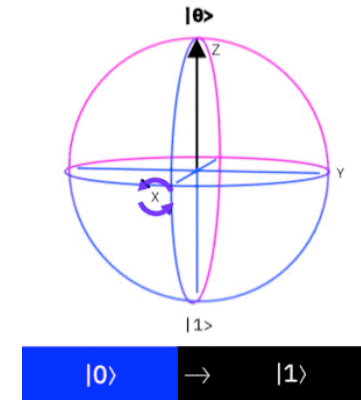
反転ゲートX

論理ゲートのNOTに相当する量子ゲート
量子ビットの状態をx軸回りに180°回転
1入力、1出力



$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$



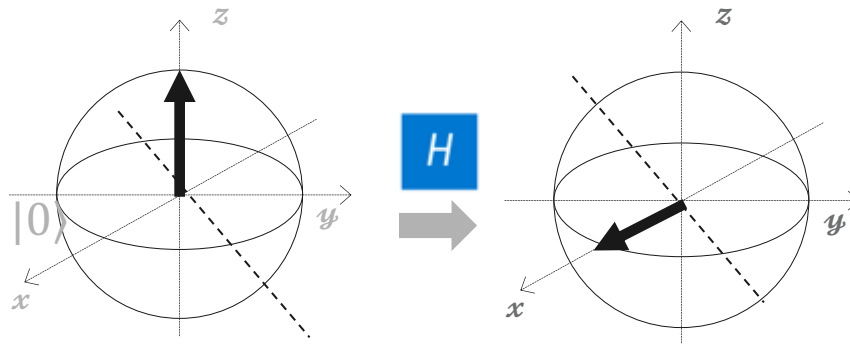
$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

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

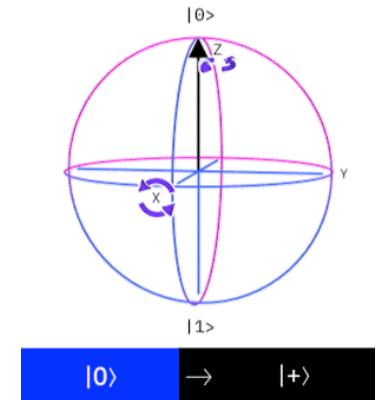
$$X|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |0\rangle$$

