量子ハードウェア

2025/09/04

Translated and modified by Masahiro Ota

Created by Masao Tokunari

自己紹介

名前：太田正洋

理学部物理学科卒

ITエンジニアとして半導体系のプロジェクトに参画中

量子コンピュータ勉強中です！

Outline

1.超伝導量子ビットの物理

量子ビットの構造や動作原理についての物理的な背景

2.量子ビット制御

量子ゲートやパルス制御など、量子状態を操作する技術

3.量子非破壊測定

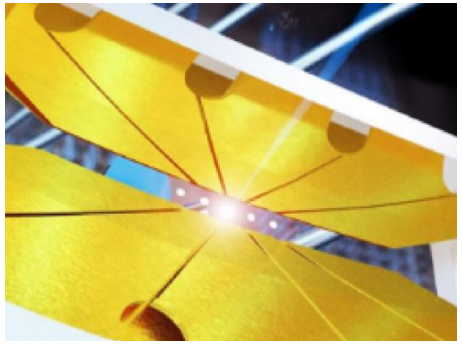
量子状態を壊さずに読み取る測定技術

4.量子コンピュータの性能指標

IBM Quantum System One

様々な量子技術

Ions



Credit: N. M. Linke et al., University of Maryland, 2017

Photons

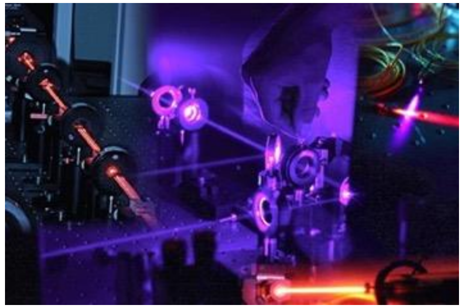
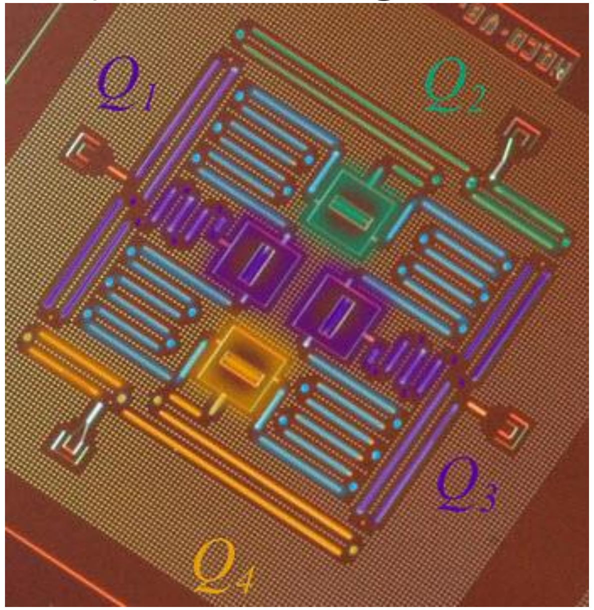


Image from the Centre for Quantum Computation & Communication Technology

Superconducting circuits



Credit: A. D. Córcoles et al., IBM, 2015

Neutral atoms

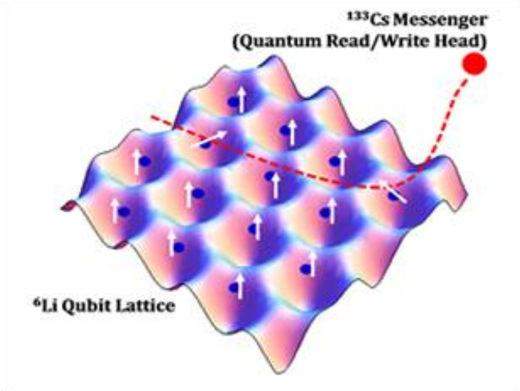


Image from Cheng Group, University of Chicago

Solid-state defects
(NV centers, phosphorous in Si)

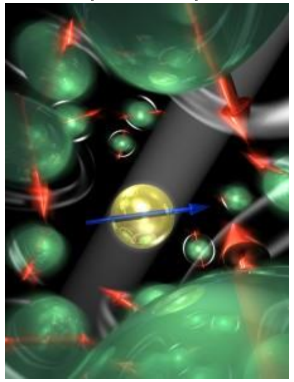
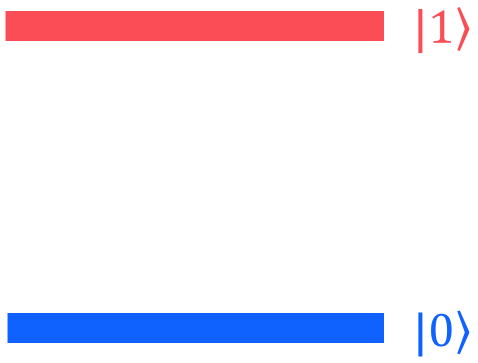


