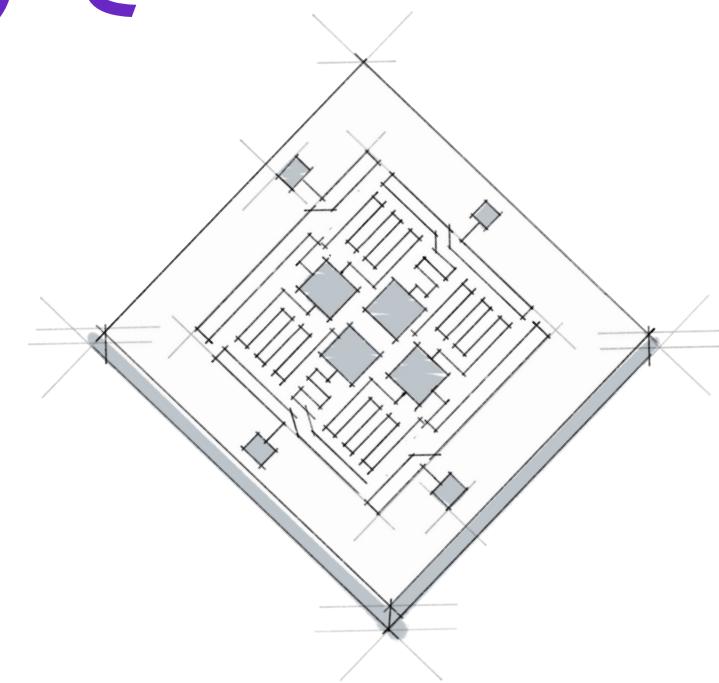


量子コンピューターの実現にむけて ハードウェア研究の飽くなき挑戦！

～量子ハードウェア入門（量子チップ編）

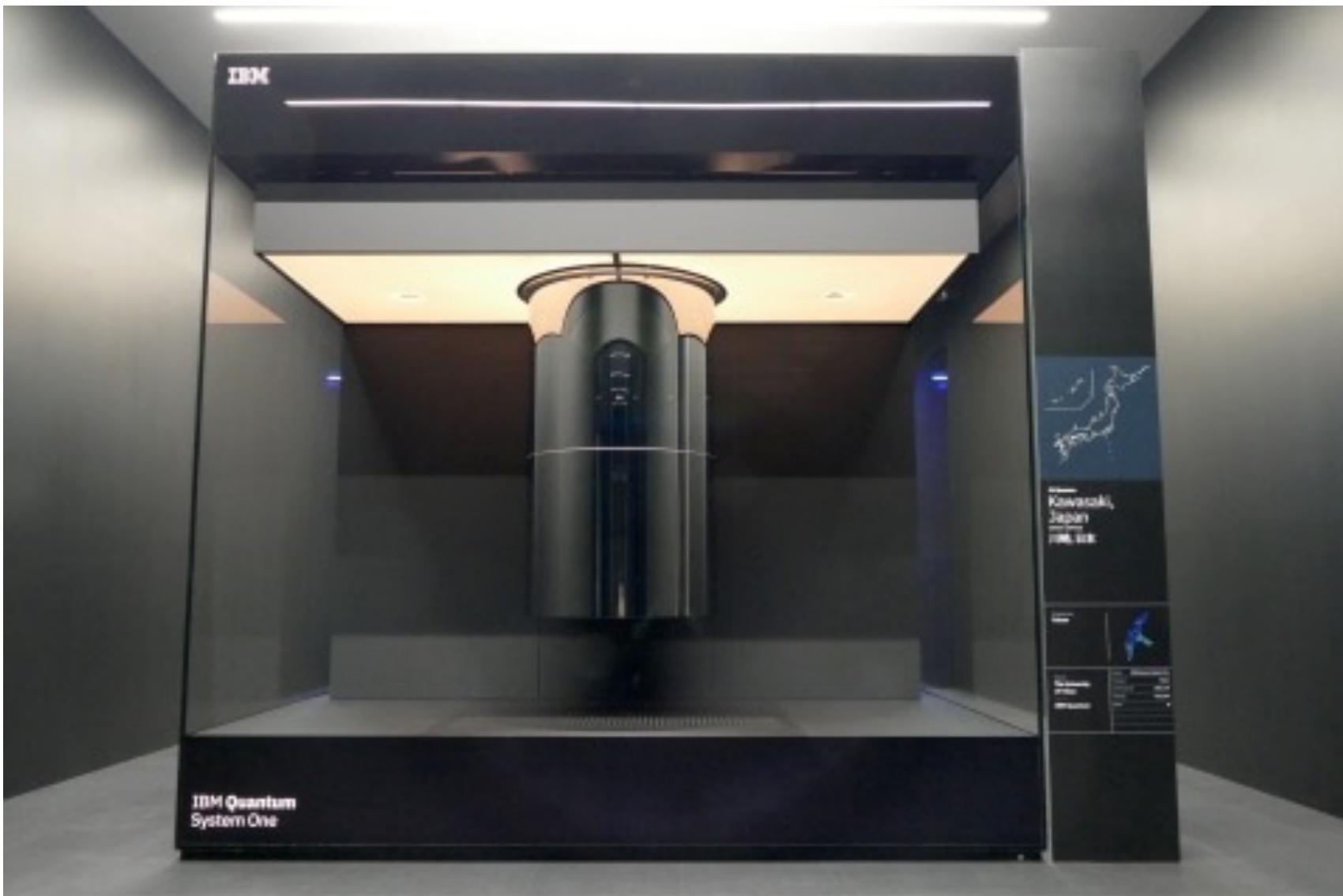
IBM Quantum

Masao Tokunari | 德成 正雄



実機見学はいかがでしたか？

IBM Quantum



もくじ

IBM Quantum

- 量子コンピューターのハードウェア
- 量子コンピューター5つの要件
- 要件クリアにむけての挑戦

回路量子電磁力学(Circuit QED)について

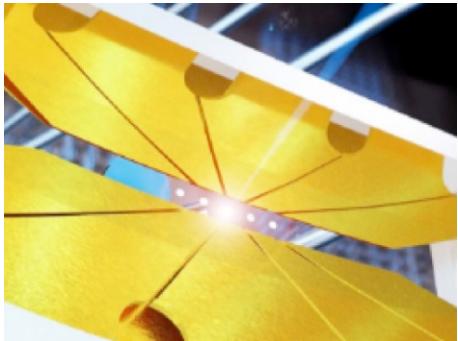
量子力学の特徴を共振器回路など電気回路に基づく電磁力学で実現する学問を「回路量子電磁力学(Circuit QED)」と呼びます。

今回の授業では前提知識として必要な数学・物理は極力省きますが、本来は大学・大学院レベル以降の学問ですので、難しく感じたとしても落ち込むことはありません。

興味のある人はぜひ自分で調べて勉強してみてください！

様々な量子コンピューター技術

イオン



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

光

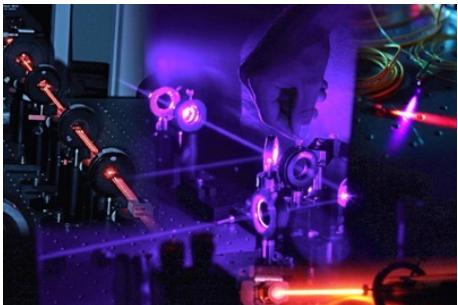
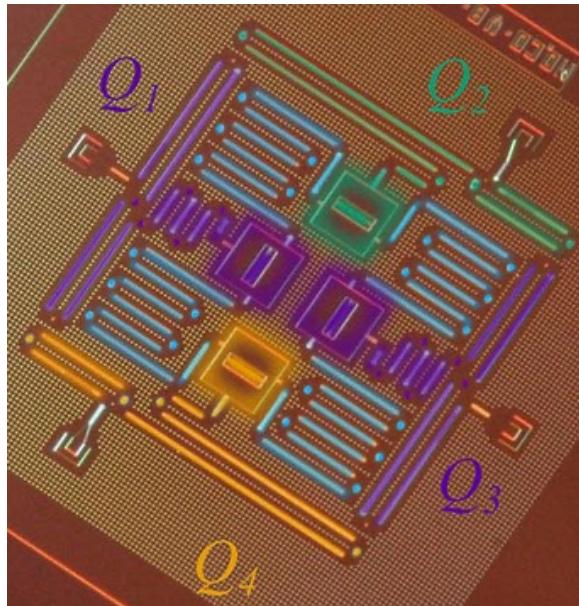


Image from the Centre for
Quantum Computation &
Communication Technology

超伝導回路



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

中性原子

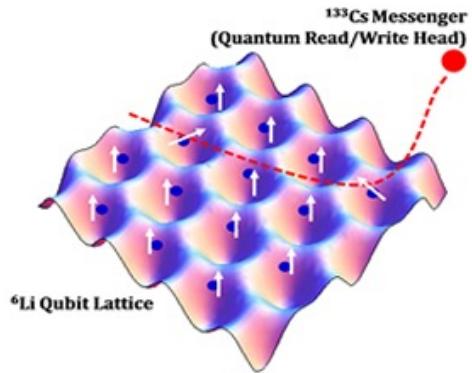


Image from Cheng Group,
University of Chicago

固体欠陥

(ダイヤモンドNVセンター, Si中のリン)

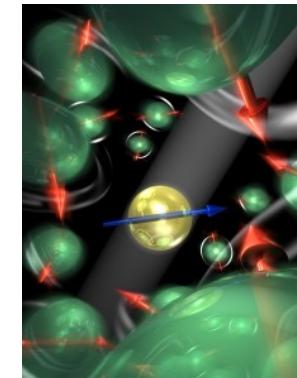


Image from Hanson Group, Delft

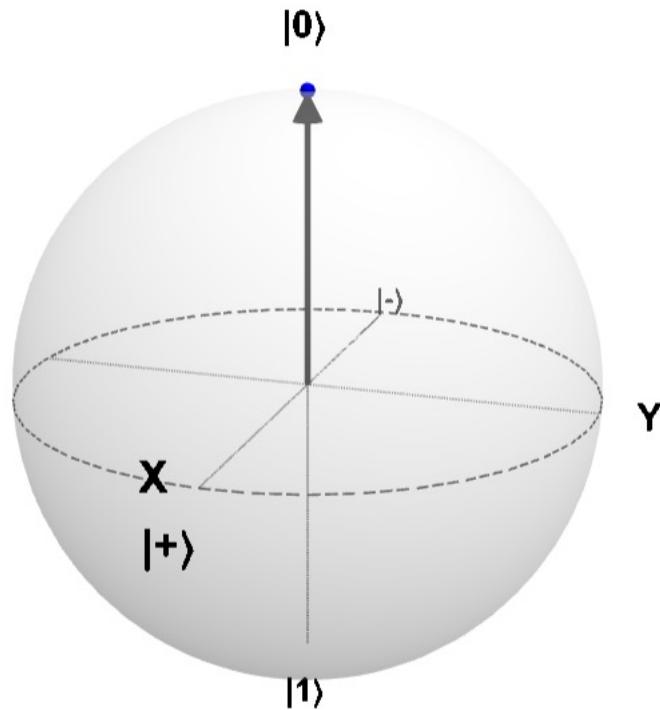
量子ビット：理想

エネルギー準位

|1>

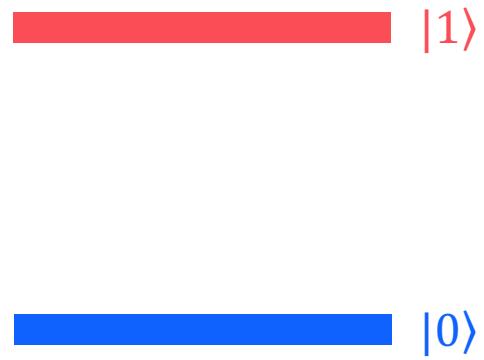
|0>

プロッホ球

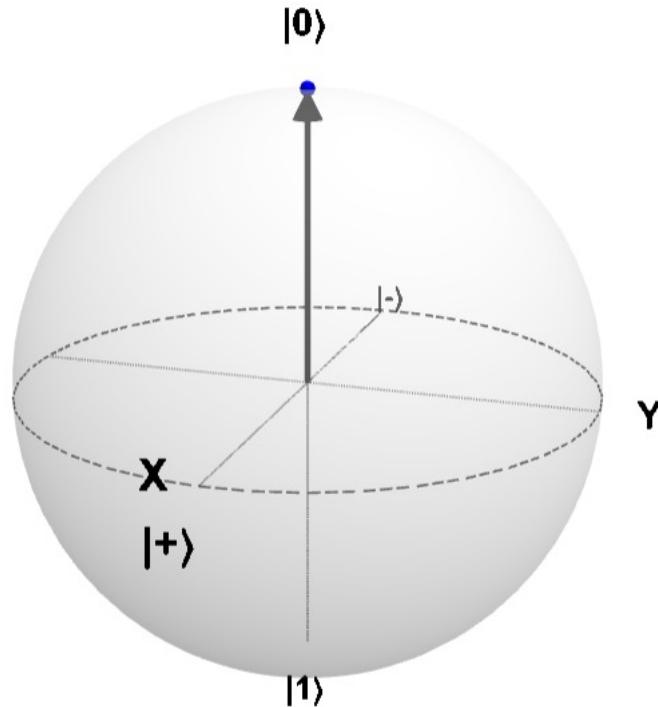


量子ビット：理想と現実

エネルギー準位

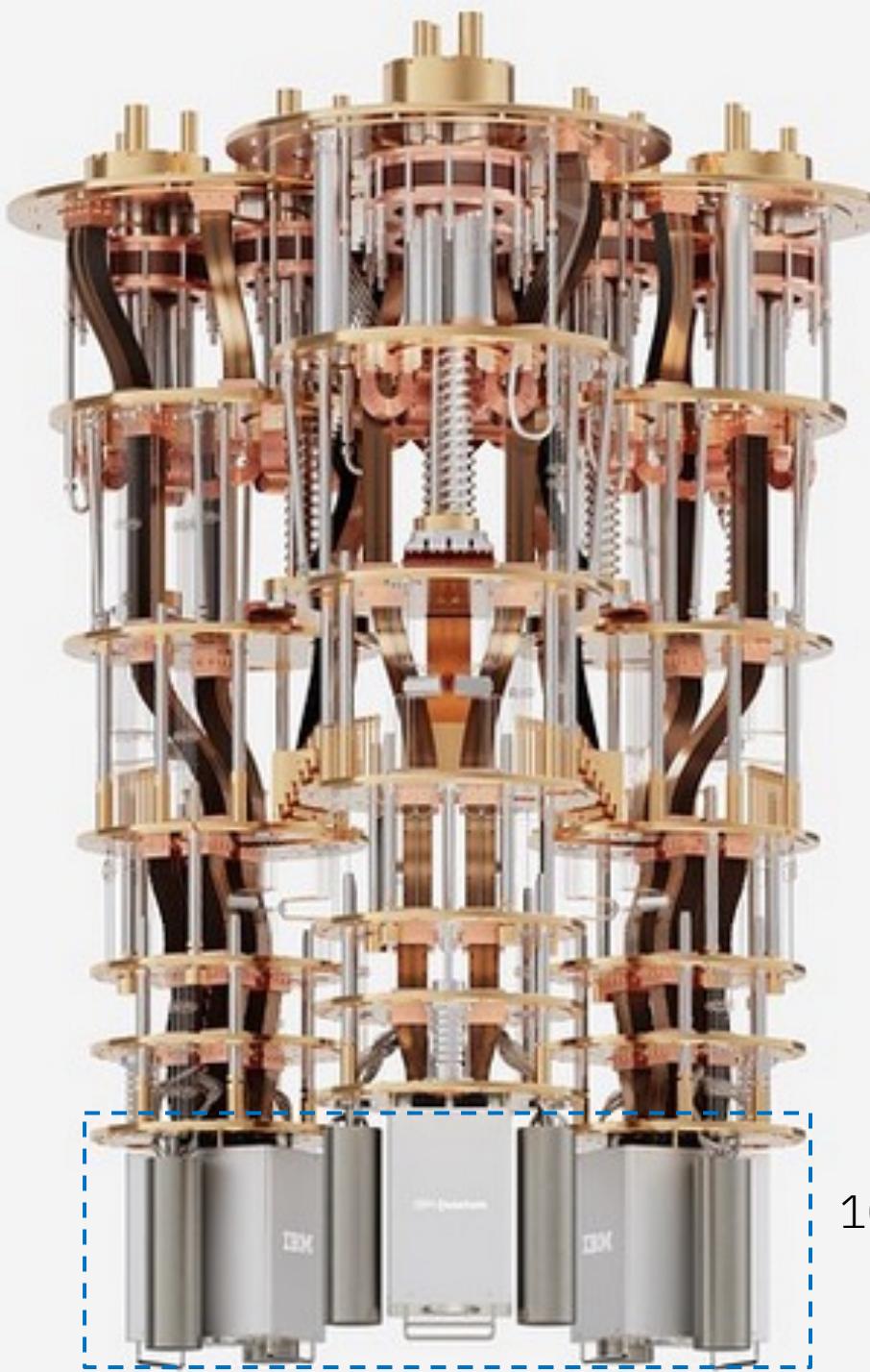


ブロッホ球



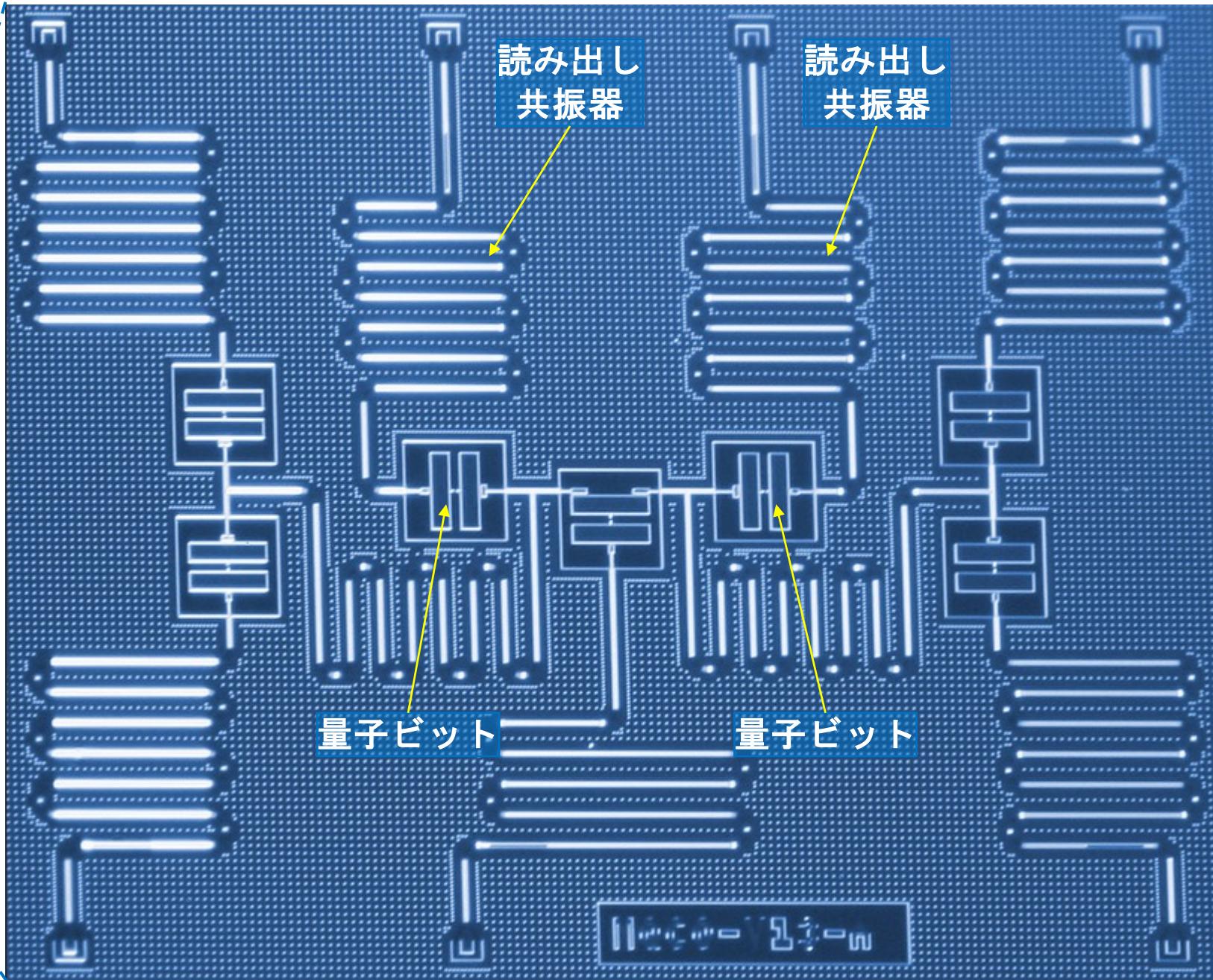
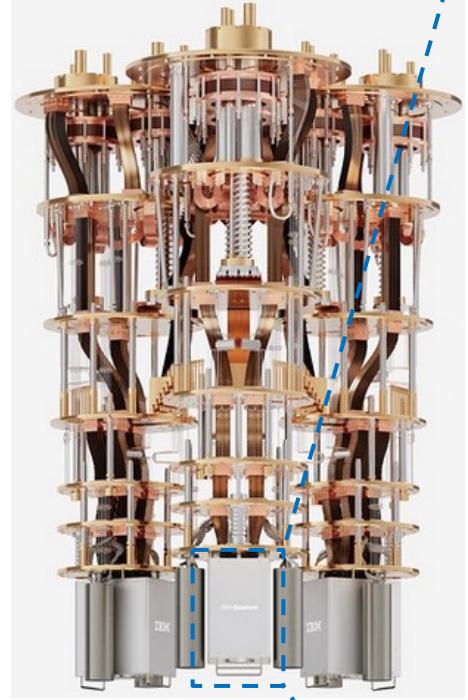
現実の量子コンピューター