アダマールゲートH

量子重ね合わせ状態を作る際に利用されることが多い。
量子ビットの状態をx軸とz軸の間の軸の回りに180°回転
1入力、1出力z





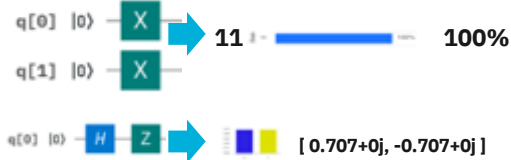


$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$



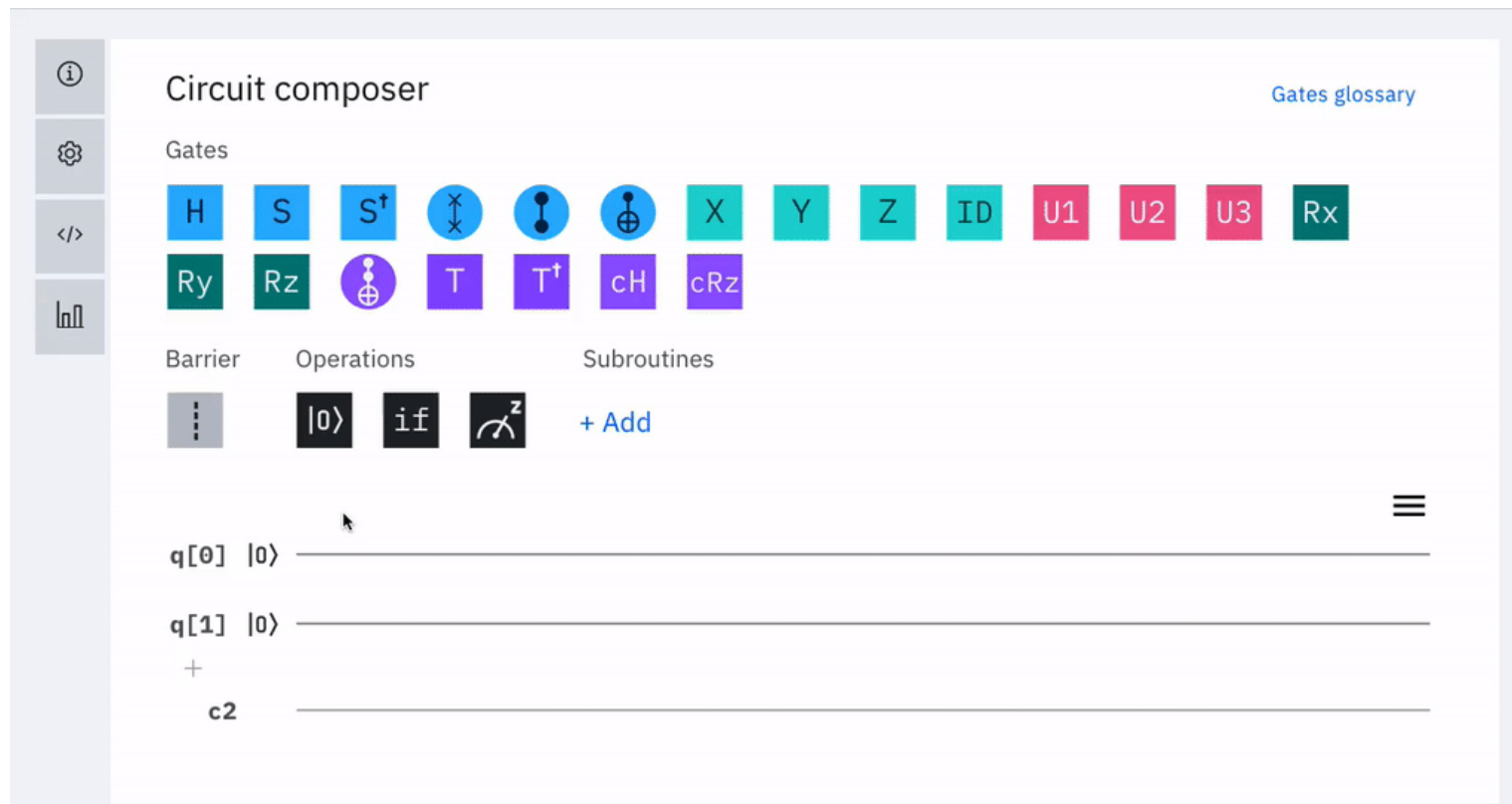
$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

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

量子計算に用いられる量子ゲートの例（一部）

ゲートの種類	説明	IBM Q Experience上のアウトプット例
アダマールゲート 	重ね合わせ 状態をつくるのに用いられる	
制御ノットゲート 	もつれ をつくるのに用いられる （論理ゲートのXORに相当） 2量子ビットに適用。	
パウリX, Y, Zゲート 	X: 反転ゲート $ 0\rangle \rightarrow 1\rangle, 1\rangle \rightarrow 0\rangle$ Y: 位相反転とビット反転の両方を引き起こす $ 0\rangle \rightarrow i 1\rangle, 1\rangle \rightarrow -i 0\rangle$ Z: $ 0\rangle$ には何もせず、 $ 1\rangle$ には位相反転, $ 0\rangle \rightarrow 0\rangle, 1\rangle \rightarrow - 1\rangle$	
位相シフトゲート 	S : 位相を $\pi/2$ 回転 T : 位相を $\pi/4$ 回転	

