量子コンピュータの現状と教育について

今井　浩

明治学院大学情報数理学部(2024年度新設)

東京大学医科学研究所ヒトゲノム解析センター・客員研究員

情報学科・専攻協議会　総会・研究会@早稲田大学, 2025-07-26

IBM Quantum System One at UTokyo Hub (Location: Shin-Kawasaki)

Quantum Innovation Initiative
Hosted by UTokyo

1量子ビット：2パラメタで表現

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

上向きスピン

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

下向きスピン

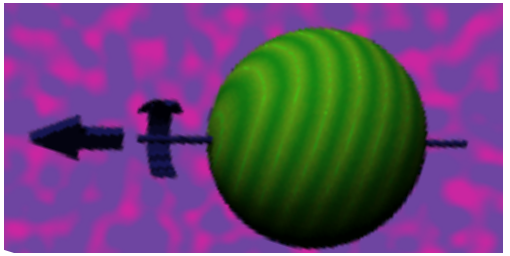
0

量子力学
2パラメタで表現

1

ノルム1の2次元複素ベクトル

1量子ビット: 2パラメタで表現

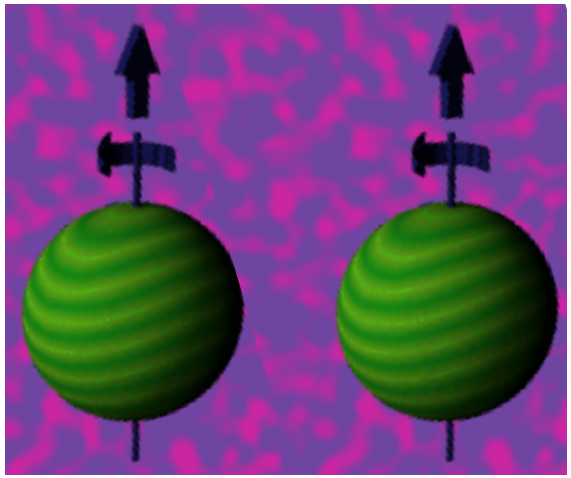


$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}$$

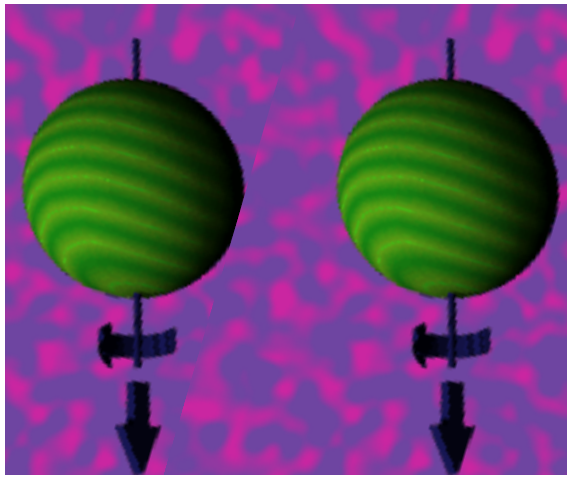
$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\-1\end{pmatrix}$$

量子力学
0と1の重ね合わせ

Entangled State



+



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

Spooky Action!

Quantum Correlation cannot be represented by Classical Correlation

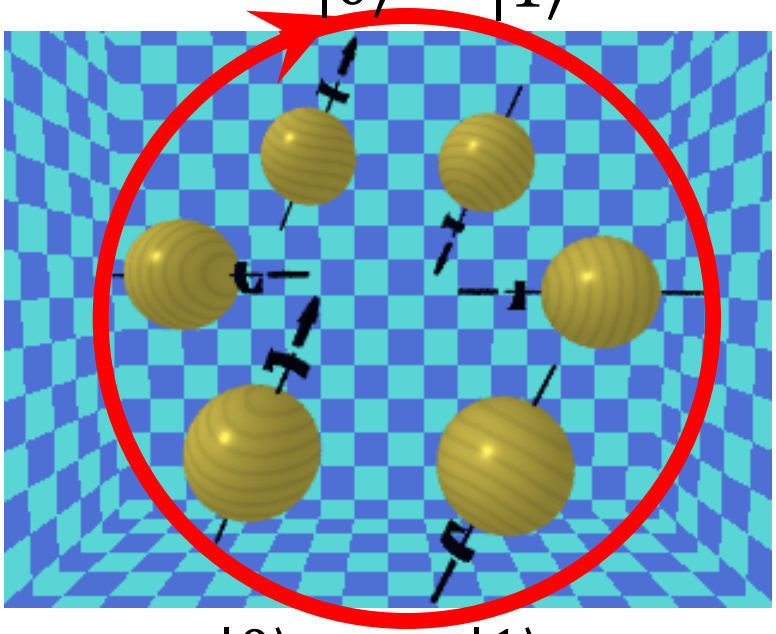
Superposition of 6qubit among 2^6=64 states

Tensor Product

N.B. This state is not entangled.

$|0\rangle \quad |1\rangle$

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



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

$|0\rangle \quad |1\rangle$

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

$$= \frac{1}{2}(|011100\rangle + |010100\rangle - |011101\rangle - |010101\rangle)$$

IBM量子コンピュータを使ってみる

習うより慣れよ的

EPR状態 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$の測定

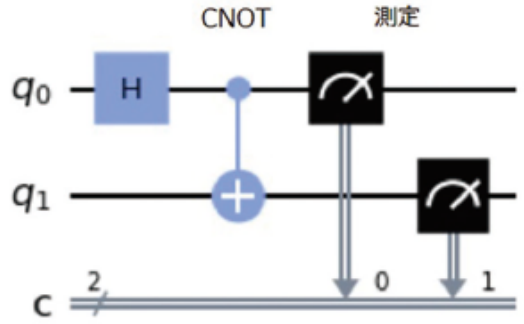
```
# EPR状態を作成・測定する回路
epr_state = QuantumCircuit(2,2)
epr_state.h(0)
epr_state.cx(0,1)
epr_state.measure([0,1], [0,1])

# 回路を計算、結果・回路図出力
backend = Aer.get_backend('qasm_simulator')
job = execute(epr_state, backend, shots=1000)
counts = job.result().get_counts()
print(counts)
epr_state.draw()
```

1000回の試行で，00が481回，11が519回測定され、01，11は測定されない。

```
{'00': 481, '11': 519}
```

量子回路



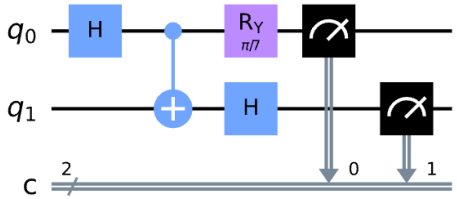
■図 -3　Qiskit でのプログラムのシミュレータでの計算例．2 量子ビットの EPR 状態というエンタングルしたものを測定すると，00, 11 のみ測定され，EPR の指摘した不思議なことが起こっている．

今井浩:**量子コンピュータのあけぼの -今そこにある量子コンピュータに触れよう. 情報処理,** Vol.62, No.4 (2021), pp. e1-e7.

