

2024年10月23日開催

NPO法人M2M・IoT研究会 第21回専門部会セミナー

-DX時代の重要課題であるメタバース，デジタルツイン，生成AI，ロボット分野の最新動向と応用事例，および，量子コンピューティングの学生による取り組みの紹介-

主催：NPO法人M2M・IoT研究会(URL： <https://www.m2msg.org/>)

(5)講演4・・・17:00～17:40(40分):(会場)

「経産省情報処理推進機構(IPA)未踏採択 双方向型ビジュアル量子教材の開発」

東京工業大学理学院物理学系 学生 鈴木泰雅さん 学生 青木幸一さん

・コーディネータ 東京高専名誉教授， NPO法人M2M・IoT研究会理事 市村洋

〈概要〉量子コンピュータ(QC)技術は近年著しく発展し，産業応用も盛んに検討されている．QC黎明期の現在，ハード的制約を考慮したソフト作成技術が必要になる一方で，ハードに関する教育資源は大きく不足している．我々はこの課題を解決するため，頭記課題を未踏に提案し，採択された．本講演では採択された課題内容を一部抜粋し，物理と情報を橋渡しすることを目指した双方向型ビジュアル量子教材を用いて量子操作技術について基礎的な紹介を行う．

コーディネータからの一言

1. 社会的背景

- ・世界・日本の動向(敢えて言わずものがなですね)
- ・日本の人材育成

1)内閣府:量子未来産業創出戦略

2)経産省:独立行政法人 情報処理推進機構 未踏ターゲット事業(量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発分野)

3)産総研:\産総研で働きながら、学位取得を目指しませんか?／産総研リサーチアシスタント制度

博士後期課程(博士課程)・・・月14日勤務で月額約22万円, 博士前期課程(修士課程)・・・月7日勤務で月額約9万円

4)大学:情報系学部・院に 量子コンピュータ教員採用

2. 幣NPO法人 M2M・IoT研究会 調査研究部門に

量子コンピュータの仕組みと応用調査研究(2022度から・・・清尾 克彦・市村 洋担当)

3. 2022~2023年度の活動

・Shor(1994年)のRSA暗号2024ビットの素因数分解

-スパコンで1億年QCでは8時間-誰もが即答できる素因数分解(例えば $21 \rightarrow 3 \times 7$ 等)をShorのアルゴリズムに忠実に従っての図解説作成-

・Grover(1996年)のデータベース高速検索

-検索レコード数Nならば $\sqrt{N}$ で検索。そのGroverアルゴリズムの解法を直角三角形(直角辺の一つを検索レコードと見立て)ての解法の図解説作成

4. 2024年2月3日 上記1.の日本の人材育成その2)の2023年度未踏採択の成果報告会

会場参加し、最年少で採択された課題「双方向型ビジュアル量子教材と量子シミュレーションツールの作成」(¥360万)を聴講。類似研究・開発に出会えたことに感謝感激。このことがご縁で幣研究会の今回の 세미나 講演の一つに。

2030年目標

- ・国内の量子技術の利用者を**1,000万人に**
- ・量子技術による生産額を**50兆円規模に**
- ・未来市場を切り拓く量子**ユニコーンベンチャー**企業を創出