10mKで動作する希釈冷凍機

量子チップ：超伝導回路



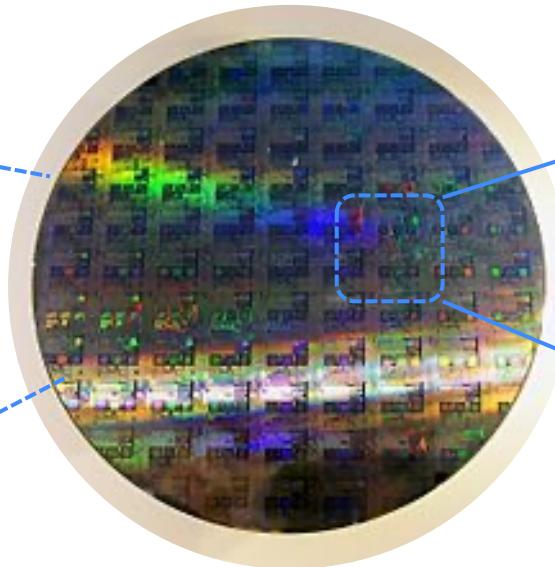
超伝導量子チップはどこからできている？

IBM Quantum

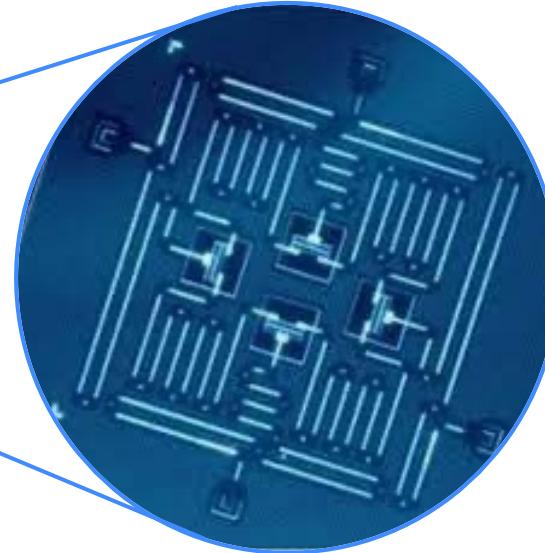
シリコン (Si)



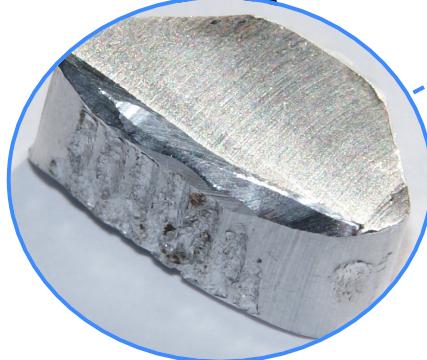
シリコンウェハー
(半導体基板)



量子チップ



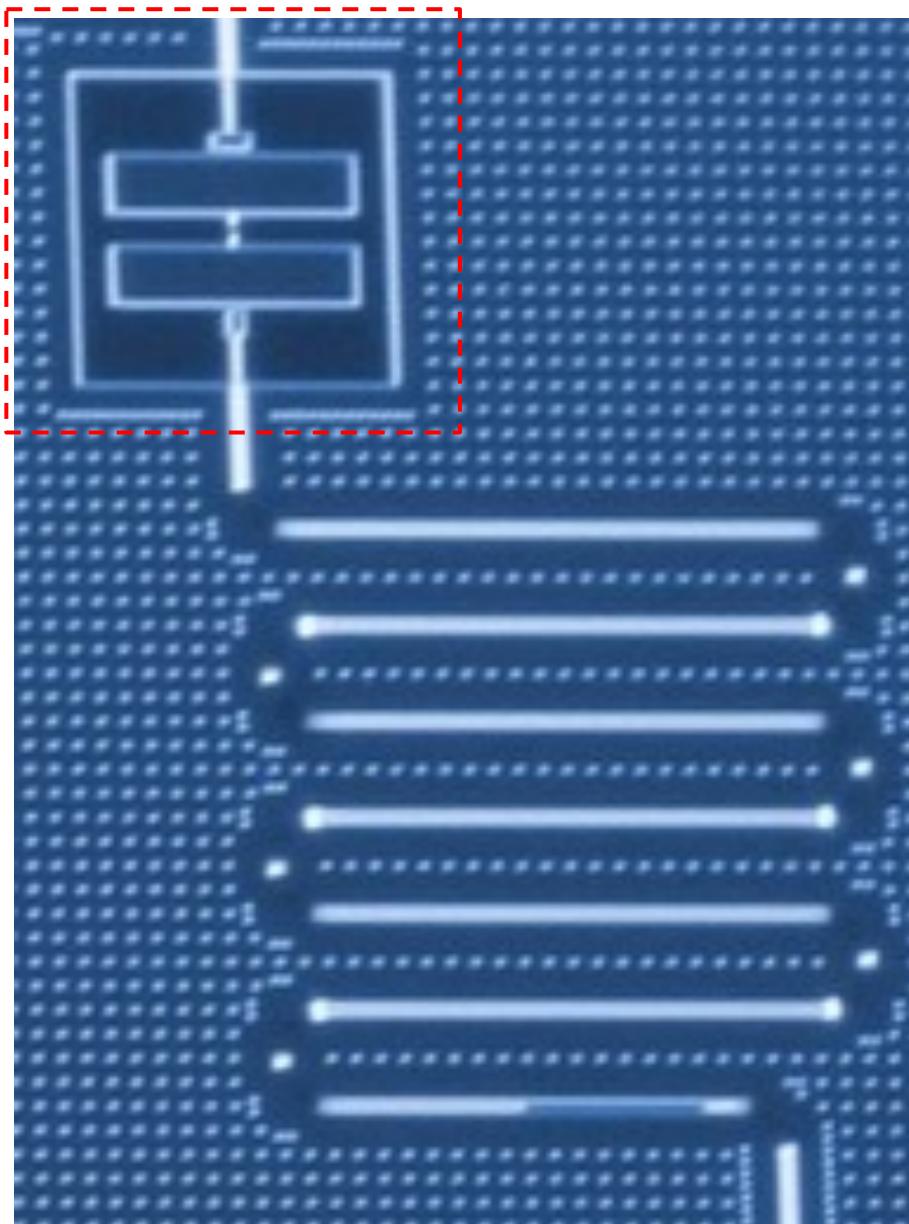
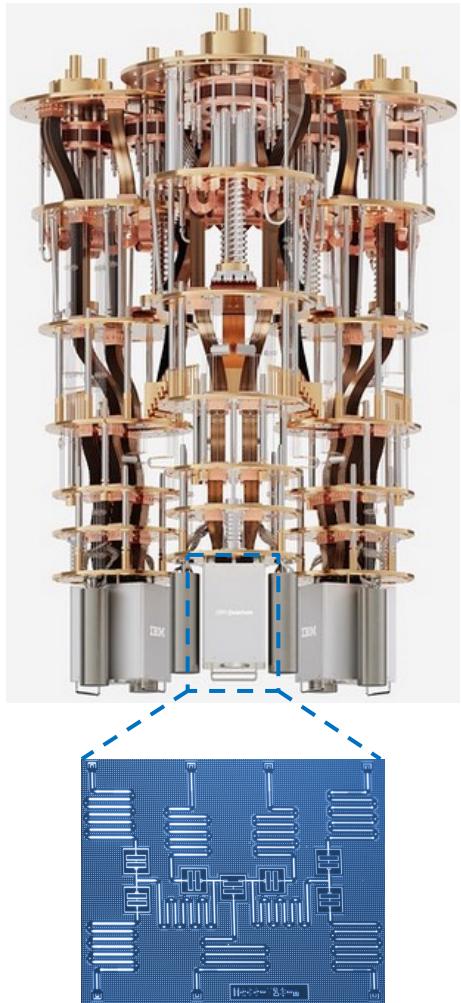
アルミニウム
(Cu)



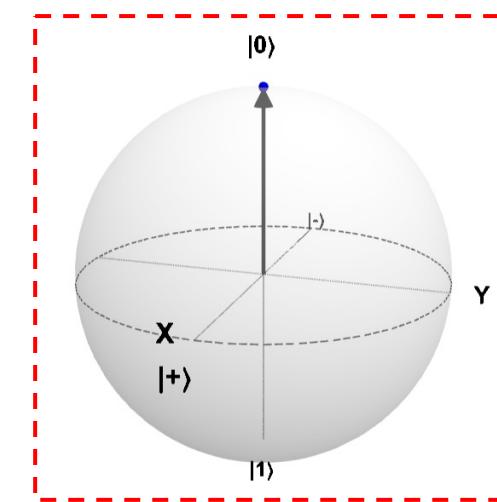
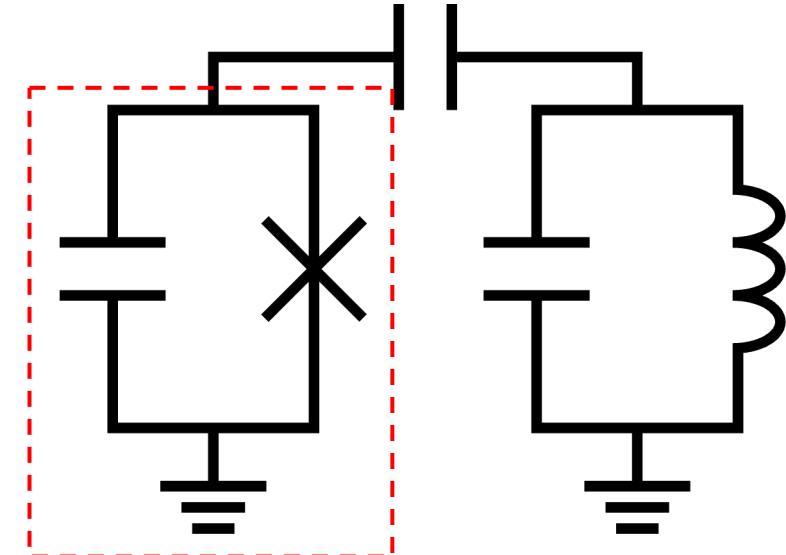
~30 cm

~5 mm

量子ビットと読み出し共振器



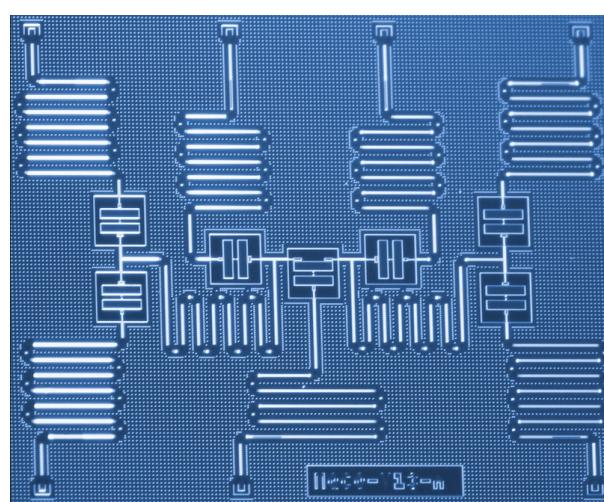
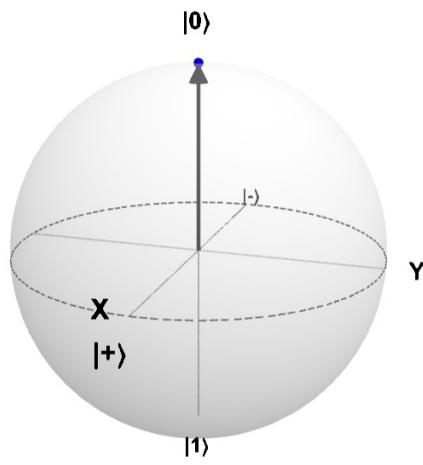
等価回路



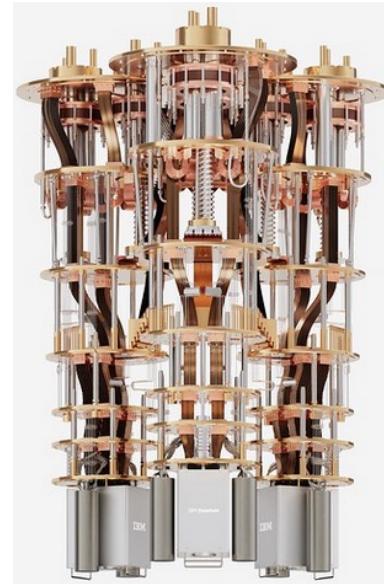
量子計算の流れ



制御
↔
読み出し

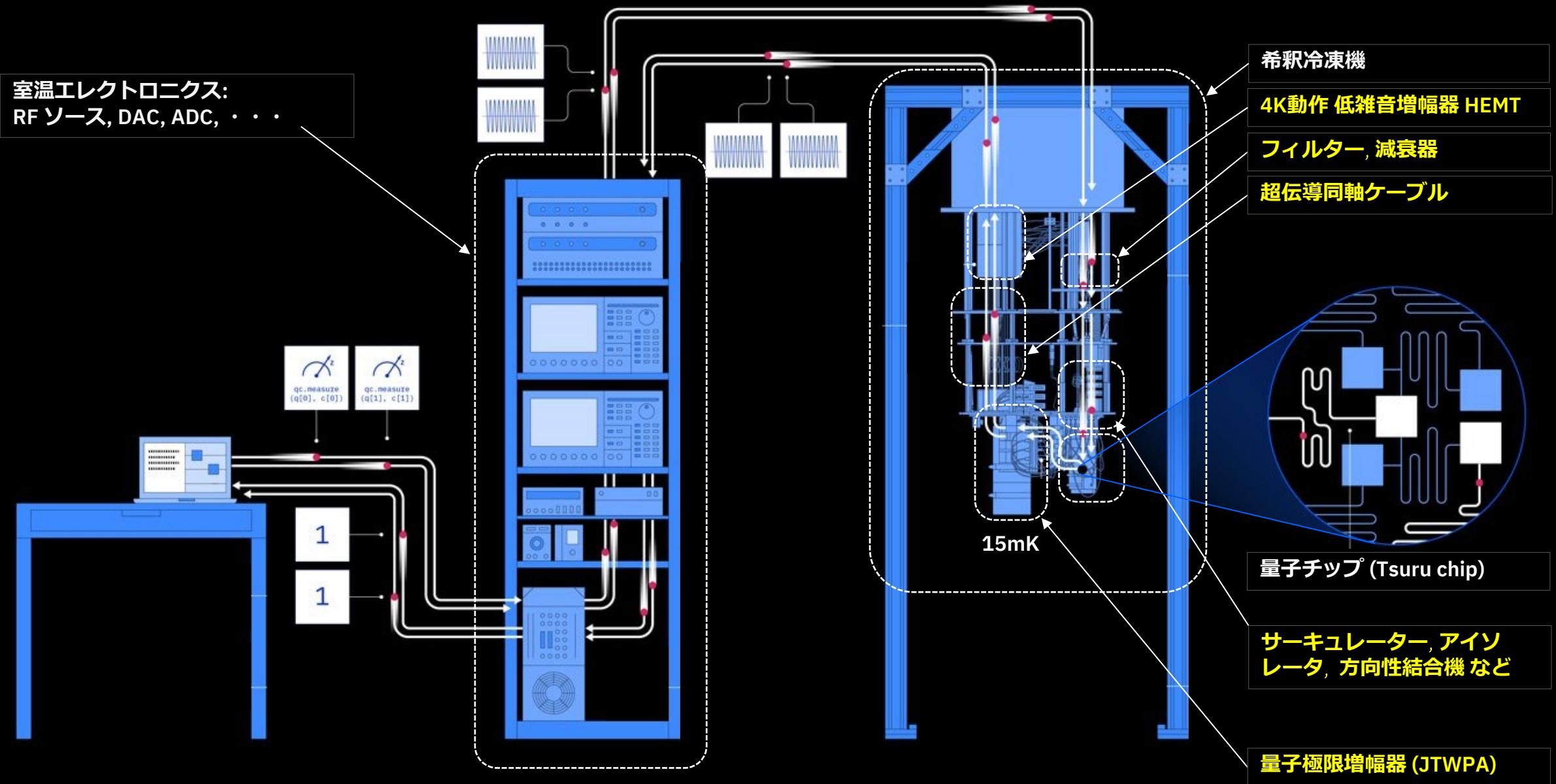


↔



超伝導量子コンピューターの概略構成

IBM Quantum



もくじ

IBM Quantum

- 量子コンピューターのハードウェア
- 量子コンピューター5つの要件
- 要件クリアにむけての挑戦

量子コンピューターに課せられた要件とは？



量子コンピューター 5つの要件

IBM Quantum

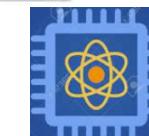
- ① 量子ビットが $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態がとれて連結してつかえること



- ② 初期化可能：繰り返し同じ状態を用意できること



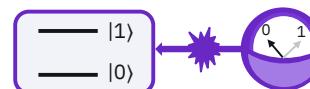
- ③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



- ④ 様々な種類の量子ゲートをつくれること



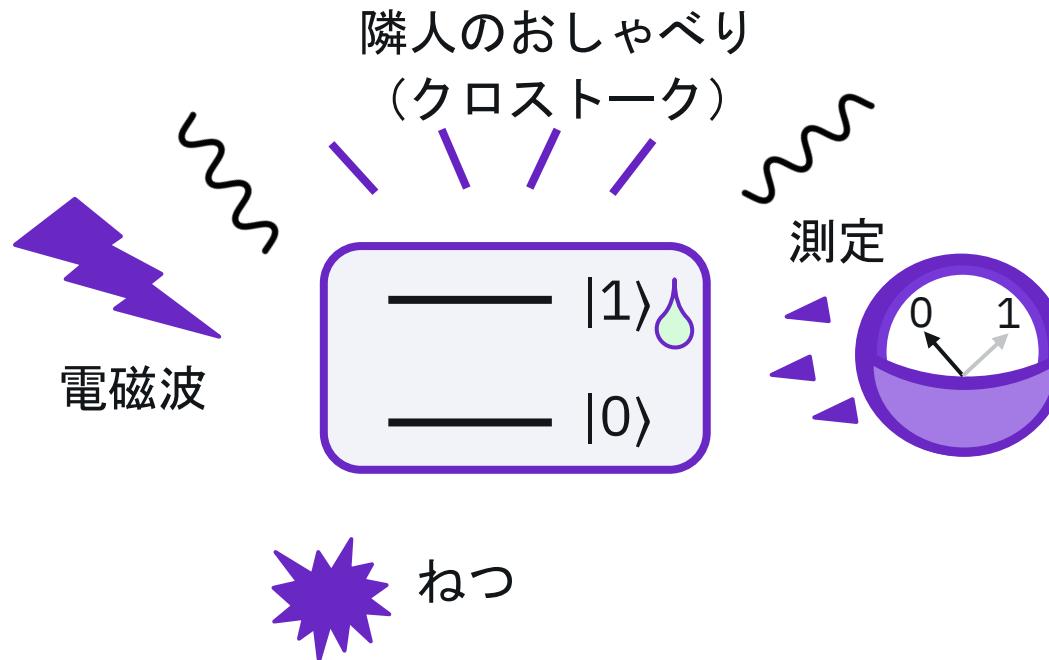
- ⑤ 効果的な測定ができること



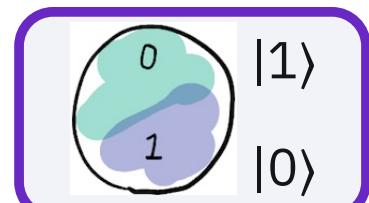
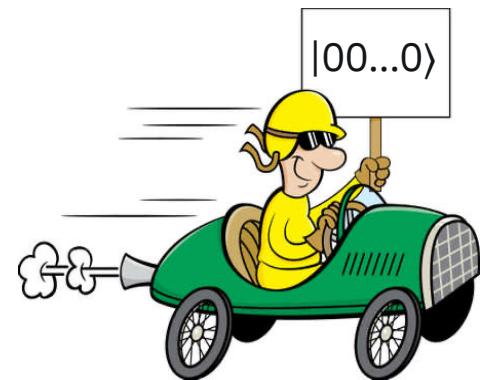
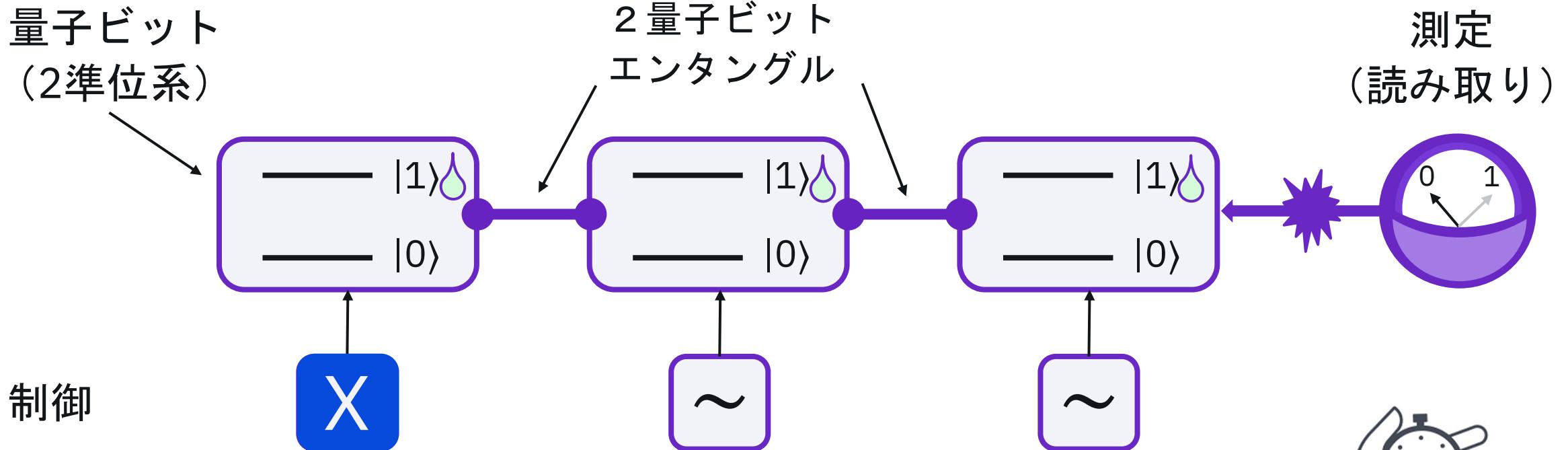
David DiVincenzo (デビット・ディヴィンченゾ) さんが
2000年(20年以上前)に量子コンピューターの基準*を提唱
*あと2つ基準があるが、量子通信にのみ当てはまる内容のため省略