2022のNobel物理学賞のベースのCHSH不等式の計算

```
my_chsh_circuits[5].draw()
```

try

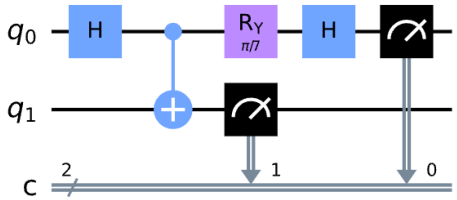


The CHSH inequality

Imagine Alice and Bob are given each one part of a bipartite entangled system. Each of them then performs two measurements on their part in two different bases. Let's call Alice's bases *A* and *a* and Bob's *B* and *b*. What is the expectation value of the quantity $\langle CHSH \rangle = \langle AB \rangle - \langle Ab \rangle + \langle aB \rangle + \langle ab \rangle$?

```
my_chsh_circuits[6].draw()
```

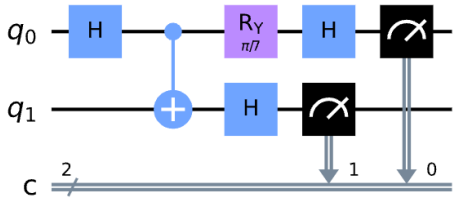
try



Now, Alice and Bob have one qubit each, so any measurement they perform on their system (qubit) can only yield one of two possible outcomes: +1 or -1. Note that whereas we typically refer to the two qubit states as $|0\rangle$ and $|1\rangle$, these are *eigenstates*, and a projective measurement will yield their *eigenvalues*, +1 and -1, respectively.

```
my_chsh_circuits[7].draw()
```

try



Therefore, if any measurement of *A*, *a*, *B*, and *b* can only yield ± 1, the quantities $(B - b)$ and $(B + b)$ can only be 0 or ± 2. And thus, the quantity $A(B - b) + a(B + b)$ can only be either +2 or -2, which means that there should be a bound for the expectation value of the quantity we have called

$$|\langle CHSH \rangle| = |\langle AB \rangle - \langle Ab \rangle + \langle aB \rangle + \langle ab \rangle| \leq 2.$$

Shorの量子多項式時間素因数分解アルゴリズム

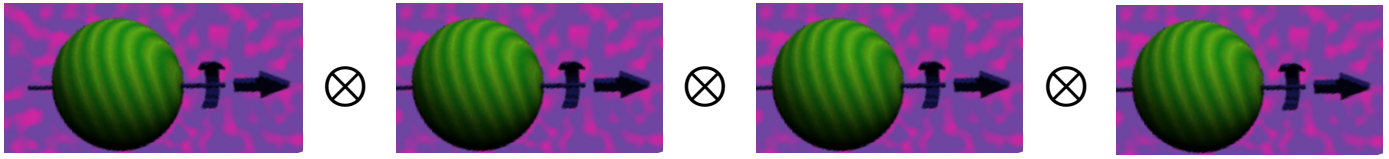
Shorの素因数分解前半

$|i\rangle|0\rangle \mapsto |i\rangle|a^i \pmod n\rangle \quad (n = 15,\ a = 2)$

$\|0000\rangle$	$\|0\rangle$	$\|0\rangle\|0\rangle$	$\|0\rangle\|1\rangle$
$+\|0001\rangle$	$+\|1\rangle$	$+\|1\rangle\|0\rangle$	$+\|1\rangle\|2\rangle$
$+\|0010\rangle$	$+\|2\rangle$	$+\|2\rangle\|0\rangle$	$+\|2\rangle\|4\rangle$
$+\|0011\rangle$	$+\|3\rangle$	$+\|3\rangle\|0\rangle$	$+\|3\rangle\|8\rangle$
$+\|0100\rangle$	$+\|4\rangle$	$+\|4\rangle\|0\rangle$	$+\|4\rangle\|1\rangle$
$+\|0101\rangle$	$+\|5\rangle$	$+\|5\rangle\|0\rangle$	$+\|5\rangle\|2\rangle$
$+\|0110\rangle$	$+\|6\rangle$	$+\|6\rangle\|0\rangle$	$+\|6\rangle\|4\rangle$
$+\|0111\rangle$	$+\|7\rangle$	$+\|7\rangle\|0\rangle$	$+\|7\rangle\|8\rangle$
$+\|1000\rangle$	$+\|8\rangle$	$+\|8\rangle\|0\rangle$	$+\|8\rangle\|1\rangle$
$+\|1001\rangle$	$+\|9\rangle$	$+\|9\rangle\|0\rangle$	$+\|9\rangle\|2\rangle$
$+\|1010\rangle$	$+\|10\rangle$	$+\|10\rangle\|0\rangle$	$+\|10\rangle\|4\rangle$
$+\|1011\rangle$	$+\|11\rangle$	$+\|11\rangle\|0\rangle$	$+\|11\rangle\|8\rangle$
$+\|1100\rangle$	$+\|12\rangle$	$+\|12\rangle\|0\rangle$	$+\|12\rangle\|1\rangle$
$+\|1101\rangle$	$+\|13\rangle$	$+\|13\rangle\|0\rangle$	$+\|13\rangle\|2\rangle$
$+\|1110\rangle$	$+\|14\rangle$	$+\|14\rangle\|0\rangle$	$+\|14\rangle\|4\rangle$
$+\|1111\rangle$	$+\|15\rangle$	$+\|15\rangle\|0\rangle$	$+\|15\rangle\|8\rangle$