2023年度未踏ターゲット事業（量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発分野）

双方向型ビジュアル量子教材

東京科学大学 鈴木泰雅

東京科学大学 青木幸一

2024年10月23日



目次

- 1 プロジェクトの概要
- 2 量子コンピュータの基礎
- 3 超伝導量子コンピュータの基礎
- 4 展望

1 プロジェクトの概要

量子力学を動作原理に持つコンピュータのこと 素因数分解や探索が古典よりも格段に早くなることが証明されて注目をより浴びている

ゲート方式のアルゴリズム

素因数分解: Shorのアルゴリズム

探索: Groverのアルゴリズム

量子アニーリングと呼ばれる技術も存在する。



Dwave社の量子アニーリング
マシン^[1]より引用

組み合わせ最適問題に特化したマシン

ハードウェア

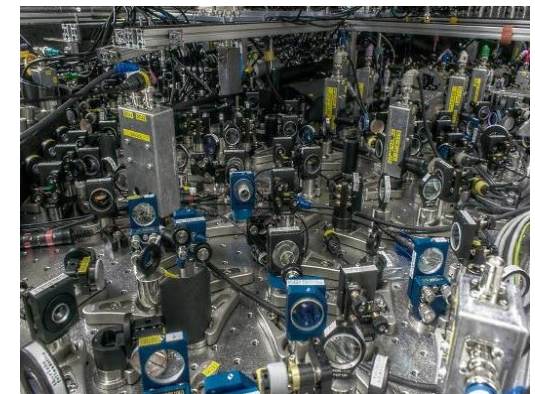
超伝導

IBM社の量子アニーリング
マシン^[2]より引用



光

東大の光量子コンピュータの
研究開発^[3]より引用

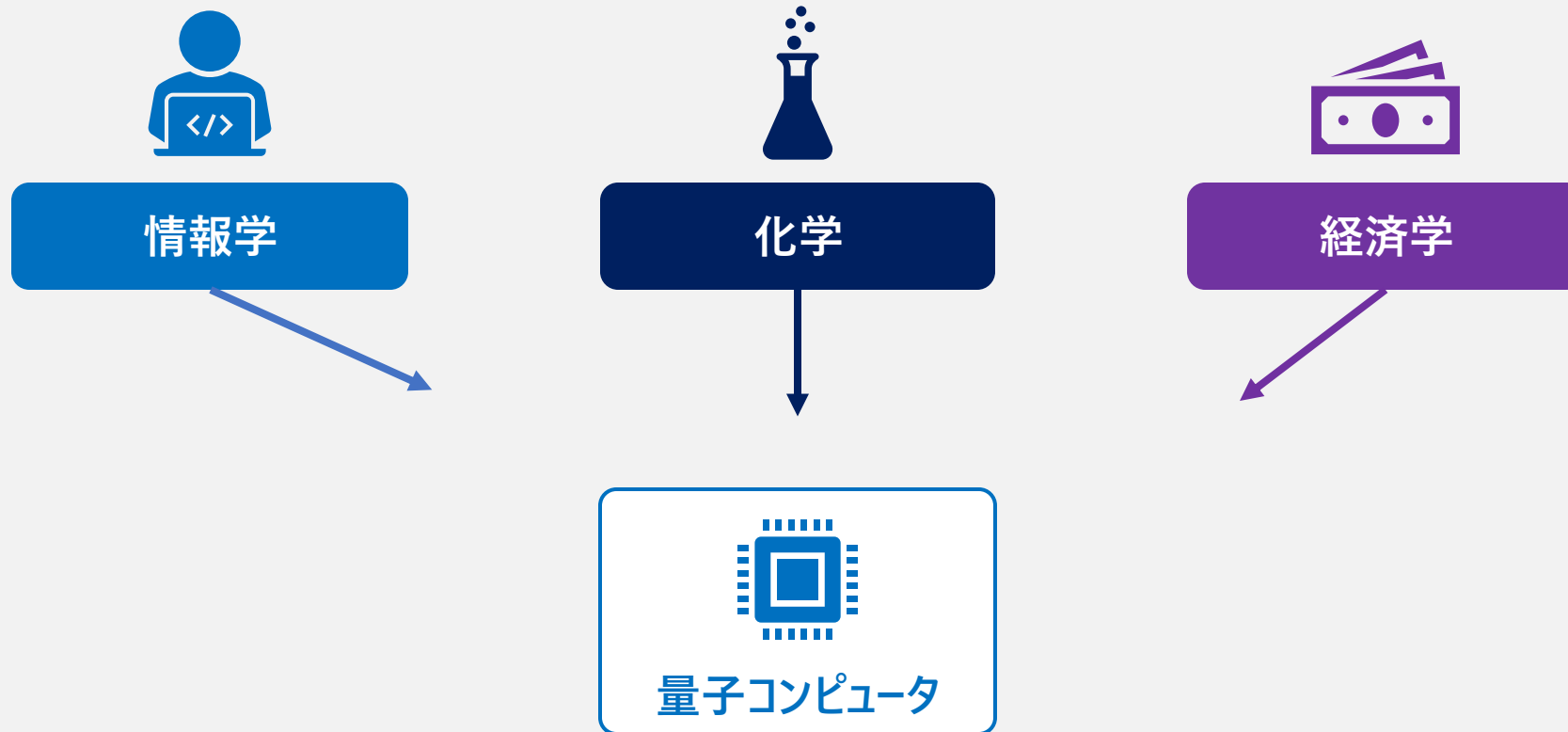


[1]: <https://thequantuminsider.com/2020/01/27/dwave-stock/>

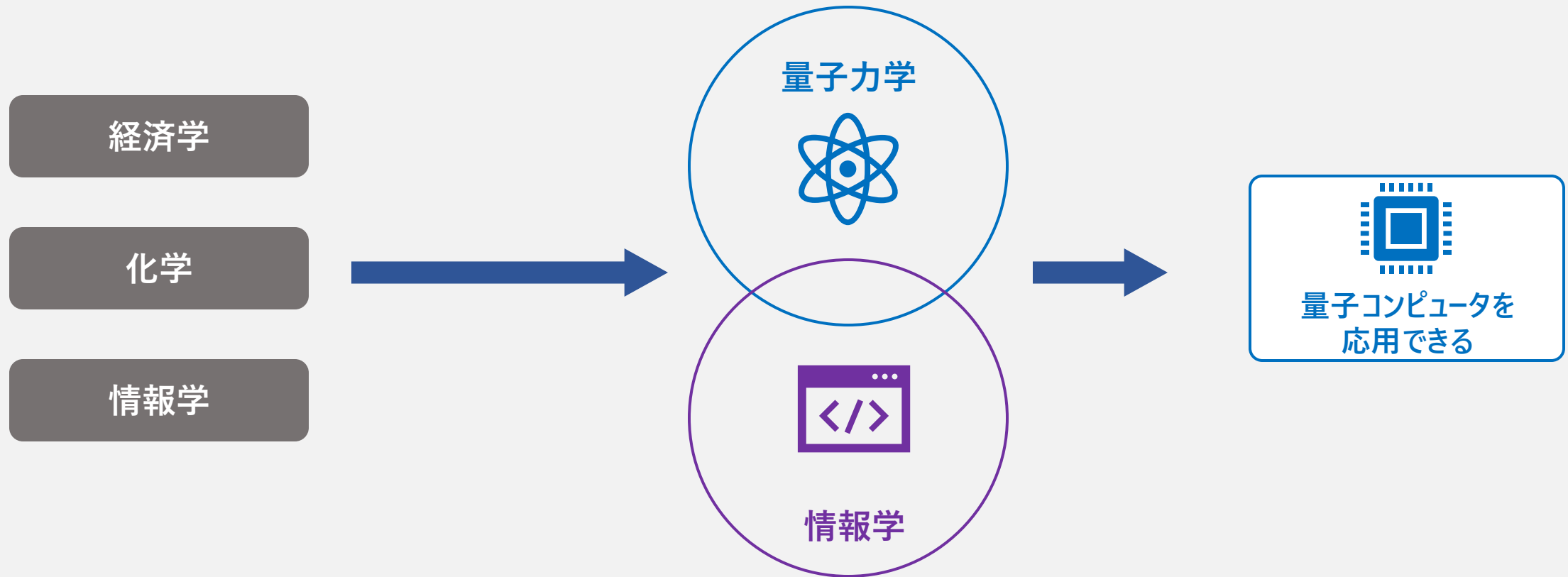
[2]: IBM社ホームページ <https://www.ibm.com/jp-ja/quantum>

