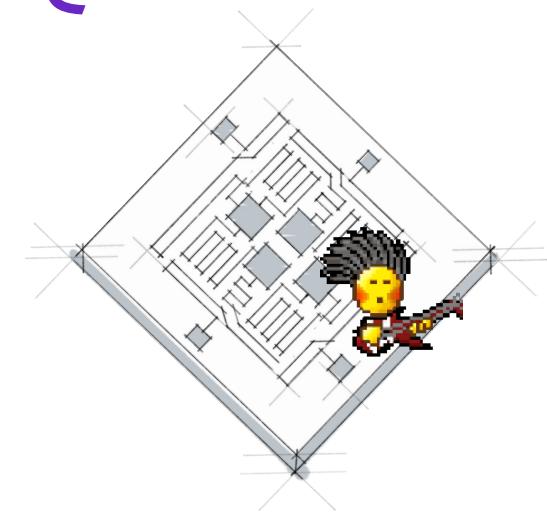


# 量子コンピューターの実現にむけて ハードウェア研究の飽くなき挑戦！ ～量子ハードウェア入門（量子チップ編）

IBM Quantum

Yuri Kobayashi | 小林 有里



# もくじ

IBM Quantum

実機見学はいかがでしたか？

量子コンピューターのハードウェア区分

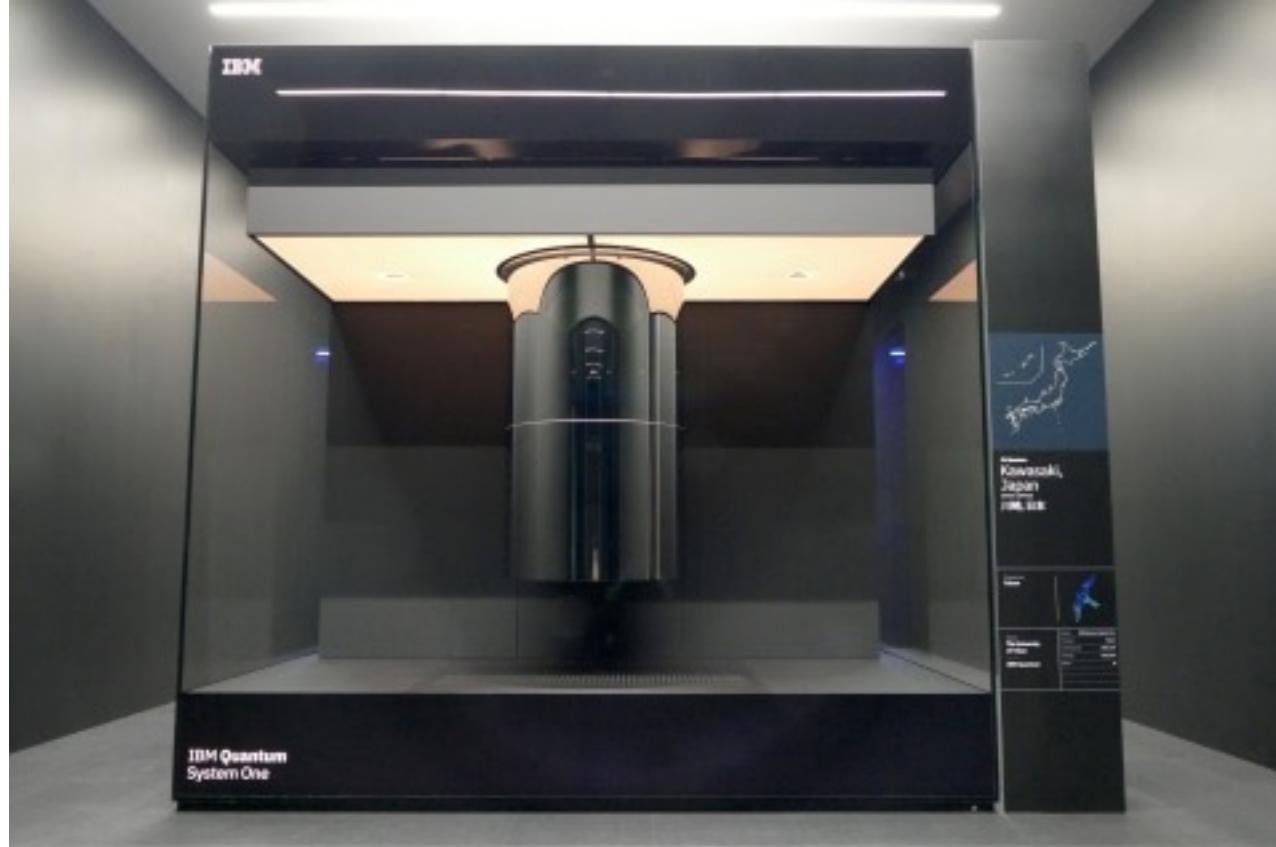
量子コンピューター5つの要件

要件クリアにむけての挑戦

量子チップのデザイン

# 実機見学はいかがでしたか？

IBM Quantum

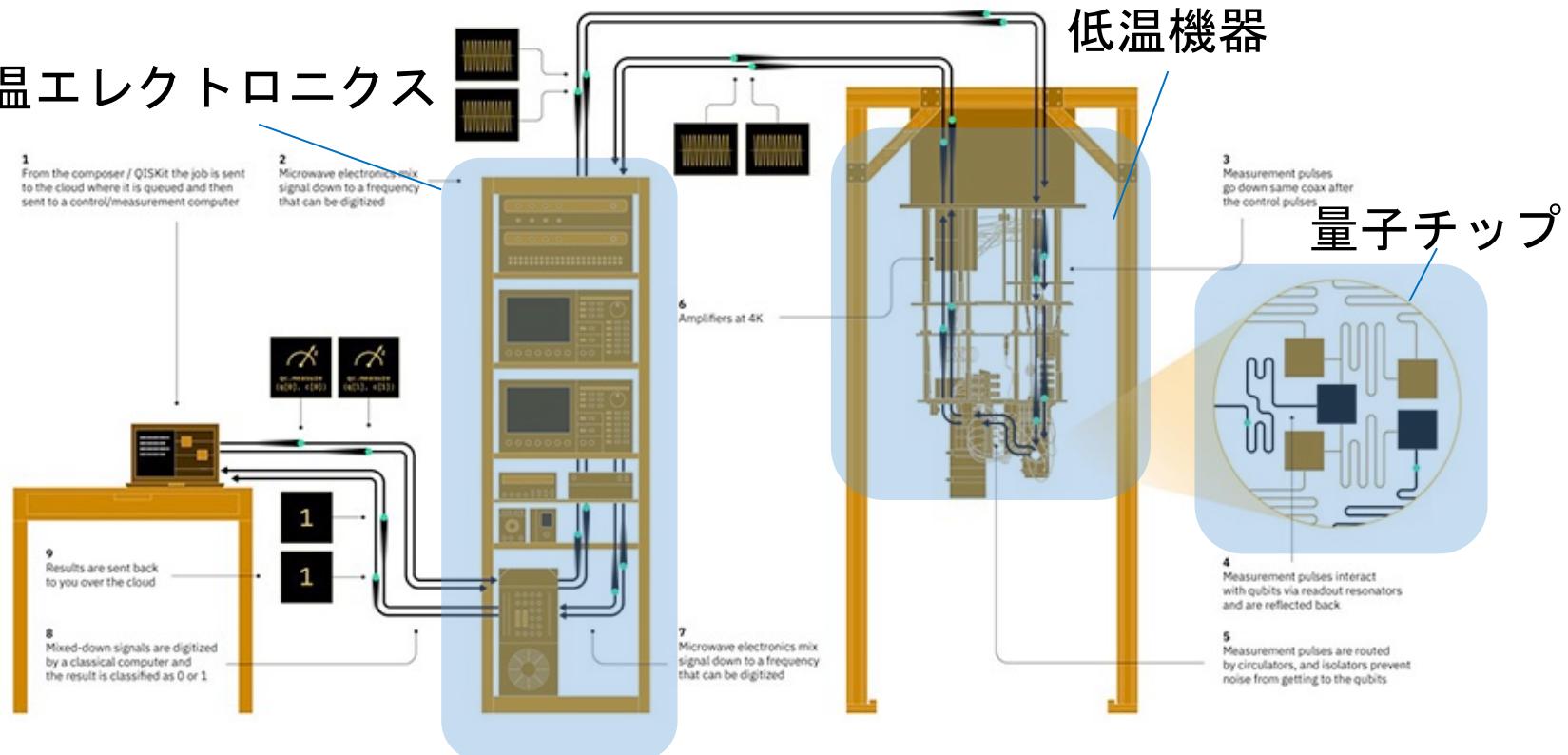