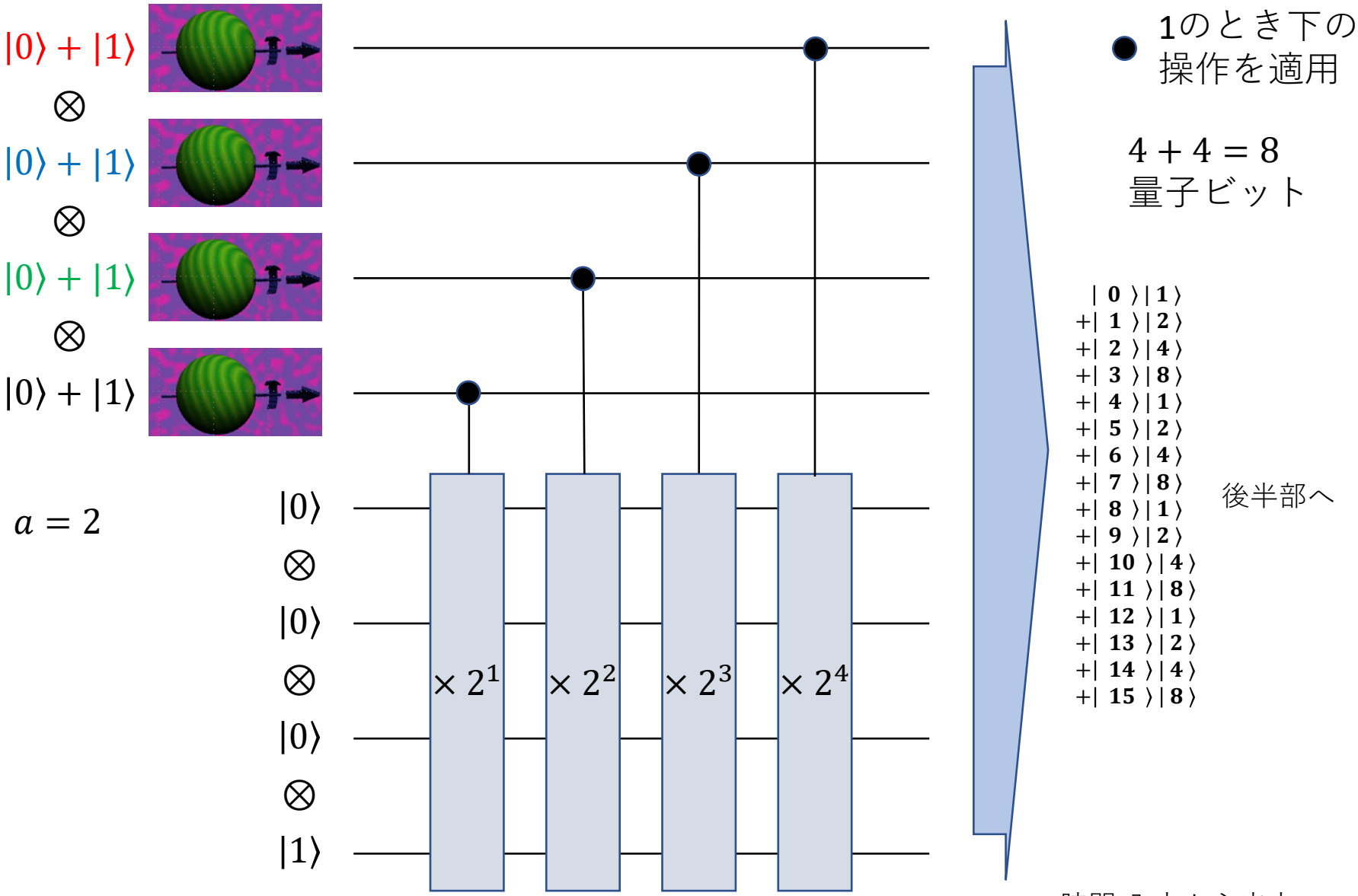
$=$

周期4
繰返し



$|0\rangle + |1\rangle \quad |0\rangle + |1\rangle \quad |0\rangle + |1\rangle \quad |0\rangle + |1\rangle$

$$|i\rangle|0\rangle \mapsto |i\rangle\left|a^i \pmod n\right\rangle \quad (n = 15,\ a = 2)$$



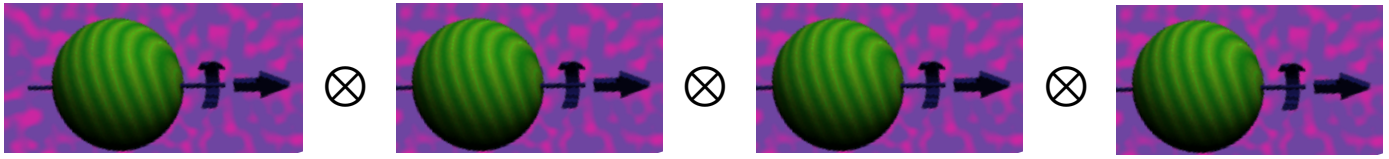
Shorの素因数分解前半

$$|i\rangle|0\rangle \mapsto |i\rangle\left|a^i \pmod n\right\rangle \quad (n=15,\ a=2)$$