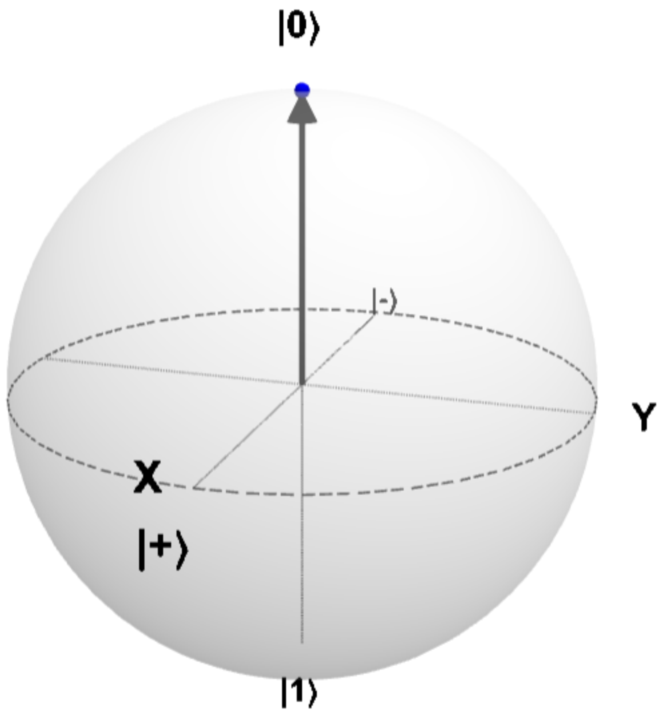
Image from Hanson Group, Delft

Qubitの理論と実装

Energy levels

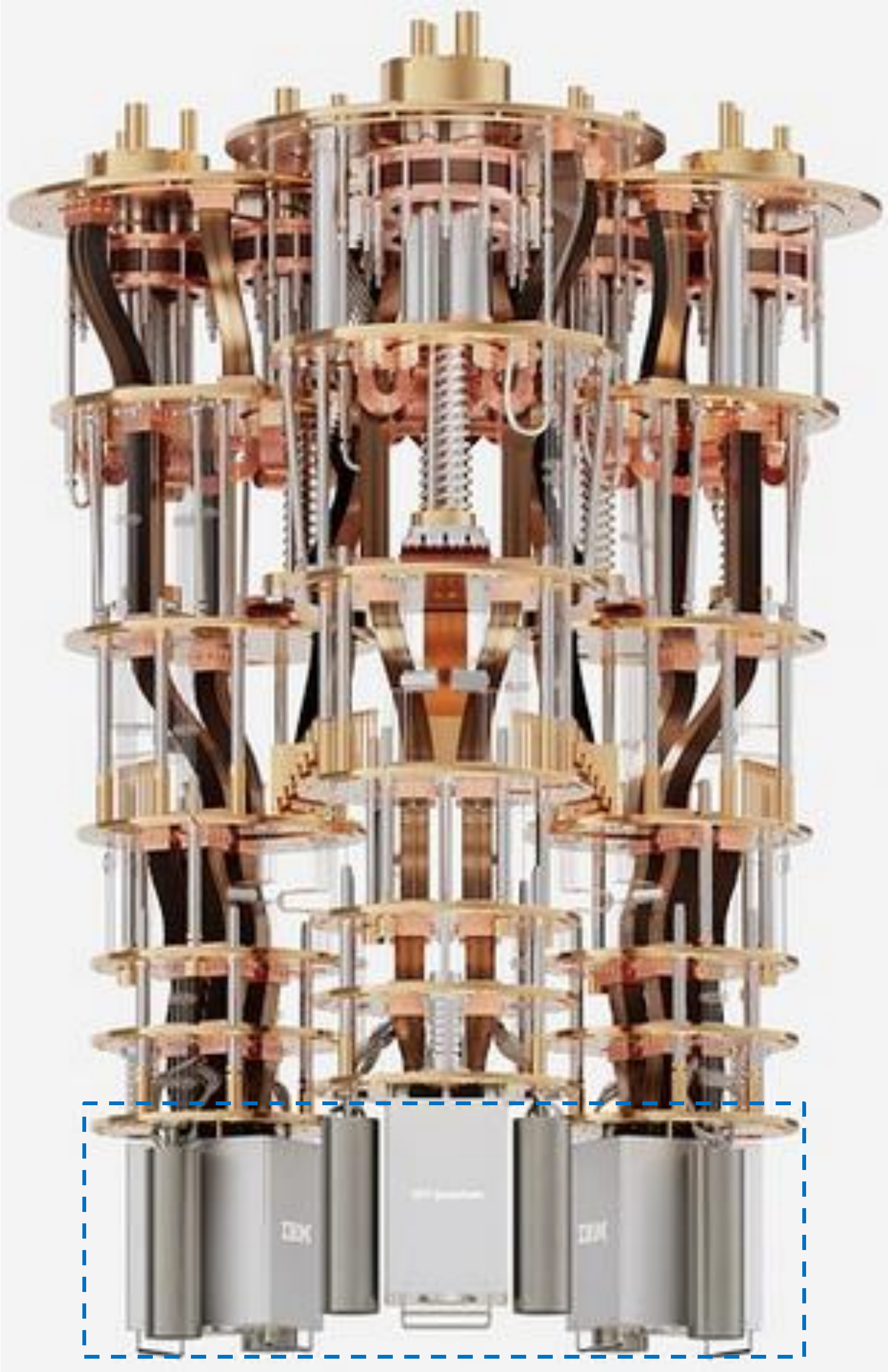


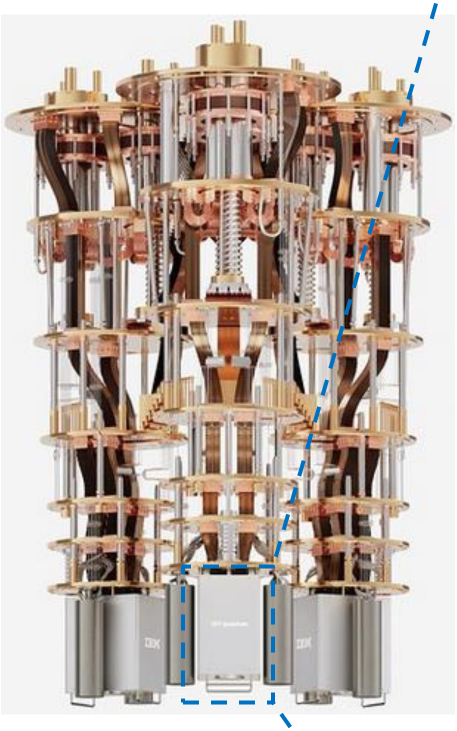
Bloch sphere

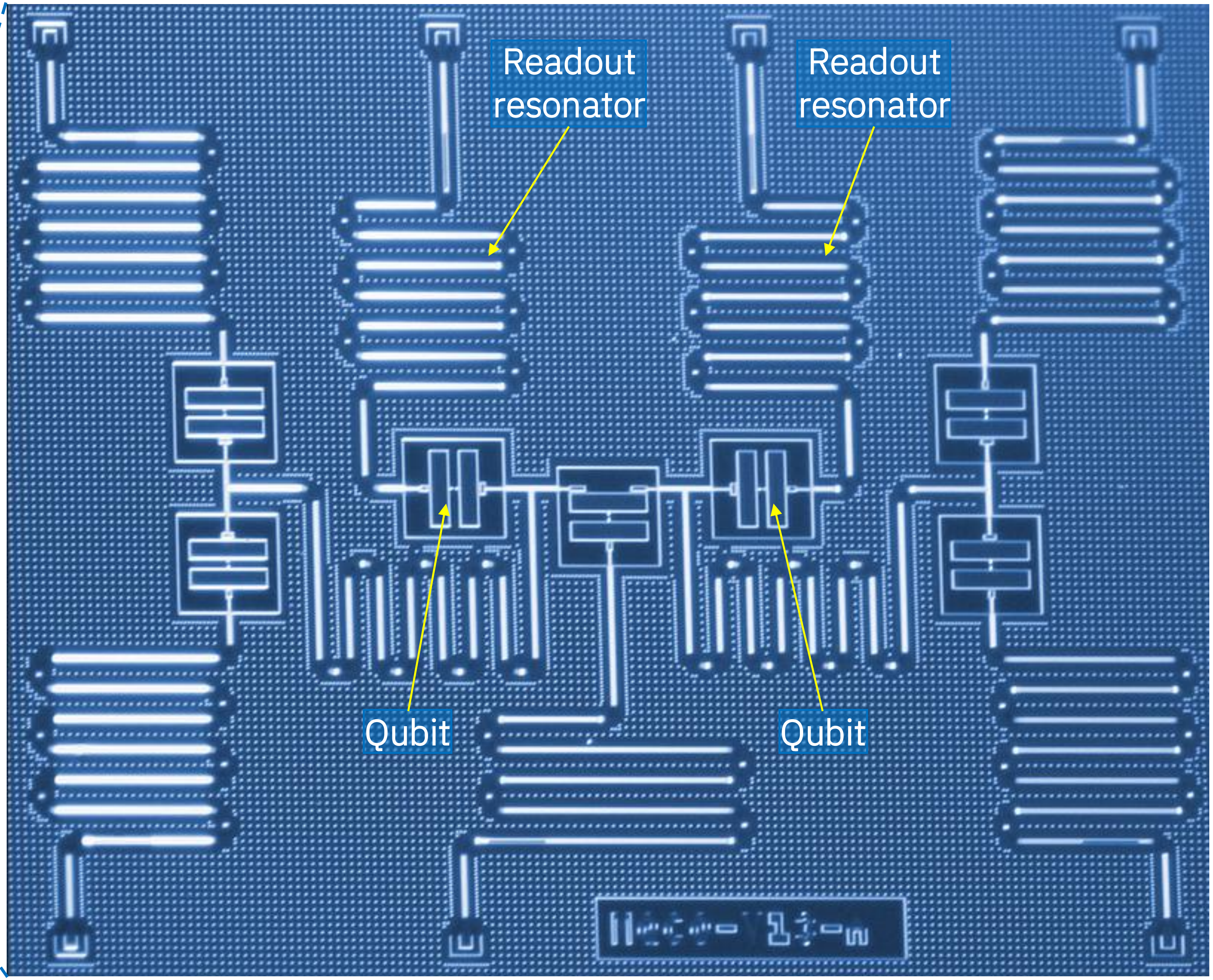


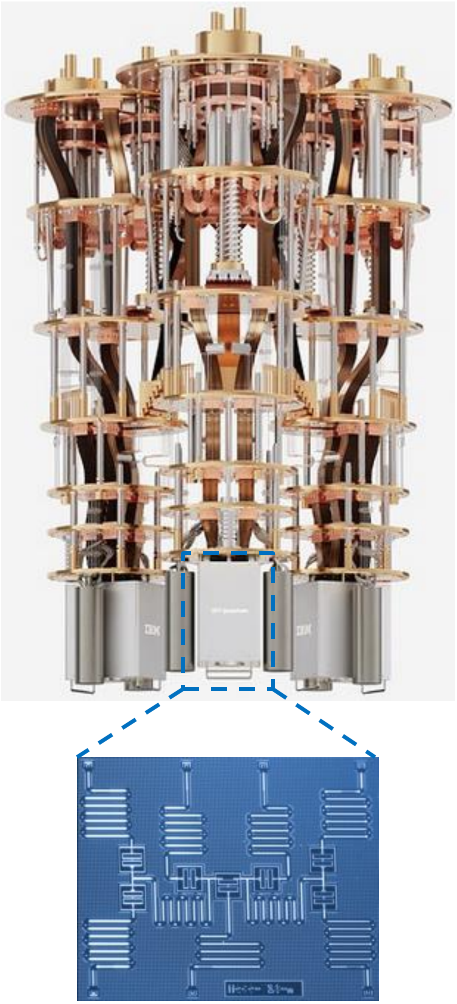
Real quantum computer


IBM Quantum

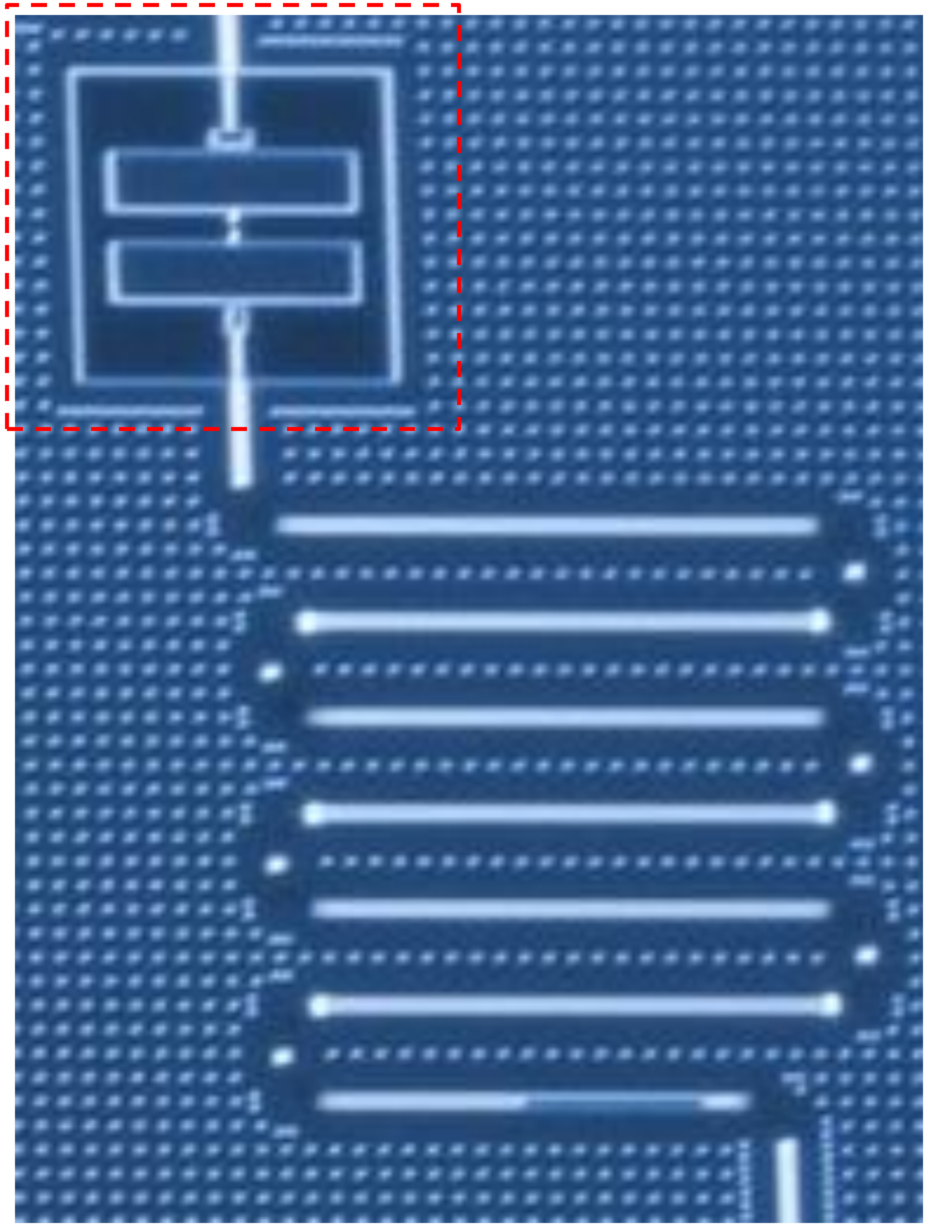

IBM
IBM



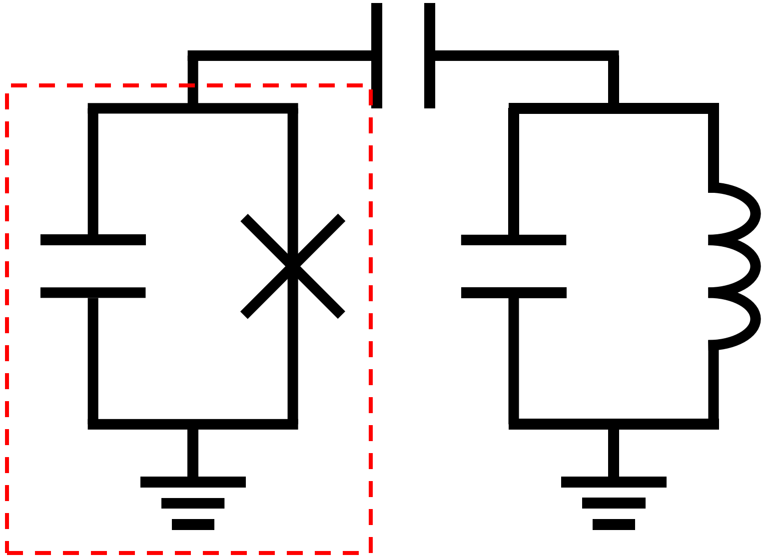

Readout resonator
Readout resonator
Qubit
Qubit

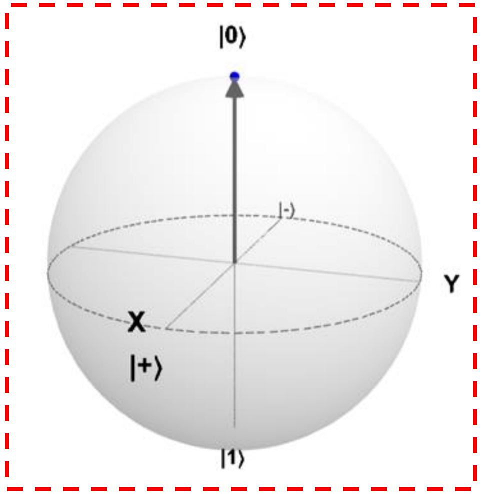


Qubit and readout resonator



Equivalent circuits

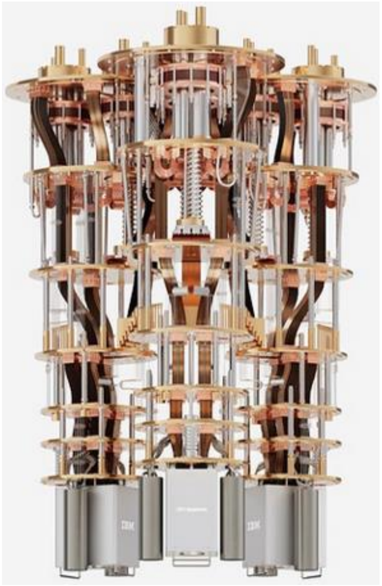


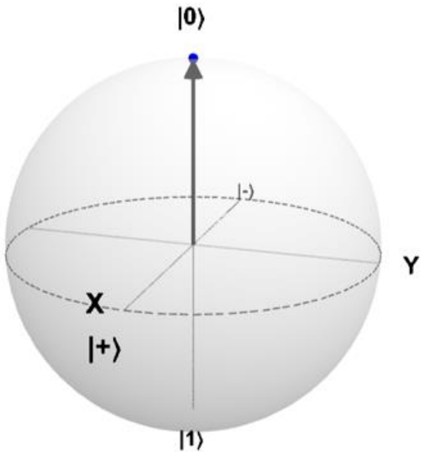


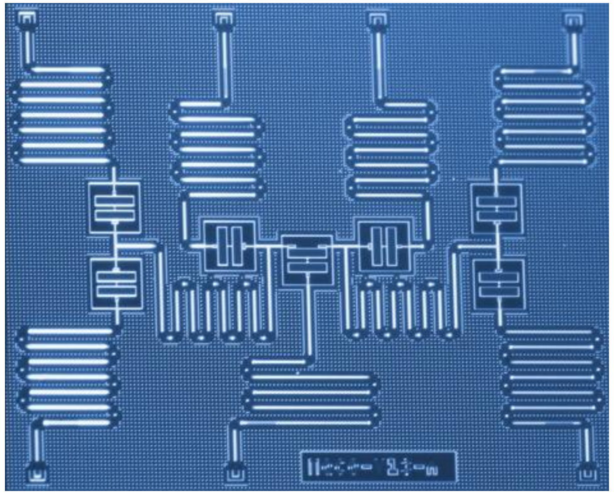
量子計算の流れ

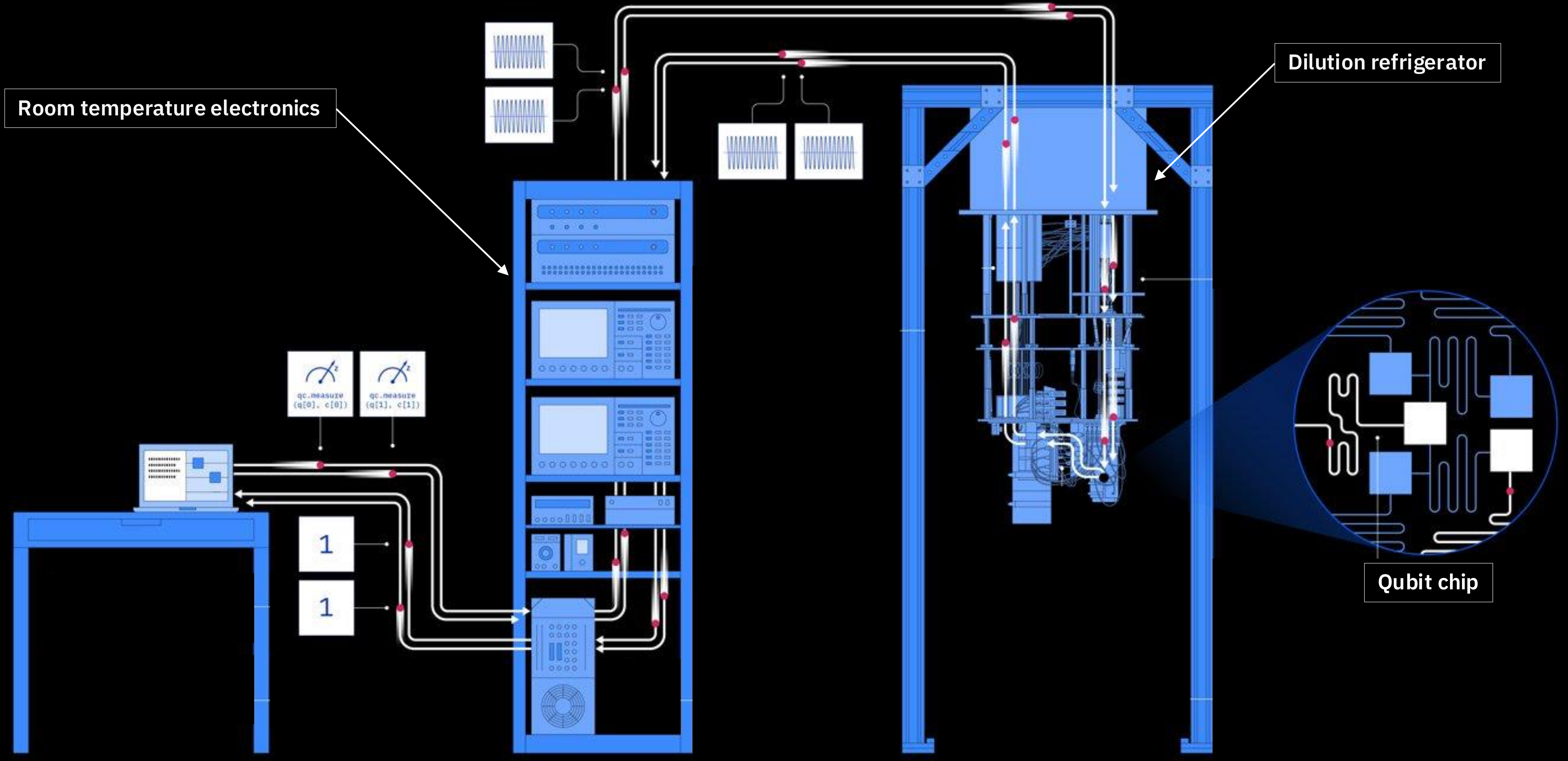
Control

Readout

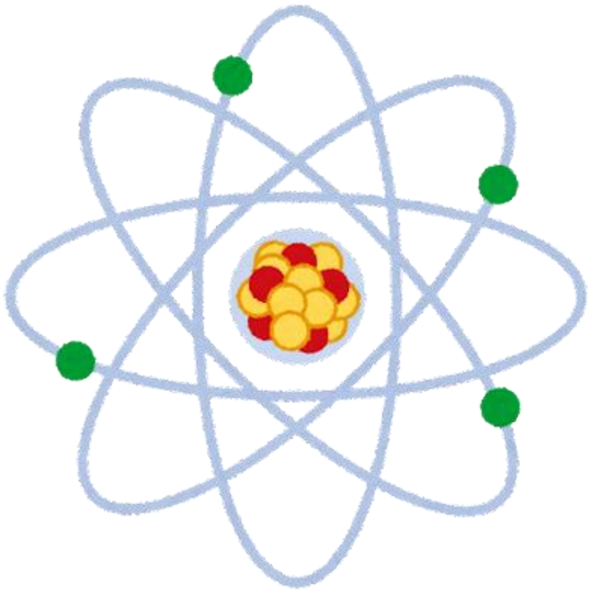







Room temperature electronics
Dilution refrigerator
qc.measure (q[0], c[0])
qc.measure (q[1], c[1])
1
1
Qubit chip