[3]: 東大光量子コンピュータ研究支援基金 <https://utf.u-tokyo.ac.jp/project/pjt93>

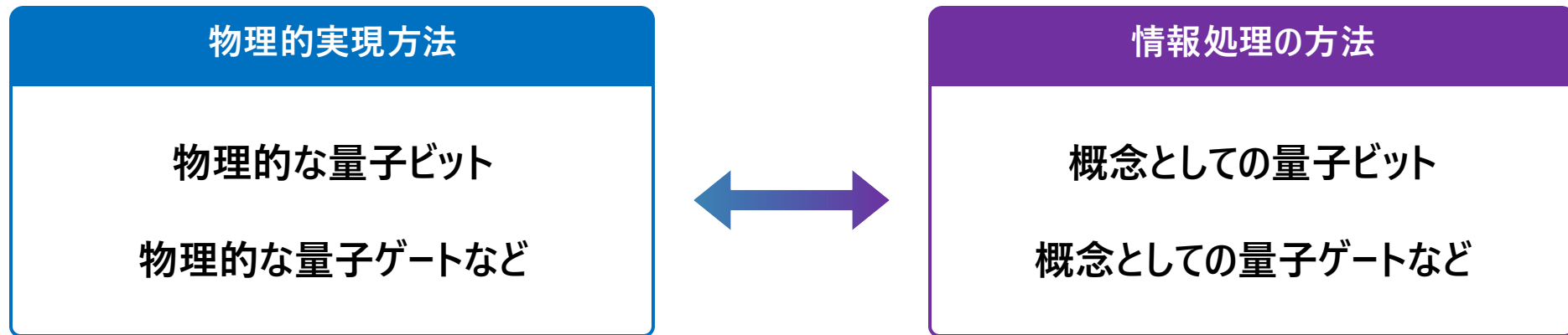
量子コンピュータは様々な分野での応用が検討され始め、幅広い分野の方が量子コンピュータを学ぶことへの需要が高まっている。



しかし、複合分野であるため学ぶ敷居が高いのが現実



また、量子コンピュータが黎明期にある現在、
情報処理だけではなく、ハードの仕組みを知る必要がある



両方を理解して、初めて量子計算を**実感**でき、
量子技術を使いこなせる。

しかし、ほとんどのE-learning系の教材が 情報処理に焦点を当ててるのが現状

E-learning教材で物理的実装を詳しく書いている教材は存在しなかった。

→量子ゲートなどの詳細な話は専門書や論文のみ※

E-learning教材の分類

情報処理として

Quantum Native Dojo

Qiskit Textbook

NEC 量子コンピューティングワークブック

量子技術として

物理・情報を双方に取り扱い、
アニメーション・ビジュアルを取り入れたら、
量子コンピュータにより親しみを持てるのでは？



未踏ターゲット事業

独立行政法人情報処理推進機構（経済産業省）の量子人材育成プログラム
（2023年度未踏ターゲット事業-量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発分野）
にて採択され支援を受けながら開発した

専門家の支援：徳永PM, 鈴木TA

資金援助：最大360万円

支援期間：約9ヶ月（2023年6月～2024年3月）



[1]より引用

物理・情報を双方に取り扱い、
アニメーション・ビジュアルを取り入れたら、
量子コンピュータにより親しみを持てるのでは？



QRコード



URL

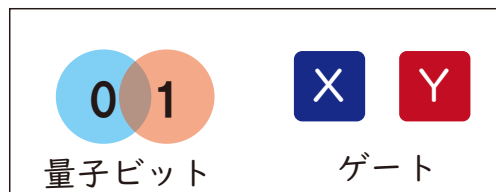
<https://qualsimu.com/textbook>



Qualsimu 教材の章立て

第一章 量子コンピュータの基礎

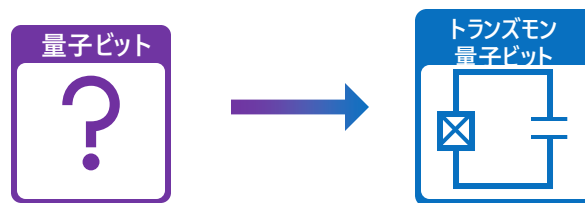
量子力学・量子情報を俯瞰する。



- 量子コンピュータの基礎
- 量子情報の基礎
- 量子力学の基礎

第二章 量子コンピュータが動く仕組み

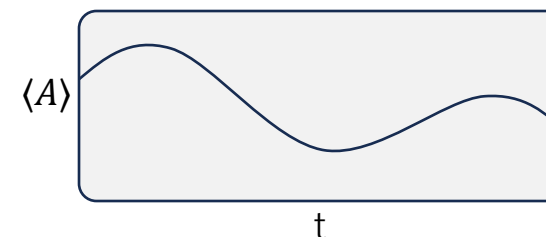
量子ビット・量子ゲートの
物理的実装方法



- 量子コンピュータの中身
- 0と1の実現方法
- ゲート操作

第三章 量子力学を実験してみる

量子力学を量子力学で実験する。



- 未公開

第一章・第二章から一部抜粋して今回は説明

第一章 量子コンピュータの基礎

- 量子コンピュータってどんなもの？
- 量子力学の世界
 - 古典と量子の世界の概略
 - 量子情報の記法
- 量子情報の基礎
 - 1量子ビット
 - 複数量子ビット
 - 量子回路モデル

第二章 量子コンピュータが動く仕組み

- 量子コンピュータの中を覗いてみよう！
- 量子ビットの実装
 - 超伝導量子回路の基礎
 - トランズモン量子ビット
- 量子ゲートの実装
 - 1量子ビットの場合(仮想ゲート, etc...)
 - 複数量子ビットの場合

2 量子コンピュータの基礎

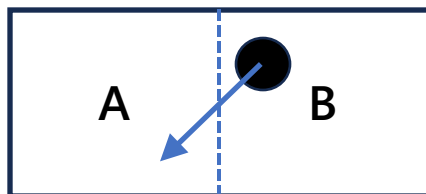
量子力学：原子以下の小さな世界における秩序



古典力学とは大きく異なる性質を持つ

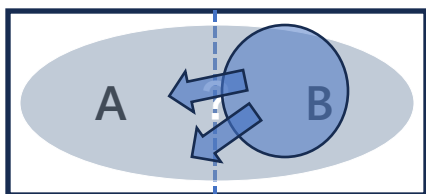
確率的な現象，不確定性

古典



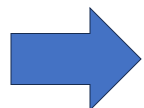
運動の状態が確定
位置，運動

量子



状態が厳密には不明

$$\Delta x \Delta p \equiv \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} \cdot \sqrt{\langle p^2 \rangle - \langle p \rangle^2} \geq \frac{\hbar}{2}$$