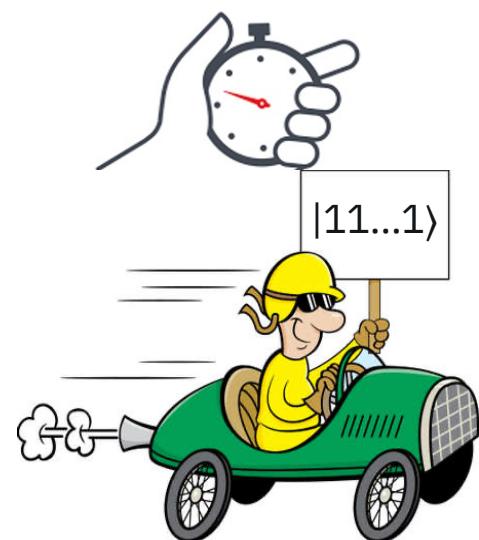
厄介な現実：量子ビットは纖細で環境の影響を受けやすい



5つの要件のクリアは簡単ではない



理想的な量子状態（コヒーレンス）



量子コンピューター 5つの要件

IBM Quantum

- ① 量子ビットが $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態がとれて連結してつかえること



- ② 初期化可能：繰り返し同じ状態を用意できること



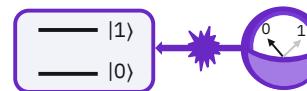
- ③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



- ④ 様々な種類の量子ゲートをつくれること



- ⑤ 効果的な測定ができること



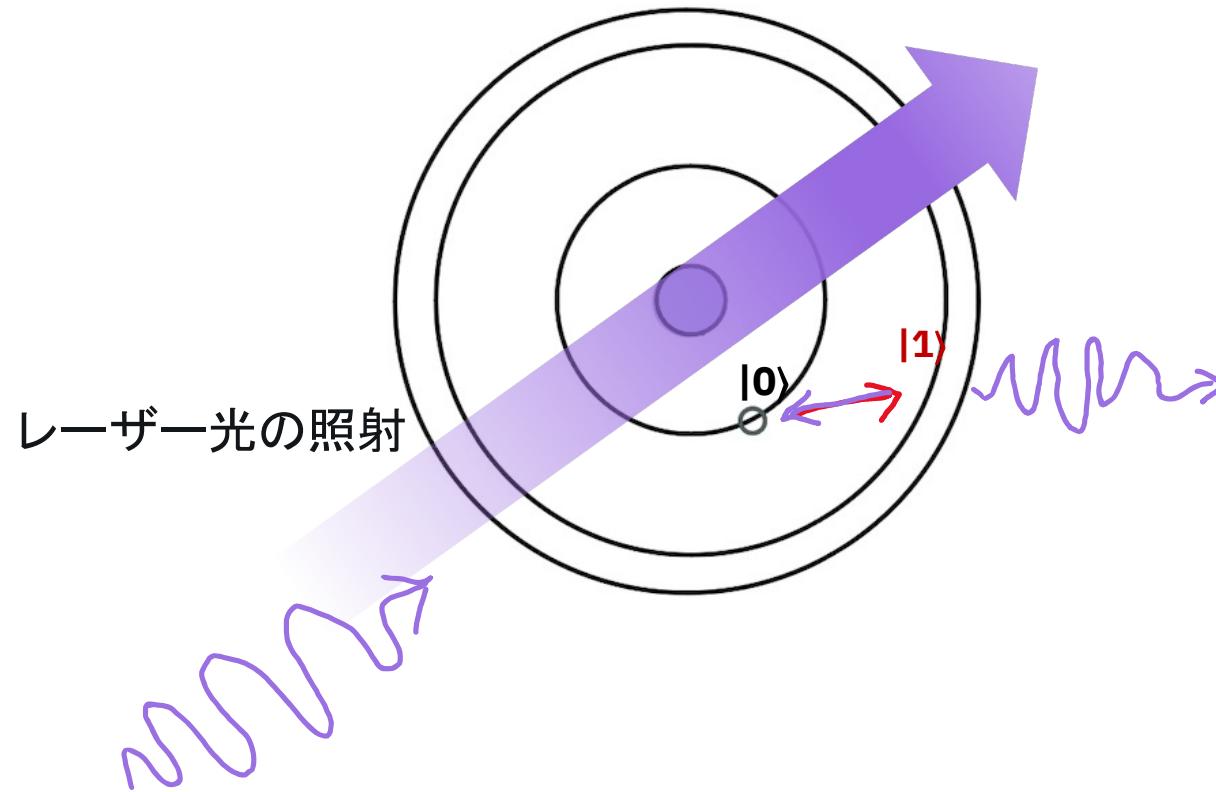
David DiVincenzo (デビット・ディヴィンченゾ) さんが
2000年(20年以上前)に量子コンピューターの基準*を提唱
*あと2つ基準があるが、量子通信にのみ当てはまる内容のため省略



要件 1 2 準位系($|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態) を用意する

どうやって用意する？

ヒント：自然界の原子



量子ビットの例：自然の原子

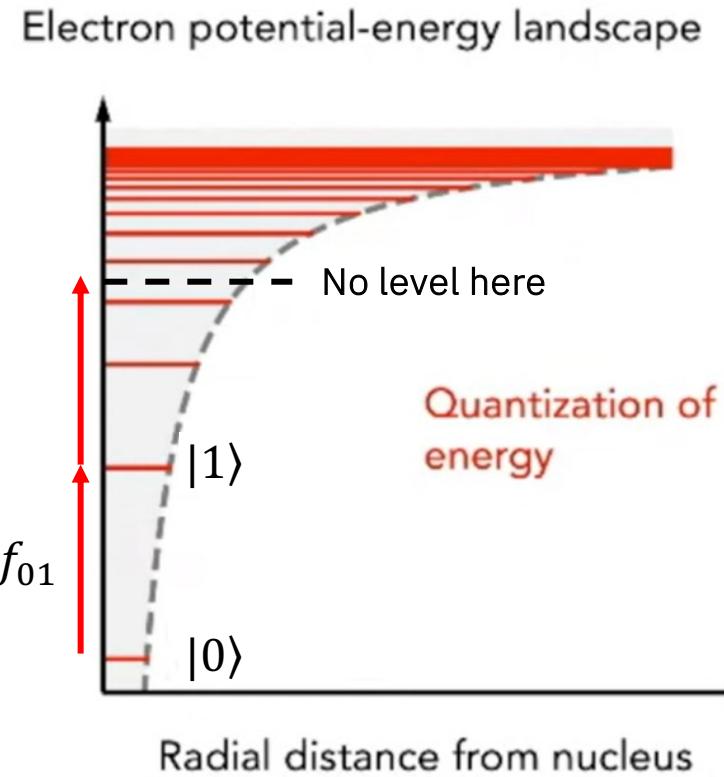
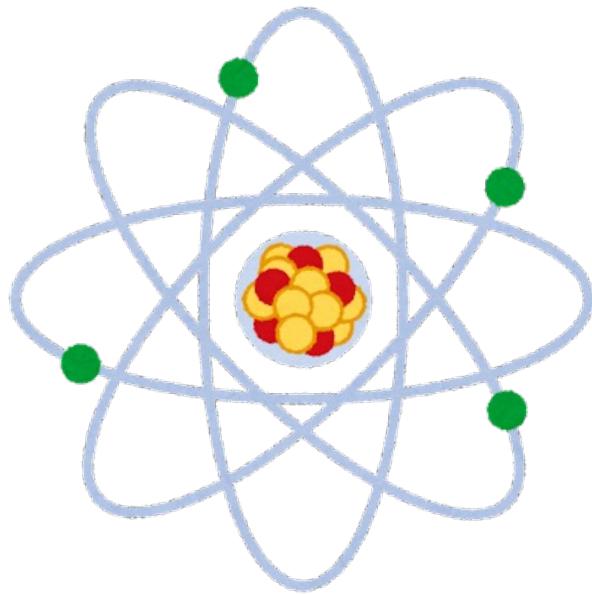


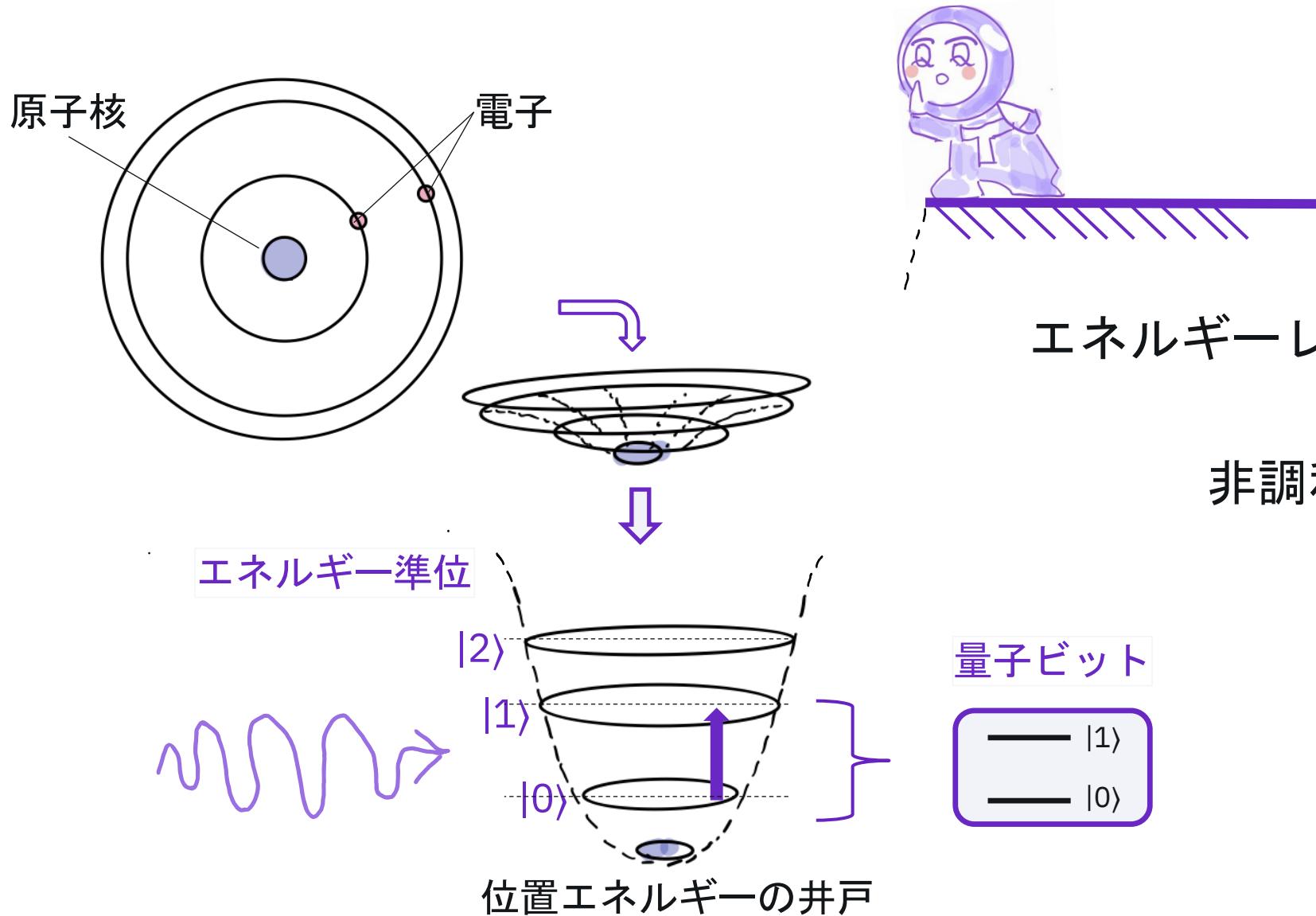
Image: Z. Minev, IBM, 2022

量子ビットのエネルギーレベル

- 離散的
- 複数準位（2準位でない）
- 等間隔でない
(非調和：アンハーモニック)

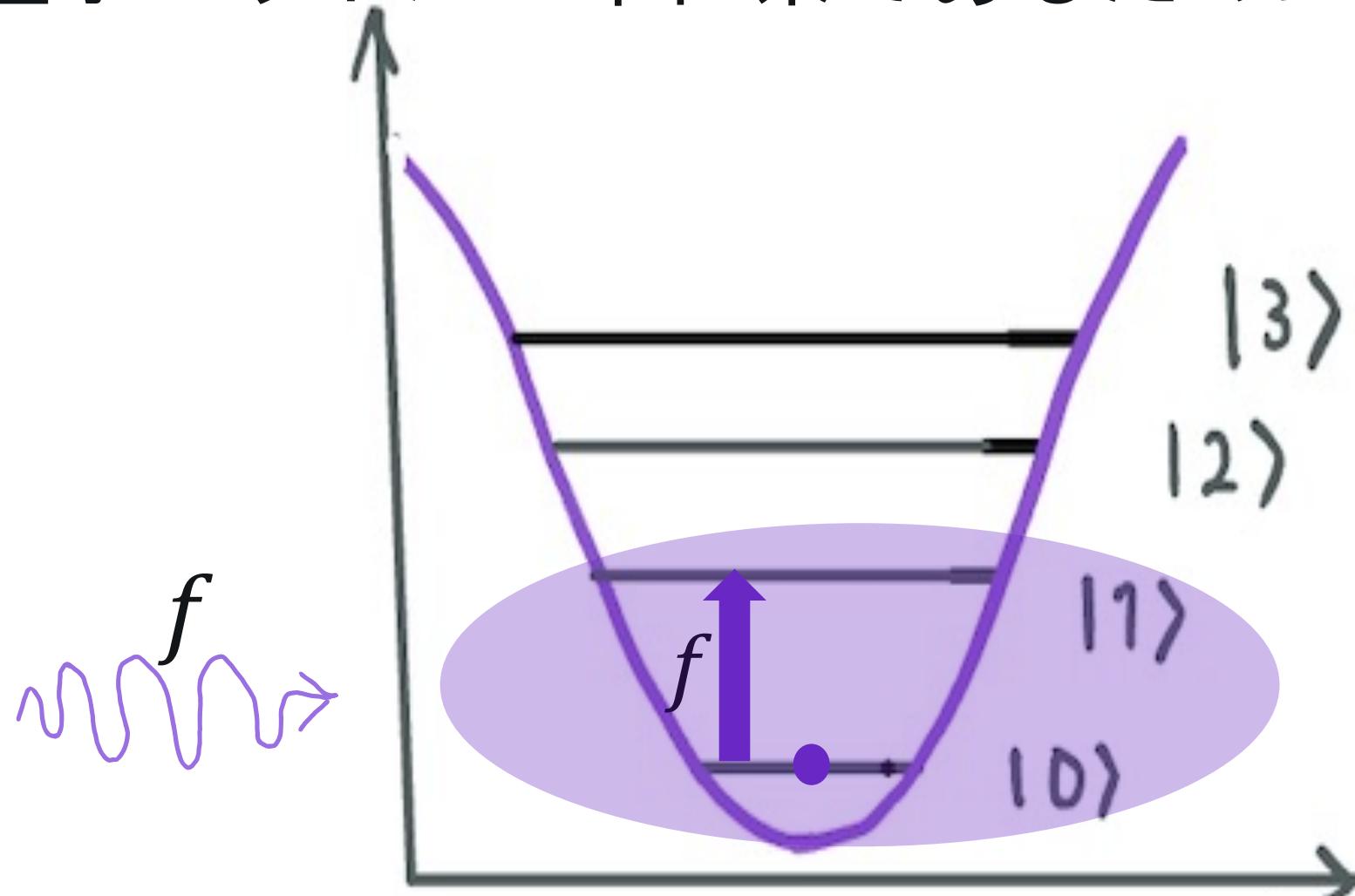
自然の原子は理想の量子ビットだった？

IBM Quantum



エネルギーレベルが等間隔ではない
||
非調和（アンハーモニック）

量子ビットが2準位系であるためには



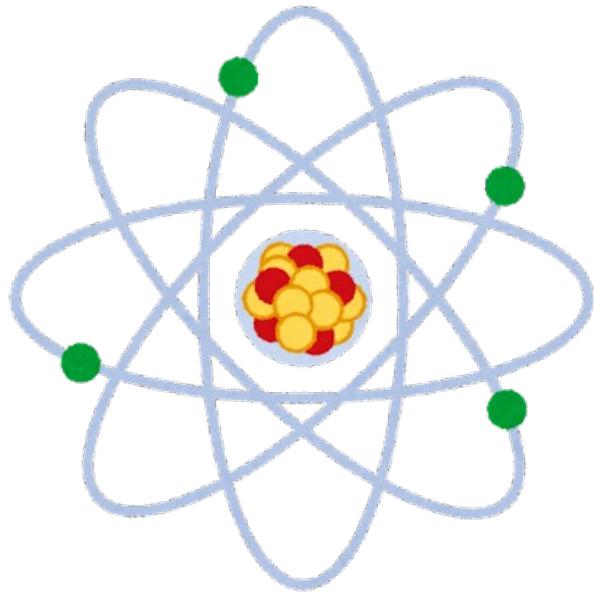
このなかだけでエネルギーが
行ったり来たりして欲しい

励起(れいき)
緩和(かんわ)

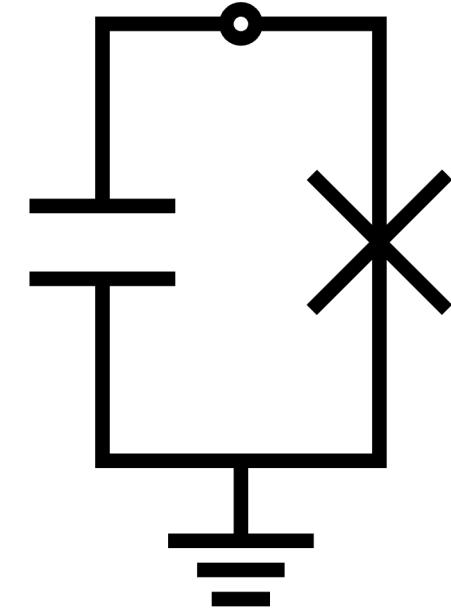
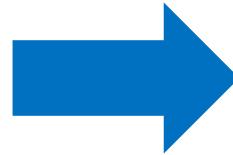
でも、自然の原子を制御する
のって大変よね？