# 量子ハードウェアについて

# 量子コンピューターのハードウェア区分

IBM Quantum

## 室温エレクトロニクス



今日は量子チップを中心に講義します！

量子コンピューターに課せられた要件

心臓部の量子チップに迫る

量子チップをデザインしてみよう

# 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



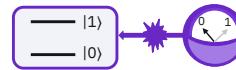
- ③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



- 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

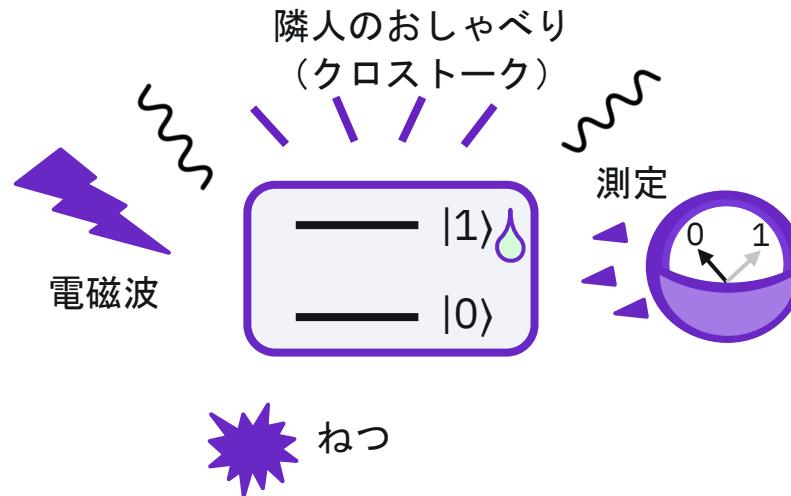


David DiVincenzo (デビット・ディヴィンченゾ) さんが  
2000年(20年以上前)に量子コンピューターの基準\*を提唱

\*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

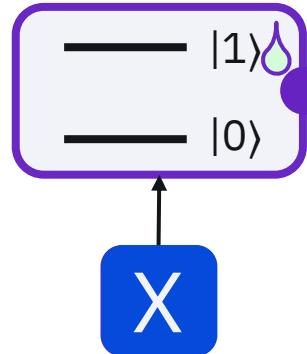


# 厄介な現実：量子ビットは繊細で環境の影響を受けやすい



# 5つの要件のクリアは簡単ではない

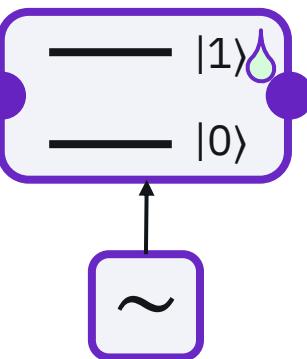
量子ビット  
(2準位系)