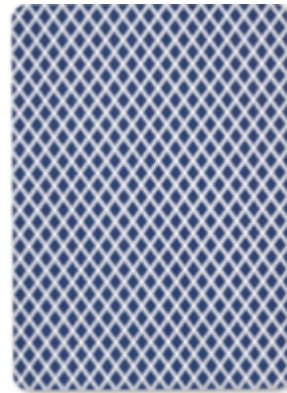
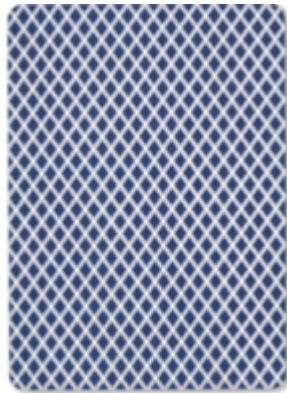
本物の量子コンピューターで解いてみましょう
五線譜のようなUIで量子回路を組むことができます



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

このあと当ツールのハンズオンを行います！

4枚のトランプの中からクイーンを探せ！



グローバーの探索回路をつくる – ステップ 1

Step 1: 重ね合わせをつくる

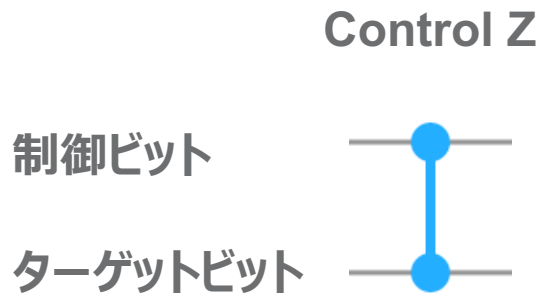
ふたつの量子ビット $q[0]$, $q[1]$ にアダマールゲートを作用させて重ね合わせの状態をつくります。



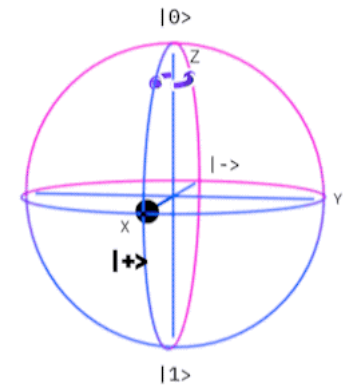
$$|0\rangle|0\rangle \rightarrow (H \otimes H) \rightarrow \frac{|0\rangle+|1\rangle}{\sqrt{2}} \frac{|0\rangle+|1\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} (|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle)$$

グローバーの探索回路をつくる – ステップ 2

Step 2: 探している解の位相を反転させる



制御ビットが1のときだけ
ターゲットビットを反転させます
(反転：z軸回りに180回転)



$$|00\rangle \xrightarrow{H \otimes H} \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle) \xrightarrow{CZ} \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$$