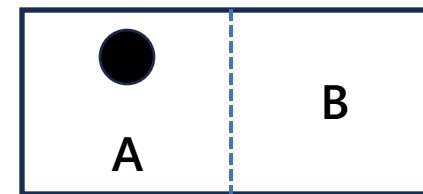


測定することでどちらかの状態は確定する

重ね合わせと量子もつれ

AとBどちらにしているのか？

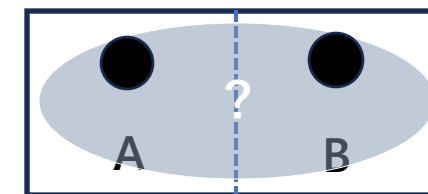
古典



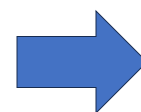
or



量子



(量子状態) = α (Aにいる状態) + β (Bにいる状態)



測定することでAにいるかBにいるかが確定する

$$\Pr(A) = |\alpha|^2 \quad \Pr(B) = |\beta|^2$$

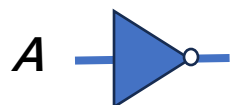
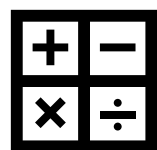
0と1によるビット表現(2進数)と記録



ASCII(アスキー)	
16進数	文字
0x3d	=
0x51	Q

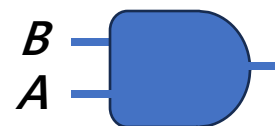
2進数による表現を4桁ずつでまとめて16進数にして扱う

論理演算



NOT演算

A	$\bar{A}$
0	1
1	0



AND演算

A	B	$A \cdot B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

これらの論理演算の組み合わせで四則演算が表現可能



量子コンピュータでもこれらに対応するものが必要

スピン：粒子が持つ小さな磁石のようなもので向きがある物理量

上向きスピン



$|0\rangle$

下向きスピン

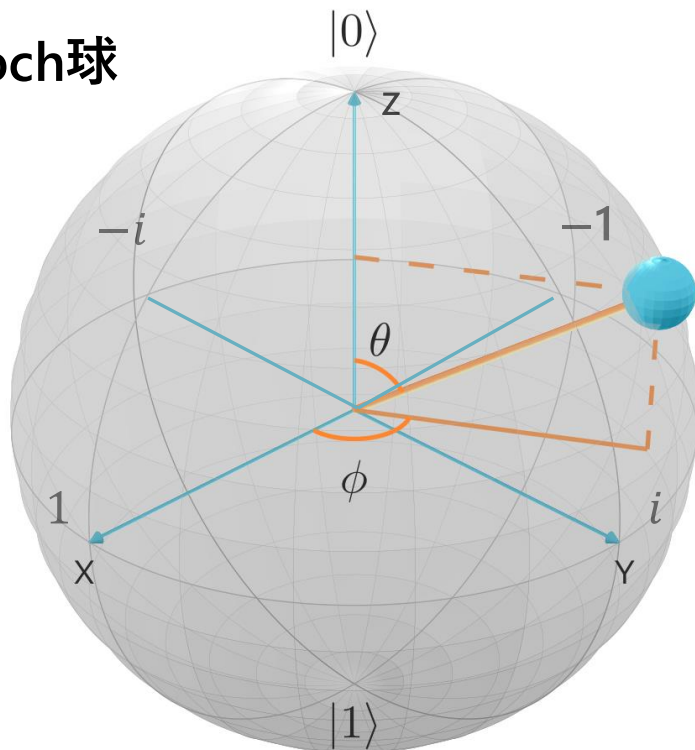


$|1\rangle$



スピンも量子系で重ね合わせの状態が存在
ビットの対象としてスピンを用いる(qubit)

Bloch球



$|0\rangle, |1\rangle$ の重ね合わせた状態はBloch球での向きに対応
2つの自由度を持つ

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$$

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |\psi\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

ベクトル表現によるラベリング

量子状態

測定



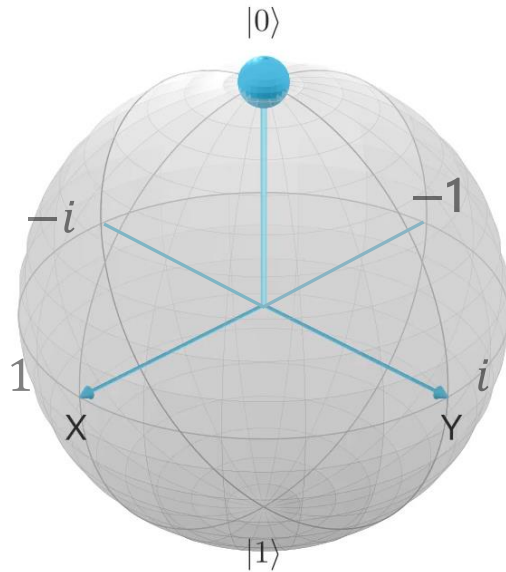
$$\Pr(0) = |\alpha|^2 \quad \Pr(1) = |\beta|^2 \quad \text{緯度と確率に対応}$$

従来：電流，電圧によってトランジスタを制御 $\rightarrow$ 量子：スピンの向きを一定の手順により操作する

180度回転操作

Xゲート

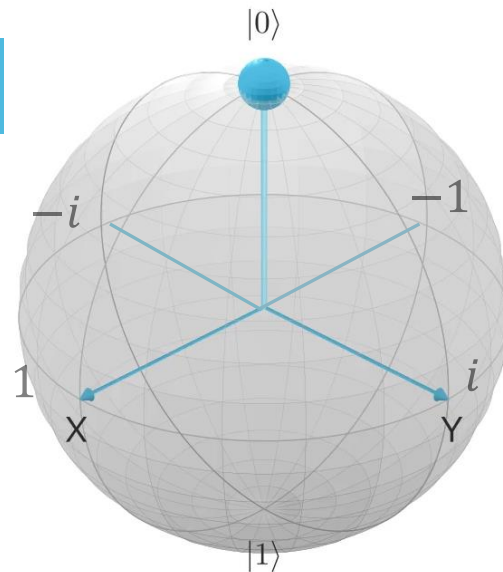
X



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

Yゲート

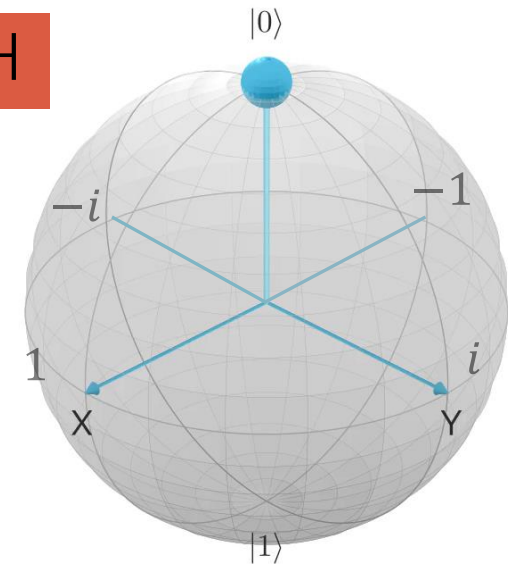
Y



$$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} Y|0\rangle &= i|1\rangle \\ Y|1\rangle &= -i|0\rangle \end{aligned}$$