自然の原子から人工原子（超伝導量子ビット）へ



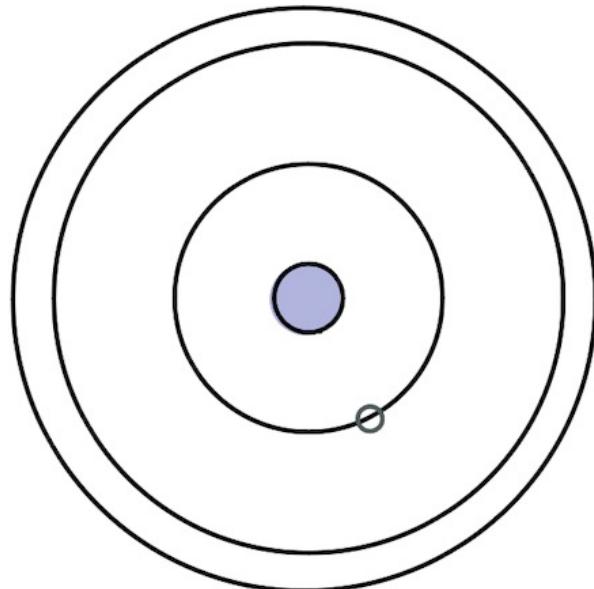
自然の原子



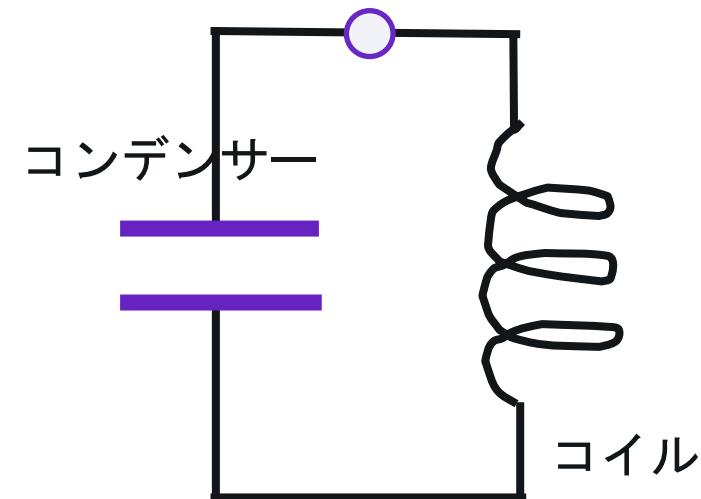
人工原子

電気回路でつくる人工の原子

IBM Quantum

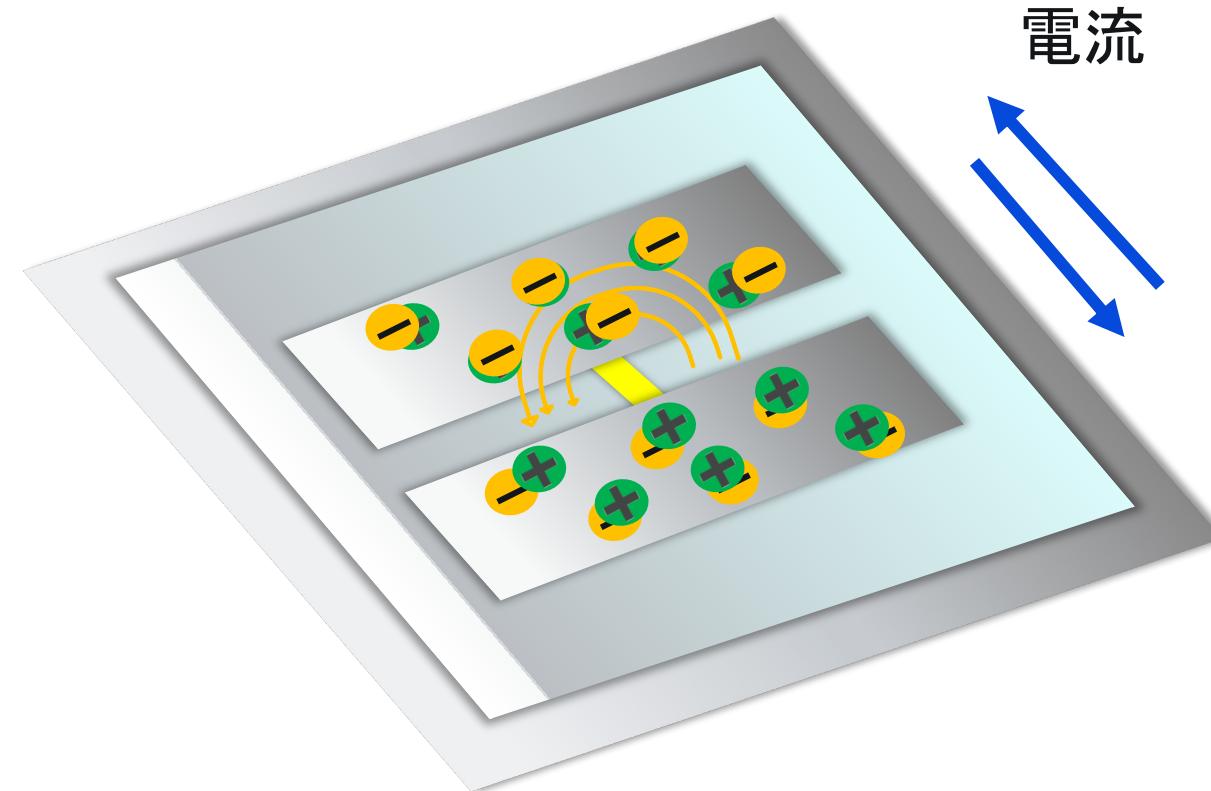
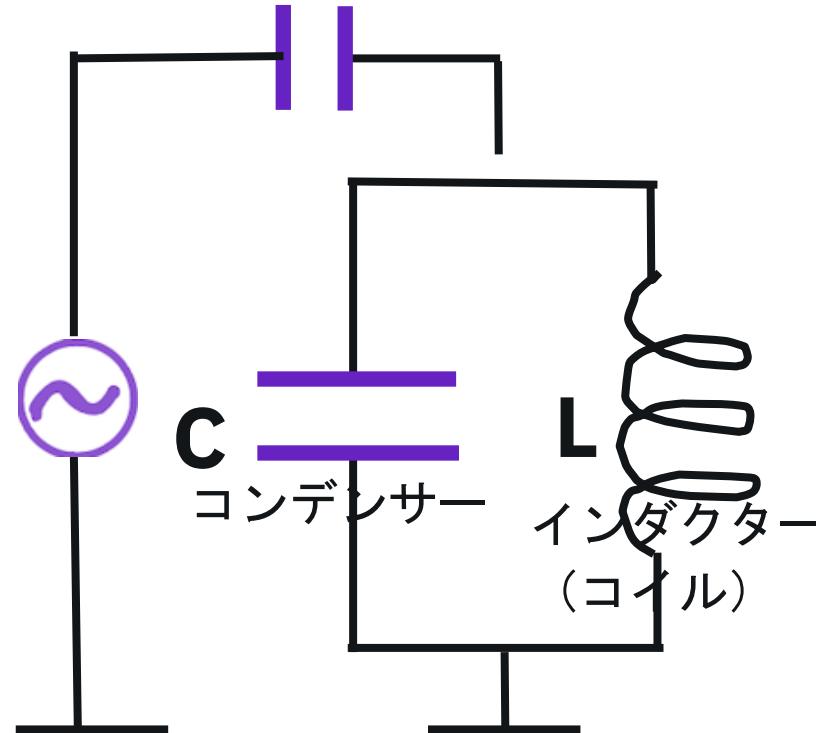


共振器（共振回路）
ともいいます！



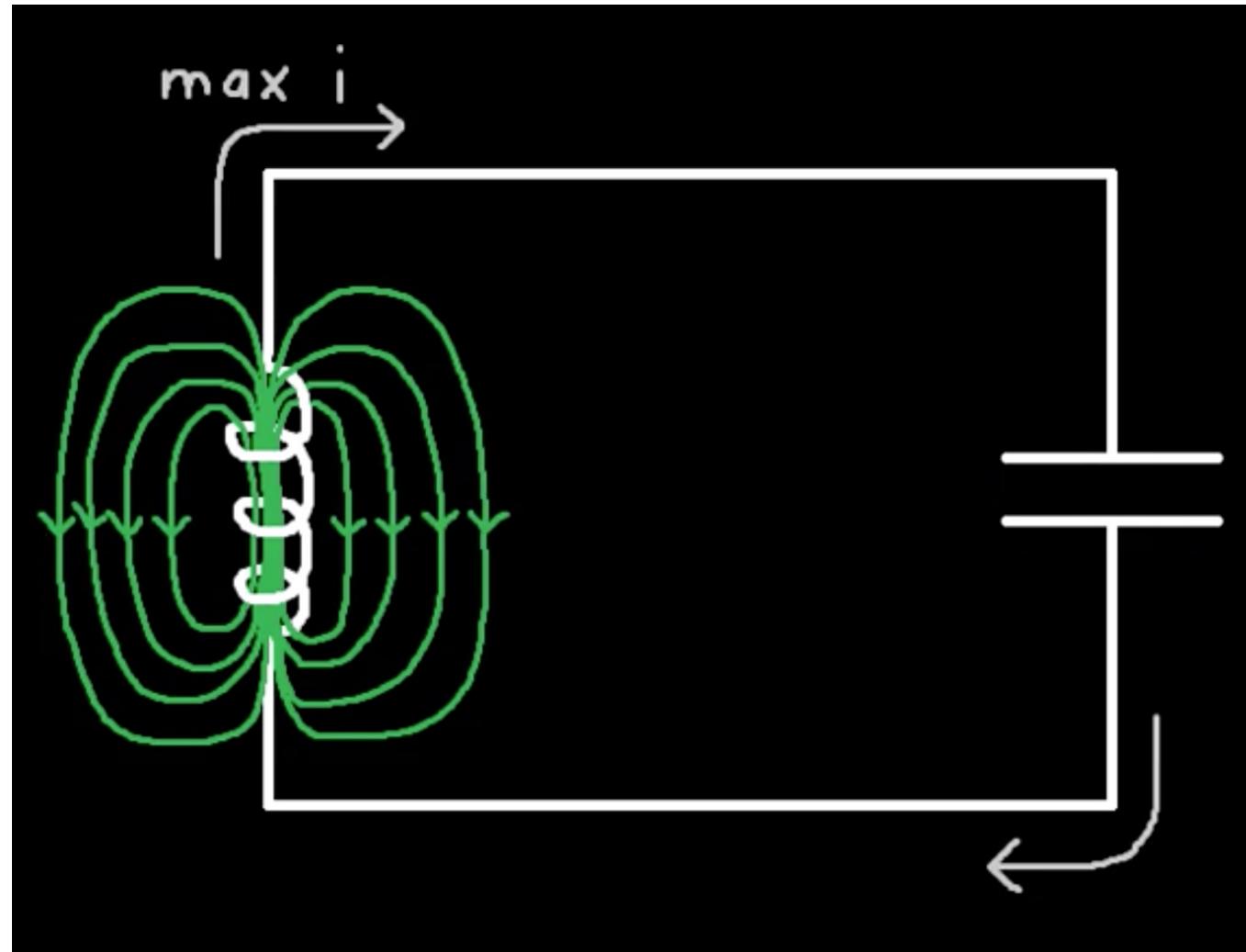
量子ビット回路の原型

IBM Quantum



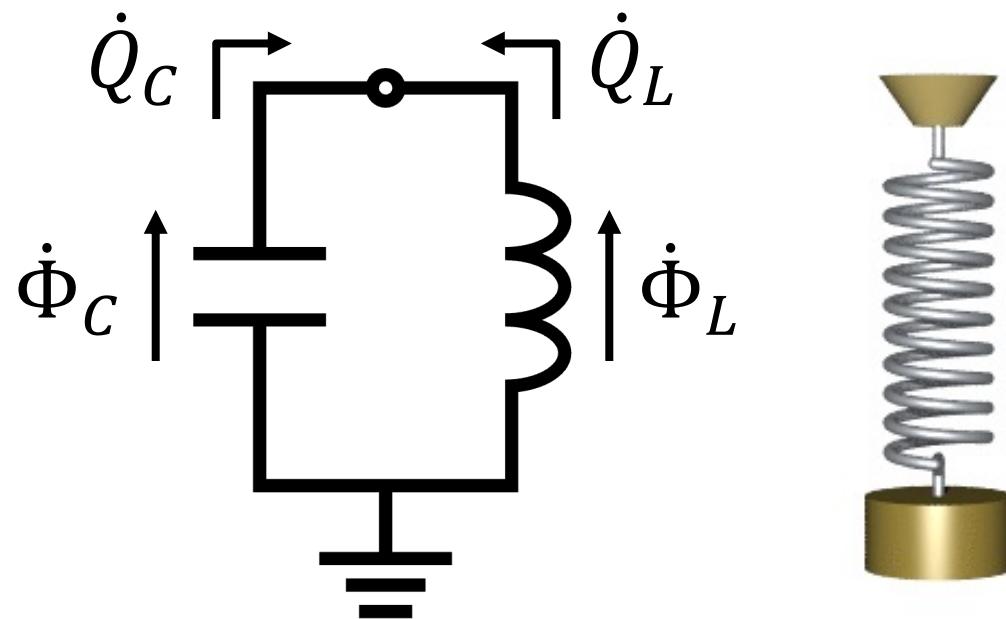
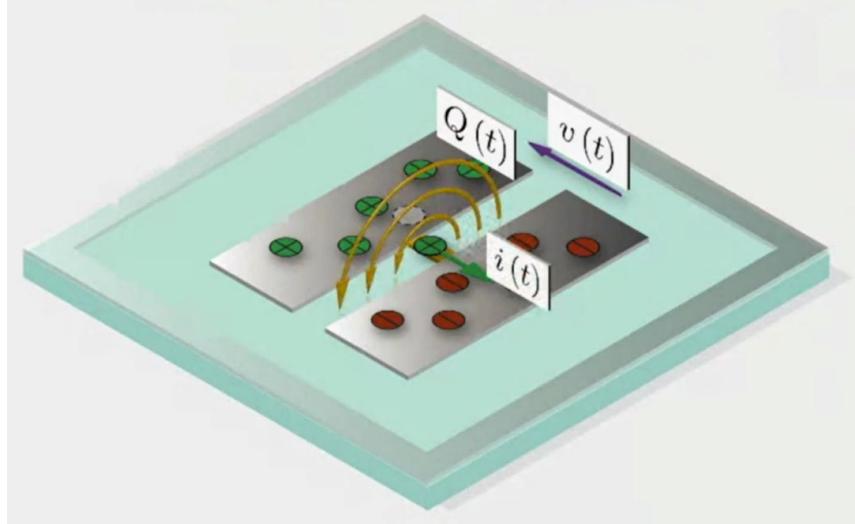
コンデンサーとインダクターの相互作用

IBM Quantum



共振

電磁共振器



LC共振回路の方程式とその解：

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

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

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

このLC共振回路では、磁束 Φ や電荷 Q は共振周波数 $\omega_0 = 2\pi f_0$ で振動する。

この振動は、ばねの振動と似ている！

磁束 → 位置 : $\Phi \mapsto x$

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

キャパシタンス → 質量 : $C \mapsto m$

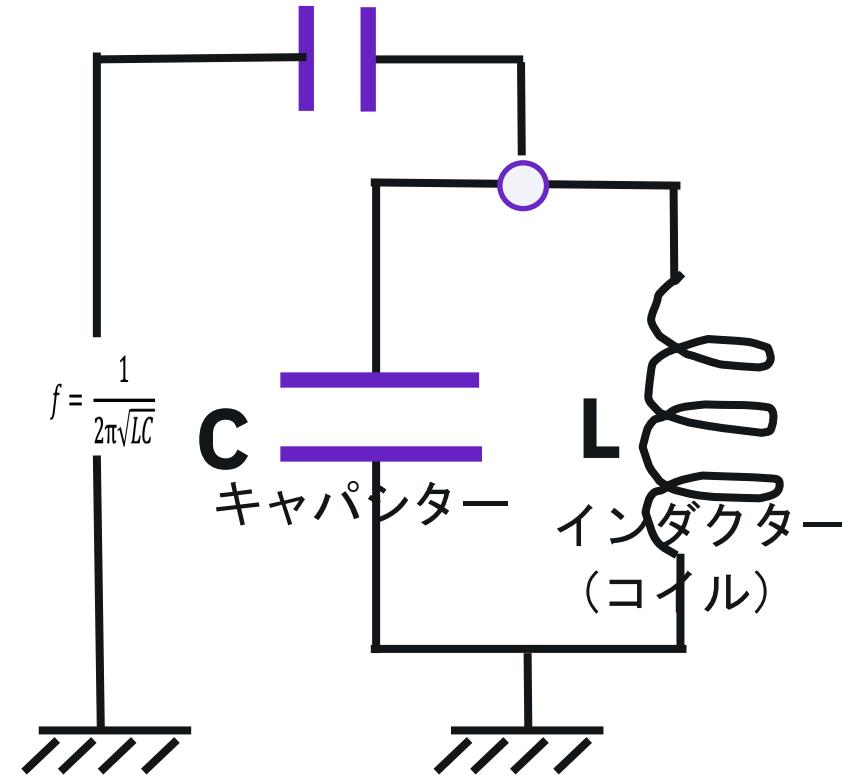
電圧 → 速度 : $\dot{\Phi}(=V) \mapsto v$

電荷 → 運動量 : $Q(=CV) \mapsto p(=mv)$

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

量子ビットは共振回路

IBM Quantum

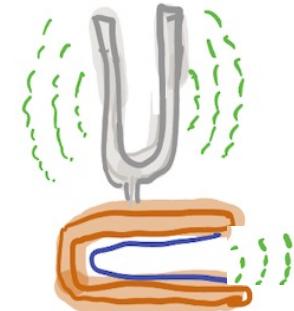


共振周波数は

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

共振

$$f = 440\text{Hz}$$



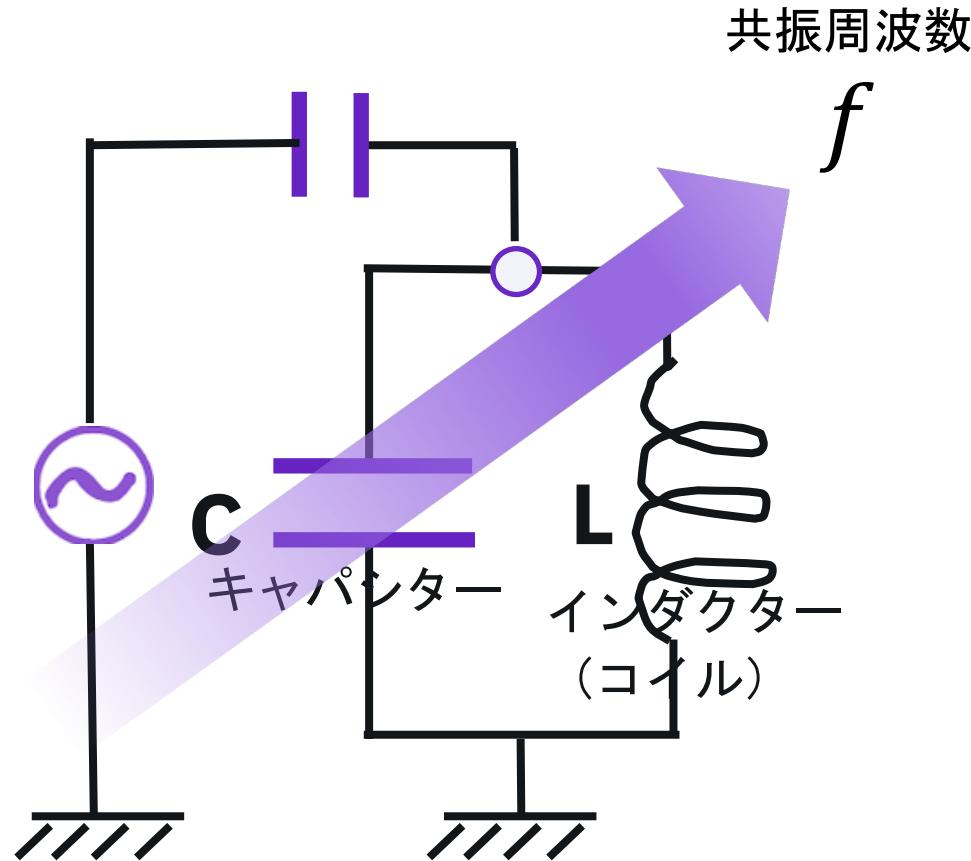
$$f = 523\text{Hz}$$



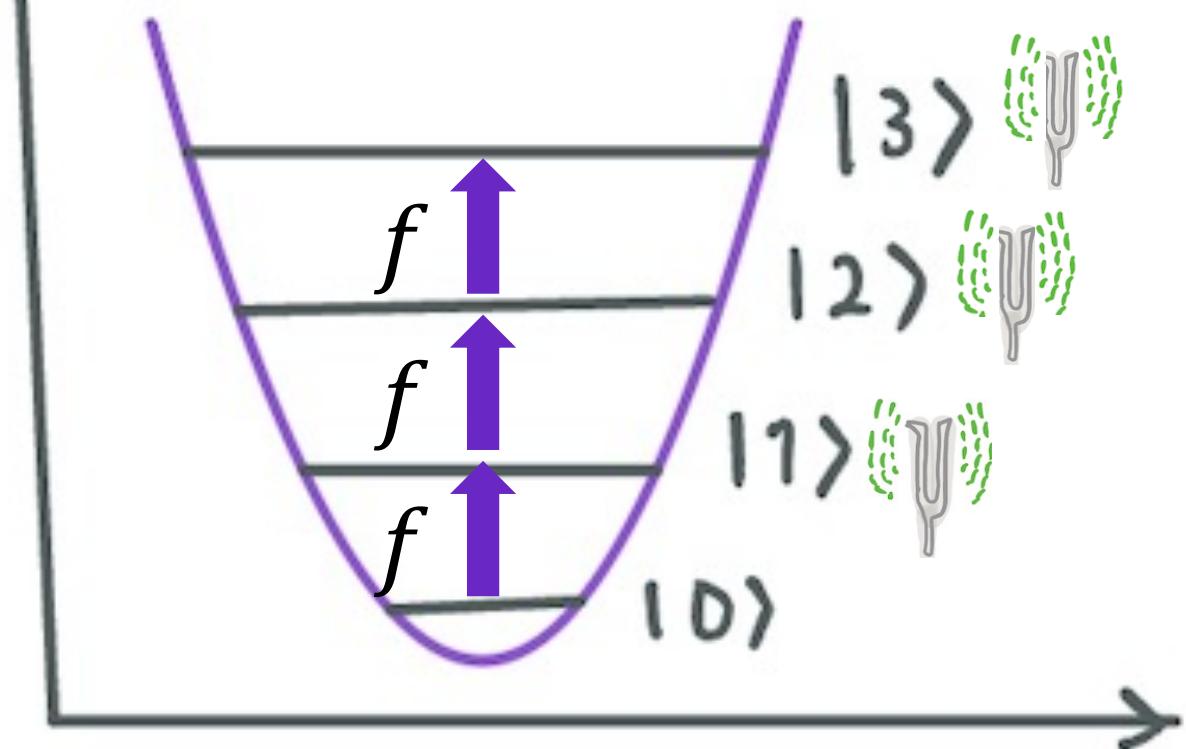
金属の厚みと長さを変えることで音叉の周波数を変えられるように
量子ビットの回路もキャパシターやインダクターの厚み、長さ、コイル
の巻き数などでかえられるってことだね！

エネルギーレベルが等間隔だと...