原子の量子性



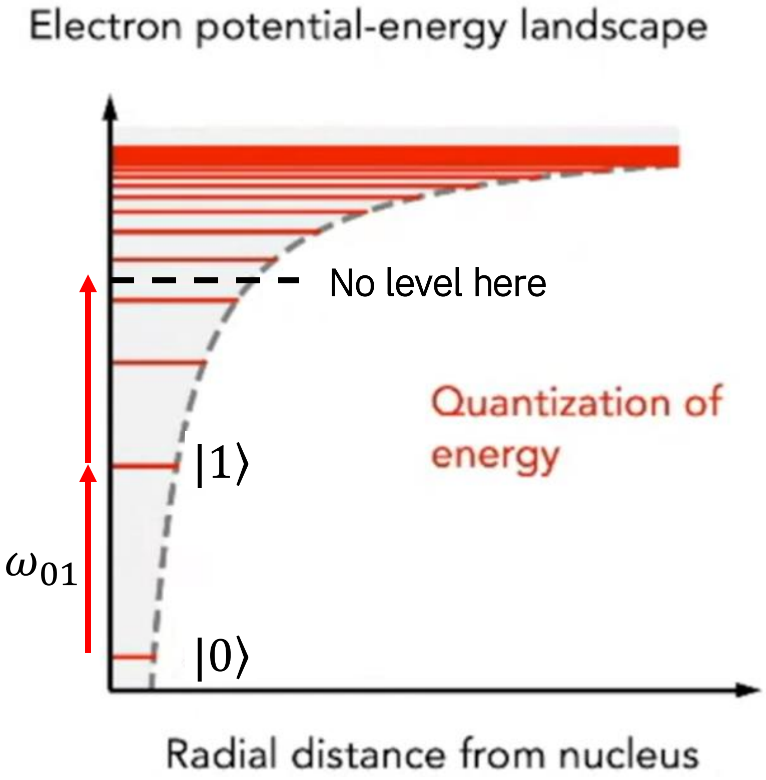
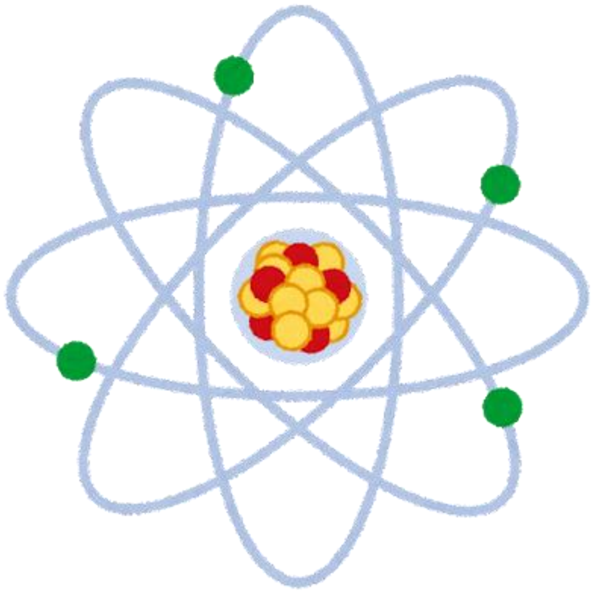


Image: Z. Minev, IBM, 2022

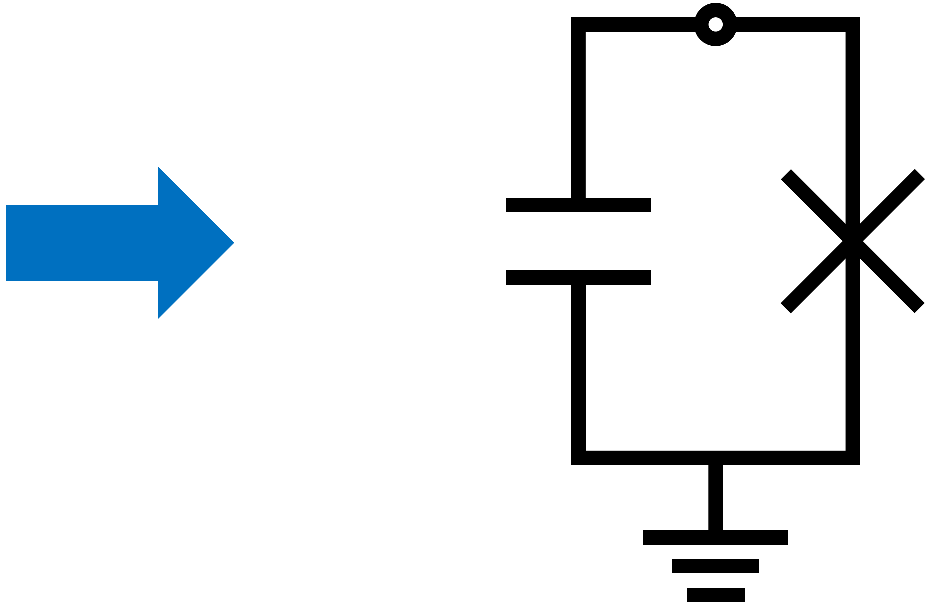
Qubit

- 複数のエネルギー準位
- 量子化 (離散的)
- 非調和性を持つ

人工原子= 超伝導量子ビット

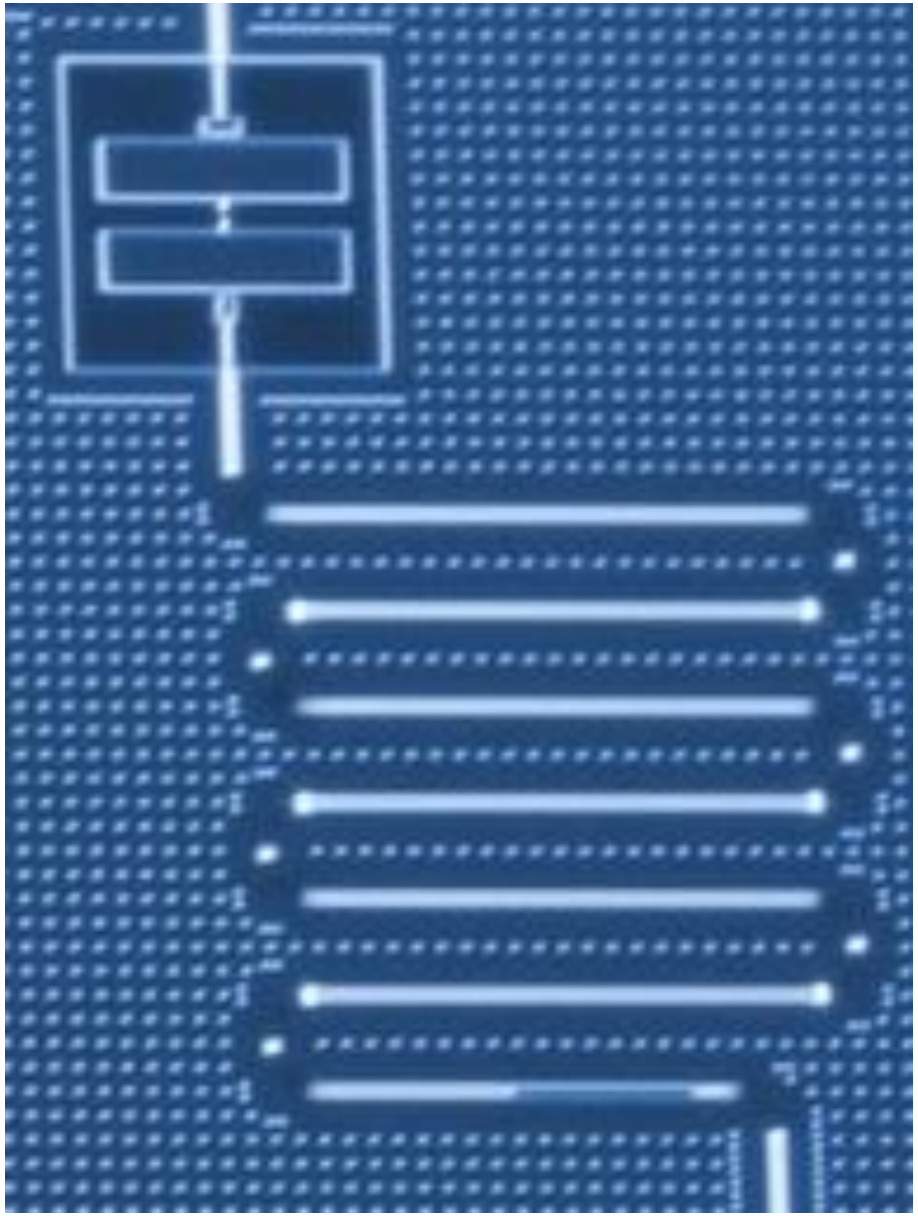


Natural atoms



Artificial atoms

超伝導量子ビット



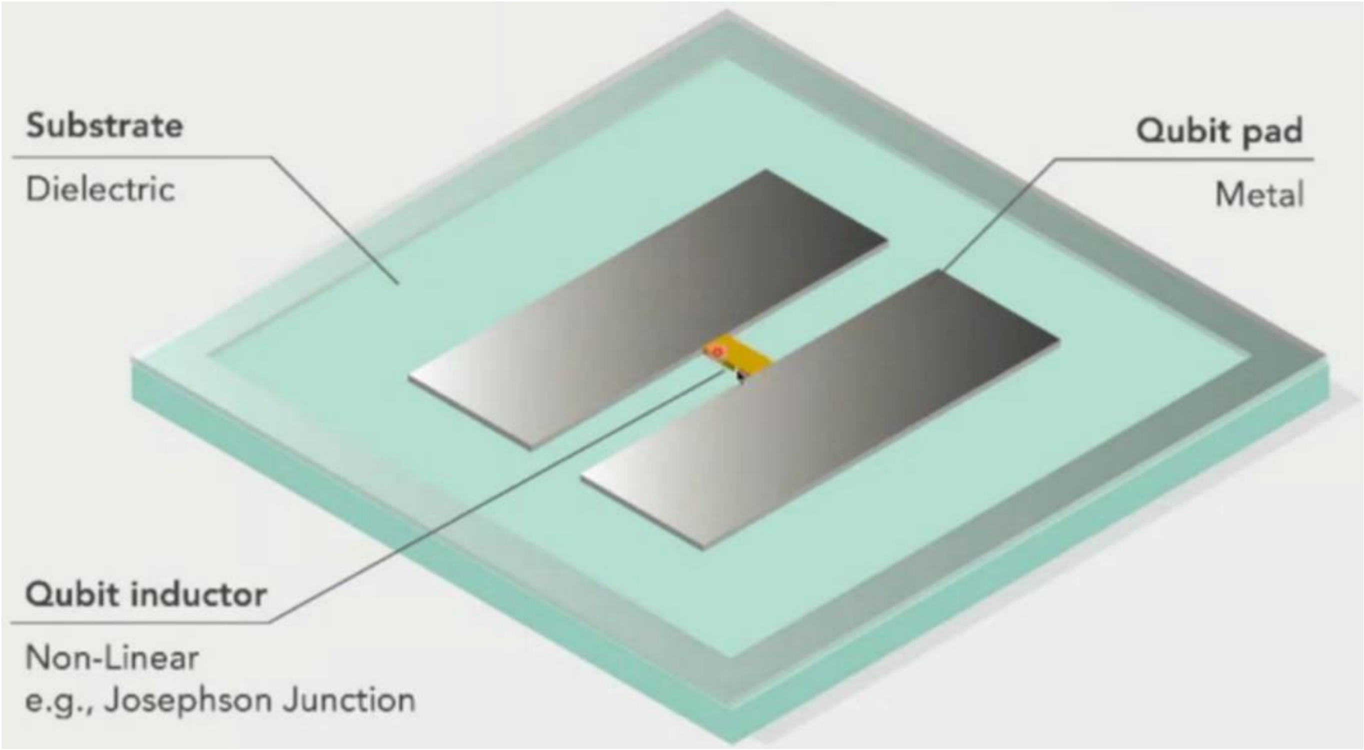
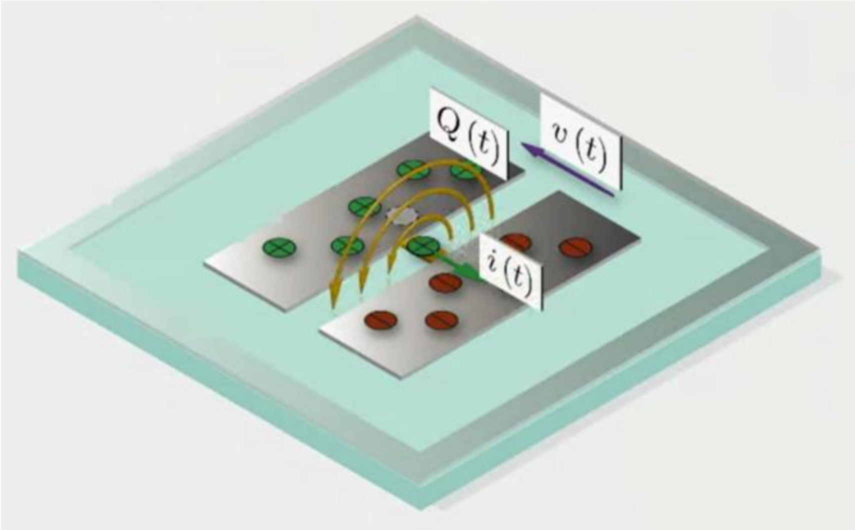
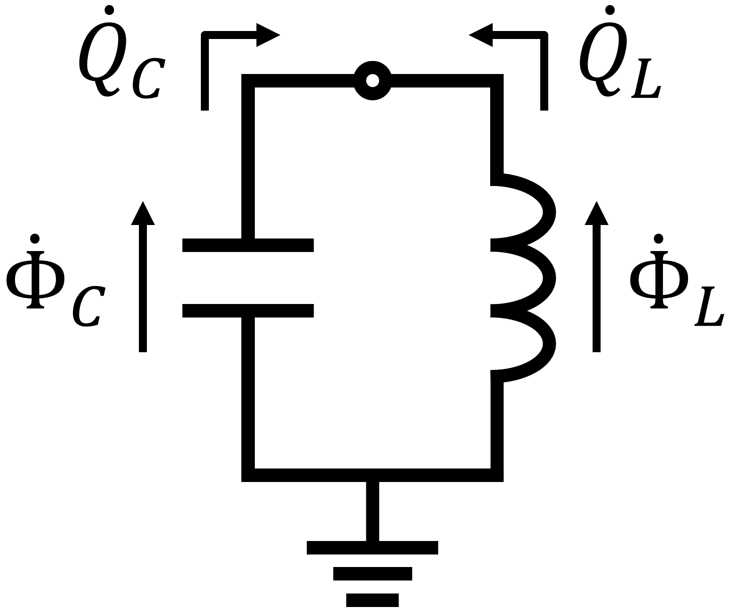