H(アダマール)ゲート

H



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

従来の計算

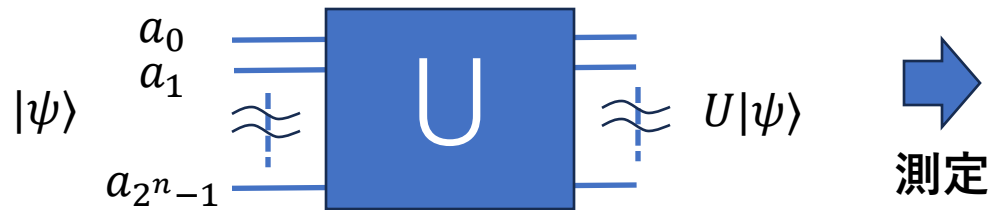
N 個のものに対して工夫を施してしらみつぶしに探索

Ex.素数の調査： $n = 2 \sim \sqrt{N}$ 個まで剰余を探索

量子計算

複数量子ビット

$$\begin{array}{ccccccc} \uparrow & \uparrow & \downarrow & \cdots & \downarrow & \uparrow & \\ |0\rangle & |0\rangle & |1\rangle & & |0\rangle & |1\rangle & \\ & & & & & & \end{array} = |0\rangle|0\rangle|1\rangle \cdots |1\rangle|1\rangle = |001 \dots 10\rangle$$

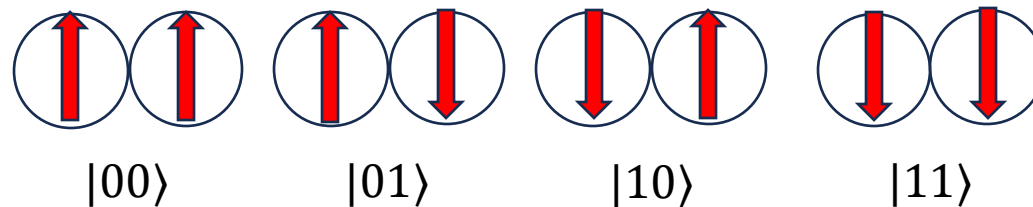


特定の値が
有意に得られる

様々なゲートを組み合わせた U
を作用させて**特定の係数**だけ
増加させる

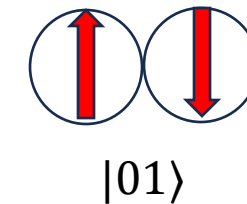
$$|\psi\rangle = a_0|00 \dots 0\rangle + a_1|00 \dots 1\rangle + \cdots + a_{2^n-1}|11 \dots 1\rangle$$

Ex. $U|\psi\rangle = 0.001|00\rangle + 0.004|01\rangle + 0.9999|10\rangle + 0.003|11\rangle$