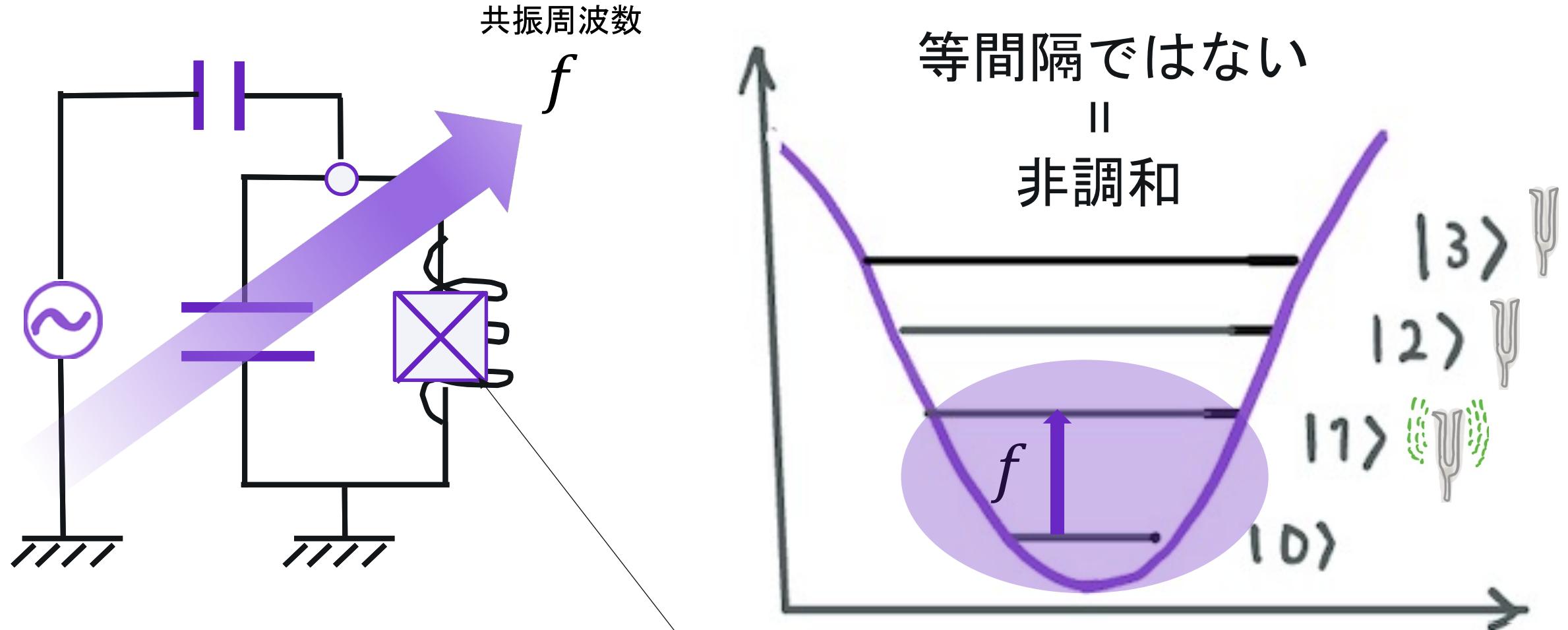
IBM Quantum



$|1\rangle$ だけを鳴らしたい。でも周波数がそろっていると全部が鳴ってしまう。



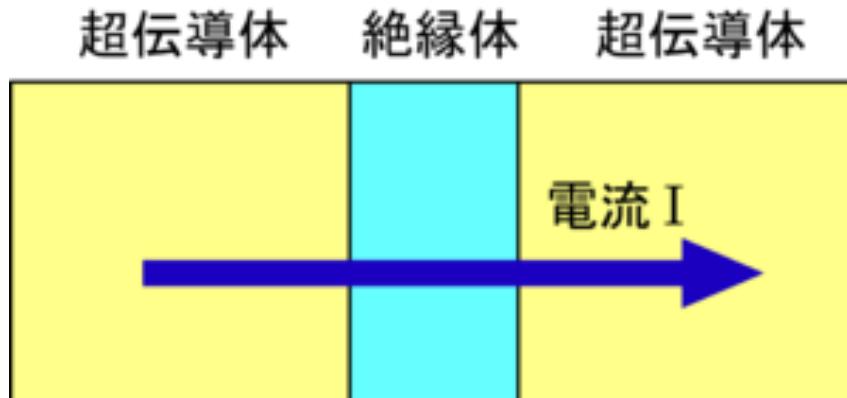
エネルギーレベルの間隔が同じにならないよう周波数を
ばらけさせることで $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ の世界を隔離できる



ふたつの超伝導体の間に絶縁層がある構造。

絶縁層がきわめて薄いとき、超伝導体間に電流が流れる。

量子状態というミクロな物理量をマクロに観測できるようにした点が画期的。

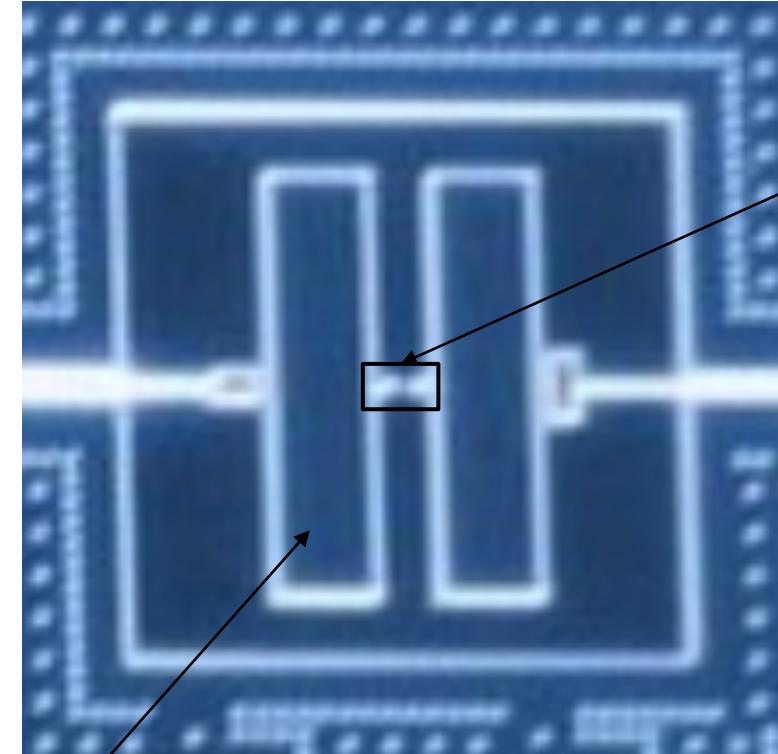


画像出典 : wikipedia.org

ジョセフソンさんは江崎玲於奈さんとともに、
1973年にこの降下の研究によって
ノーベル物理学賞を受賞したんだよ。

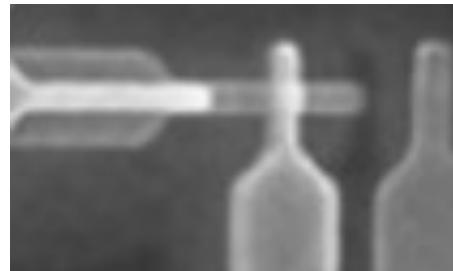


量子ビット：非線形な共振器



キャパシター
超伝導体 (Nb, TiN, Ta等)

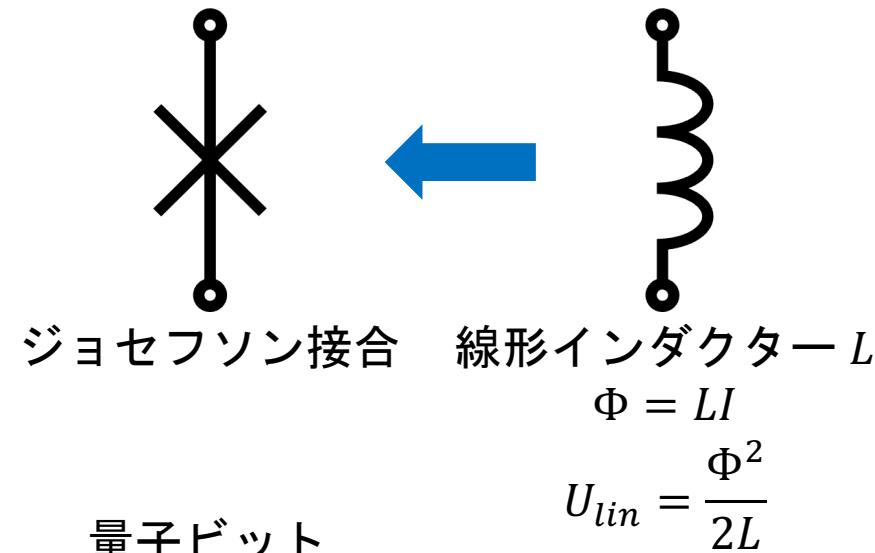
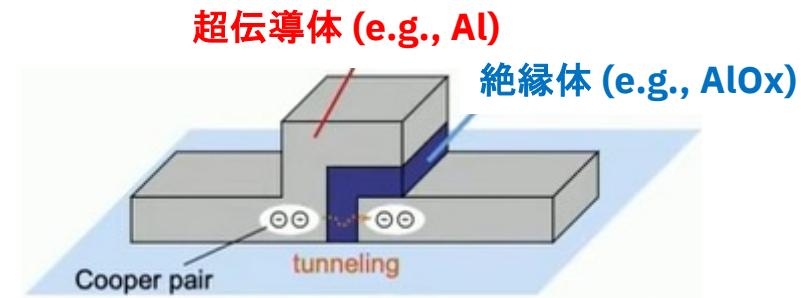
非線形なインダクター
e.g., ジョセフソン接合



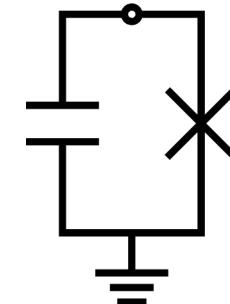
量子ビットのハミルトニアン

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

非線形ポテンシャル



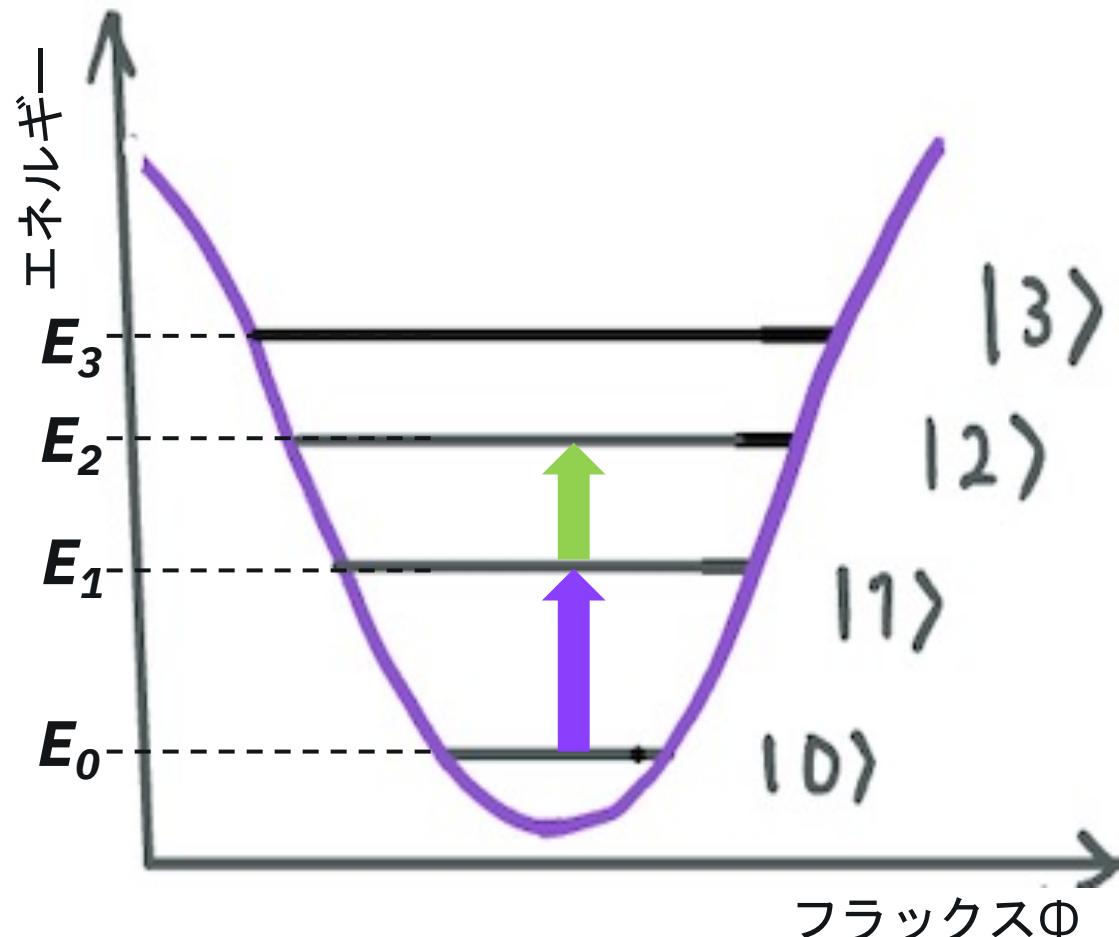
量子ビット



非調和度 (Anharmonicity)

IBM Quantum

$|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ に遷移するためのエネルギーと $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ に遷移するためのエネルギーとの差



量子チップを設計する際の重要な
パラメーターの一つ

$$\alpha = (E_2 - E_1) - (E_1 - E_0)$$

非調和度の記号は通常 α (アルファ)で
あらわします

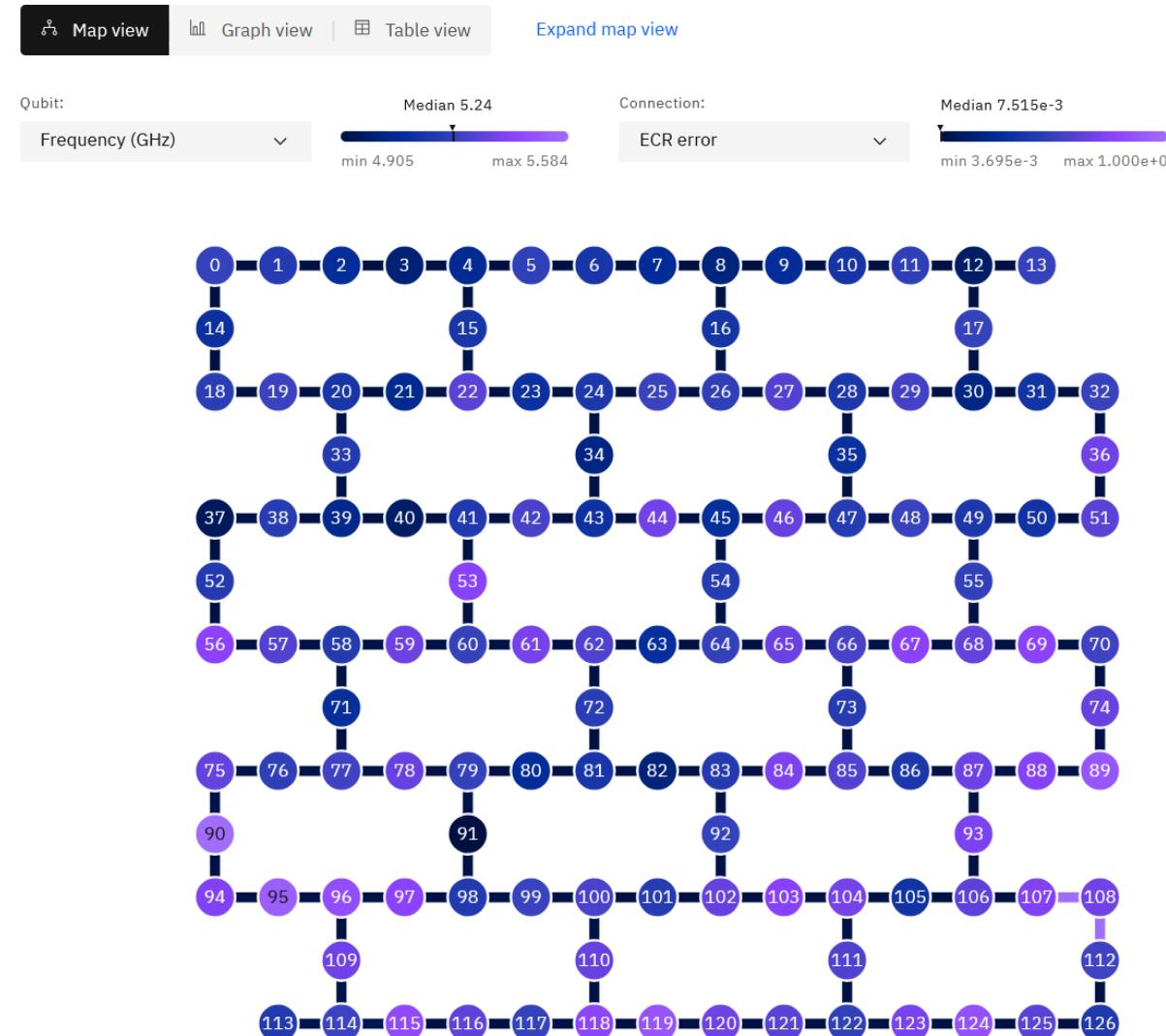
実際の量子チップの周波数と非調和度を チェックしてみよう！

IBM Quantum Platform

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

量子ビット周波数 ⇄ 温度

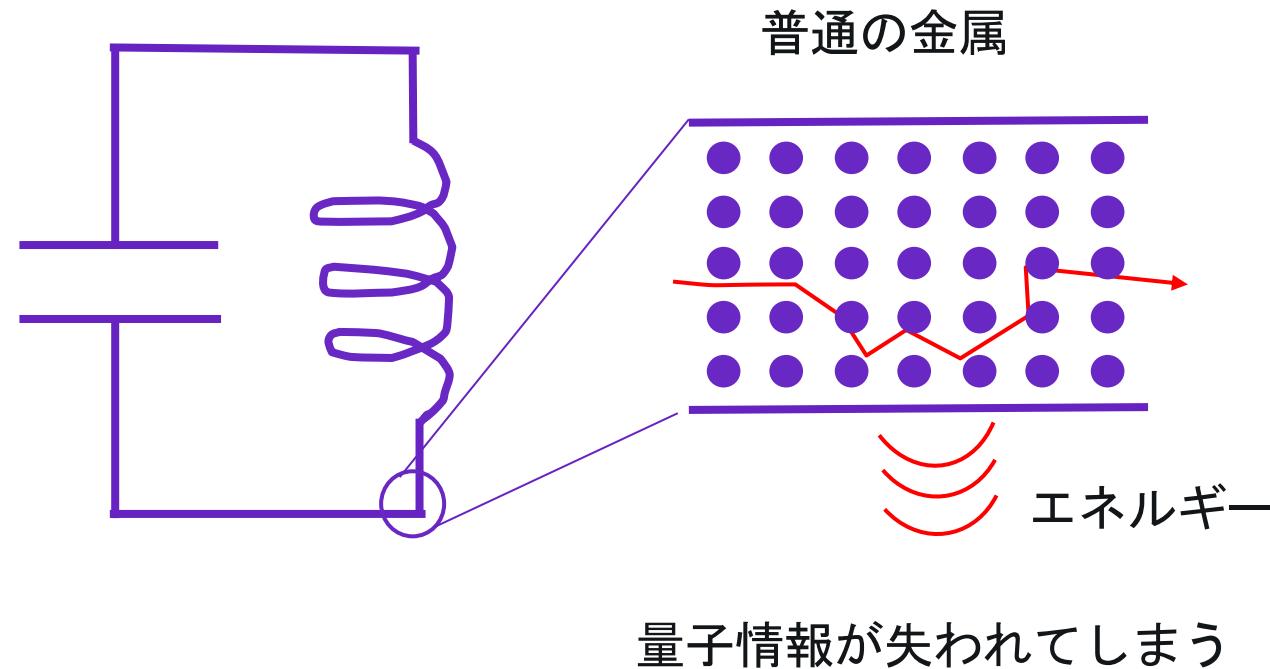
$\omega_q \sim 5 \text{ GHz} \Leftrightarrow T_q \sim 0.25 \text{ K}$ ($\hbar\omega_q = k_B T_q$)
 電磁波のノイズの影響を受けないよう、
 $k_B T \ll \hbar\omega_q$ を満たす必要があるため、
 ⇒ 10mKの冷凍機が必要！



なぜ超伝導体で回路をつくるの？(1)

IBM Quantum

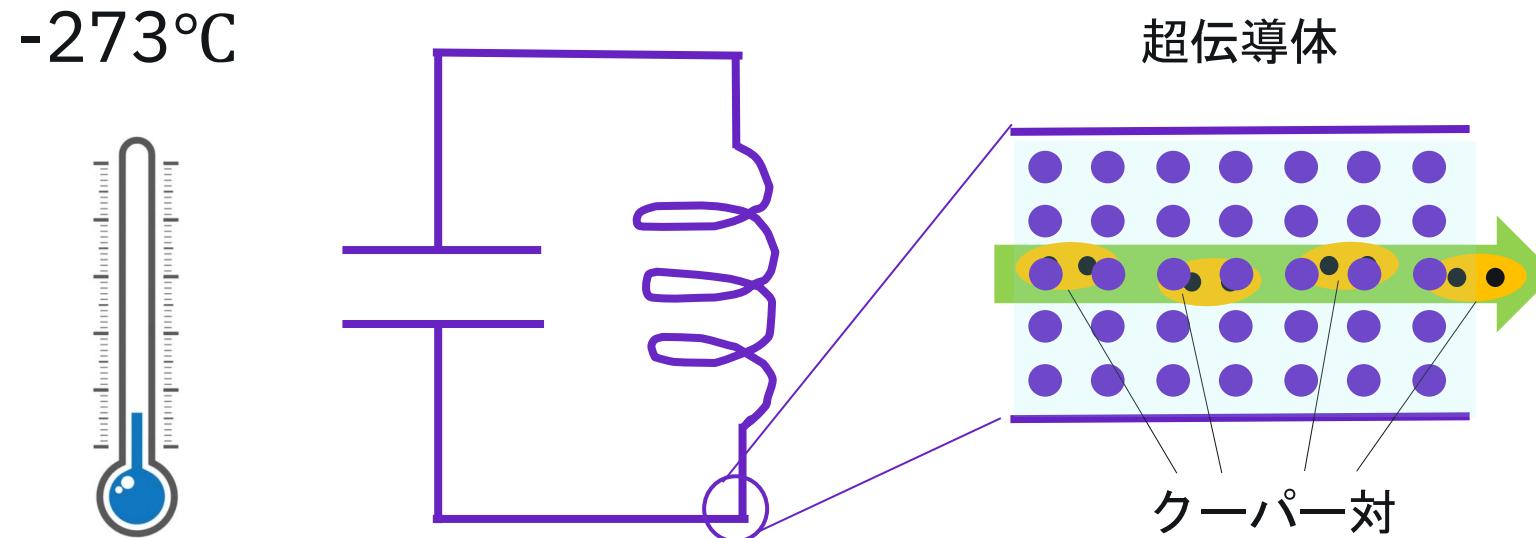
普通の金属で回路をつくると電気抵抗で量子情報が失われる



なぜ超伝導体で回路をつくるの？(2)

IBM Quantum

超伝導体でつくることで電気抵抗がなくなり情報ロスがゼロに



超伝導体（極低温）にすることで、
情報ロスがゼロとなる

超伝導型量子ビットにとっての必須環境 液体ヘリウムをつかった希釀冷凍機



超伝導体の素子をつかって
実現している量子ビットだから
冷やさないといけなかつたんだね



量子コンピューター 5つの要件

IBM Quantum

- ① 量子ビットが $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態がとれて連結してつかえること



- ② 初期化可能：繰り返し同じ状態を用意できること



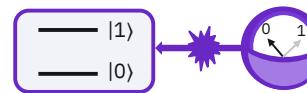
- ③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



- ④ 様々な種類の量子ゲートをつくれること



- ⑤ 効果的な測定ができること



David DiVincenzo (デビット・ディヴィンченゾ) さんが
2000年(20年以上前)に量子コンピューターの基準*を提唱
*あと2つ基準があるが、量子通信にのみ当てはまる内容のため省略