$$|x\rangle = |11\rangle \quad -|x\rangle$$

グローバーの探索回路をつくる – ステップ 3

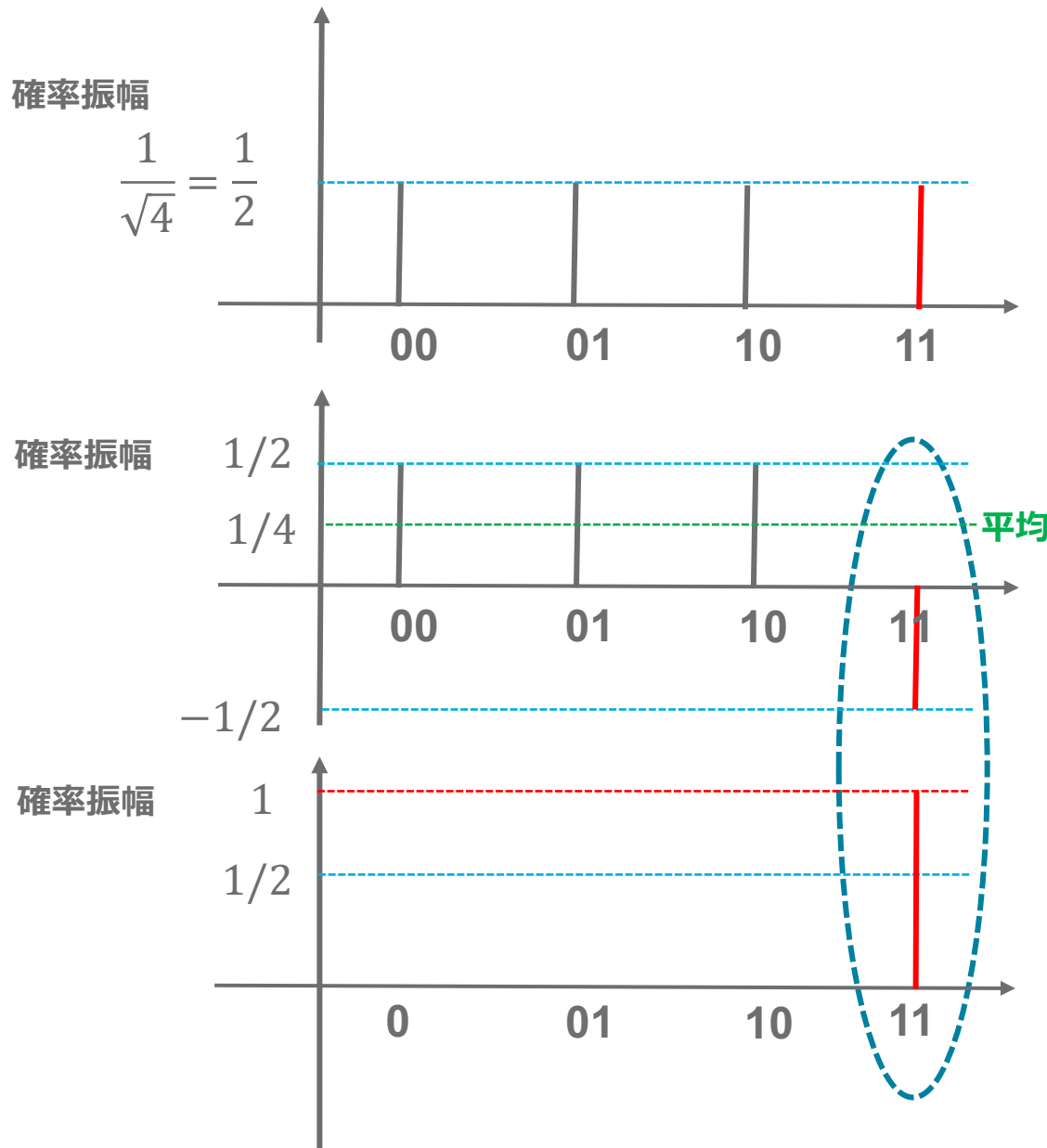
Step 3: 確率振幅の増幅回路

重ね合わせ状態の平均値の周りで反転を繰り返してくれます。これによって、求めている解の確率振幅が増幅されます。



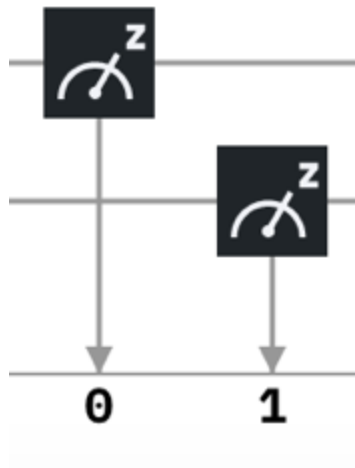
$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle) = \frac{1}{2}[|0\rangle(|0\rangle + |1\rangle) + |1\rangle(|0\rangle - |1\rangle)] \\ & \xrightarrow{H \otimes H} \frac{1}{2}[(|0\rangle + |1\rangle)|0\rangle + (|0\rangle - |1\rangle)|1\rangle] \xrightarrow{X \otimes X} \frac{1}{2}[(|0\rangle + |1\rangle)|1\rangle - (|0\rangle - |1\rangle)|0\rangle] \\ & \xrightarrow{CZ} \frac{1}{2}[(|0\rangle - |1\rangle)|1\rangle - (|0\rangle - |1\rangle)|0\rangle] \xrightarrow{X \otimes X} \frac{1}{2}[-(|0\rangle + |1\rangle)|1\rangle + (|0\rangle - |1\rangle)|1\rangle] \\ & \xrightarrow{H \otimes H} \frac{1}{2}[-|1\rangle(|0\rangle + |1\rangle) + |1\rangle(|0\rangle - |1\rangle)] = -|11\rangle \end{aligned}$$