Image: Z. Minev
https://youtu.be/eZJjQGu85Ps?si=LrAlGV4CZOa-qHY3

LC回路 | 調和振動子





定義として、

$$\dot{Q} = I$$
$$\dot{\Phi} = V$$

キャパシタとインダクタの関係

$$Q = CV \left(= C\dot{\Phi}\right)$$
$$\Phi = LI \left(= L\dot{Q}\right)$$

キルヒホッフの第2法則より、

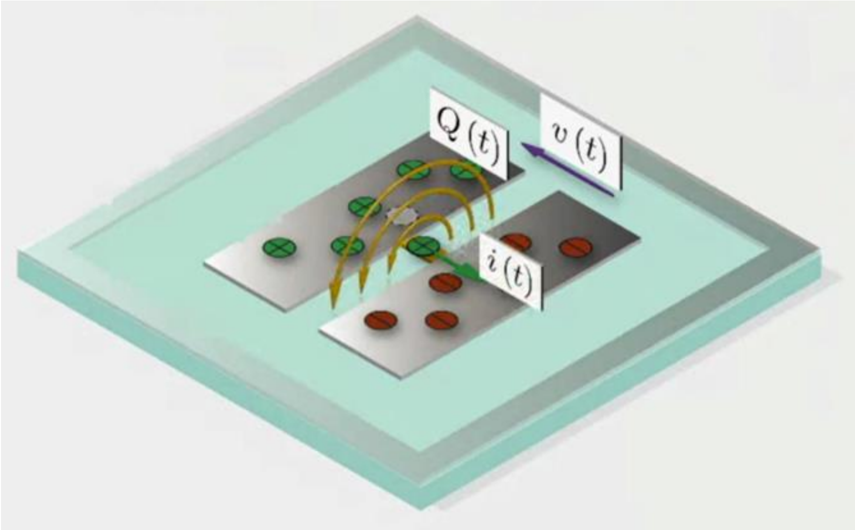
$$\dot{\Phi}_C = \dot{\Phi}_L$$
$$\Rightarrow \Phi_C = \Phi_L \equiv \Phi$$

キルヒホッフの第1法則より、

$$\dot{Q}_C + \dot{Q}_L = 0$$
$$\Rightarrow C\ddot{\Phi}_C + \frac{\Phi_L}{L} = C\ddot{\Phi} + \frac{\Phi}{L} = 0$$
$$\Rightarrow \ddot{\Phi} = -\omega_0^2\Phi, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$
$$\Rightarrow \Phi = \Phi_0 \mathrm{e}^{-i\omega_0 t}$$

ω_0：**共振周波数**

LC回路と力学的振動子の類似性

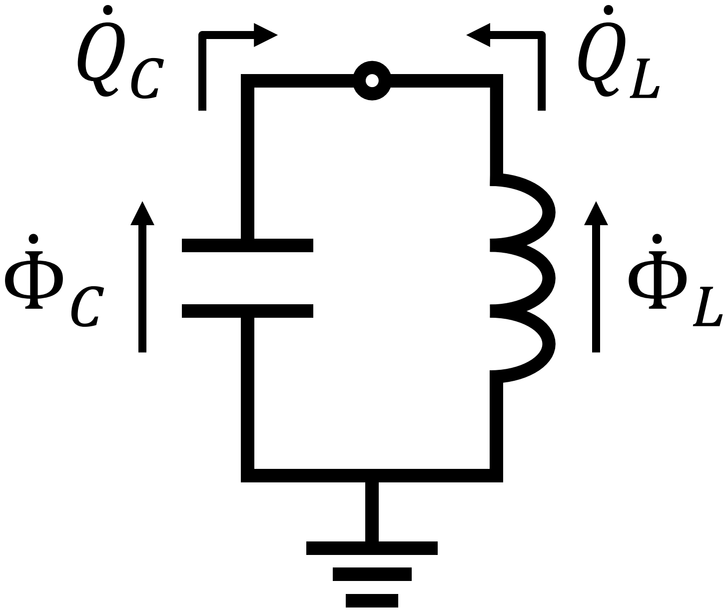


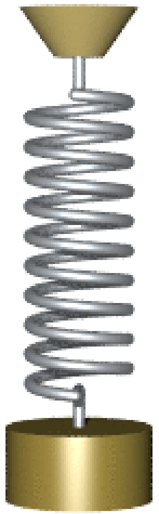
LC回路では、磁束が時間とともに振動する。
この振動は、共振周波数に従う。

$$C\ddot{\Phi} + \frac{\Phi}{L} = 0$$

$$\Phi = \Phi_0 \mathrm{e}^{-i\omega_0 t}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$





力学的振動子の類似性

磁束→ 位置: $\Phi \longmapsto x$

インダクタンス → ばね定数: $\frac{1}{L} \longmapsto k$

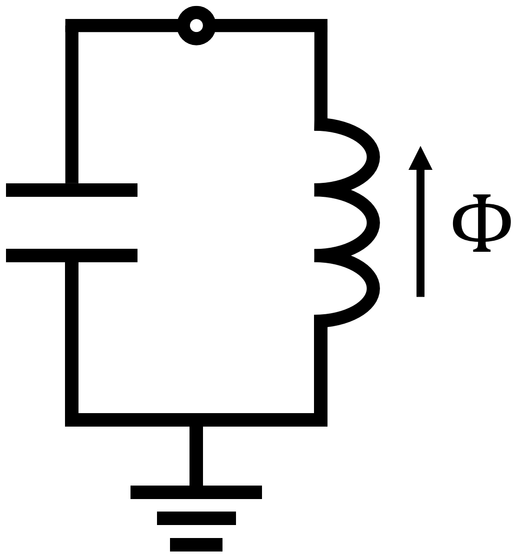
キャパシタンス → 質量: $C \longmapsto m$

電圧 → 速度: $\dot{\Phi}(= V) \longmapsto v$

電荷 → 運動量: $Q(= CV) \longmapsto p(= mv)$

運動方程式: $C\ddot{\Phi} + \frac{\Phi}{L} = 0 \longmapsto F = ma$

LC回路を力学的な視点から解析する



Lagrangian = 「運動エネルギー」 – 「ポテンシャルエネルギー」であるから、

$$\mathcal{L}(\Phi, \dot{\Phi}) = K_{cap}(\dot{\Phi}) - U_{ind}(\Phi)$$

$$= \frac{C\dot{\Phi}^2}{2} - \frac{\Phi^2}{2L} \quad \longmapsto \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}kx^2$$

オイラー・ラグランジュ方程式より、

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\Phi}}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \Phi} = 0 \longmapsto F = ma$$

磁束Φに対する正準共役変数は、

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\Phi}} = C\dot{\Phi} = Q$$

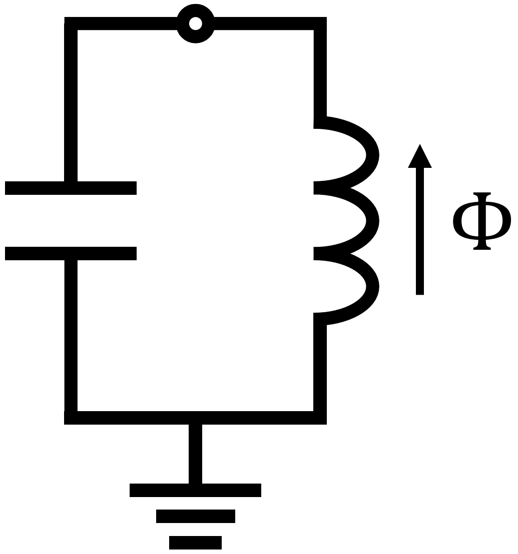
ルジャンドル変換: Lagrangian → Hamiltonian

$$\mathcal{H}(\Phi, Q) = Q\dot{\Phi} - \mathcal{L}(\Phi, \dot{\Phi}) = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L}$$

正準方程式

$$\dot{\Phi} = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial Q} = \frac{Q}{C}, \qquad \dot{Q} = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \Phi} = -\frac{\Phi}{L}$$

ハミルトン力学と位相空間



ハミルトニアン(全エネルギー) は

位相空間上の点を表す複素変数$\alpha(t)$ を使って以下のように量子化できる

$$\mathcal{H} = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L} = \frac{1}{2}\hbar\omega_0(\alpha^*\alpha + \alpha\alpha^*) = \boldsymbol{\hbar\omega_0\left(n + \frac{1}{2}\right)}$$

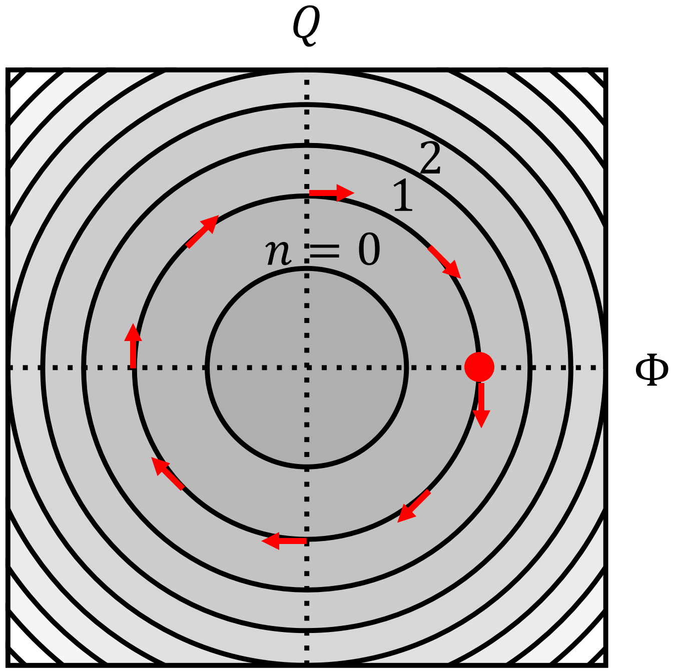
$\alpha(t)$ は量子力学でいう生成・消滅演算子の古典的アナロジー

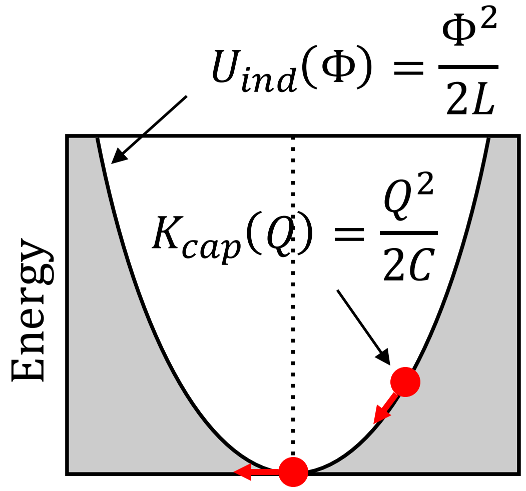
$$\alpha(t) = \sqrt{1/2\hbar Z}[\Phi(t) + iZQ(t)] = \alpha(0)e^{-i\omega_0 t}$$

$$Z = \sqrt{L/C}$$

$$\mathcal{H}(\Phi, Q) = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L}$$

$$\begin{cases} \dot{\Phi} = \dfrac{\partial\mathcal{H}}{\partial Q} = \dfrac{Q}{C} \\ \dot{Q} = -\dfrac{\partial\mathcal{H}}{\partial\Phi} = -\dfrac{\Phi}{L} \end{cases}$$