要件 2：初期化を繰り返し行える

IBM Quantum

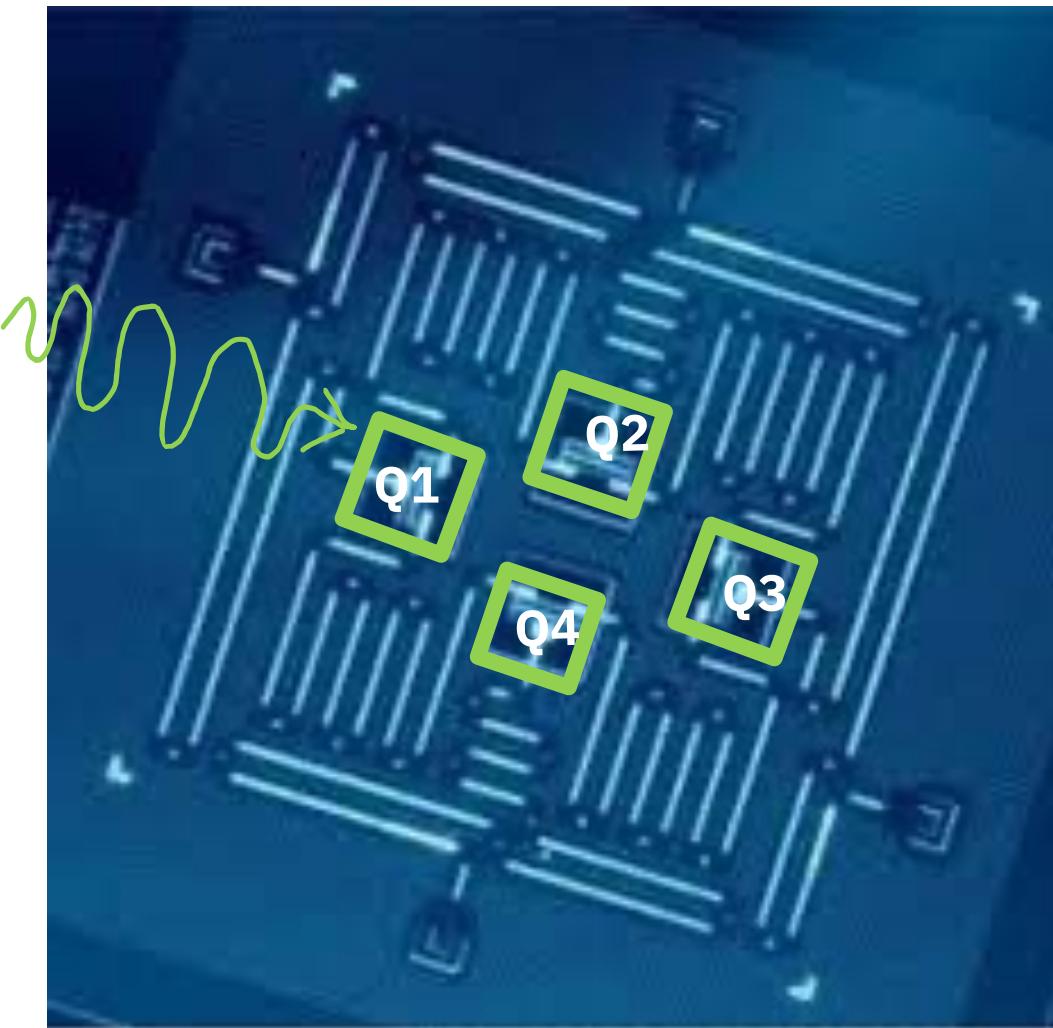
マイクロ波周波数帯のパルス信号を使う



任意波形生成装置 (AWG)

各量子ビットは $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ 遷移する固有の周波数をもつようチューニングされるパルスをつかって初期化することも可能

これでディヴィンチェンゾさんの条件 1 と 2 をクリアーできたわけだね！



量子コンピューター 5つの要件

IBM Quantum

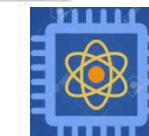
- ① 量子ビットが $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態がとれて連結してつかえること



- ② 初期化可能：繰り返し同じ状態を用意できること



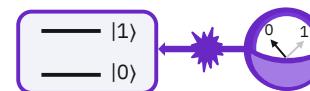
- ③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



- ④ 様々な種類の量子ゲートをつくれること



- ⑤ 効果的な測定ができること



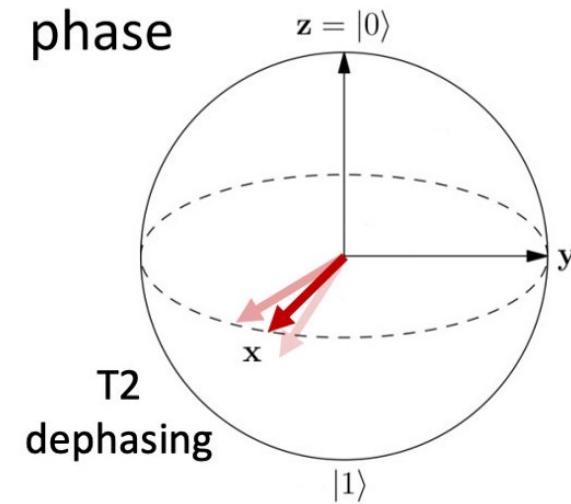
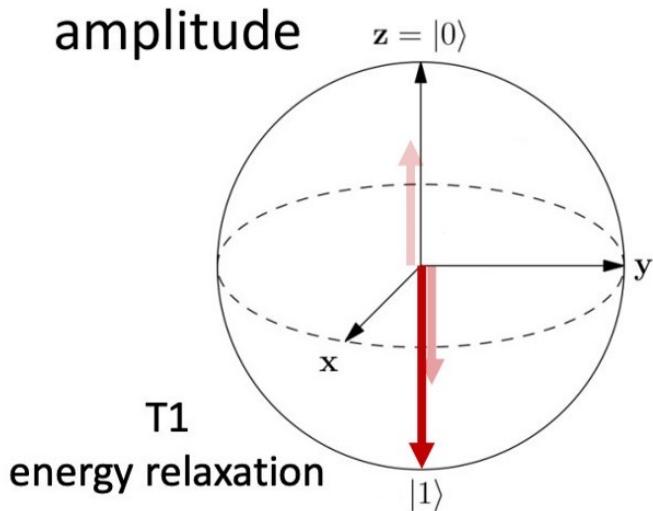
David DiVincenzo (デビット・ディヴィンченゾ) さんが
2000年(20年以上前)に量子コンピューターの基準*を提唱
*あと2つ基準があるが、量子通信にのみ当てはまる内容のため省略



コヒーレンスタイムとは？

T1 励起状態を維持できる時間

T2 重ね合せを維持できる時間



コヒーレンスタイムに悪影響を及ぼすもの
||
さまざまなもの

T1: エネルギー緩和時間 (Relaxation)

- 縦緩和
- ビットフリップエラー

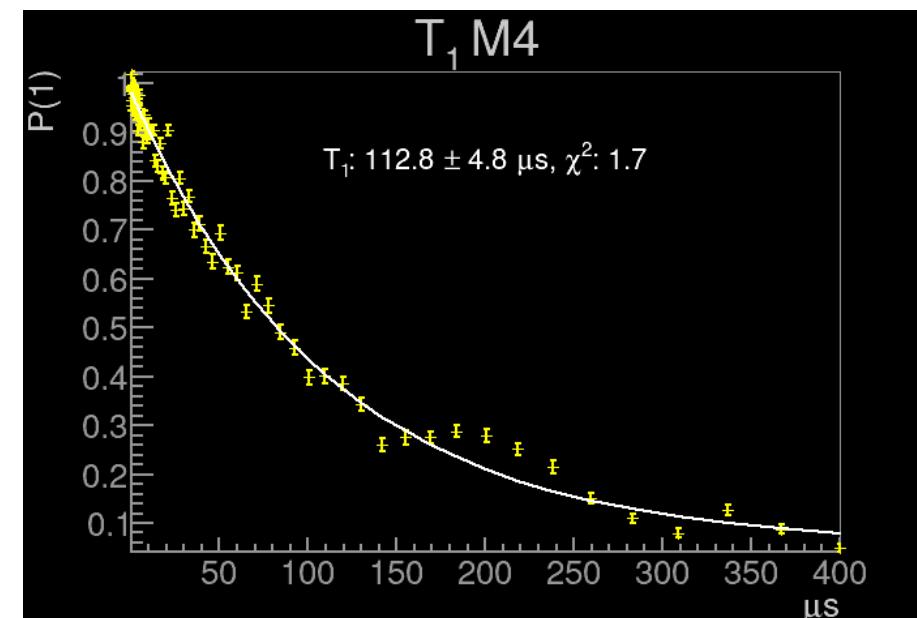
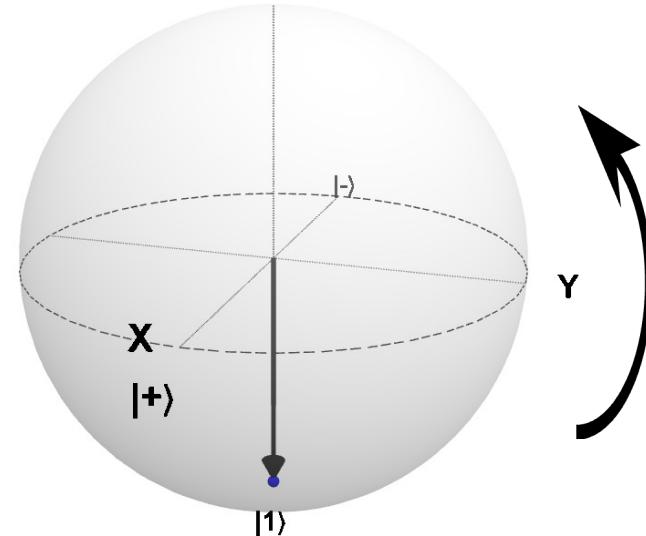
緩和の原因

- 自然のエネルギー放出
- 不純物等の損失源

T1測定手順

- X_π - (遅延) - 測定

$|0\rangle$



T2: コヒーレンス時間 (Decoherence)

- 横緩和
- 位相フリップエラー
- T_1 と位相エラー T_ϕ で制限

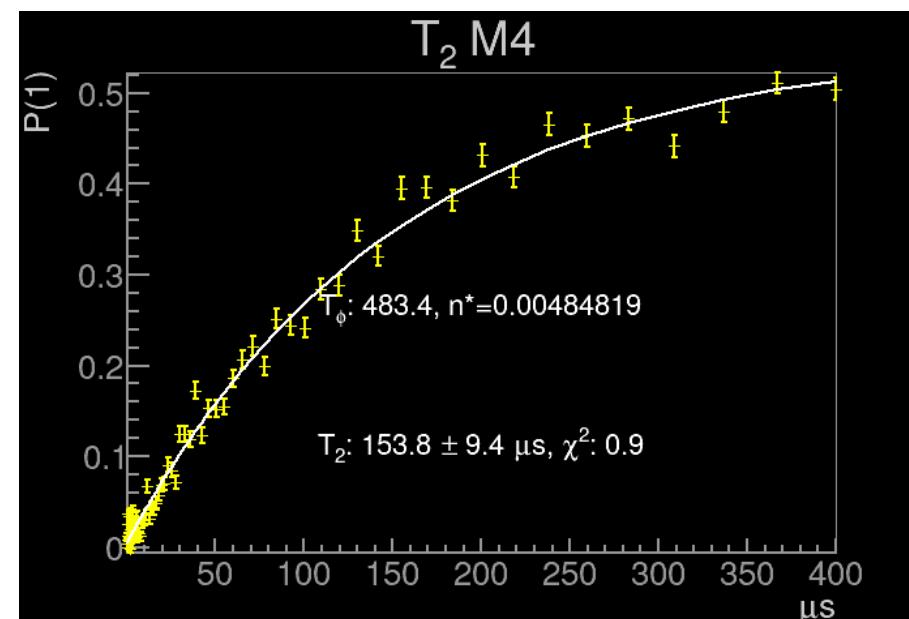
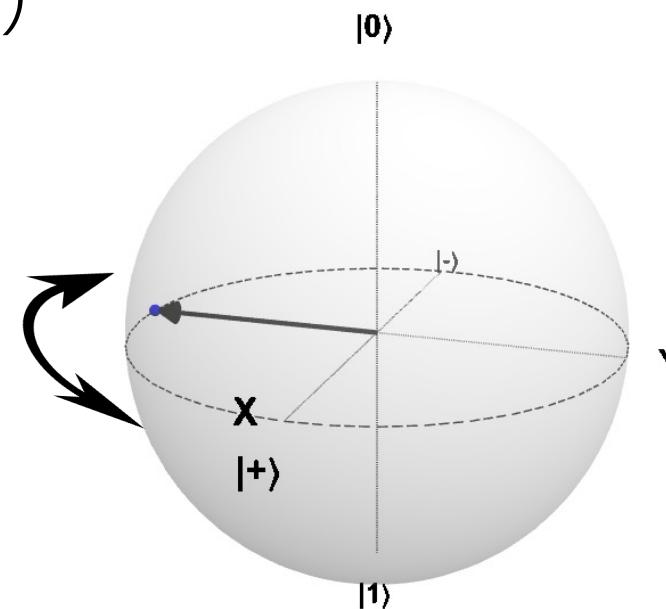
$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{2T_1} + \frac{1}{T_\phi}$$

Decoherenceの原因

- 热雑音
- 磁場ノイズ

T2測定手順

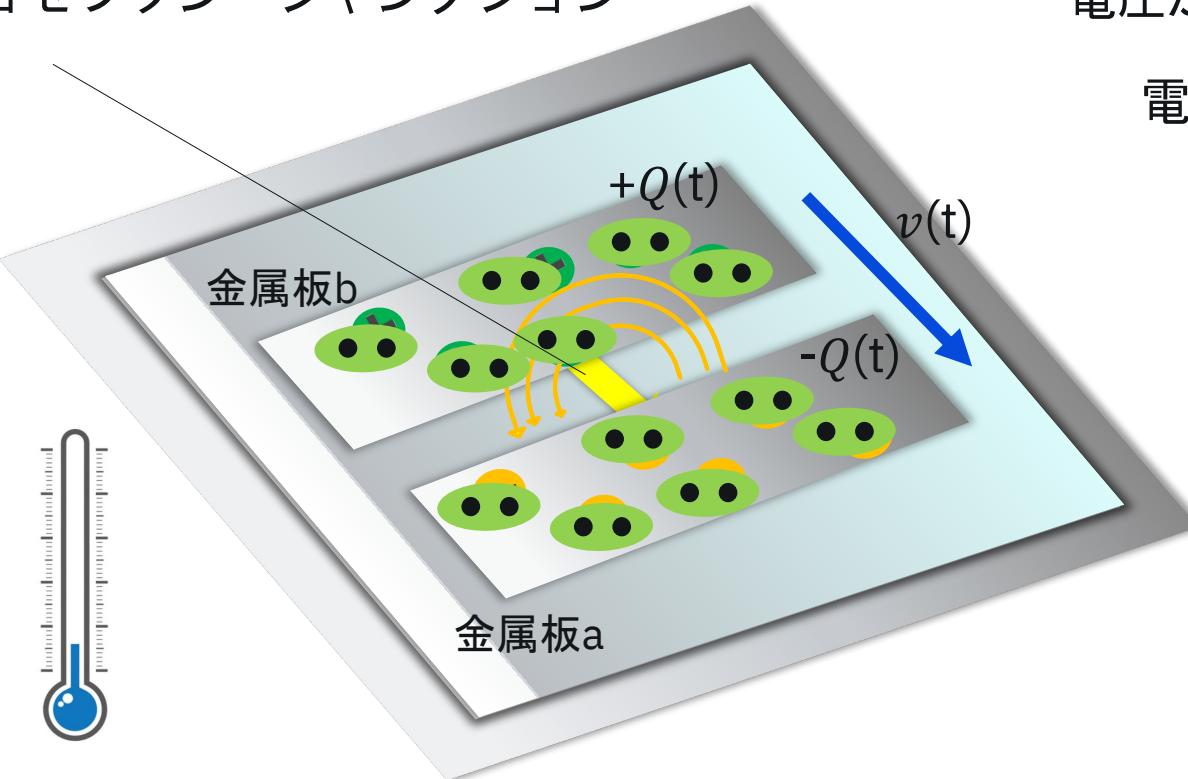
- $X_{\pi/2}$ - (遅延) - X_π - (遅延) - $X_{\pi/2}$ - 測定



コヒーレンス時間の向上

IBM Quantum

ジョセフソン・ジャンクション



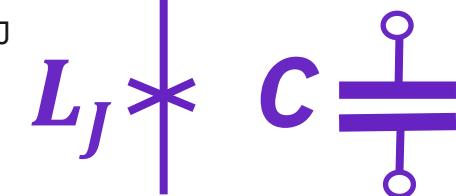
電位差のあるところに電圧が生まれる $v(t)$

電圧がかかると電流 I が流れる I

電流が流れると 磁束 $\Phi(t)$ が生まれる $\Phi(t)$

ジョセフソンエネルギー E_J

$$E_J = \frac{I_c \Phi_0}{L_J}$$



充電エネルギー E_C

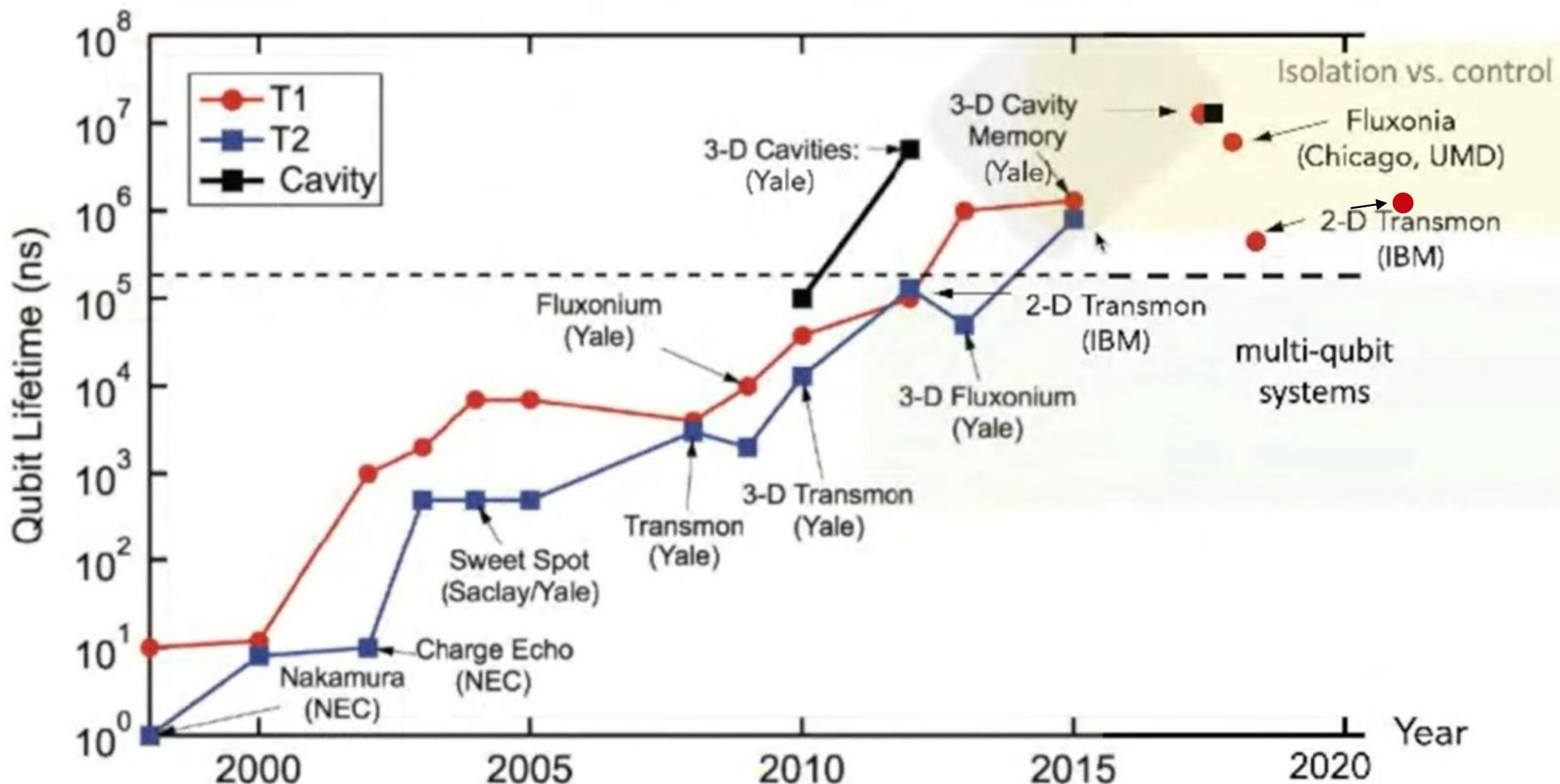
(クーパー対を 1 つ追加するのに必要なエネルギー)

$$E_C = \frac{(2e)^2}{2C}$$

(e :磁束の向きと反対に働く誘導起電力)

E_J/E_C 比率を高めるとノイズへの耐性が増して、コヒーレンスタイムが向上する！

超伝導量子ビットのコヒーレンス時間の変遷



量子コンピューター 5つの要件

IBM Quantum

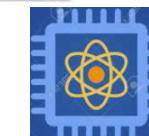
- ① 量子ビットが $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態がとれて連結してつかえること



- ② 初期化可能：繰り返し同じ状態を用意できること



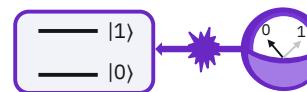
- ③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



- ④ 様々な種類の量子ゲートをつくれること



- ⑤ 効果的な測定ができること

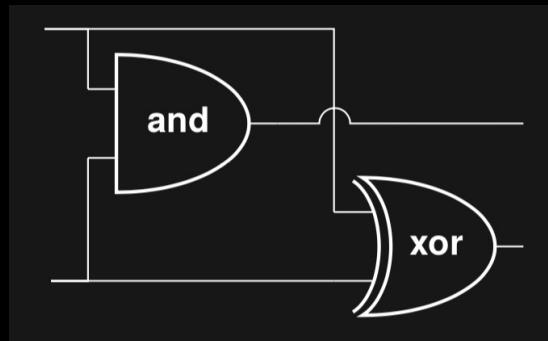


David DiVincenzo (デビット・ディヴィンченゾ) さんが
2000年(20年以上前)に量子コンピューターの基準*を提唱
*あと2つ基準があるが、量子通信にのみ当てはまる内容のため省略