$\|0000\rangle$	$\|0\rangle$	$\|0\rangle\|0\rangle$	$\|0\rangle\|1\rangle$
$+\|0001\rangle$	$+\|1\rangle$	$+\|1\rangle\|0\rangle$	$+\|1\rangle\|2\rangle$
$+\|0010\rangle$	$+\|2\rangle$	$+\|2\rangle\|0\rangle$	$+\|2\rangle\|4\rangle$
$+\|0011\rangle$	$+\|3\rangle$	$+\|3\rangle\|0\rangle$	$+\|3\rangle\|8\rangle$
$+\|0100\rangle$	$+\|4\rangle$	$+\|4\rangle\|0\rangle$	$+\|4\rangle\|1\rangle$
$+\|0101\rangle$	$+\|5\rangle$	$+\|5\rangle\|0\rangle$	$+\|5\rangle\|2\rangle$
$+\|0110\rangle$	$+\|6\rangle$	$+\|6\rangle\|0\rangle$	$+\|6\rangle\|4\rangle$
$+\|0111\rangle$	$+\|7\rangle$	$+\|7\rangle\|0\rangle$	$+\|7\rangle\|8\rangle$
$+\|1000\rangle$	$+\|8\rangle$	$+\|8\rangle\|0\rangle$	$+\|8\rangle\|1\rangle$
$+\|1001\rangle$	$+\|9\rangle$	$+\|9\rangle\|0\rangle$	$+\|9\rangle\|2\rangle$
$+\|1010\rangle$	$+\|10\rangle$	$+\|10\rangle\|0\rangle$	$+\|10\rangle\|4\rangle$
$+\|1011\rangle$	$+\|11\rangle$	$+\|11\rangle\|0\rangle$	$+\|11\rangle\|8\rangle$
$+\|1100\rangle$	$+\|12\rangle$	$+\|12\rangle\|0\rangle$	$+\|12\rangle\|1\rangle$
$+\|1101\rangle$	$+\|13\rangle$	$+\|13\rangle\|0\rangle$	$+\|13\rangle\|2\rangle$
$+\|1110\rangle$	$+\|14\rangle$	$+\|14\rangle\|0\rangle$	$+\|14\rangle\|4\rangle$
$+\|1111\rangle$	$+\|15\rangle$	$+\|15\rangle\|0\rangle$	$+\|15\rangle\|8\rangle$

$=$

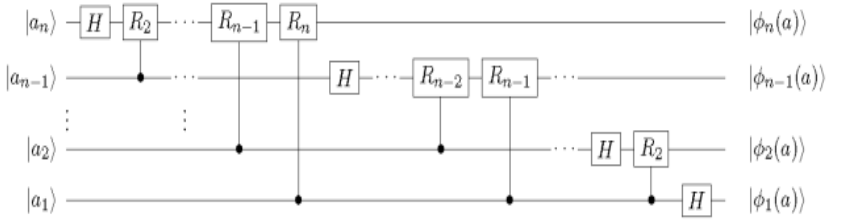
周期4
繰返し



$|0\rangle + |1\rangle$ $\otimes$ $|0\rangle + |1\rangle$ $\otimes$ $|0\rangle + |1\rangle$ $\otimes$ $|0\rangle + |1\rangle$

Peter Shorの量子計算・量子情報への貢献

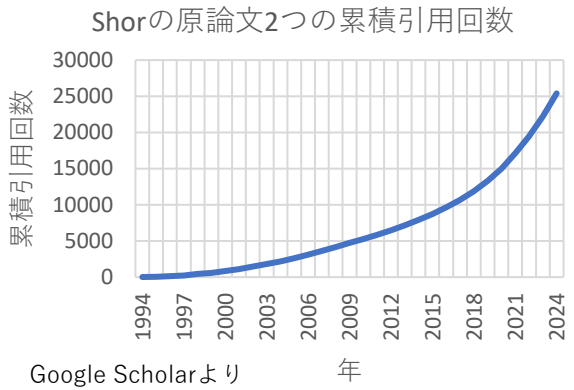
量子計算での重要問題での指数加速可能性を提示
量子コンピュータ基礎
・RSA公開鍵暗号等を破る量子計算高速素因数分解(1994)
・量子誤り訂正符号CSS, 耐故障量子計算、量子通信路定理
(Shannon prize 2025)



量子フーリエ変換

- **量子計算の社会的有用性**：
  量子計算機が社会的にインパクトを与える問題を解けることを示した.
- **量子計算の実現性**：
  量子誤り訂正・耐故障性を提案して量子計算機が実現可能であることを示した

FOCS国際会議, SIAM J. COMP/Review



RSA-2048 = (10進671桁, 2進数2048bit)

25195908475657893494027183240048398571429282126204032027777137836043662020707595556264018525880784406918290641249515082189285591491761845028084891200728449926873928072877767359714183472702618963750149718246911650776133798590957000973304597488084284017974291006424586918171951187461215151726546322822168699875491824224336372590851418654620435767984233871847744479207399342365848238242811981638150106748104516603773060562016196762561338441436038339044149526344321901146575444541784240209246165157233507787077498171257724679629263863563732899121548314381678998850404453640235273819513786365643912120103971228221207203 57

現在使われている長さの鍵ー今のスパコンでは無理!
←大規模・精緻な量子コンピュータなら破れる

社会インパクト：
- 耐量子計算機暗号PQCの標準策定・新たな公開鍵暗号に移行（米国では2035に移行）
- 量子コンピュータに関する研究分野を拡大することに貢献