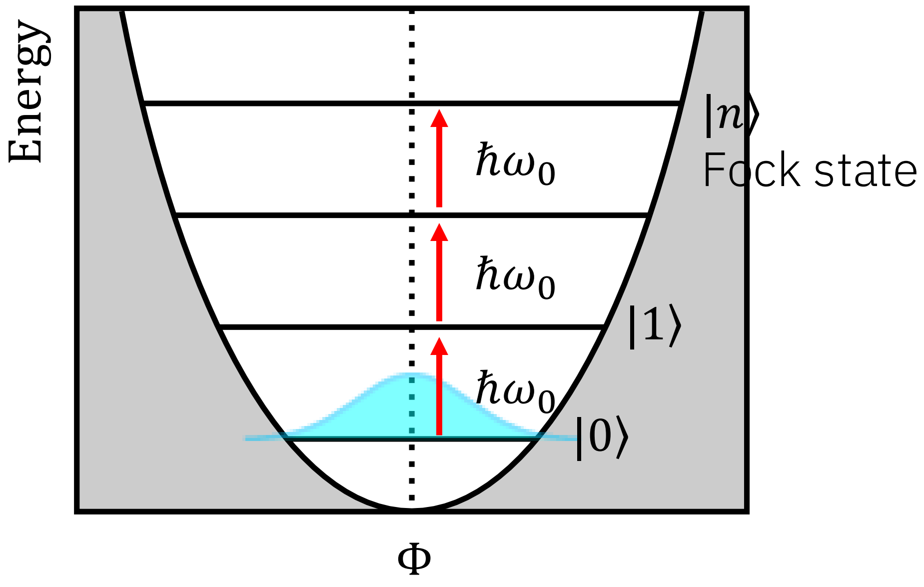
量子調和振動子のエネルギー準位

量子化されたLC回路のハミルトニアン

$$\hat{H} = \frac{\hat{\Phi}^2}{2L} + \frac{\hat{Q}^2}{2C} = \frac{1}{2}\hbar\omega_0(\hat{a}^\dagger\hat{a} + \hat{a}\hat{a}^\dagger) = \hbar\omega_0\left(\underbrace{\hat{a}^\dagger\hat{a}}_{\hat{N}\text{: 数演算子}} + \frac{1}{2}\right)$$

$$\hat{a} = \sqrt{\frac{1}{2\hbar Z}}(\hat{\Phi} + iZ\hat{Q}),\ Z = \sqrt{L/C}$$

Energy levels and wavefunction



エネルギー準位が等間隔に並んでいるので量子ビットとして使えない！

消滅演算子$\hat{a}$

$\hat{a}|0\rangle = 0$

$\hat{a}|1\rangle = |0\rangle$

$\hat{a}|n\rangle = \sqrt{n}|n-1\rangle$

$$\hat{a} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{3} \\ 0 & 0 & 0 & \ddots \end{pmatrix}$$

生成演算子$\hat{a}^\dagger$

$\hat{a}^\dagger|0\rangle = |1\rangle$

$\hat{a}^\dagger|1\rangle = \sqrt{2}|2\rangle$

$\hat{a}^\dagger|n\rangle = \sqrt{n+1}|n+1\rangle$

$$\hat{a}^\dagger = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & \ddots \end{pmatrix}$$

数演算子$\hat{a}^\dagger\hat{a}$

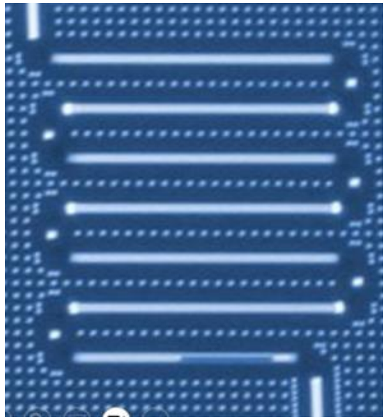
$\hat{a}^\dagger\hat{a}|0\rangle = 0$

$\hat{a}^\dagger\hat{a}|1\rangle = |1\rangle$

$\hat{a}^\dagger\hat{a}|n\rangle = n|n\rangle$

$$\hat{a}^\dagger\hat{a} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots \end{pmatrix}$$

読み出し共振器は線形なLC回路



非線形振動子 | Transmon量子ビット

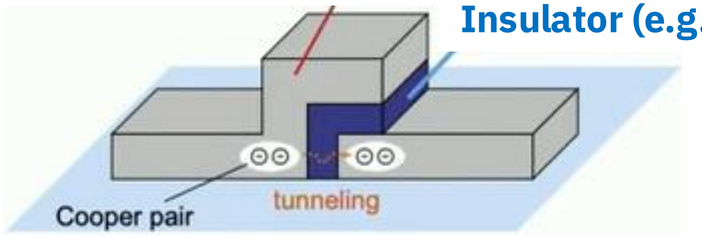
Transmon: transmission-line shunted plasma oscillation qubit

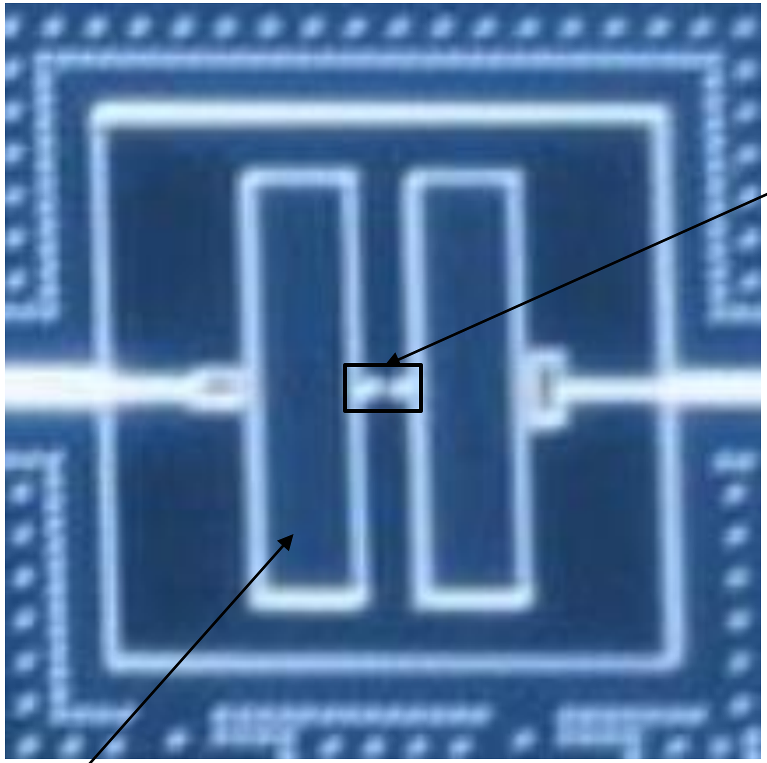
https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0703002

Image: S. Tamate

Superconductor (e.g., Al)

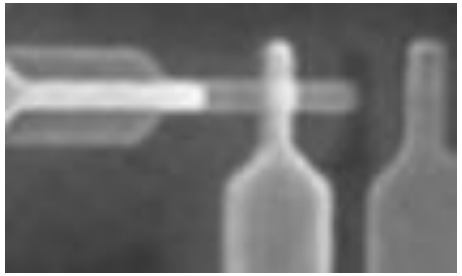
Insulator (e.g., AlOx)

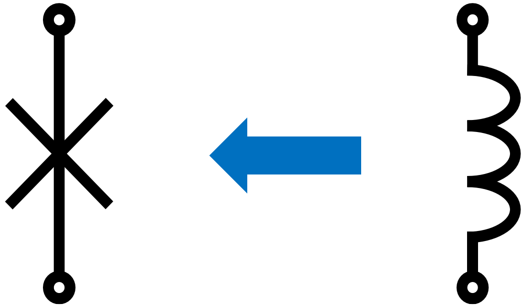




非線形インダクタ

e.g., ジョセフソン接合





ジョセフソン接合

線形 L

$\Phi = LI$

$U_{lin} = \frac{\Phi^2}{2L}$

キャパシタ

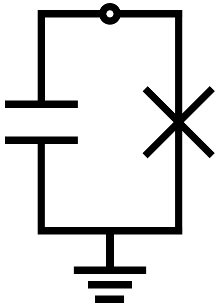
超伝導材料(Nb, TiN, Ta, etc.)

Qubit Hamiltonian

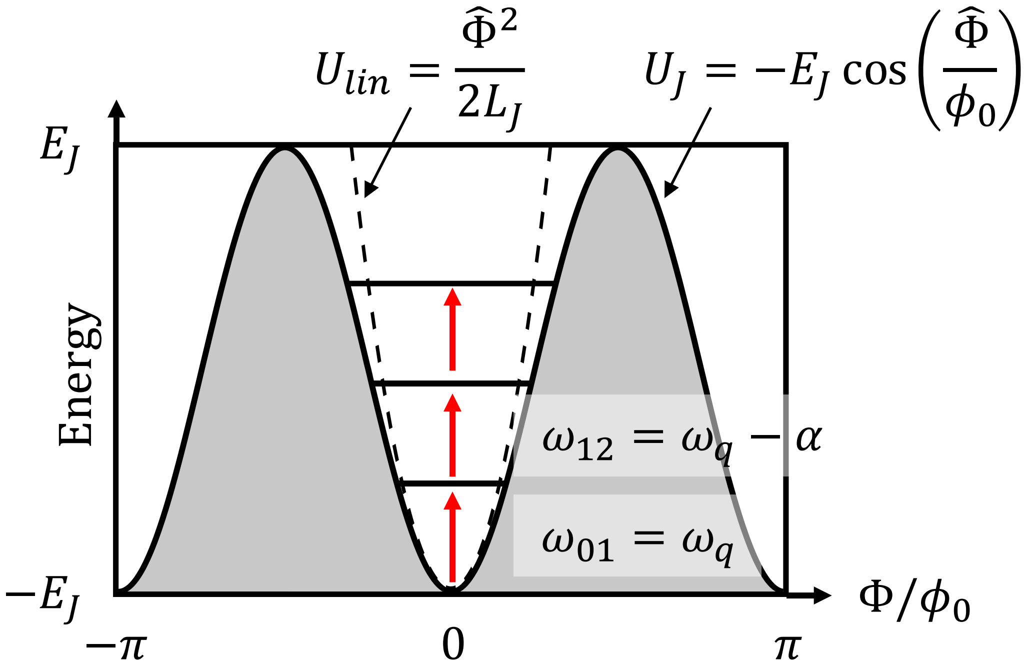
$$\hat{H} = \frac{\hat{Q}^2}{2C} - E_J \cos\left(\frac{\hat{\Phi}}{\phi_0}\right)$$

非線形なポテンシャル

Qubit



Transmon量子ビットのハミルトニアン



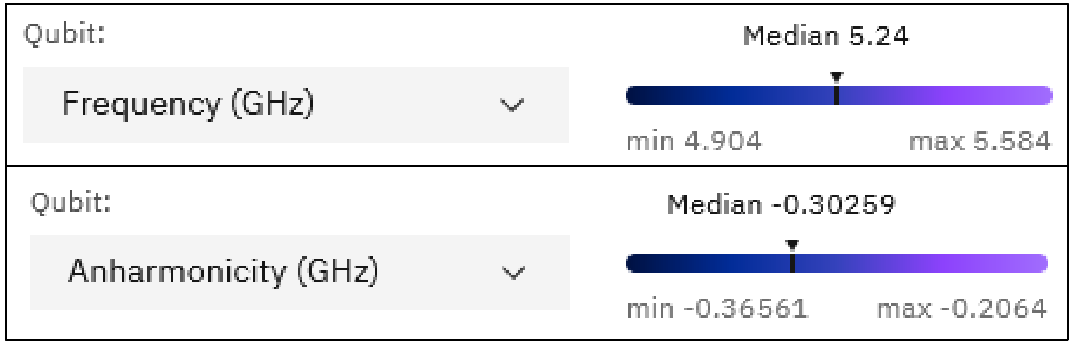
Transmon量子ビットのハミルトニアン：

$$\hat{H}^{RWA} = \hbar\omega_q \hat{a}^\dagger \hat{a} - \frac{\hbar\alpha}{2}\hat{a}^{\dagger 2}\hat{a}^2 = \underbrace{\hbar\omega_q \hat{N}}_{\text{Linear}} - \underbrace{\frac{\hbar\alpha}{2}\hat{N}(\hat{N}-1)}_{\text{Nonlinear}}$$

ここで α は非調和性の係数。

この非調和性によってTransmonを量子ビットとして使える！

Q. ibm_kawasakiの基本周波数と非調和性係数は?



基本周波数に対応する温度は、

$$\omega_q \sim 5\ \text{GHz} \Leftrightarrow T_q \sim 0.25\ \text{K}\ (\hbar\omega_q = k_B T_q)$$