制御

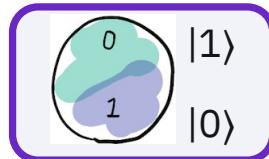


2量子ビット  
エンタングル

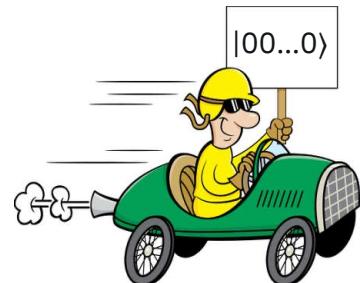
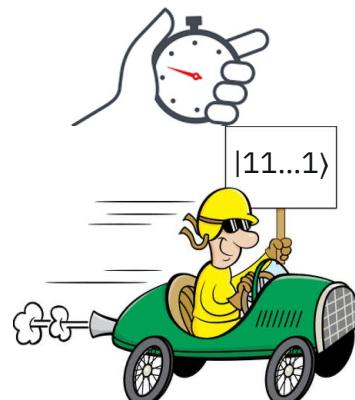
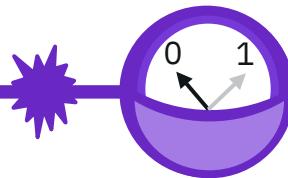
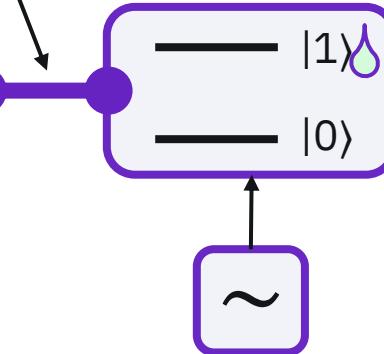


$\sim$

理想の量子状態 (コヒーレンス)



測定  
(読み取り)