確率振幅の増幅の仕組み



グローバーの探索回路をつくる – ステップ 4

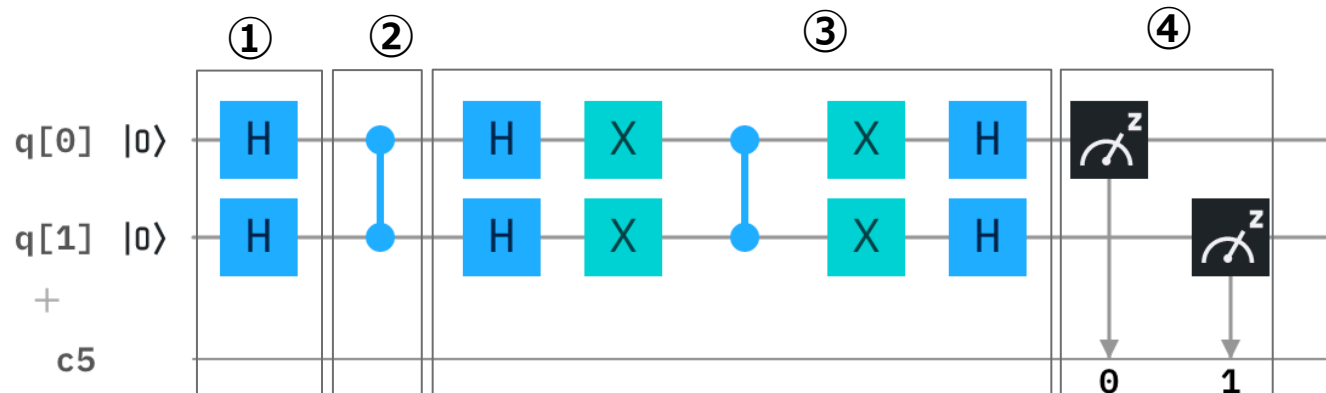
Step 4: 観測（測定）を行います



グローバーの探索回路

まとめ

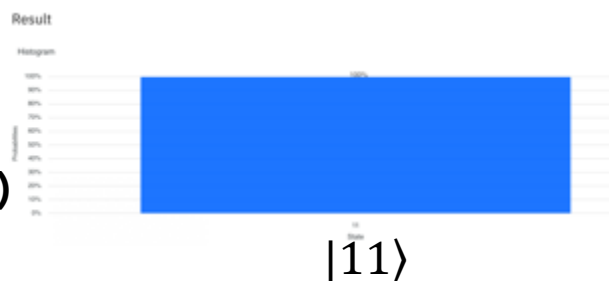
- ①重ね合わせをつくる (superposition)
- ②探している解の位相反転 (oracle)
- ③振幅を高める (diffusion)
- ④測定 (measure)