熱ノイズの影響を受けないように$\hbar\omega_q \gg k_B T$を満たす必要がある。

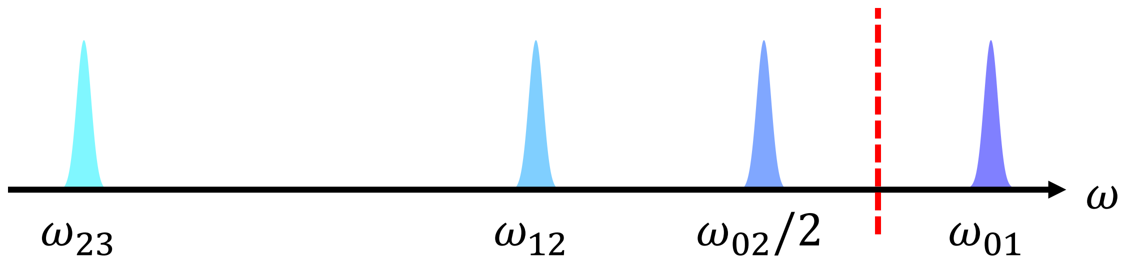
⇒ 10mK **オーダーの冷凍機が必要な理由**

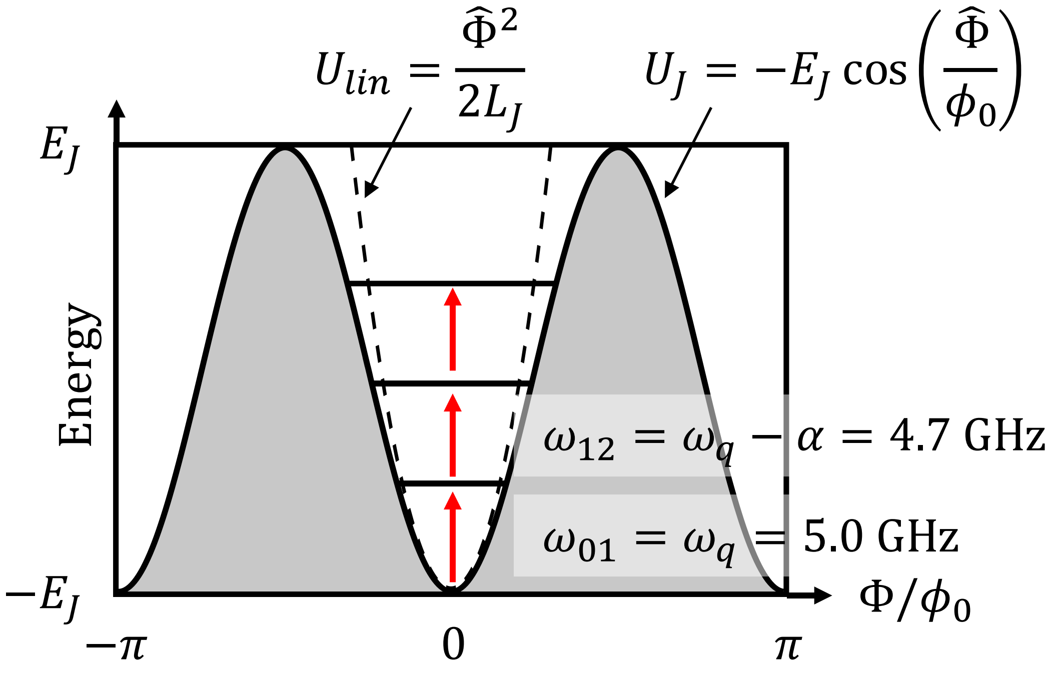
量子ビットの遷移スペクトル

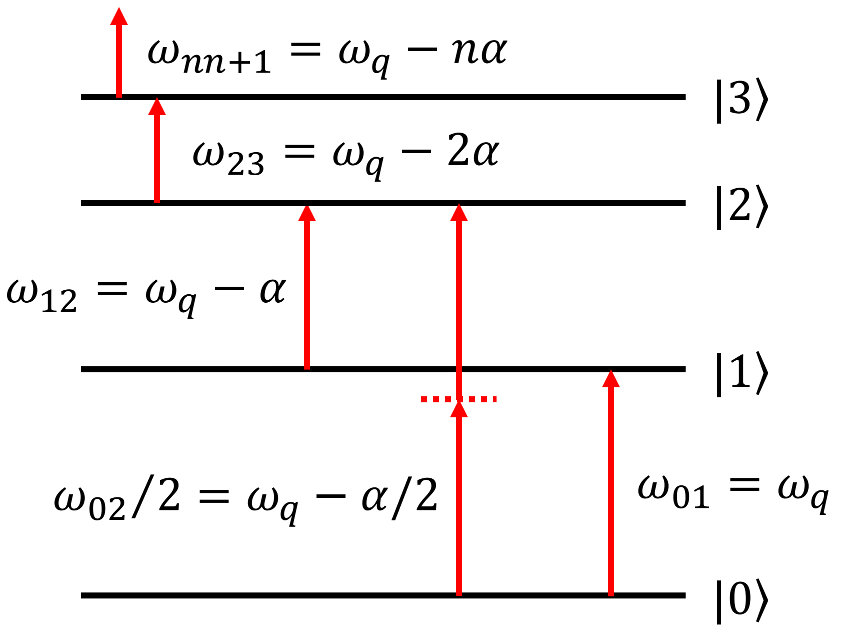
$$\hat{H}^{RWA} = \hbar\omega_q \hat{a}^\dagger \hat{a} - \frac{\hbar\alpha}{2}\hat{a}^{\dagger 2}\hat{a}^2 = \hbar\omega_q \hat{N} - \frac{\hbar\alpha}{2}\hat{N}(\hat{N}-1)$$

$L_J = 14\ \mathrm{nH}$ $\quad E_J = \frac{\phi_0^2}{L_J} = 12\ \mathrm{GHz}$ $\quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = 2\pi \times 5.3\ \mathrm{GHz}$

$C_J = 65\ \mathrm{fF}$ $\quad E_C = \frac{e^2}{2C} = 0.3\ \mathrm{GHz}\ (= \Delta_q = \alpha)$ $\quad \frac{Q_{zpf}}{2e} \sim 1$







量子サブスペースへの制限

フォック数演算子

$$\hat{a}^\dagger\hat{a} = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix}} & \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 2 & 0 \\ 0 & \ddots \end{matrix} \end{pmatrix}$$

$$\hat{N} - \frac{1}{2}\hat{I} \longmapsto -\frac{1}{2}\hat{Z}$$

Qubit Pauli Z operator

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

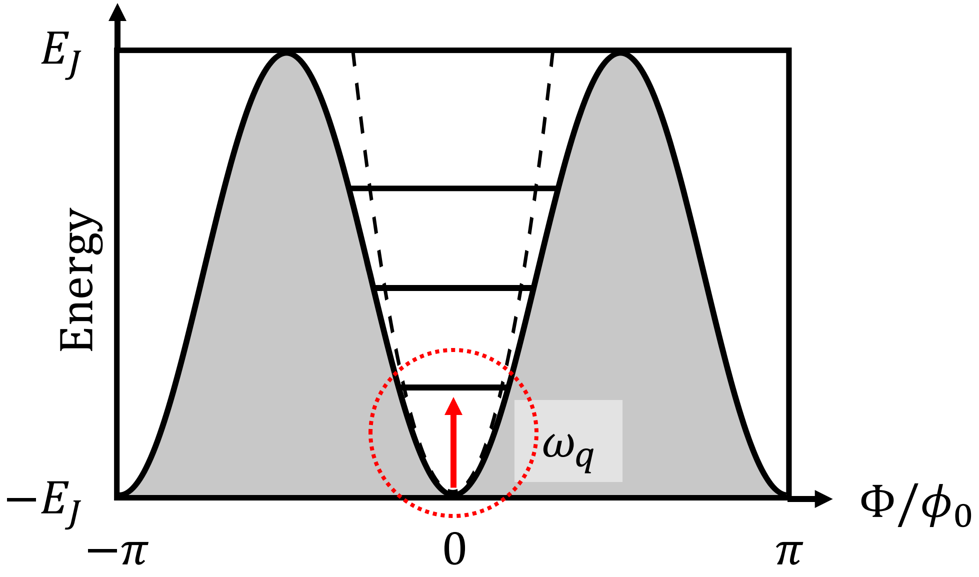
消滅演算子

$$\hat{a} = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{matrix}} & \begin{matrix} 0 & 0 \\ \sqrt{2} & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & \sqrt{3} \\ 0 & \ddots \end{matrix} \end{pmatrix}$$

$$\hat{a} \longmapsto \hat{\sigma} = \frac{1}{2}\left(\hat{X} + i\hat{Y}\right)$$

Qubit Pauli X and Y operators

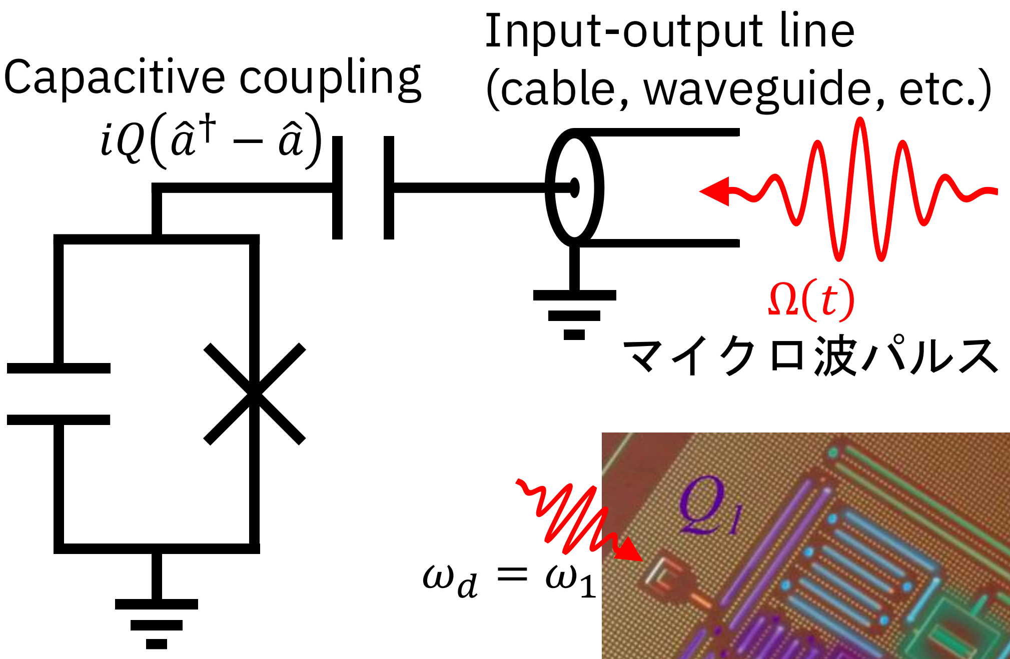
$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$



Qubit Hamiltonian

$$\hat{H}_{\text{qubit}} = -\frac{1}{2}\hbar\omega_q\hat{Z}$$

量子ビットの制御



量子ビットをマイクロ波パルスで制御する：

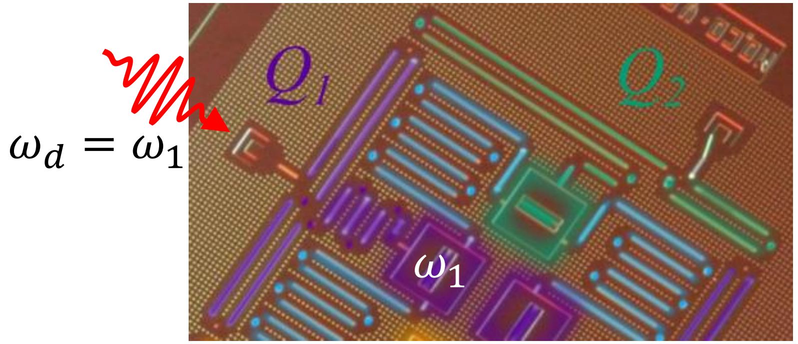
$$\hat{H}_{\text{drive}} = i\frac{\hbar}{2}\Omega(t)\left(\hat{\sigma}^\dagger - \hat{\sigma}\right) = \frac{\hbar}{2}\Omega(t)\hat{Y}$$

周波数ω_dで振動する：

$$\Omega(t) = \Omega_0 \sin(\omega_d t + \theta)$$

$$\hat{\sigma}(t) = \hat{\sigma}e^{-i\omega_d t}$$

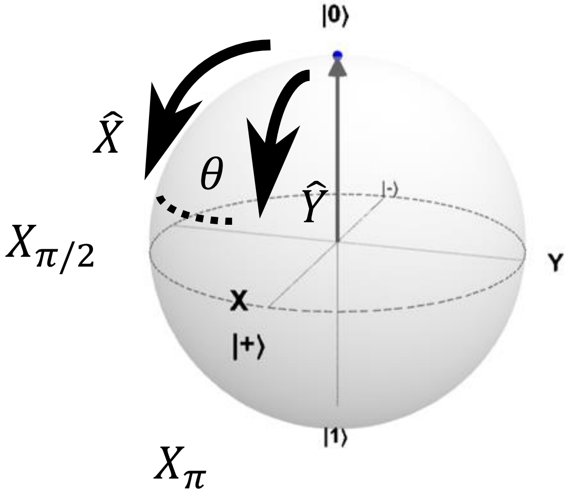
$$\hat{H}_{\text{drive}}^{RWA} = -\frac{\hbar}{4}\Omega_0\left(\hat{\sigma}^\dagger e^{-i\theta} + \hat{\sigma}e^{i\theta}\right)$$