測定

$$\text{Pr}(10) \simeq 1$$

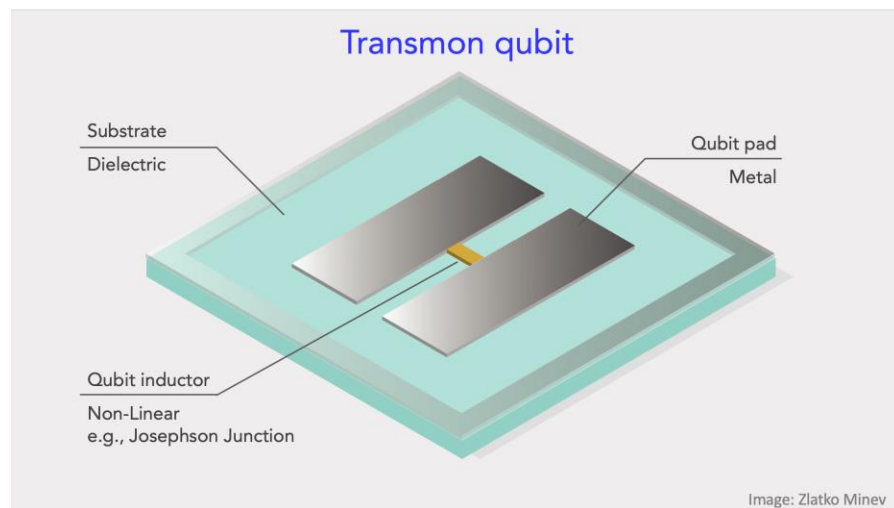


量子有意性は量子計算の効率が従来の計算を上回る**特定のケース**

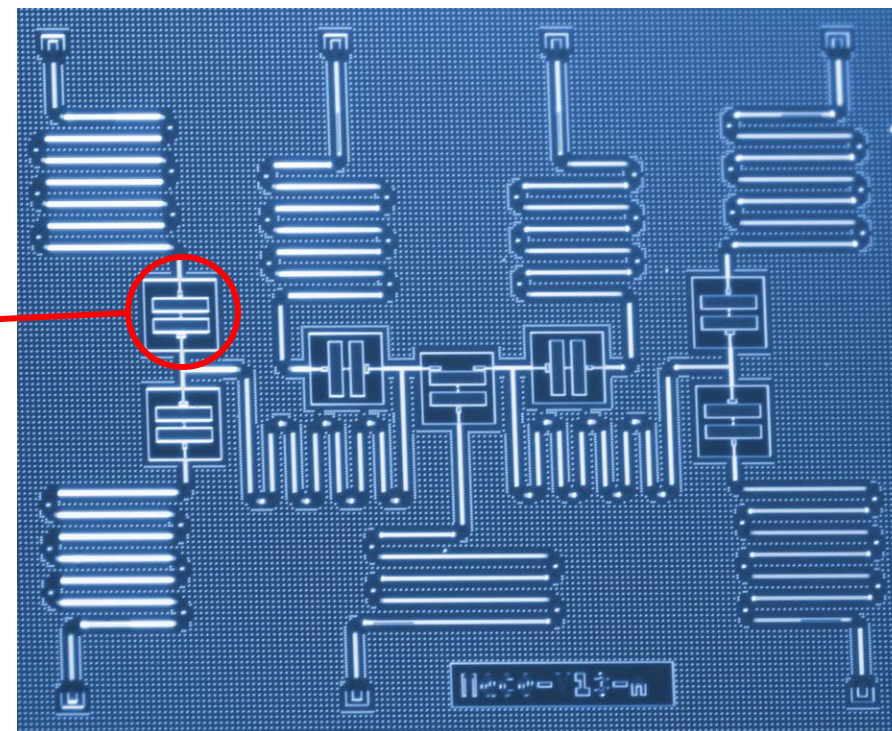
2 量子コンピュータの基礎

素子で構成された回路をごく低温まで冷やすことで量子性が現れる**超伝導状態**になる
→「超伝導量子ビット」と呼ばれている。

一つの量子ビット[1]より引用



複数の量子ビット[2]より引用



[1]: https://x.com/zlatko_minev/status/1287176800280416256

[2]: IBM社ホームページ <https://newsroom.ibm.com/media-quantum-innovation>

超伝導量子ビットで構成された量子コンピュータのことを
超伝導量子コンピュータと呼ぶ

2024年現在、使用できる環境が整っているため我々の教材で詳しく取り扱った

理研の超伝導量子コンピュータ[1]より引用



IBMの超伝導量子コンピュータ[2]より引用



[1]: 理化学研究所のホームページ https://www.riken.jp/pr/news/2023/20231005_1/index.html

[2]: IBM社ホームページ <https://www.ibm.com/jp-ja/quantum>

量子性を持つ超伝導量子ビットでは許されるエネルギーがとびとびの値になる。

古典だと

ボールを上を持ち上げると

高さ



エネルギーが連続的に大きくなる。

エネルギー



量子(超伝導量子ビット)だと

超伝導量子ビットのエネルギーが離散的に大きくなる。

エネルギー

⋮

E_2

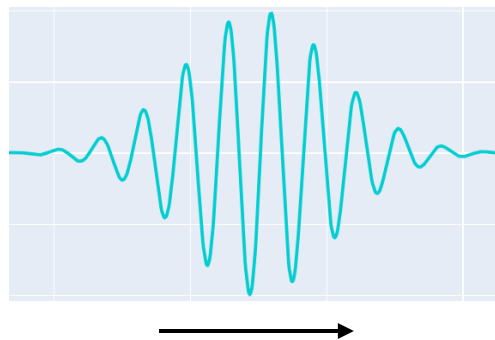
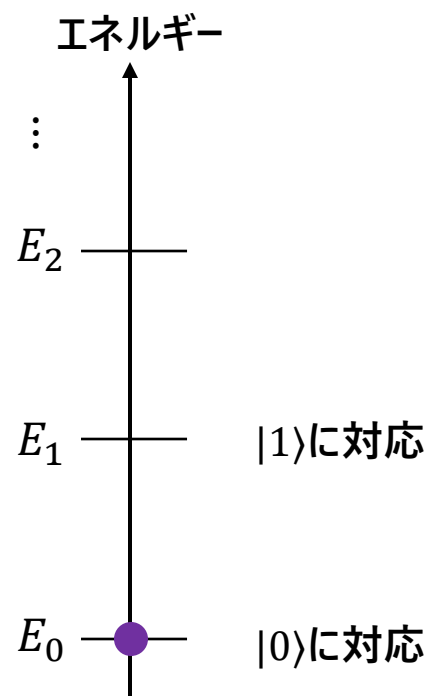
E_1