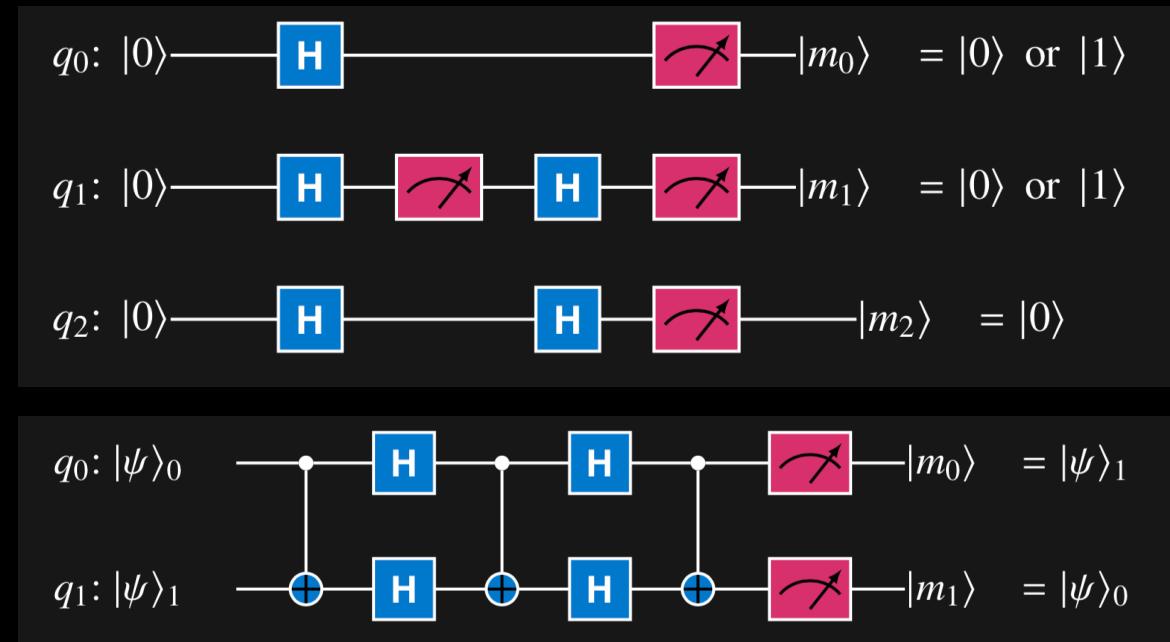
量子力学を応用した 量子計算

ゲート / 演算



古典コンピュータでは、`and`, `or`, `not`, `nand`,
そして `xor` の演算子を用いて計算します

量子コンピュータでは、可逆なゲートを用いて演算処理することで量子状態を変えて演算をします。



演算と情報

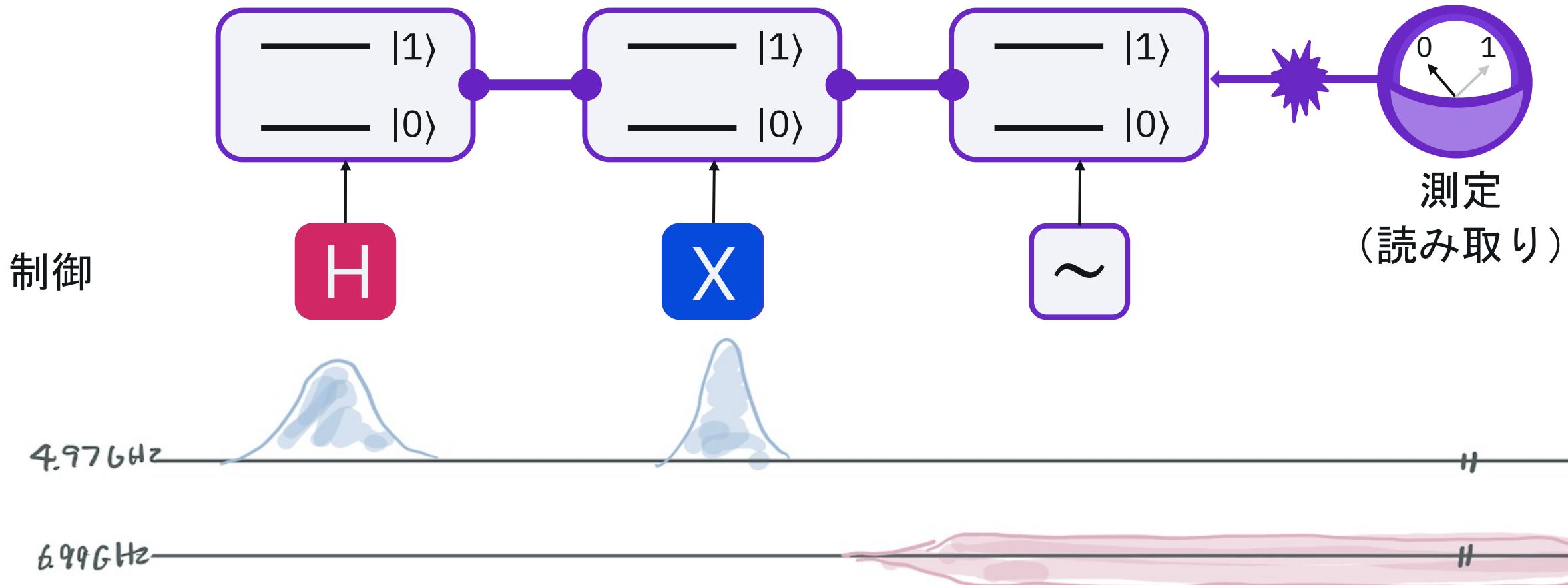
デジタル計算



量子計算



量子ゲートはマイクロ波パルス信号



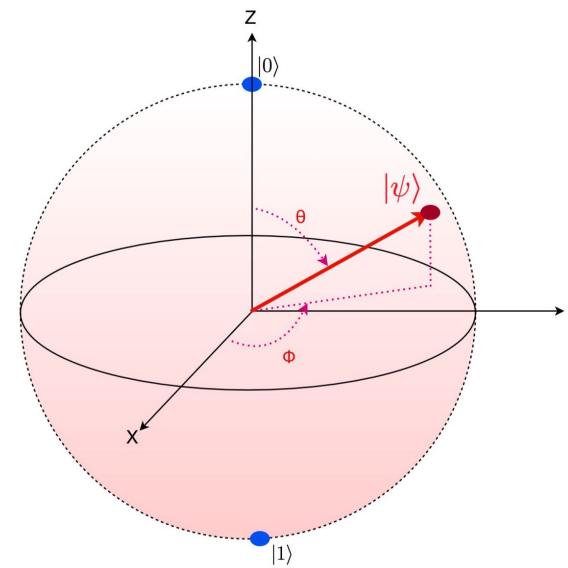
電気回路でできた量子ビットの状態を変化させるゲートも、
実態はマイクロ波パルス信号。さまざまな量子ゲートがつくれる！

色々なゲートを色々なパルスでつくる

IBM Quantum

量子状態はブロッホ球上のベクトルとして表現できる。

パルスの持続時間は、ブロッホ球の特定の軸に対する量子状態（ベクトル）の回転角度を制御する。したがって、異なるパルスで異なる量子ゲートをつくることができる。



実際に使っているゲートを見てみよう

IBM Quantum Platform

<https://quantum.ibm.com/services/resources>

ibm_kawasaki

OpenQASM 3

Details

127

Qubits

2.4%

EPLG

5K

CLOPS

Status: ● Online

Median ECR error: 7.653e-3

System region: us-east

Median SX error: 2.340e-4

Total pending jobs: 210 jobs

Median readout error: 1.080e-2

Processor type ⓘ: Eagle r3

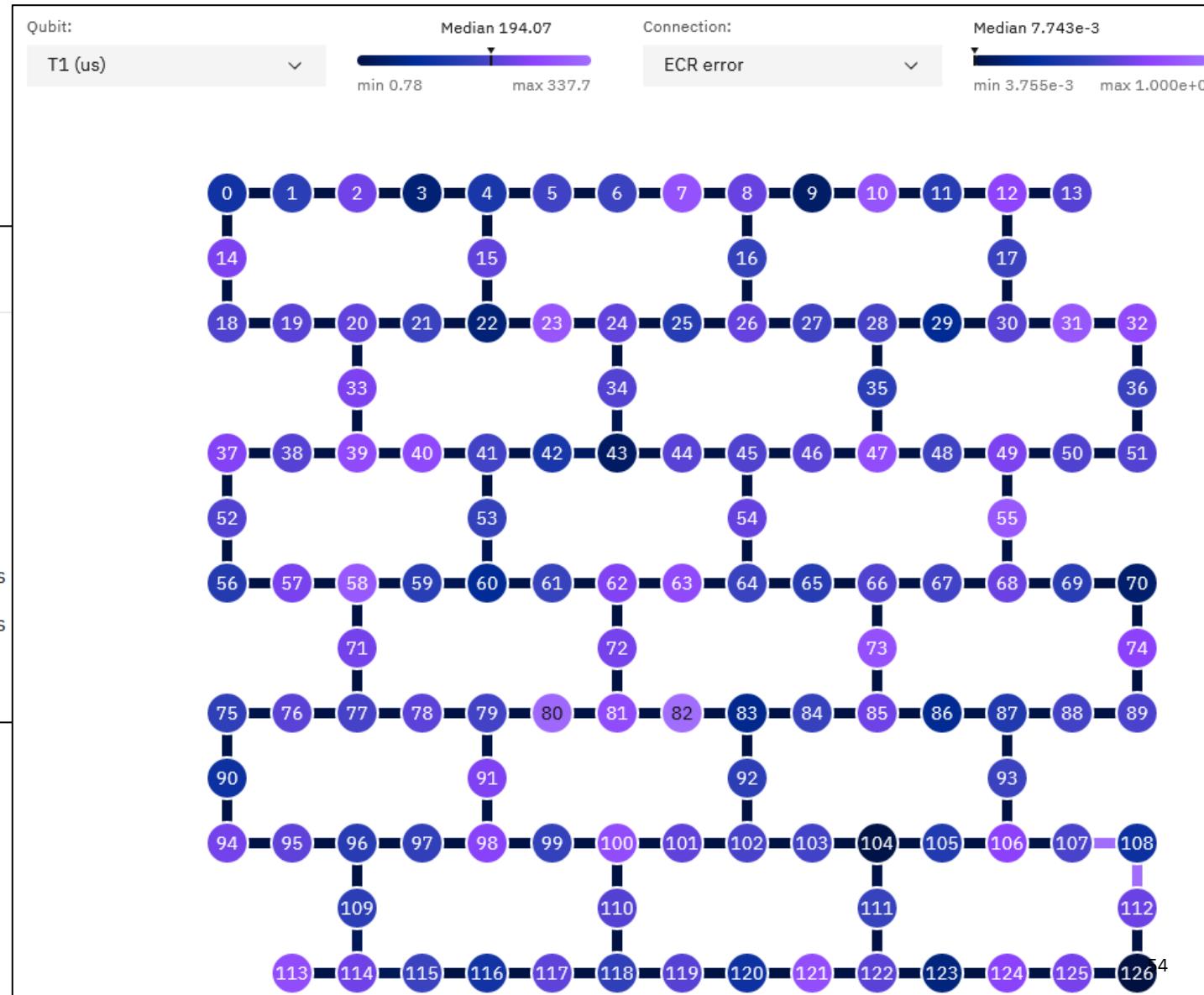
Median T1: 183.48 us

Version: 2.1.28

Median T2: 138.56 us

Basis gates: ECR, ID, RZ, SX, X

Your instance usage: 0 jobs



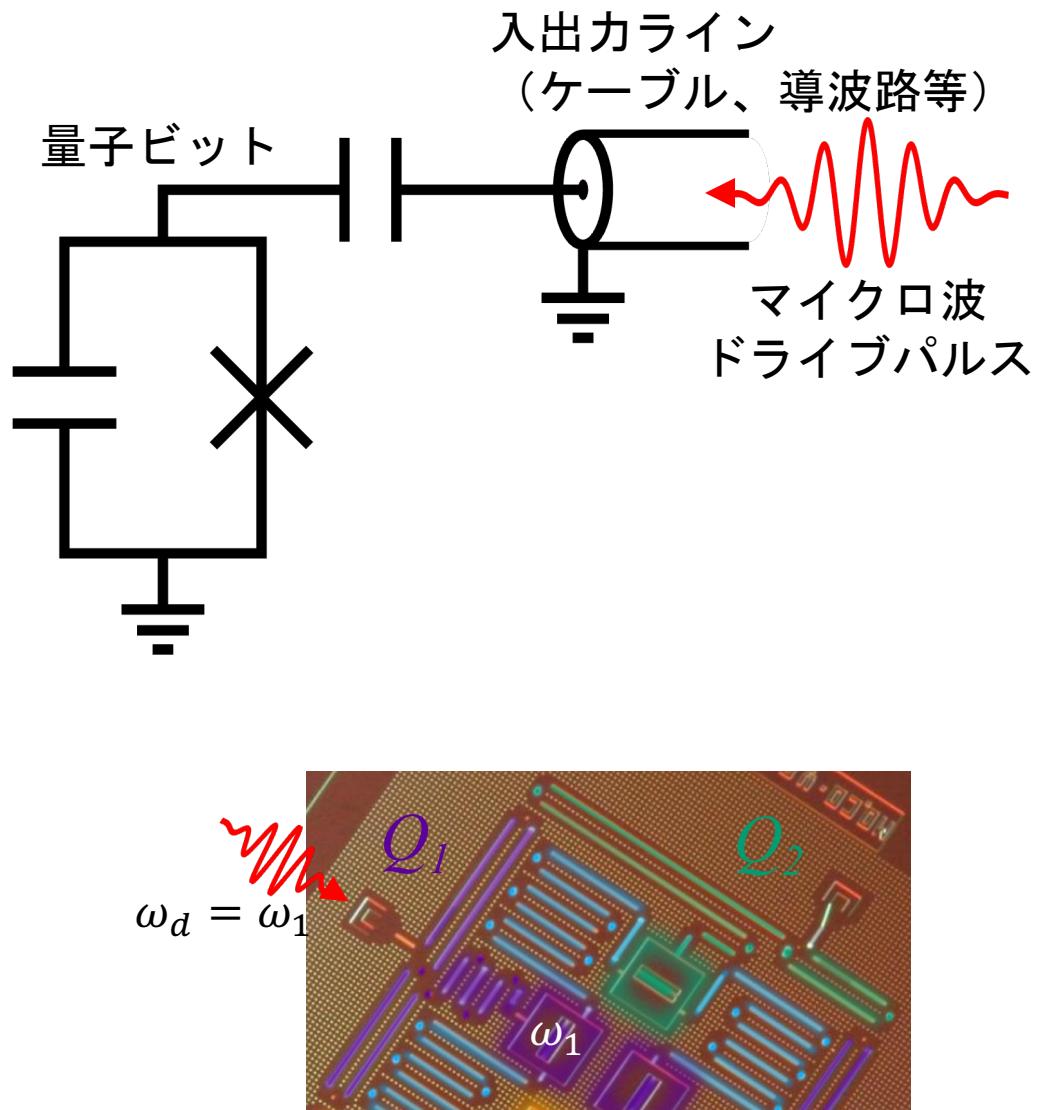
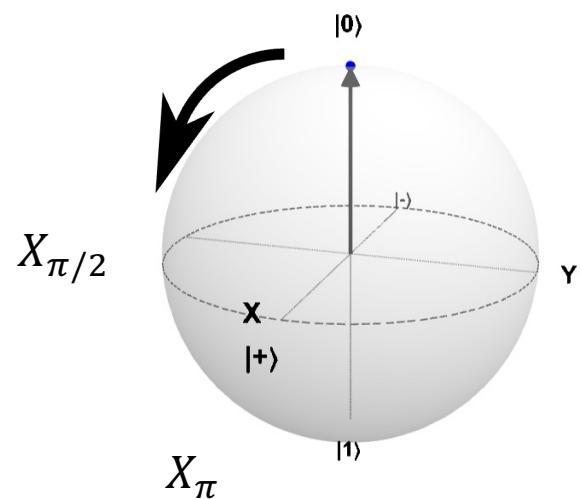
基本ゲート

- ECR (Echoed Cross Resonance) 交差共鳴ゲート: $ECR = XI_{\pi} \cdot ZX_{\pi/2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & i \\ 0 & 0 & i & 1 \\ 1 & -i & 0 & 0 \\ -i & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
→ エンタングルメントを作るゲート、2量子ビット相互作用、CNOT
- ID (IDentity) 単位ゲート: $I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
- RZ (single-qubit Rotation about Z-axis) Z回転ゲート: $RZ(\theta) = \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\theta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\theta}{2}} \end{pmatrix}$
→ フレーム変換で行われる仮想ゲート
- X (single-qubit X) Xゲート: $X_{\pi} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$
→ ビットフリップさせるゲート
- SX (Sqrt X) \sqrt{X} ゲート、Hゲート: $X_{\pi/2} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1+i & 1-i \\ 1-i & 1+i \end{pmatrix}$
→ 重ね合わせを作るゲート

1量子ビットゲート

Xゲート：量子ビットに $\omega_d = \omega_1$ のマイクロ波を入射

Hゲート：Xゲートの半分のゲート長 $X_{\pi/2}$ で実現



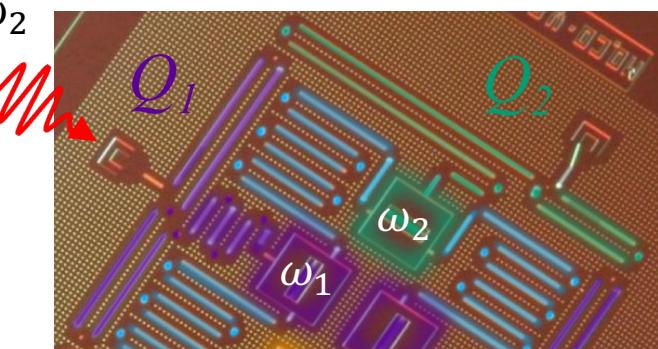
2量子ビットゲート – 交差共鳴ゲート

交差共鳴ゲート

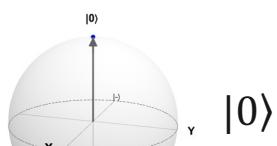
- CNOTを構成するゲート
- コントロールQ1にターゲットQ2の共振周波数 $\omega_d = \omega_2$ のマイクロ波パルスを入射

$$ZX_{\pi/2} = \exp\{-i(\pi/4)ZX\} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -i & 0 & 0 \\ -i & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & i \\ 0 & 0 & i & 1 \end{pmatrix}$$

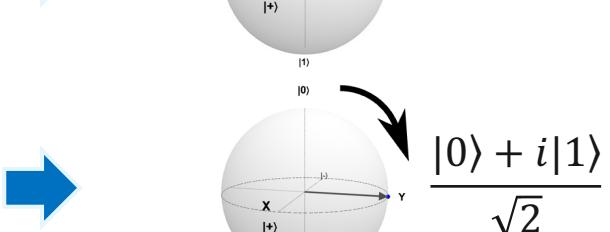
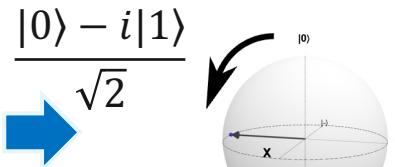
コントロール量子ビットの状態によって
X回転が逆方向に



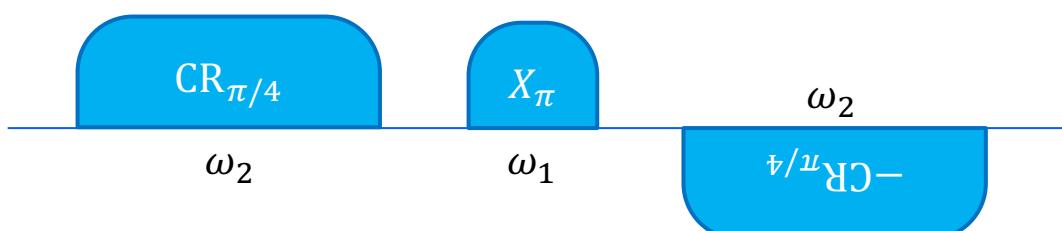
コントロール
量子ビット1



ターゲット
量子ビット2



エコーあり交差共鳴ゲート（位相エラー低減のため）

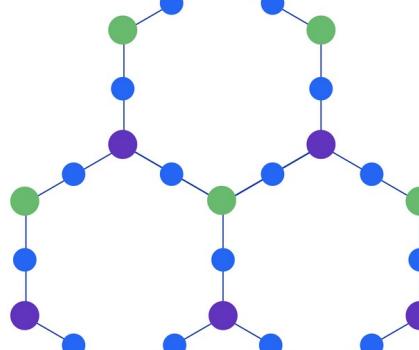


<https://javafxpert.github.io/grok-bloch/>

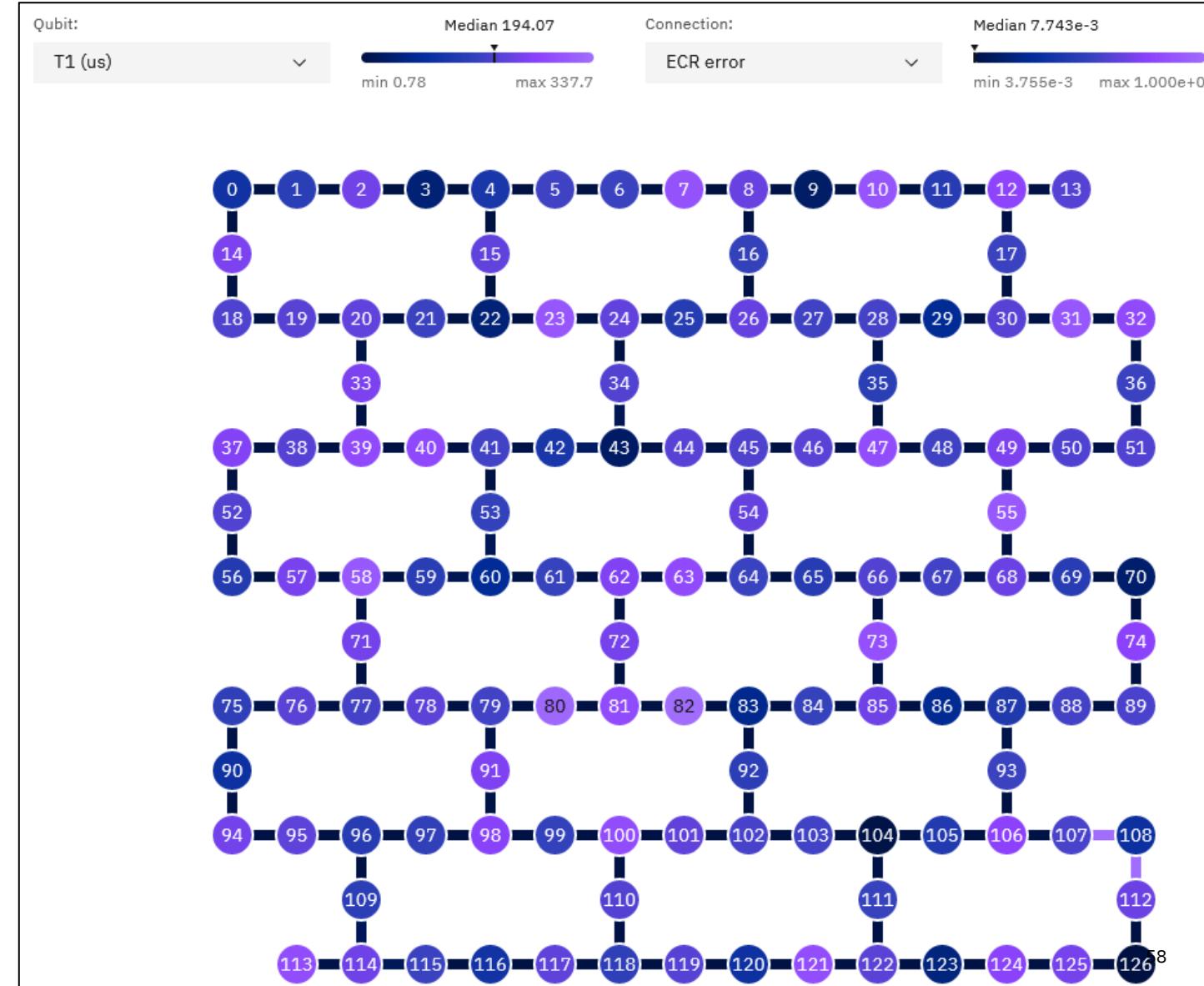
デバイスマップー・ヘビー・ヘックス格子 (heavy-hex lattice)