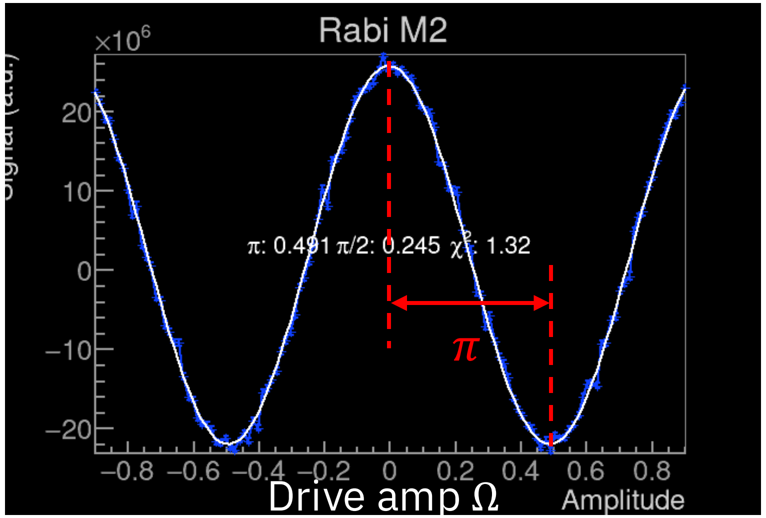


回転速度(Rabi周波数) $\Omega(t)$ と位相 θ で回転の速さと回転軸をコントロールできる

$$\hat{X} = \hat{\sigma}^\dagger + \hat{\sigma}$$

$$\hat{Y} = i\left(\hat{\sigma}^\dagger - \hat{\sigma}\right)$$

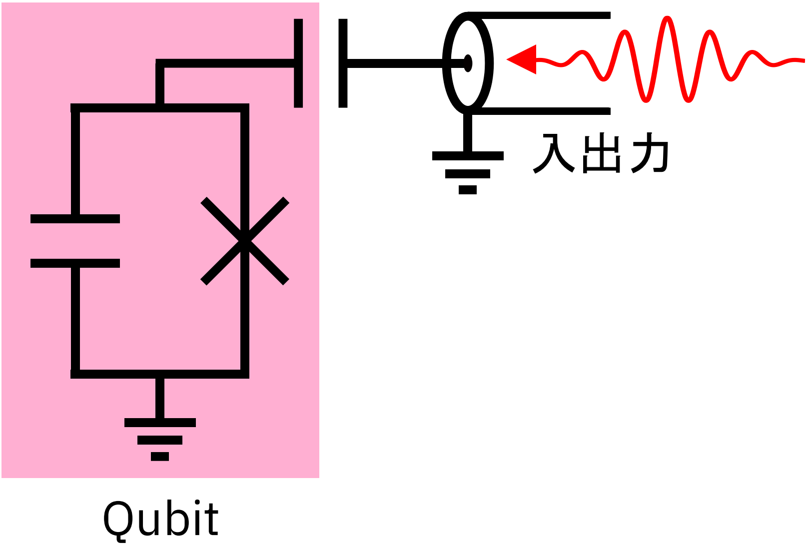


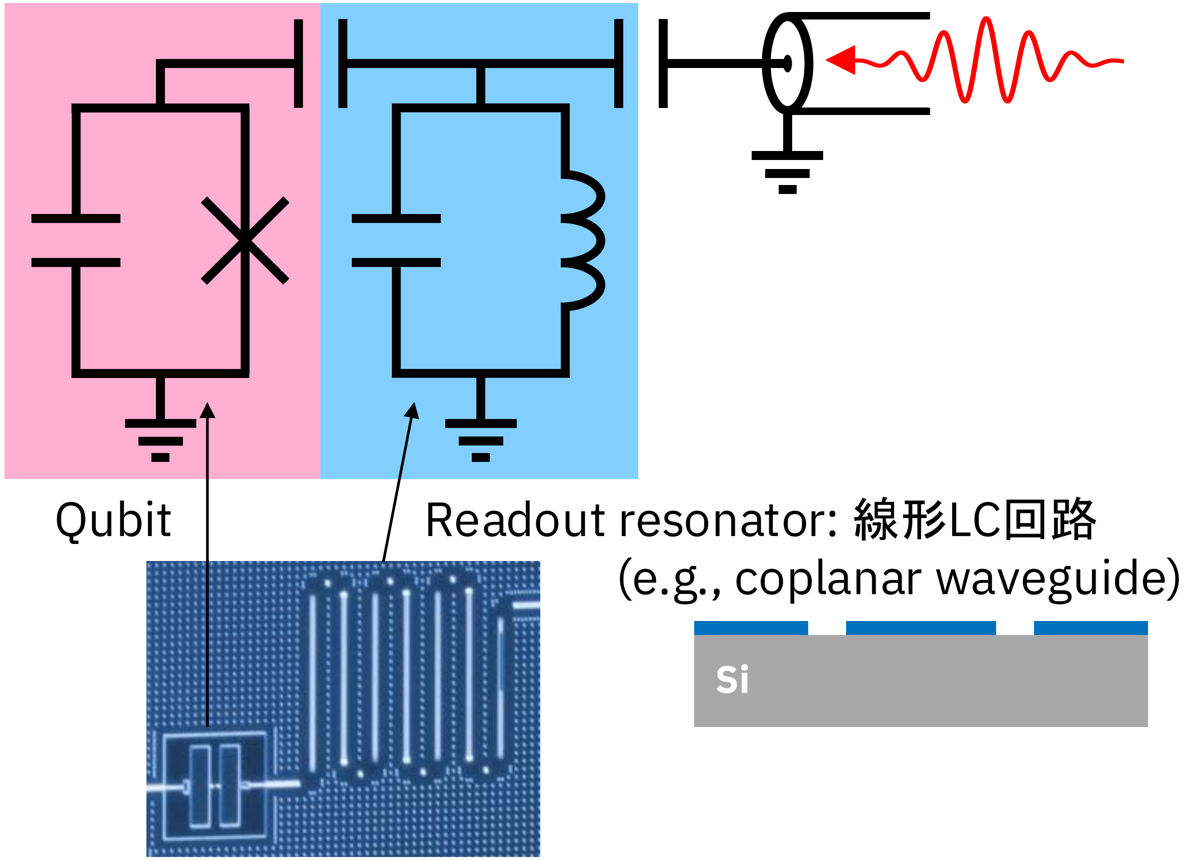


量子電磁気学による分散型測定

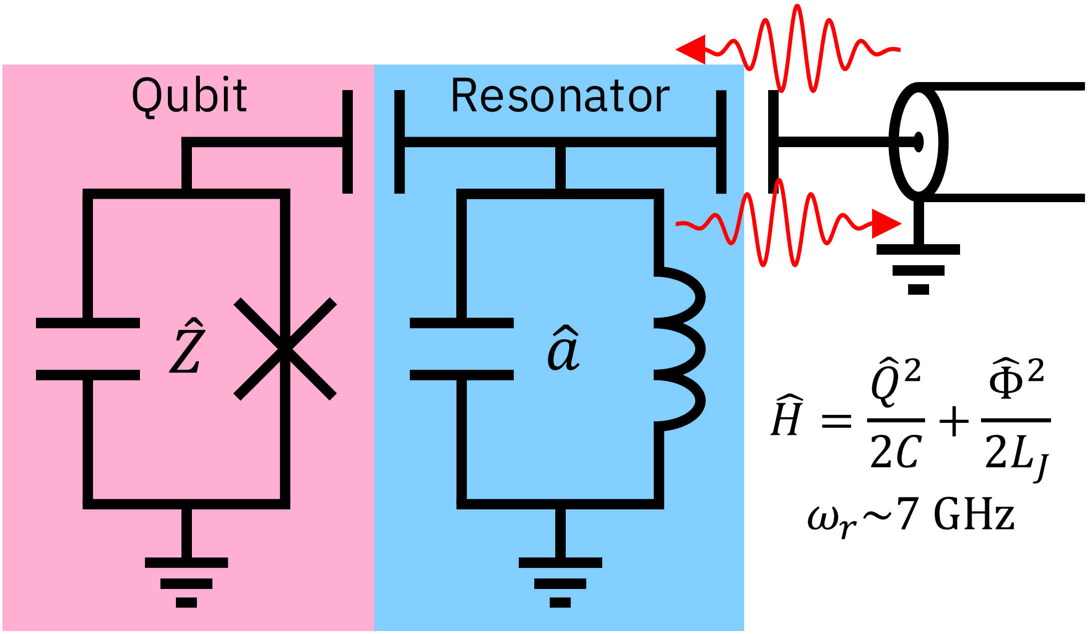
直接測定
- 破壊型
- 量子ビットのエネルギーが流出する
- 外部ノイズが入りやすい

回路量子電磁気学による分散型測定
- 非破壊型: 共振器経由で測定
- 量子ビットのエネルギーが流出しない
- ノイズが入りにくい





分散型測定



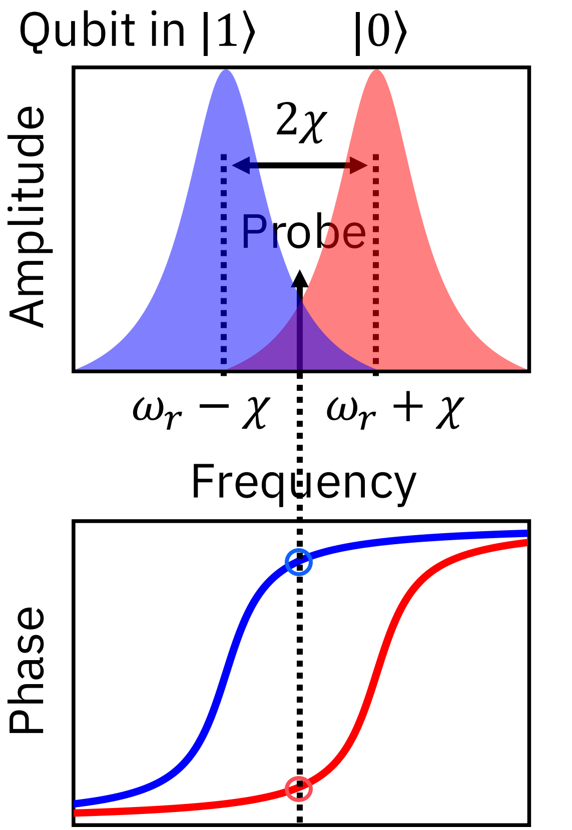
$$\hat{H} = \frac{\hat{Q}^2}{2C} - E_J \cos\left(\frac{\hat{\Phi}}{\phi_0}\right)$$

$\omega_q \sim 5\ \mathrm{GHz}$

$$\hat{H} = \frac{\hat{Q}^2}{2C} + \frac{\hat{\Phi}^2}{2L_J}$$

$\omega_r \sim 7\ \mathrm{GHz}$

Resonator response
on microwave irradiation

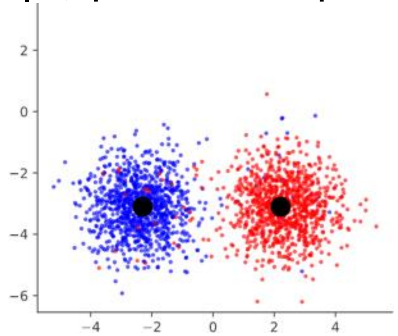


有効ハミルトニアン：

$$\hat{H}_{\mathrm{eff}} = -\frac{1}{2}\hbar(\omega_q - \chi)\hat{Z} + \hbar(\underline{\omega_r + \chi\hat{Z}})\hat{a}^\dagger\hat{a}$$

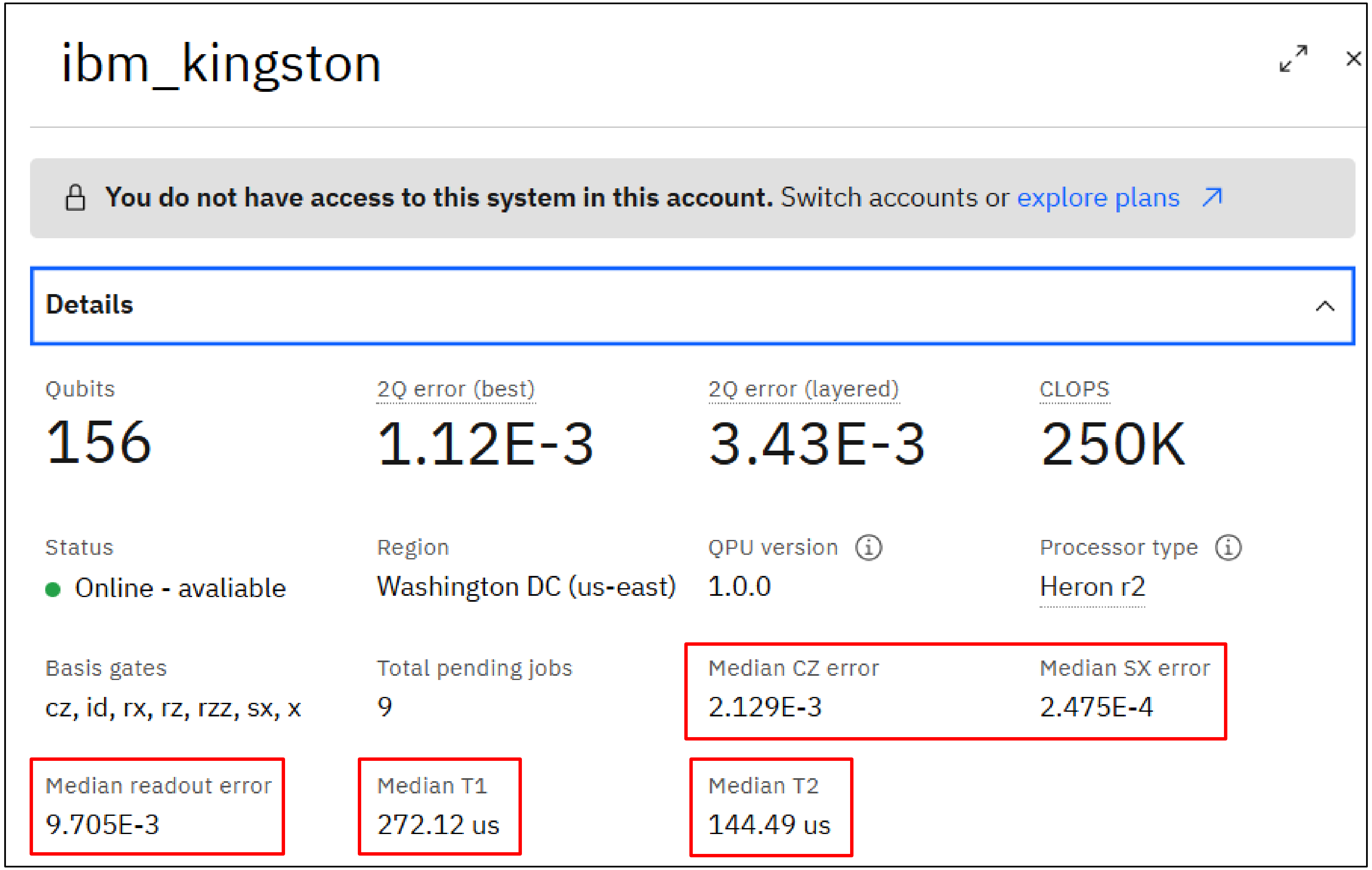
共振器の周波数は量子ビットの状態によってわずかにシフトする

$|0\rangle, |1\rangle$ plot on IQ plane



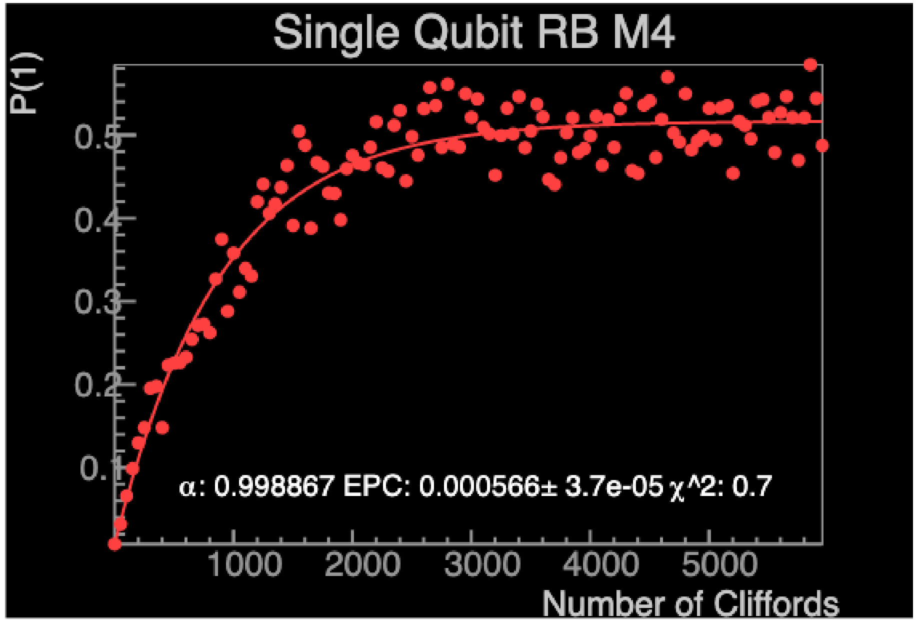
Ref. Qiskit Textbook 6.4 Circuit Quantum Electrodynamics

IBM quantum platformから確認できます。
[Compute resources | IBM Quantum Platform]