E_0

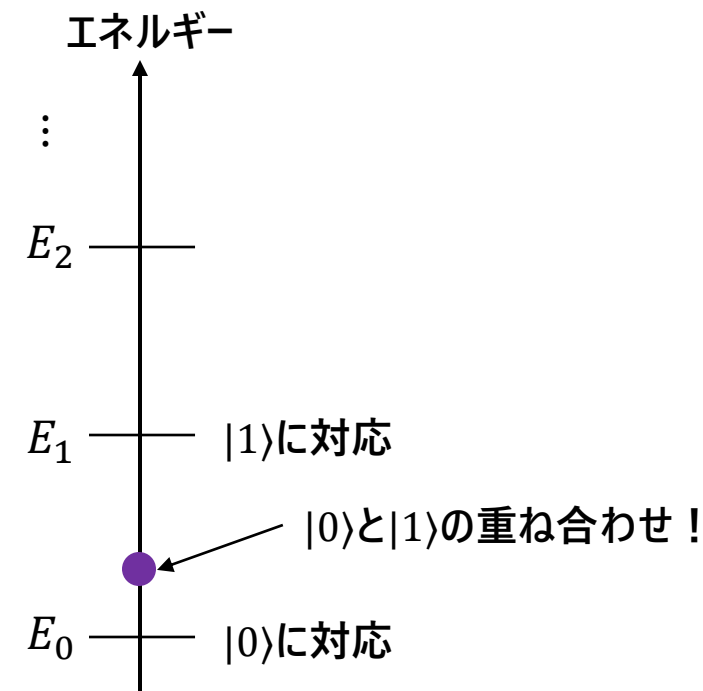


電気的な信号である電磁波を当てることで、 $|0\rangle, |1\rangle$ を制御できる！
重ね合わせ状態を作ることにも可能

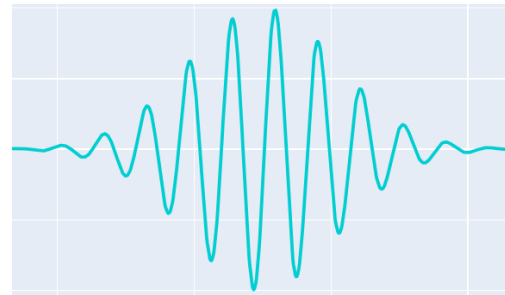
量子(超伝導量子ビット)だと



量子(超伝導量子ビット)だと



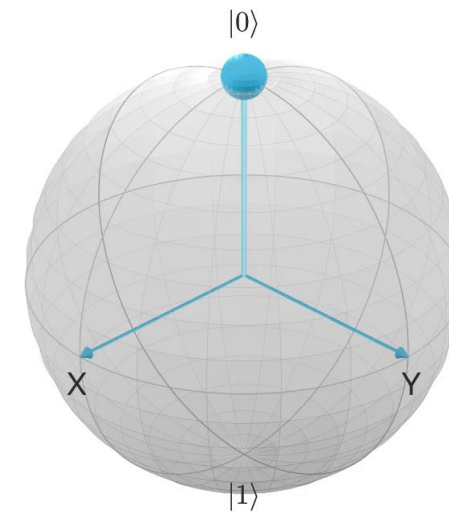
電磁波は、Bloch球の回転の支点と、回転角を指定できる！



ϕ, θ を指定した電磁波

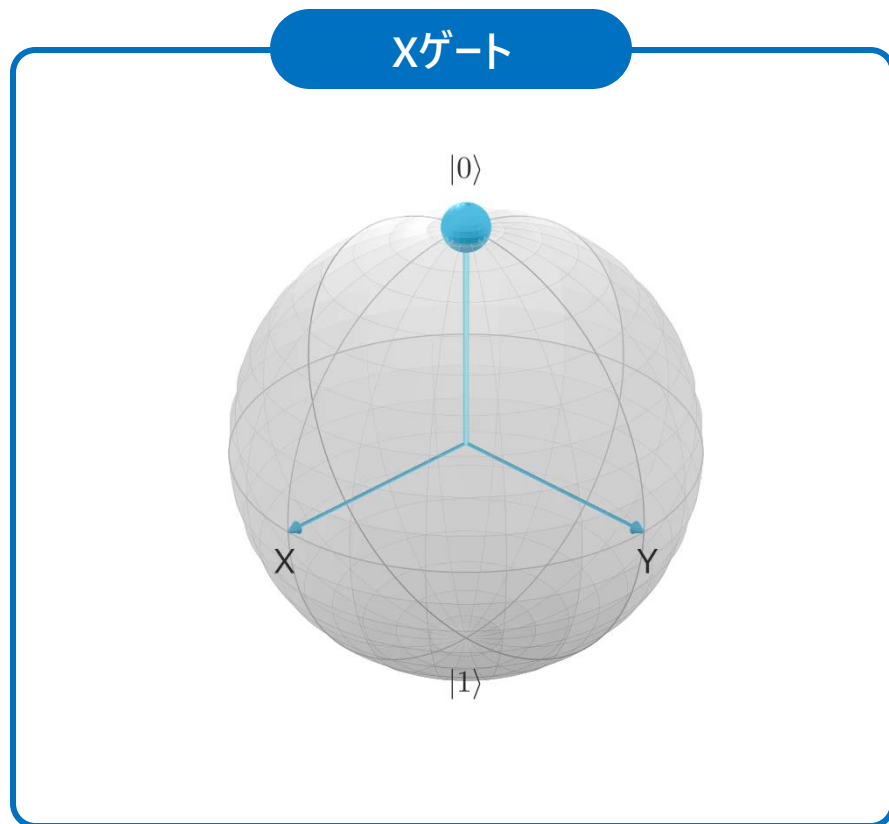


回転の様子



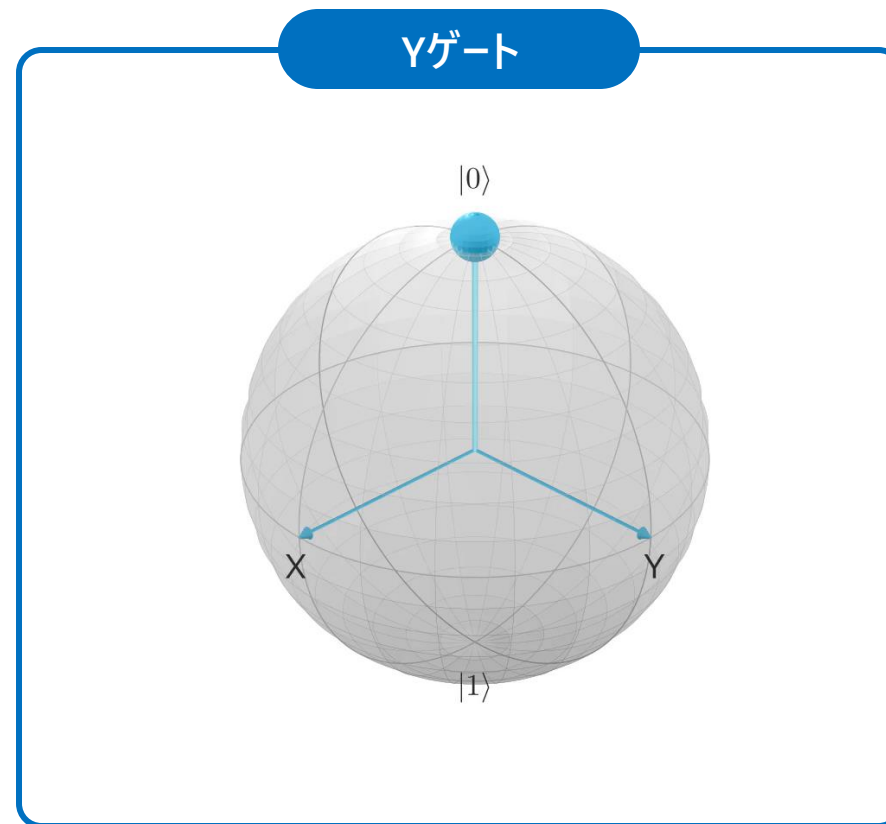
X,Yゲートを電磁波だけで実現できる！

Xゲート



$$\phi = 0, \theta = \pi$$

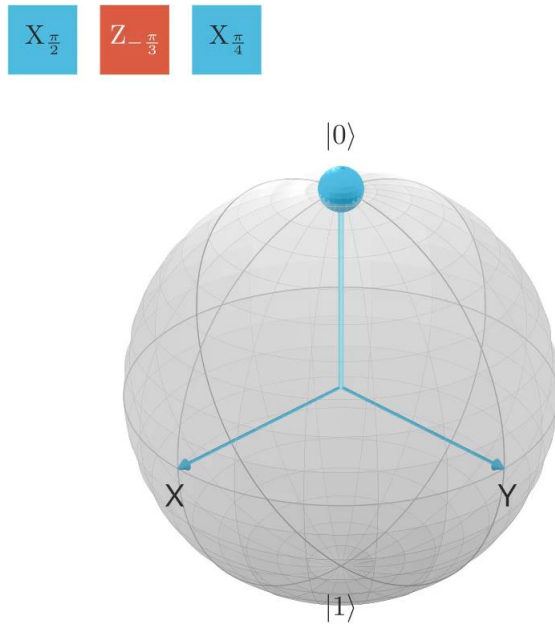
Yゲート



$$\phi = \pi/2, \theta = \pi$$

では Z 軸の回転はどうする？

数学的な操作



理想的なゲート操作

考えられる電磁波

$$X(\pi/2): \phi = 0, \theta = \pi/2$$

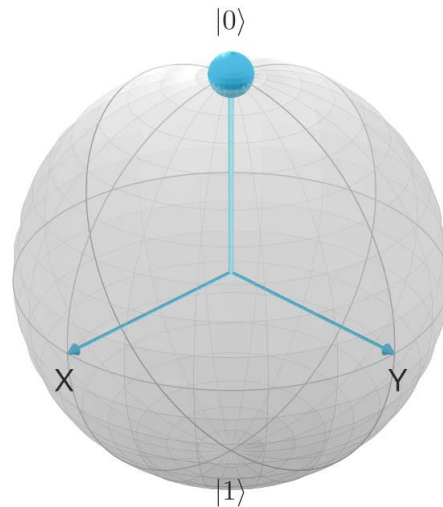
$$Z(-\pi/3): \phi = ?, \theta = ?$$

$$X(\pi/4): \phi = 0, \theta = \pi/4$$

では Z 軸の回転はどうする？
X,Y 軸の定義を変えてしまっただけで仮想的に実現すればよい = 仮想 Z ゲート

エンジニアリング的な操作