1st ERATO/AQIS Confernece on Quantum Information Science @UTokyo, 2001

2nd ERATO/AQIS Confernece on Quantum Information Science @UTokyo, 2002

Organized by JST ERATO
Quantum Computation & Information

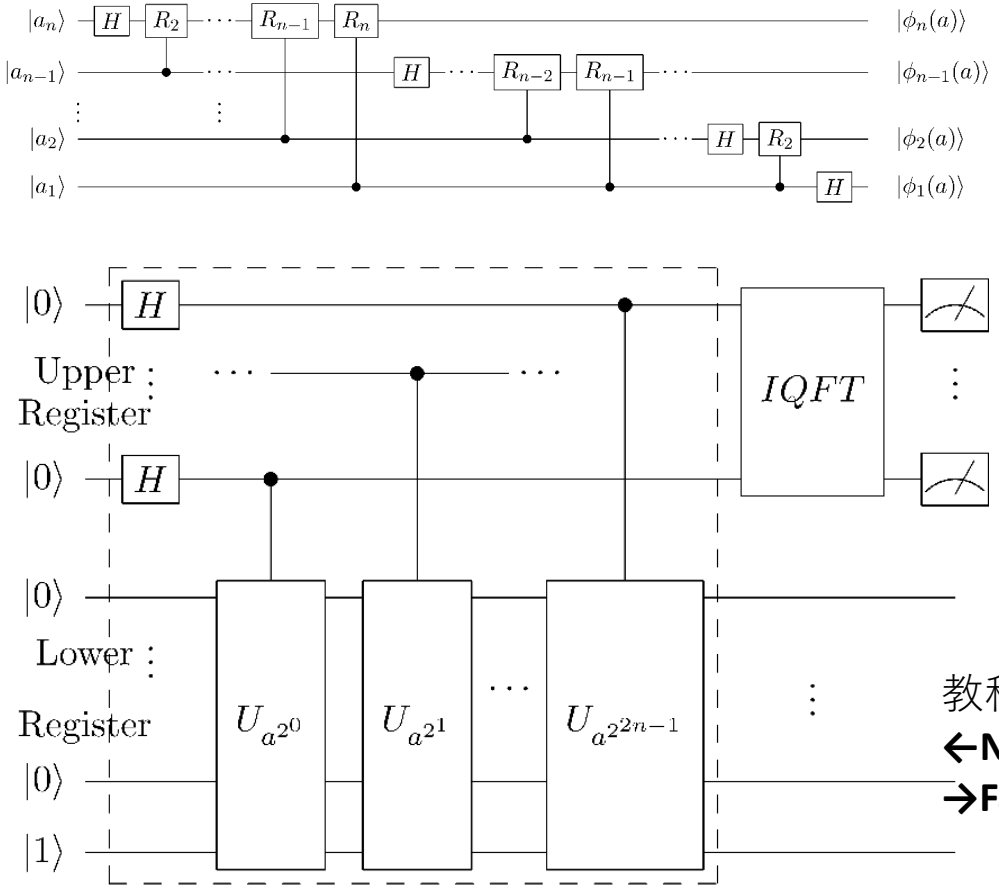
Peter Shor

量子素因数分解

1994

重要

おそらく
指数爆発的
スピードアップ



Alexei Kitaev

量子位相推定

1995

教科書のアルゴリズム
←Near-term では無理
→Fault-Tolerant QC実現へ

量子力学シミュレーション 1996~

量子化学VQE 2014~

量子近似最適法2014~

量子機械学習 2015~

量子線形方程式解法2008~

量子特異値変換 2018~

IBM Quantum Roadmap

https://www.ibm.com/quantum/technology

2020年頃より毎年更新・公開
これまでの達成事項チェック ✅

100M gates
200 Logical Qubits

7.5K gates
120x9 Qubits

15K gates
120x9 Qubits

10K gates
120x3 Qubits

5K gates
120 Qubits

5K gates
133 Qubits

Introduction to Quantum Computing in the Utility-Era

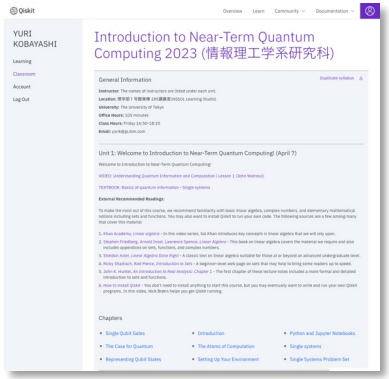
The goal of this course is to learn how to implement utility-scale applications on a quantum computer. To achieve the goal, the course covers from the basics of quantum information to recent advances of quantum algorithms for noisy quantum devices as well as circuit optimization and error mitigation techniques to maximize results. The course also introduces how to implement quantum algorithms using open-source framework of quantum computing and real quantum devices with more than 100 qubits. The course is intended to help students understand The potential and limitations of currently available quantum devices.

Contents:
1: Invitation to the Utility era/Basics of Quantum Information
2: Quantum Algorithms: Quantum Teleportation
3: Quantum Algorithms: Grover's algorithm
4: Quantum Algorithms: Phase Estimation
5: Quantum Algorithms: Variational Quantum Algorithms (VQA)
6: Quantum Simulation, Time Evolution
7: Classical Simulation
8: Sample-based Quantum Diagonalization
9: Quantum Circuit Optimization
10: Quantum Noise Model and Quantum Error Mitigation
11: Creating Large Scale GHZ State based on Hardware Topology and Qubits Fidelity
12: Reproducing Nature paper – 2D Ising model simulation
13. Final Project

Final presentation, 2022

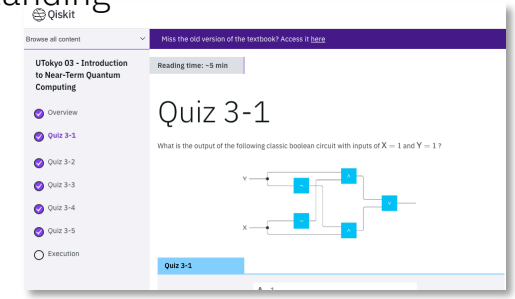
東京大学授業カタログより, 2025

University of Tokyo Quantum Computational Theory Course @ Imai Lab (2019-2023)



From gates, circuits, measurements to quantum algorithms and applications in machine learning, optimization, and chemistry.

Weekly quizzes to test understanding of lectures each week



Students participated in Challenge for extra creditIBM Quantum

- Delivering course in collaboration since 2019
- Department of Computer Science, Registered under CS, PHY, MI)
- 14 weeks during Spring Semester
- Material co-developed by IBM Research - Tokyo and UTokyo
- Focuses on teaching students how to program and execute quantum circuits using Qiskit
- Reached 500+ students so far (100+ students complete the course each year)

Originally started around 2009 by Francois Le Gall in G30 projectsl w/o use of quantum computers

University of Tokyo Quantum Computational Course @ Sato Lab (2024-)

- For the first time, educators and students can exploit 100+ qubit systems in classrooms.
- The Spring 2024 course at UTokyo is the First Utility-scale quantum computation course offered in the world.
- Students learn utility-scale workflow and implement the nature paper using Qiskit by the end of the course.
- Designed to provide practical skills to help students become part of the workforce that can bring useful quantum computing.

Implementation of the utility paper

Trotter Circuit

Create a circuit to simulate the time evolution of the kicked Ising model. First, let's make one circuit that is its building block. The Hamiltonian is

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j + h \sum_i X_i.$$

The unitaray gate for trotter are

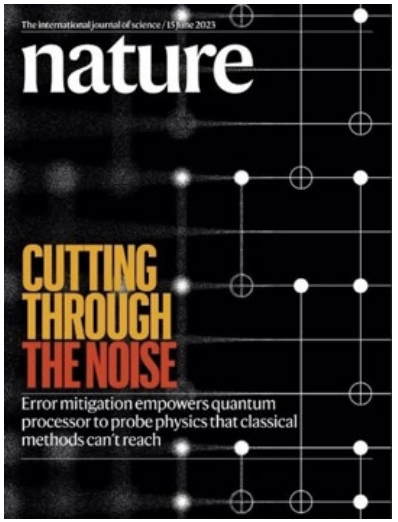
$$e^{-iH_{ZZ}\delta t} = \prod_{\langle i,j \rangle} e^{iJ\delta t Z_i Z_j} = \prod_{\langle i,j \rangle} R_{Z_i Z_j}(-2J\delta t)$$
$$e^{-iH_X\delta t} = \prod_i e^{-ih\delta t X_i} = \prod_i R_{X_i}(2h\delta t),$$