ヘビー・ヘックス・コード

- 量子エラー訂正のためのコード
- 周波数衝突を避けるため、少ないコネクティビティ（隣接量子ビット ≤ 3 ）
- 適度なフォールト・トレラントしきい値
(必要な2量子ビットゲート精度)



<https://www.ibm.com/quantum/blog/heavy-hex-lattice>



量子コンピューター 5つの要件

IBM Quantum

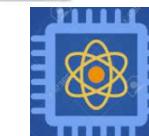
- ① 量子ビットが $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態がとれて連結してつかえること



- ② 初期化可能：繰り返し同じ状態を用意できること



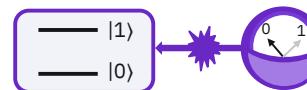
- ③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



- ④ 様々な種類の量子ゲートをつくれること



- ⑤ 効果的な測定ができること



David DiVincenzo (デビット・ディヴィンченゾ) さんが
2000年(20年以上前)に量子コンピューターの基準*を提唱
*あと2つ基準があるが、量子通信にのみ当てはまる内容のため省略



2種類の測定方法：破壊と非破壊

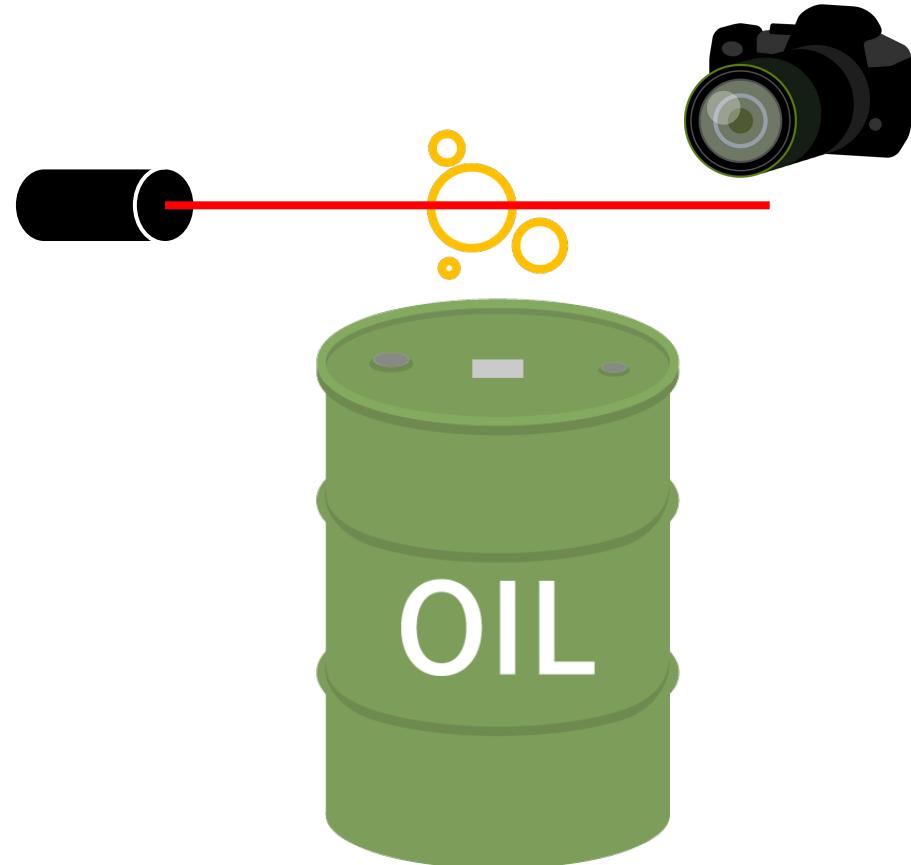
Demolition (破壊)

e.g., 光の吸収

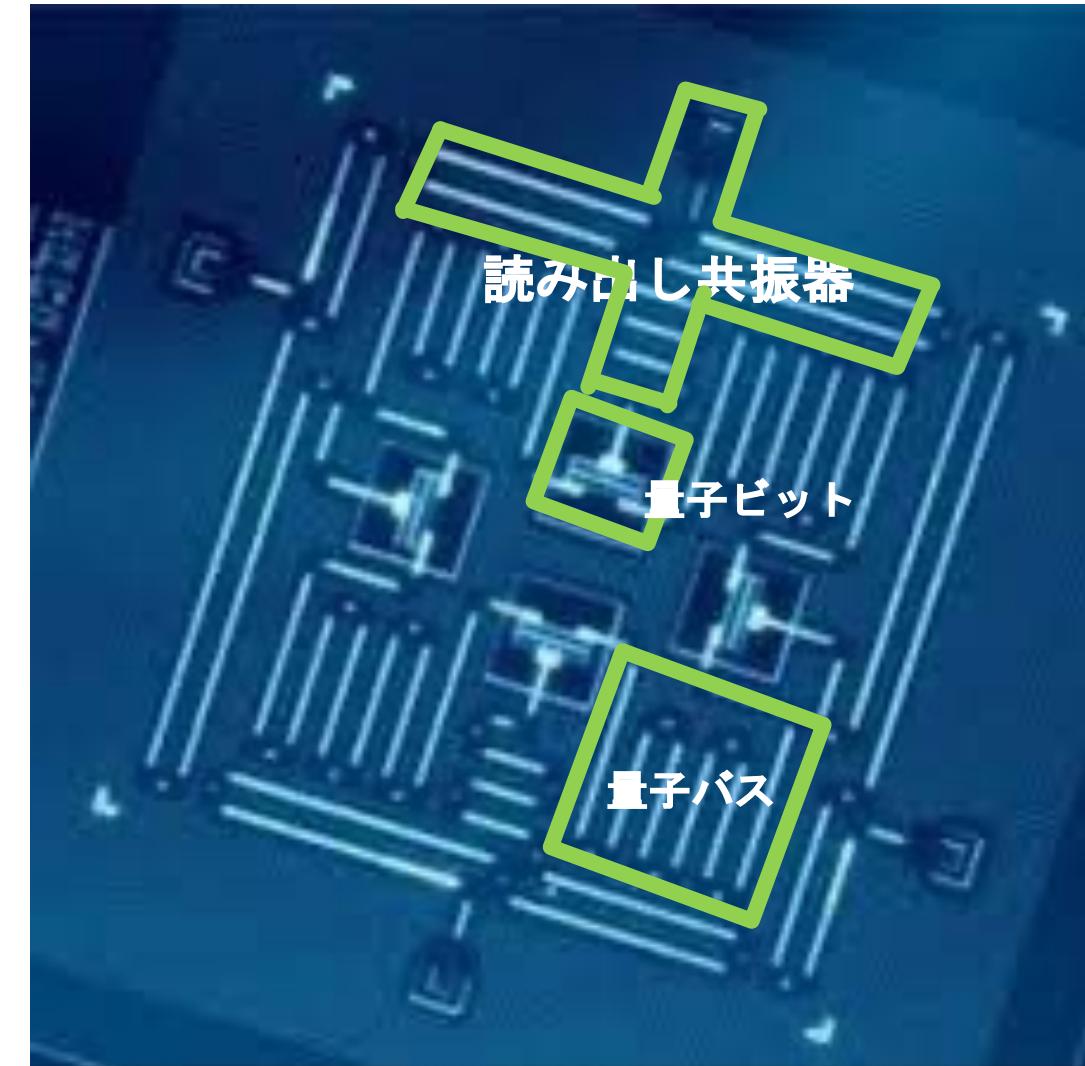


Non-demolition (非破壊)

e.g., 分散読み出し (QND:量子非破壊)

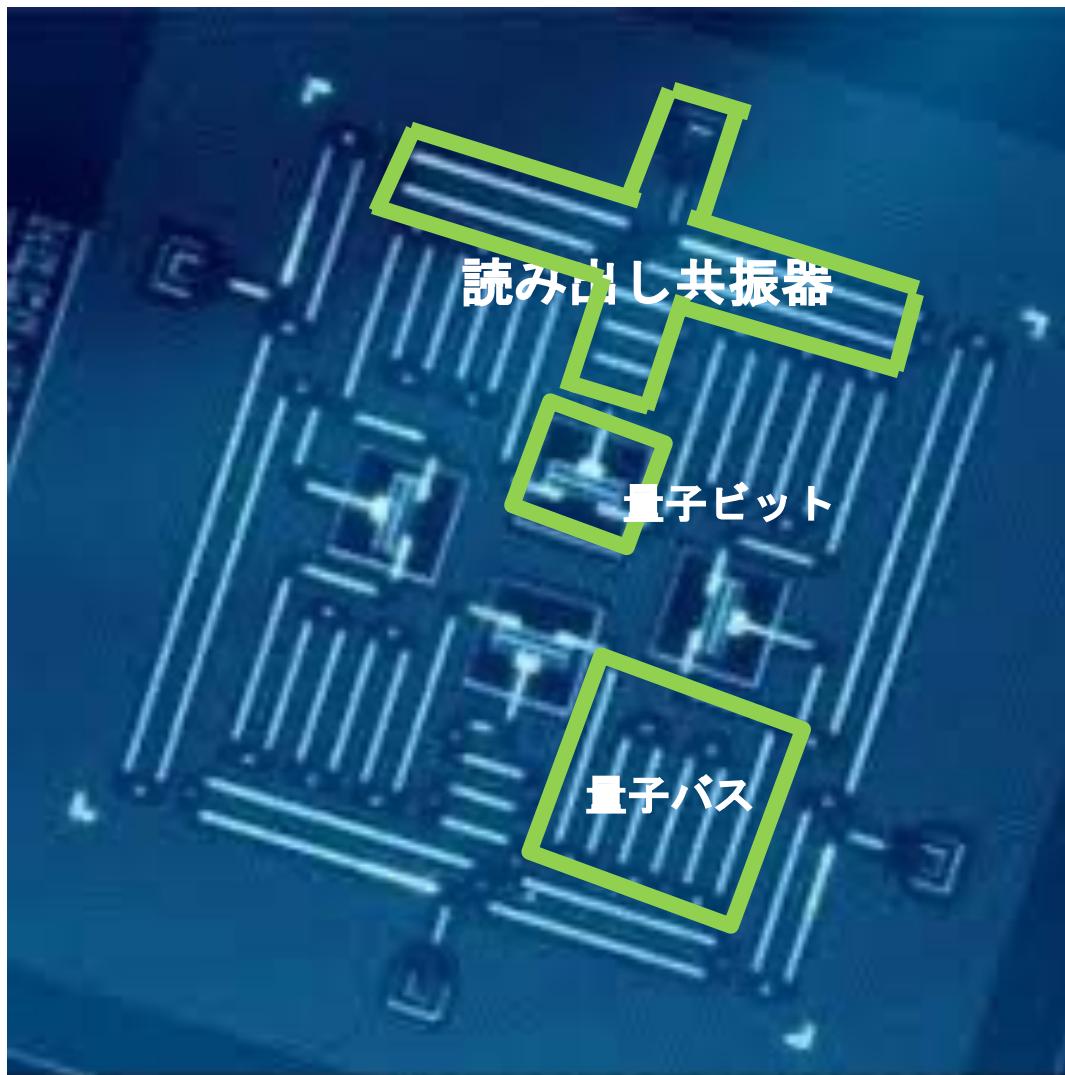


本物の量子チップの
写真にヒントが隠され
ています



画像出典：IBM

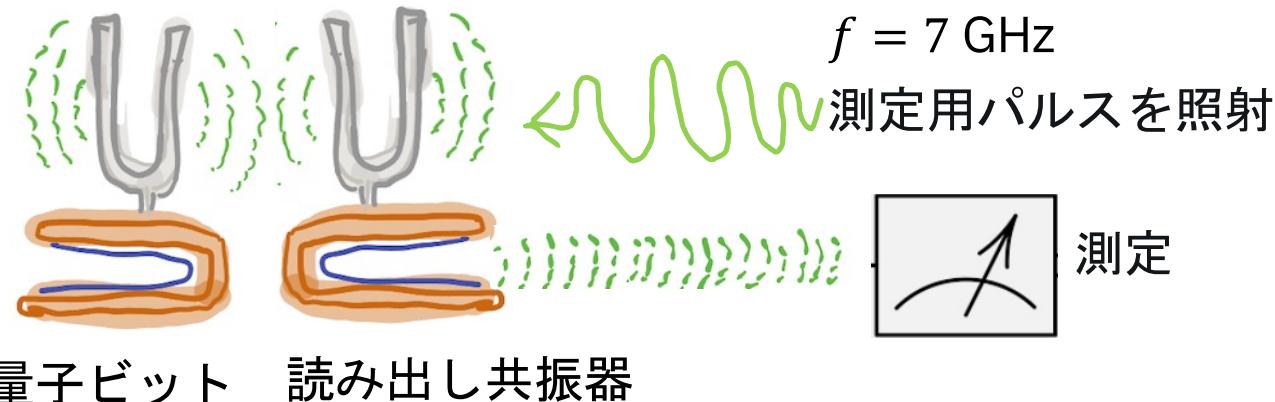
分散読み出しによる工夫



画像出典：IBM

周波数の大きく離れた共振器を結合させる

5 GHz 7 GHz



量子ビットには直接触れずに読み出し共振器の周波数のみを測定する！

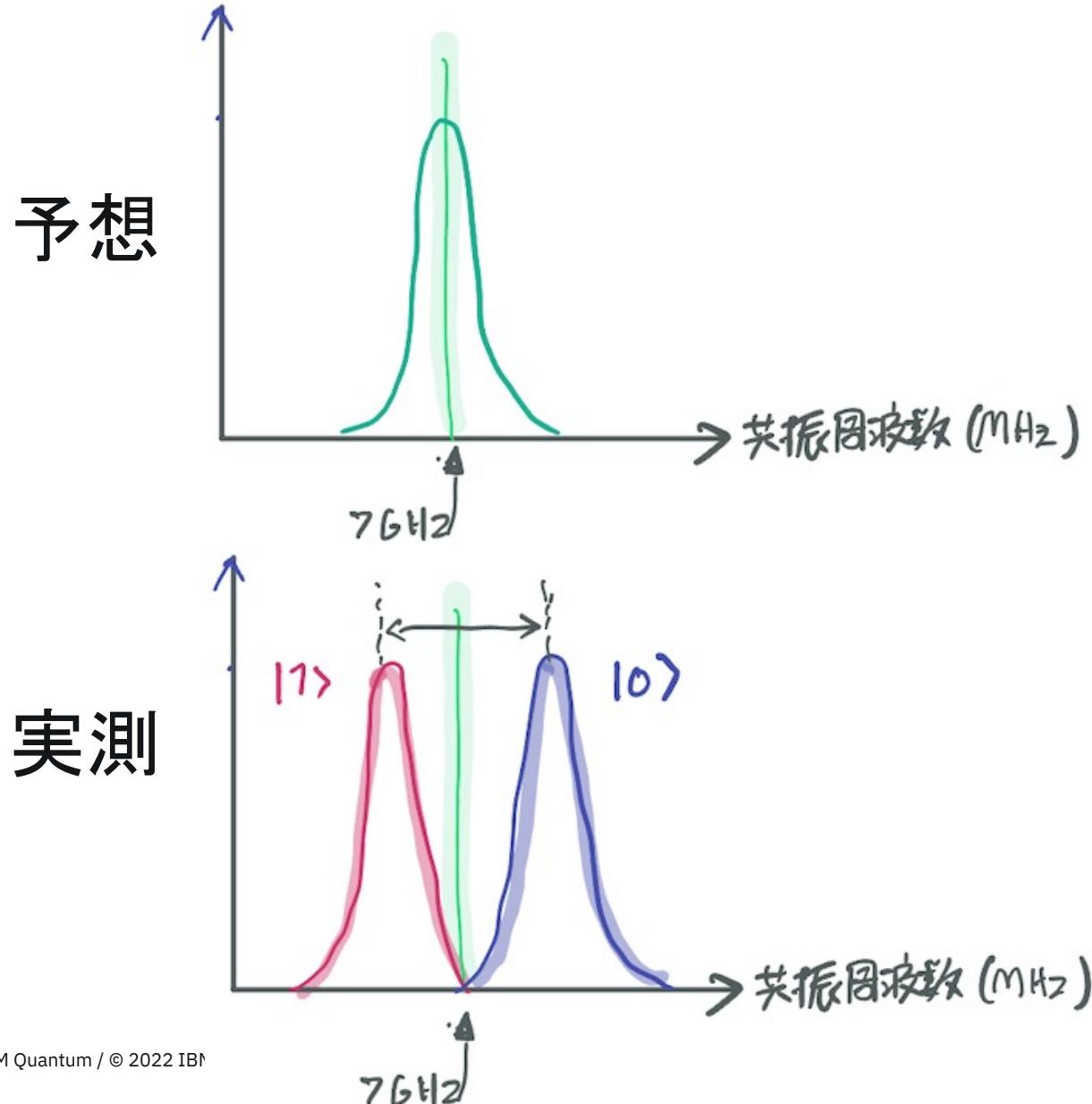
読み出しの結果がどうなるか予測できますか？

7GHzの音叉が共振しているんだから
7GHzの音波がでているはずだよね？



読み出しの結果

IBM Quantum



読み出し共振器の共振周波数が
量子ビットの状態に依存して
わずかにシフトする

|1>のときはマイナス方向に
|0>のときはプラス方向に

へえ！読み出し共振からの応答だけで
量子ビットの状態を非破壊的に測定で
きるって事だね！



5つの条件はクリア！
でも飽くなき挑戦はつづく！

量子ビット間の混信問題もっと解消したい！

初期状態準備（リセット）時間をよりクイックに高い精度で実現したい

理想の量子状態（コヒーレンス）を今よりもっと長く保ちたい

用途に応じた特殊なゲートをもっとつくりたい

ゲート実行時エラー、測定エラーをもっと改善したい！

Hands-on

量子コンピューターのバックエンド情報を見てみよう！

回路量子電磁力学(Circuit QED)について

量子力学の特徴を共振器回路など電気回路に基づく電磁力学で実現する学問を「回路量子電磁力学(Circuit QED)」と呼びます。

今回の授業では前提知識として必要な数学・物理は極力省きましたが、本来は大学・大学院レベル以降の学問ですので、難しく感じたとしても落ち込むことはありません。

興味のある人はぜひ自分で調べて勉強してみてください！

- 超伝導量子チップは人工の原子
- 非調和な共振回路で量子ビットを実現できる
- 室温の任意波形生成装置で制御可能
- エレクトロニクスの改良でコヒーレンスタイムも向上
- 共振回路とパルス量子ゲートを独自に設計できる
- ミクロの量子情報をマクロに計測できる

共振器量子電磁力学 量子コンピュータのハードウェア理論（SGCライブラリ）

https://honto.jp/netstore/pd-book_30510447.html

A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits

<https://arxiv.org/abs/1904.06560>

Superconducting Qubits I & II (from Qiskit Global Summer School 2020)

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLOFEBzvs-VvrXTMy5Y2IqmSaUjfnhvBHR>

Qiskit Metal Tutorials

https://www.youtube.com/playlist?list=PLOFEBzvs-VvqHl5ZqVmhb_FcSqmLufsjb

QC – How to build a Quantum Computer with Superconducting Circuit?

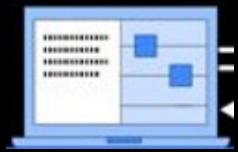
<https://jonathan-hui.medium.com/qc-how-to-build-a-quantum-computer-with-superconducting-circuit-4c30b1b296cd>

Thank you



Backup

量子ゲート



Python code



Quantum circuit



Runtime



マイクロ波のパルス列



量子ビットへの演算処理



Classical gates



Phase gates



Non-unitary operators and modifiers



Hadamard gate



Quantum gates



Readout error

Pulse sequence

- I - measure (blue)
- X_π - measure (red)
- Plot on IQ plane and discriminate 0/1