$$X_{\frac{\pi}{2}} \quad X_{\frac{\pi}{4}}$$



実際に行っているゲート操作

考えられる電磁波

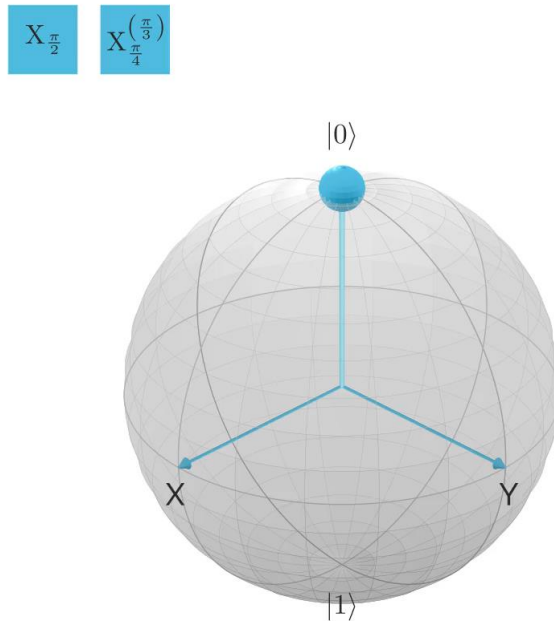
$$X(\pi/2): \phi = 0, \theta = \pi/2$$

$$Z(-\pi/3) = \text{この}\phi\text{の値を}\pi/3\text{だけずらす}$$

$$X(\pi/4): \phi = 0, \theta = \pi/4$$

では Z 軸の回転はどうする？
X,Y 軸の定義を変えてしまっただけで仮想的に実現すればよい = 仮想 Z ゲート

エンジニアリング的な操作



実際に行っているゲート操作

考えられる電磁波

$$X(\pi/2): \phi = 0, \theta = \pi/2$$

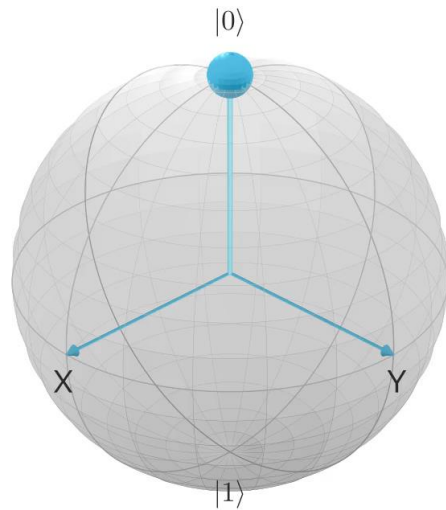
$$Z(-\pi/3) = \text{この}\phi\text{の値を}\pi/3\text{だけずらす}$$

$$X(\pi/4): \phi = \pi/3, \theta = \pi/4$$

3つのゲート操作を二回の電磁波だけで実現できる！

数学的な操作

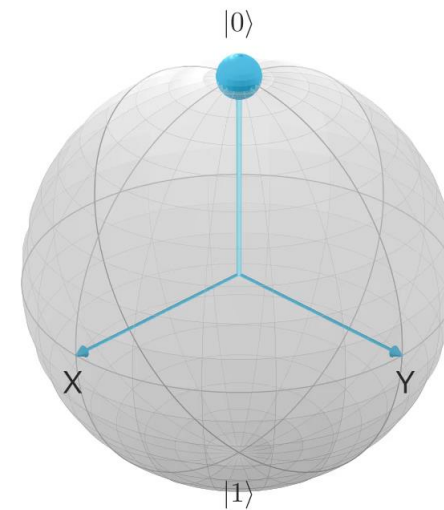
$$X_{\frac{\pi}{2}} \quad Z_{-\frac{\pi}{3}} \quad X_{\frac{\pi}{4}}$$



理想的なゲート操作

エンジニアリング的な操作

$$X_{\frac{\pi}{2}} \quad X_{\frac{\pi}{4}}^{(\frac{\pi}{3})}$$



実際に行っているゲート操作

4 展望