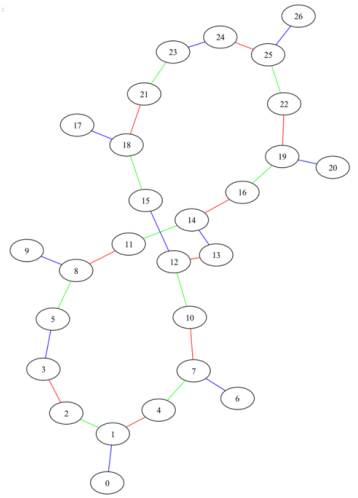
[1]:
```
import numpy as np

from qiskit import QuantumCircuit
from qiskit.circuit import Parameter
```

[2]:
```
θ_h = Parameter("$\\theta_h$")
θ_j = Parameter("$\\theta_j$")

qc = QuantumCircuit(2)
qc.rx(θ_h, [0, 1])
qc.rzz(θ_j, 0, 1)
```





標準カリキュラム

量子技術分野全体を俯瞰する共通カリキュラムの雛形を公開しています。

既存の学部学科教育において量子技術分野を強化する科目構成や学科の再編成や新設の参考となるように必須・選択科目を整理しています。

学部前期（1、2年生） ›

学部後期（3、4年生） ›

博士前期課程（1、2年生） ›

量子技術高等教育拠点

© Quantum Academy of Science and Technology reserved.

https://qacademy.jp/curriculum/

量子技術高等教育拠点は、文部科学省 Q-LEAP 人材育成プログラムの共通的なコアプログラムとして、「量子技術高等教育拠点標準プログラムの開発」に基づき運営されています。

カリキュラム標準モデル

学部前期（1、2年生）

量子情報基礎科学	量子情報物理学	量子デバイス	量子計算機工学	量子ネットワーク・通信

共通科目

- プログラミング
- 確率・統計
- 複素関数論
- 量子ビットの量子力学
- ミニマム線形代数
- 数理論理学（集合・論理）
- 微分積分
- 量子プログラミング（量子アルゴリズムで理解する量子計算）
- 量子プロトコル基礎（量子プロトコルで理解する量子効果）
- プログラミングの科学（プログラム意味論：古典から量子へ）

量子情報基礎科学	量子情報物理学	量子計算機工学	量子ネットワーク・通信
論理工学	解析力学	（構造化プログラミングを含め）プログラミングとプログラム意味論	**スパイラル方式※**
抽象代数	力学	（コンパイラのための）形式言語とオートマトン	● 量子通信
形式言語（オートマトン含む）	波動・熱力学	（コンパイラ＆計算機アーキテクチャのための）チューリング機械	● 量子アルゴリズム
グラフ理論	電磁気学		● 量子誤り訂正
アルゴリズム・データ構造	物理数学		● 量子光学
情報理論基礎	計算理論		● 量子インターネット
	物理実験・物理実験学		● 量子ネットワーク

※スパイラル方式

スパイラル方式とは、学生がカリキュラムを進む中で、同じ学習テーマについて繰り返し学ぶ機会をもつ方法で、学年が上がるごとに同じテーマでも内容の難易度が増すように設計する方法である。新しく学ぶ内容に対して、すでに学んだ内容を結びつけることができるようになっていることを特徴とする。スパイラル方式を採用することで、同じテーマの学びを繰り返す機会を得ることで知識が定着しやすいこと、簡単な概念から複雑な概念への発展において論理的な理解を助ける、初期に習った基礎的な事項について、より高度な内容へ応用する機会を持ちやすい、といった利点があると考えれている。

量子技術必修科目　量子技術選択科目　従来科目

カリキュラム標準モデル

学部後期（3、4年生）

量子情報基礎科学

- 量子アルゴリズム
- 量子暗号数理
- 符号理論
- 幾何学
- アルゴリズム発展
- 計算量理論（チューリングマシン入る）

量子情報物理学

- エンタングルメント理論基礎
- 量子シャノン理論基礎
- 量子情報における群論
- 量子情報で使う情報数学
- 量子計算モデリング
- 色々な量子計算モデル
- Qunditの量子力学
- CV系の量子力学
- 場の理論基礎
- 相対性理論
- 量子力学
- 統計力学
- 量子統計物理・固体物性基礎

量子デバイス

- 量子高精度測定と量子センサー
- 量子情報処理デバイス概論
- 量子光学と光量子デバイス基礎
- 超伝導量子ビット技術とマイクロ波制御技術基礎
- 冷却原子・イオントラップ基礎

量子計算機工学

- 量子オートマトンと量子テューリング機械
- 量子計算機のための古典コンパイラ基礎
- 量子計算機のための古典アーキテクチャ基礎
- 量子計算機のための古典OS基礎
- 誤り耐性量子コンピュータ基礎

量子ネットワーク・通信

スパイラル方式

- 量子通信プロトコル
- 量子通信システム
- 量子鍵配送システム

共通科目

- 量子計算基礎
- 量子通信基礎
- 量子暗号基礎
- テクニカルライティング
- 機械語
- 機械学習
- 圏論
- 確率論
- 線形代数発展
- 微積分発展
- 推定理論
- 数理統計学
- 最適化
- アセンブリ言語

量子技術必修科目　量子技術選択科目　従来科目

カリキュラム標準モデル

博士前期課程（1、2年生）

量子情報基礎科学

- 量子計算理論発展
- 量子アルゴリズム発展
- 量子プログラミング言語
- 量子符号理論
- 量子シャノン理論発展
- 量子暗号発展
- 量子誤り訂正
- 量子機械学習
- 量子情報幾何

量子情報物理学

- エンタングルメント理論発展
- 量子入出力の量子プロトコル
- 量子制御理論
- 非定型量子アルゴリズム
- 量子熱力学
- 量子シミュレーション
- 量子情報のための数値計算手法（SDP, MLなど）