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

要件 2 初期化を可能とする

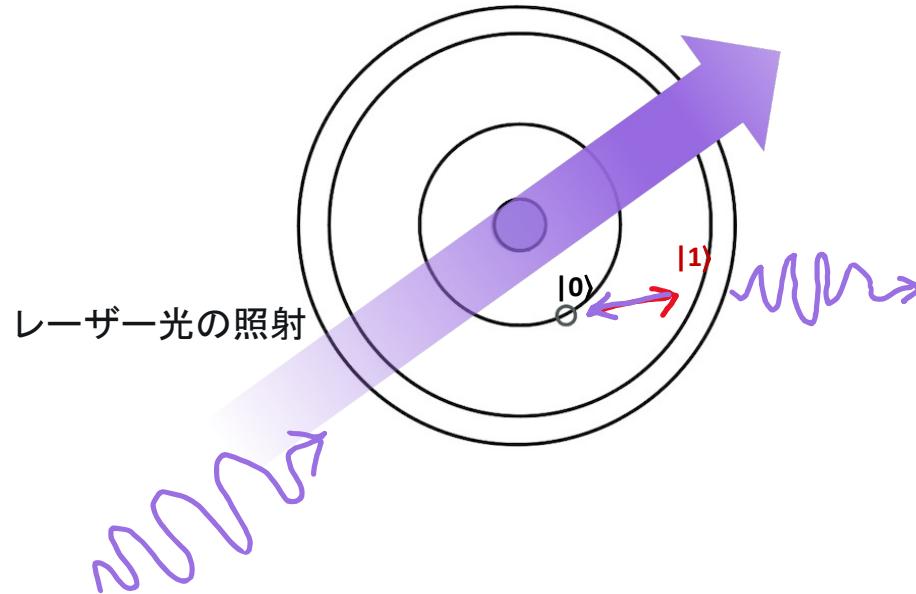


# 要件 1

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

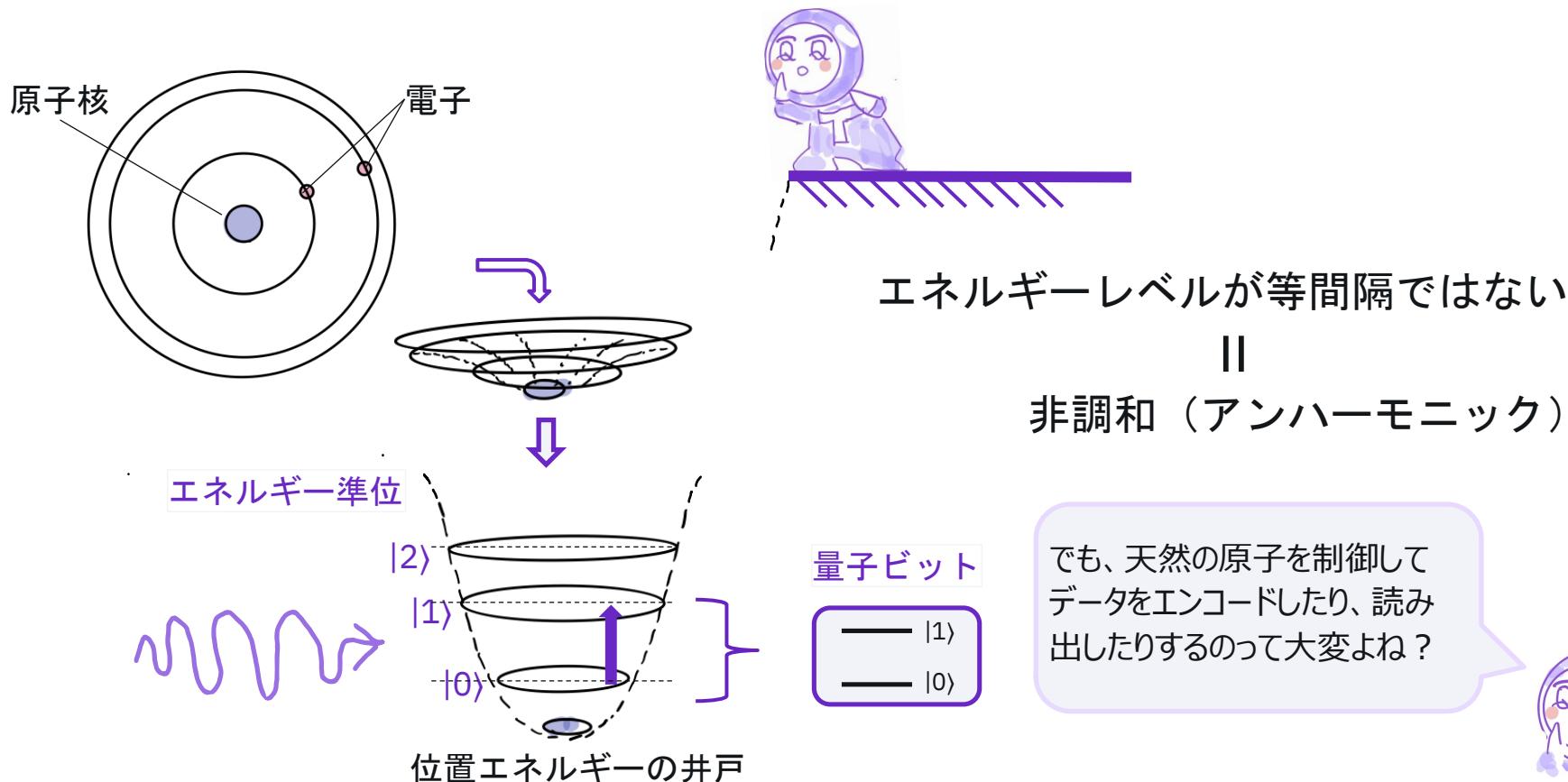
どうやって用意する？

ヒント：自然界の原子