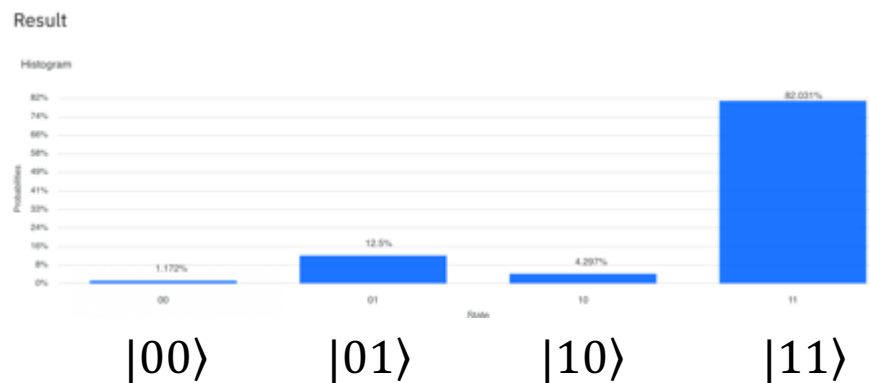
量子コンピューターの計算結果

正しい解が確率的に示される

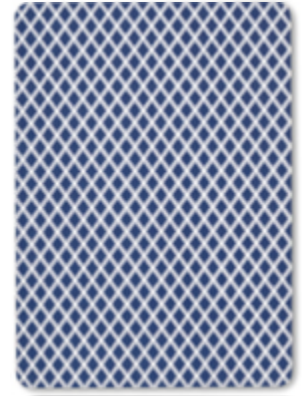
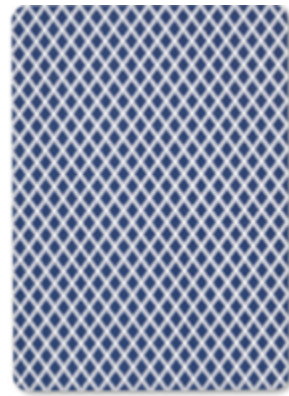
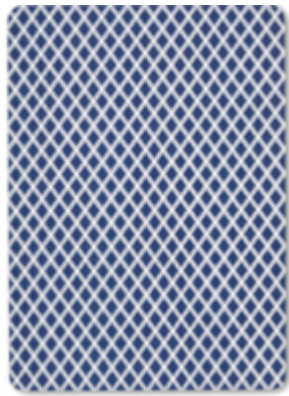
ibmq_qasm_simulator
(32量子ビットシミュレーター)



Ibmq_essex
(5量子ビットの実機)



無事に1回でクイーンを引き当てる回路を作成しました



量子コンピューターは黎明期

NISQ:

Noisy Intermediate-Scale Quantum Computer
ノイズのある小中規模の量子コンピューター



Fault-tolerant Universal Quantum Computer
エラー耐性のある万能量子コンピューターへ

将来の使い道

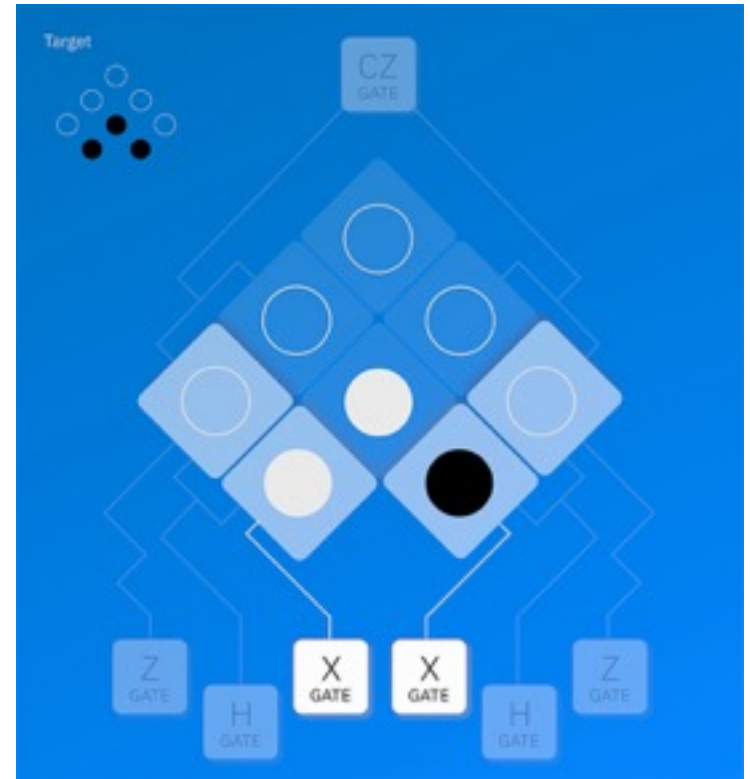
量子コンピューターは将来以下のような分野で活用されることが期待されています。

- ・ 新しい材料、創薬の開発
- ・ 金融計算
- ・ 新しい暗号化技術
- ・ AI・機械学習



Hello Quantum アプリで学ぼう！

ゲームを通じて量子ゲートの動作を学びます。
AppStoreから無料でダウンロード可能。

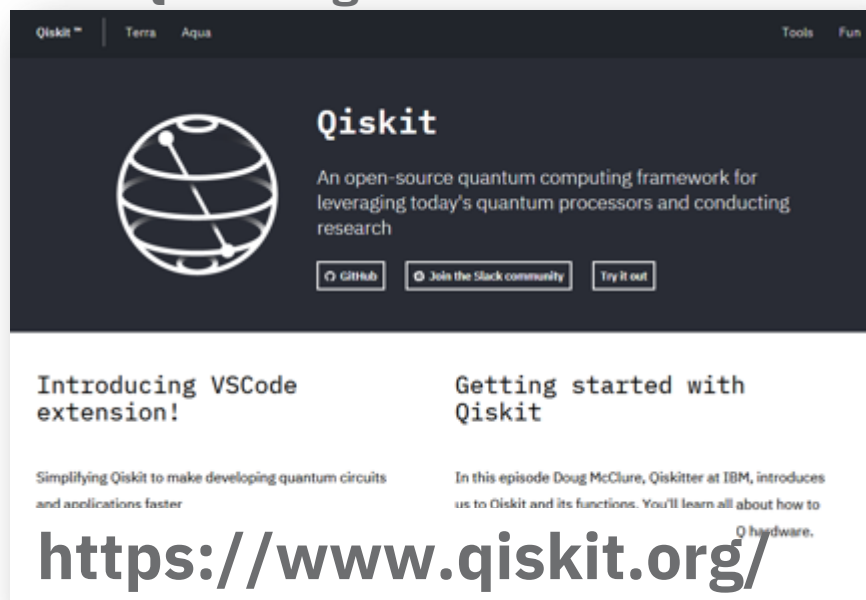


<https://helloquantum.mybluemix.net/>

プログラミングが好きな方

- Pythonベースのオープンソース開発ツールキット「Qiskit」
- 様々なアルゴリズムが実装されているだけでなく、豊富なチュートリアルも用意されています！

Qiskit.orgのトップページ



Qiskitオンラインテキストブック



<https://qiskit.org/textbook/>

まとめ

- 量子力学の性質を利用して計算を行う
- 従来のコンピューターよりも速いのではなく、異なる原理で特定の領域において効率良く問題を解く
- 量子計算は量子ゲートを組み合わせたプログラム（回路）で実行される
- グローバーのアルゴリズムとIBM Quantum Experienceをつかった本物の量子コンピューター上での計算

まとめ

- 量子力学の性質を利用して計算を行う
- 従来のコンピューターよりも速いのではなく、異なる原理で特定の領域において効率良く問題を解く
- 量子計算は量子ゲートを組み合わせたプログラム（回路）で実行される
- グローバーのアルゴリズムとIBM Quantum Experienceをつかった本物の量子コンピューター上での計算

お勧めの量子コンピューター本

一般向け書籍 数式はあまりなく、概念の説明が中心。

[いちばんやさしい量子コンピューターの教本](#)

[絵で見てわかる量子コンピュータの仕組み](#)

[みんなの量子コンピューター](#)



愛好家向け書籍 一般解説に加えて高校生向け + α くらいの数式も登場。

[量子コンピューター—超並列計算のからくり](#)



大学教養向け書籍 大学教養課程のレベル。数式は当たり前のように登場。

[量子コンピュータと量子通信 I-量子力学とコンピュータ科学](#)

[量子計算理論](#)

[量子情報科学入門](#)



6月25日(木)開催 量子コンピューターハンズオン - アルゴリズム入門編その2



Welcome to Quantum

代表的な量子アルゴリズム
ドイチ・ジョザのアルゴリズムと
ベルンシュタイン・ヴァジラニのアルゴリズム
をハンズオン形式で学びます！



講師：小林有里

お申し込みはconnpassから

主催：Quantum Tokyo



ありがとうございました。

量子コンピューターの二つの方式