量子デバイス

- 推定理論と量子デバイス評価
- 量子制御理論

量子計算機工学

- 量子コンパイラ基礎
- 量子アーキテクチャ基礎
- 量子計算機のための古典コンパイラ実習
- 量子計算機のための古典計算機アーキテクチャ実習
- 量子計算機のための古典OS演習
- 誤り耐性量子コンピュータアーキテクチャ
- 誤り耐性量子コンピュータ・量子機械言語とコンパイラ設計

量子ネットワーク・通信

スパイラル方式

- 微分方程式・複素解析
- 信号及び通信
- グラフ理論及び群論
- 情報理論
- 暗号理論

- 量子通信理論
- 量子暗号システム
- 量子ネットワーク科学

共通科目

- アントレプレナーシップ
- 量子技術と法整備
- 先端科学のパブリックリレーションズ

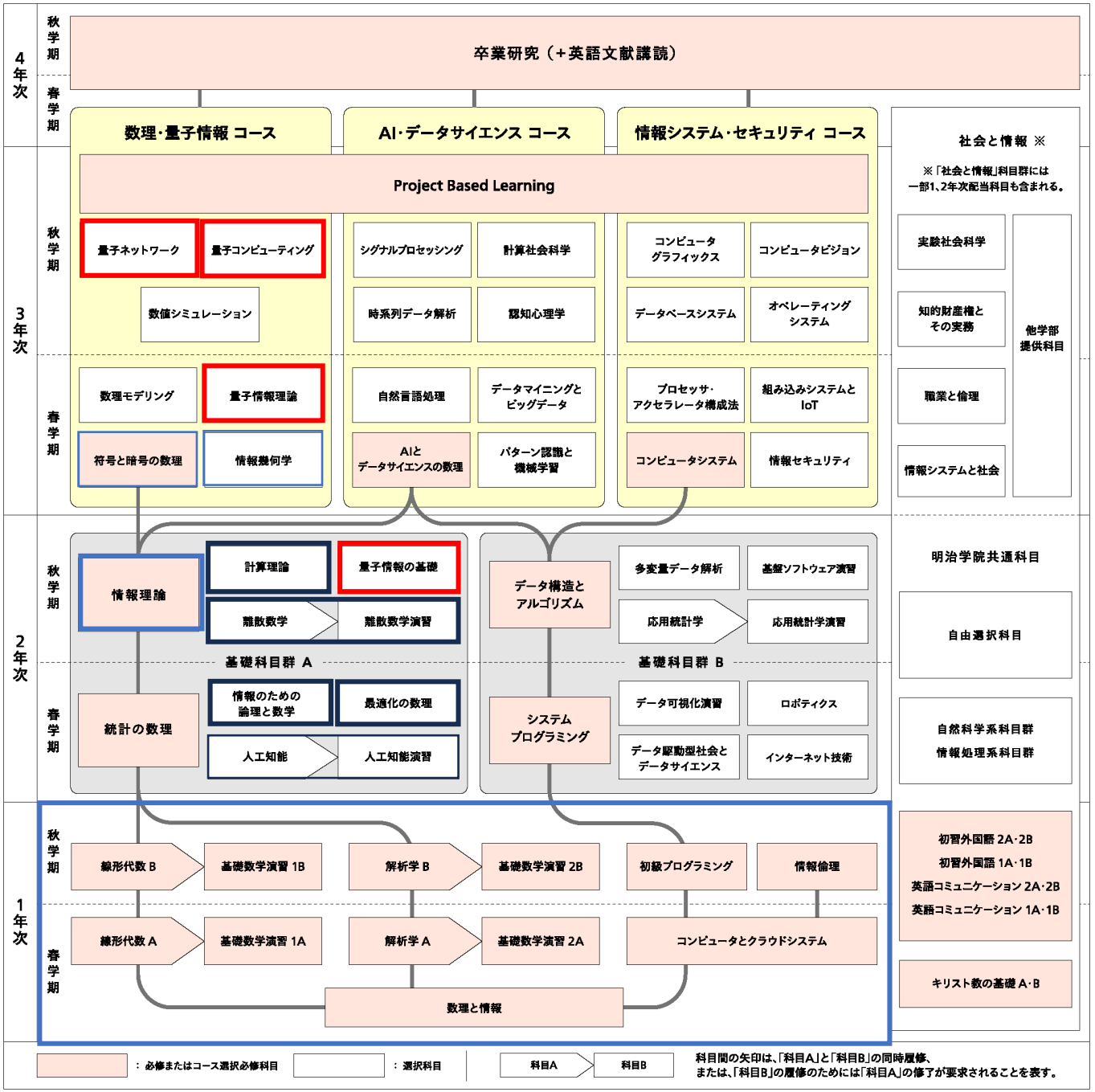
量子技術必修科目　量子技術選択科目　従来科目

明治学院大学
情報数理学部
カリキュラムツリー

・学部新設
→ カリキュラムをゼロから構築
新規教員も多数
⇒これを利点に!