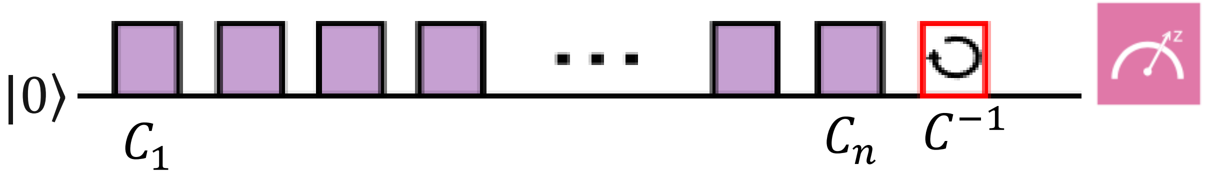


Gate error - ゲート1回あたりの平均誤差率

Randomized Benchmarking(RB)：
- ゲート誤差を定量的に評価
- １量子ビットの RB → 1Q gate error, SX error
- ２量子ビットのRB → ECR error



シーケンス構成: Cliffordゲート N コ適用 → 逆操作 → 測定
- C_i：ランダムに選ばれたCliffordゲート
- C^{-1} ：逆操作。全体の操作を打ち消すために適用。
- 最終的に基底状態に戻る確率を測定
- シーケンスの長さを変化させ、忠実度(元に戻った確率)の減衰を指数関数でフィッティングして、Error Per Clifford(EPC)を算出

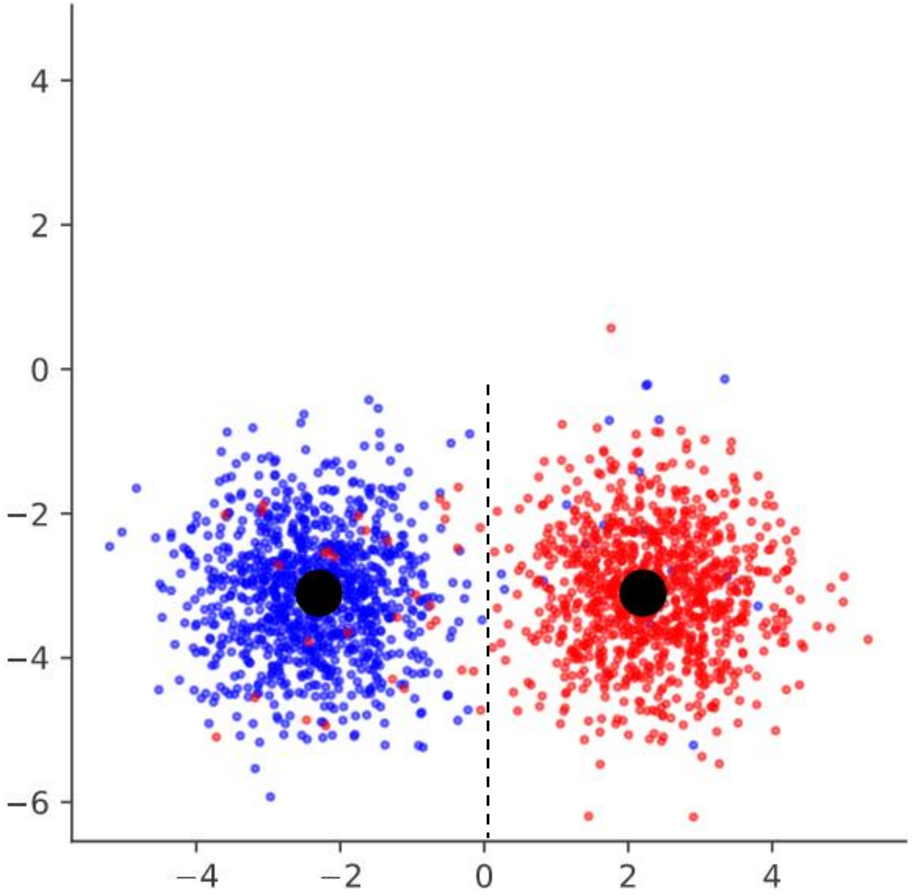


Magesan et al., PRL 106, 180504 (2011)

Readout error - 測定時の誤差率

- 量子ビットの状態(0または1)を測定する際に生じる誤差
- 測定結果はIQ平面にプロットすると状態を識別できる

- 測定前の誤差と測定時のReadout Errorは分離が難しい
- できるだけ小さく抑えることが重要



青：何せずに測定
赤：π回転してから測定

緩和時間(T1): エネルギーの散逸

緩和時間：量子ビットが励起状態$|1\rangle$ から基底状態$|0\rangle$へ自然に戻る(＝エネルギーが散逸する)までの時間

主な原因：

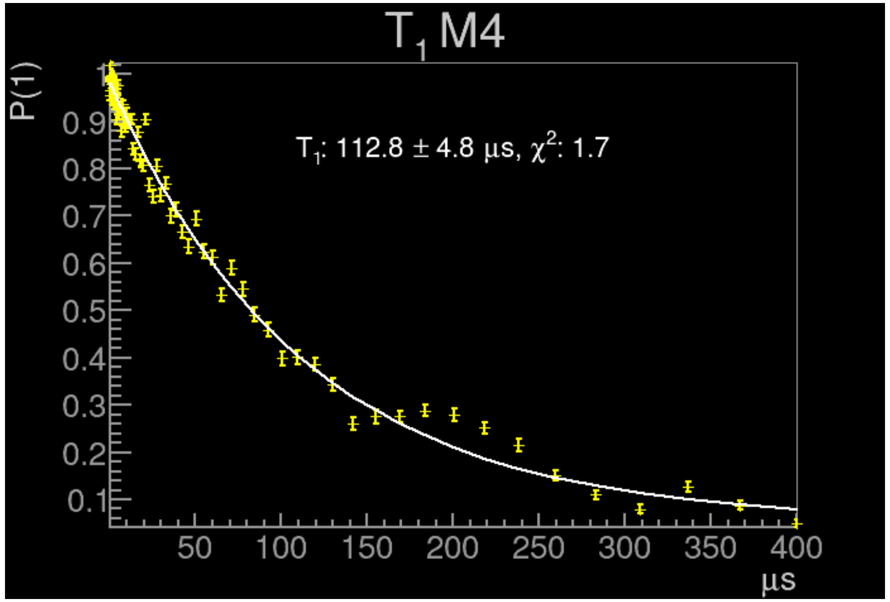
- 電磁環境による自発的なエネルギー放出
- 材料中の二準位系との結合
- 超伝導内の準粒子や磁束渦

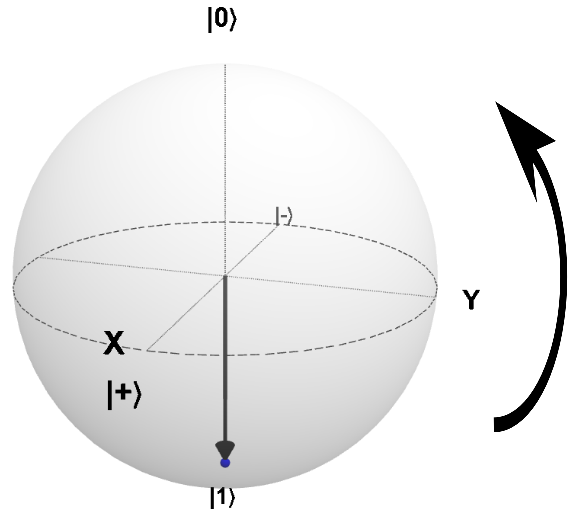
測定方法：

- **「量子ビットをπ回転で励起」→「待機」→「測定」**
- 待機時間を変化させながら基底状態に戻る確率を算出

誤差率：

$$1 - e^{-\frac{t}{T_1}}$$





コヒーレンス時間(T2): 位相緩和

コヒーレンス時間：量子ビットが重ね合わせ状態を維持できる時間

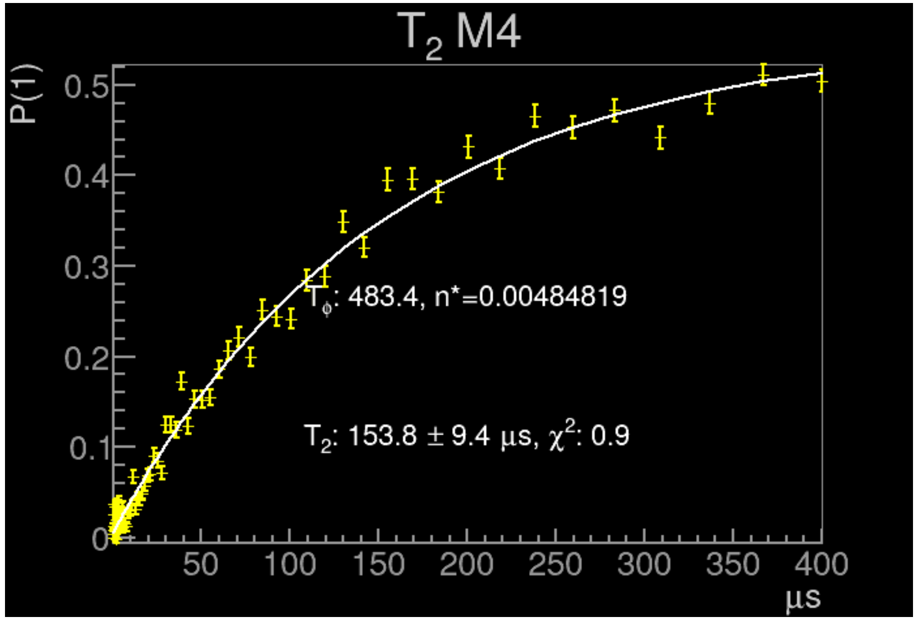
- 外部ノイズ（磁場・熱ゆらぎなど）により、量子状態の位相情報が失われる
- 状態が「量子的」から「古典的」へ崩れていく
- エネルギー緩和時間(T_1)と純粋な位相緩和時間(T_Φ)に依存

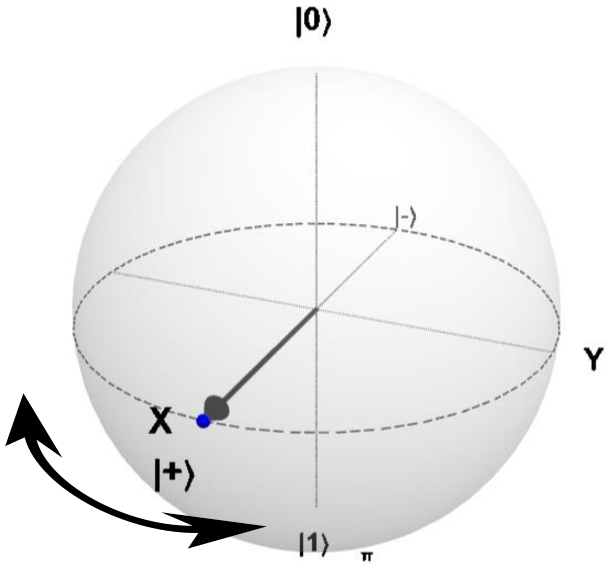
式：$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{2T_1} + \frac{1}{T_\phi}$

測定方法：

$\frac{\pi}{2}$**回転** $\rightarrow$ **待機** $\rightarrow$ π**回転** $\rightarrow$ **待機** $\rightarrow$ $\frac{\pi}{2}$**回転** $\rightarrow$ **測定**

誤差率：$1 - e^{-\frac{t}{T_2}}$





最後に：もっと勉強したい方へ

Search ⌘ + K

Quantum Tokyo へようこそ

学習コンテンツ

- Qiskit の始め方
- IBM Quantum Plaform 教材日本語訳
- IBM Research Blog 日本語版
- (旧) Qiskitテキストブック 日本語版
- (旧)Qiskitテキストブック (Qiskitコース) 日本語版
- (旧) Qiskitドキュメント・チュートリアル 日本語版リンク集
- IBM Quantum Challenge
- Qiskit Global Summer School（Qiskit夏の学校）資料 日本語版

ユーティリティー・スケール量子コンピューティング

概要

このイベント・リプレイ・コースは、IBM Quantum®が東京大学と共同で開発し実施した14のLessonとLabで構成されています。このコースでは、量子コンピューティングにおける幅広い重要なトピックを網羅しつつ、実用規模（ユーティリティー・スケール）の量子計算を構築することに重点を置いています。最終的な結果として、2023年6月にNature誌の表紙を飾った論文と非常によく似た課題を扱います。

1. はじめに
2. 量子ビット・量子ゲート・量子回路
3. 量子テレポーテーション
4. グローバーのアルゴリズム
5. 量子位相推定
6. 量子変分アルゴリズム
7. 量子系のシミュレーション
8. 古典計算によるシミュレーション
9. 量子ハードウェア
10. 量子回路の最適化
11. 量子エラー緩和
12. 量子ユーティリティーの実験 I
13. 量子ユーティリティーの実験 II
14. 量子ユーティリティーの実験 III

https://quantum-tokyo.github.io/introduction/courses/utility-scale-quantum-computing/overview-ja.html

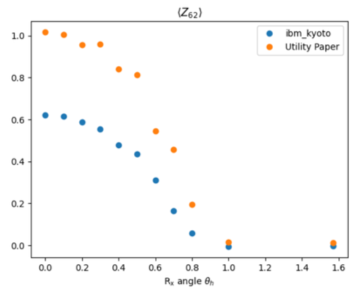
IBM Quantum Learning
「Utility-scale quantum computing」の日本語解説

元のコース：https://quantum.cloud.ibm.com/learning/en/courses/utility-scale-quantum-computing

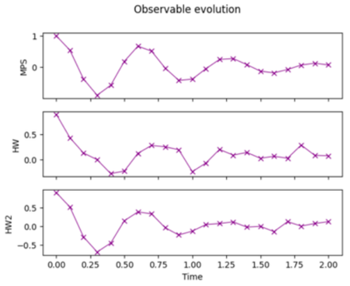
1. はじめに (飛ばします)
2. 量子ビット・量子ゲート・量子回路 (7/7(月))
3. 量子テレポーテーション (7/16(水))
4. グローバーのアルゴリズム (7/16(水))
5. 量子位相推定 (7/28(月))
6. 量子変分アルゴリズム (7/28(月))
7. 量子系のシミュレーション(8/22(金))
8. 古典計算によるシミュレーション
9. **量子ハードウェア**
10. 量子回路の最適化
11. 量子エラー緩和
12. 量子ユーティリティーの実験 I
13. 量子ユーティリティーの実験 II
14. 量子ユーティリティーの実験 III

今回のJupyter notebookの和訳：
https://quantum-tokyo.github.io/introduction/courses/utility-scale-quantum-computing/quantum-simulation-ja.html

I. Nature paper
(127 qubits x 60 entangling gates)



II. 1D Transverse Ising model
(70 qubits x 80 entangling gates)



III. The largest GHZ state challenge