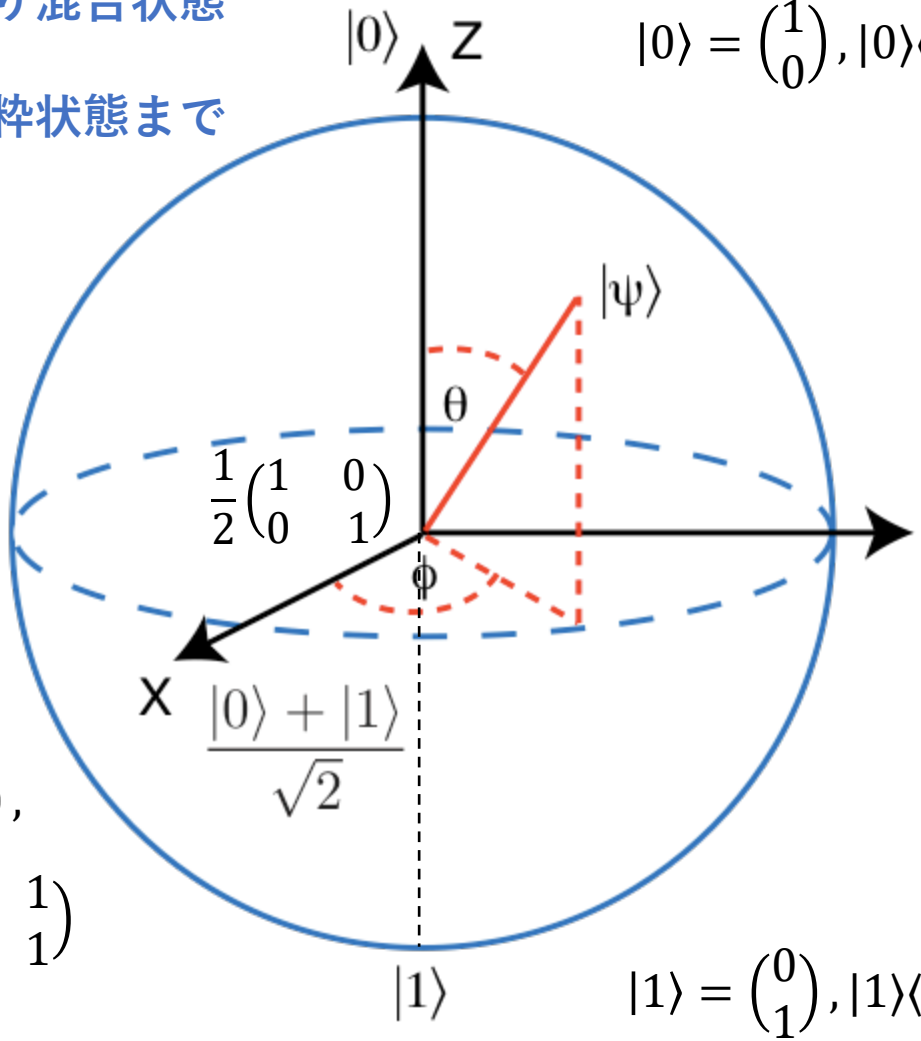
・それまで文系総合大学であった明学で理系学部を新設して文理を含む総合大学へと展開する点については以下記事参照

明治学院大学情報数理学部 文系大学での新情報系学部設置と文理融合 ―AI・量子コンピュータの先端教育―, 今井浩, 大学時報2025年1月号, No.420
https://daigakujihou.shidairen.or.jp/list/contents/?jihou=420



Bloch球ー1量子ビットのモデル

- 密度行列により混合状態を表現可
- ベクトルは純粋状態まで



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

$\frac{1}{2}\begin{pmatrix}1 & 0\\0 & 1\end{pmatrix}$

$\frac{|0\rangle + i\,|1\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\i\end{pmatrix}$

$\frac{1}{2}\begin{pmatrix}1 & -i\\i & 1\end{pmatrix}$

エルミート行列

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

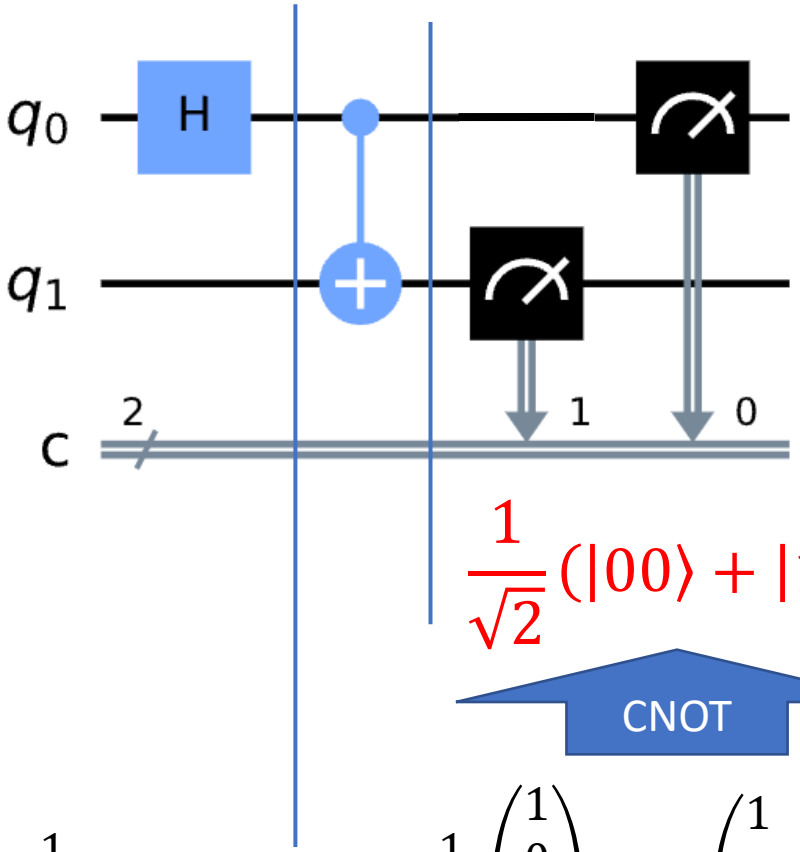
$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix},$

$|+\rangle\langle +| = \frac{1}{2}\begin{pmatrix}1 & 1\\1 & 1\end{pmatrix}$

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

EPR State (entanglement)

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



$$H = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1 & 1\\ 1 & -1\end{pmatrix}, \text{Hadamard行列}$$

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

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

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \neq (\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle)(\beta_0|0\rangle + \beta_1|1\rangle)$$

CNOT

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |10\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\0\\1\\0\end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 1 & 0\end{pmatrix}$$

$\because$

$$\alpha_0\beta_0 = 1$$
$$\alpha_0\beta_1 = 0$$
$$\alpha_1\beta_0 = 0$$
$$\alpha_1\beta_1 = 1$$

no solution

ゲート：行列に対応

出力ベクトル＝行列× 入力ベクトル

1qubitゲート: 2次正方行列

2qubitゲート: 4次正方行列

Entangled state (EPR state)

情報系での量子計算の教育

- 「量子力学」講義をベースにする必要はない
  - 知っていると研究に役立つことはあり

- 線形代数をベースに量子計算・量子情報コース
  - 情報系の基礎ももちろん有用
    - アルゴリズムと計算量理論
    - 情報理論
    - 符号理論
    - プログラミング
    - アーキテクチャ
    - などなど

- コンピュータは計算して結果を出すことが大切
- 強力な量子コンピュータはまだ時間がかかる中、確かな基盤に上に華が開き、広く展開できる

量子コンピュータ

身近なものに