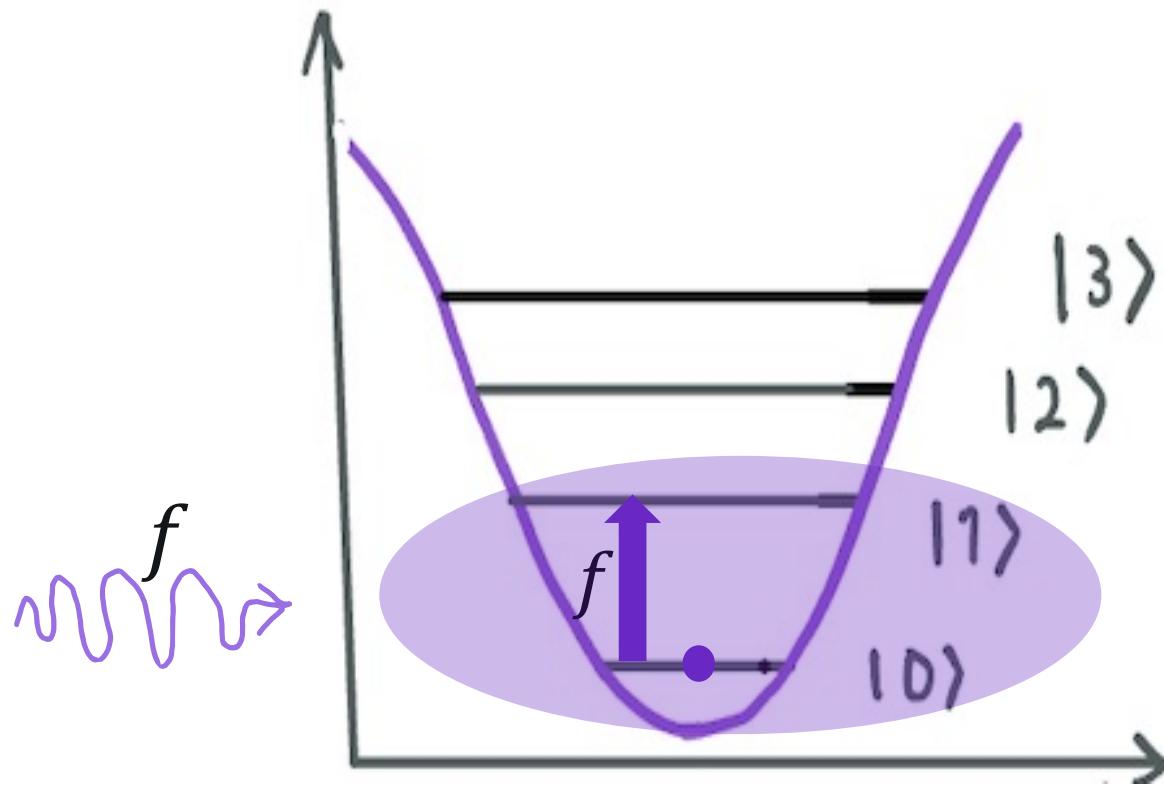


# 天然の原子は理想の量子ビットだった？

IBM Quantum



# 量子ビットが2準位系であるためには



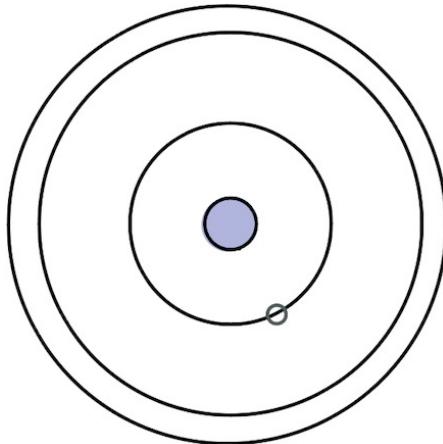
このなかだけでエネルギーが  
行ったり来たりして欲しい

励起(れいき)

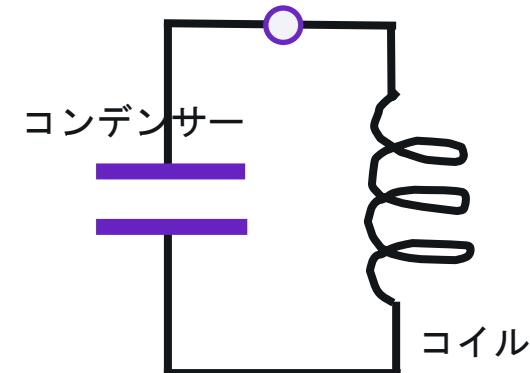
緩和(かんわ)

# 電気回路でつくる人工の原子

IBM Quantum

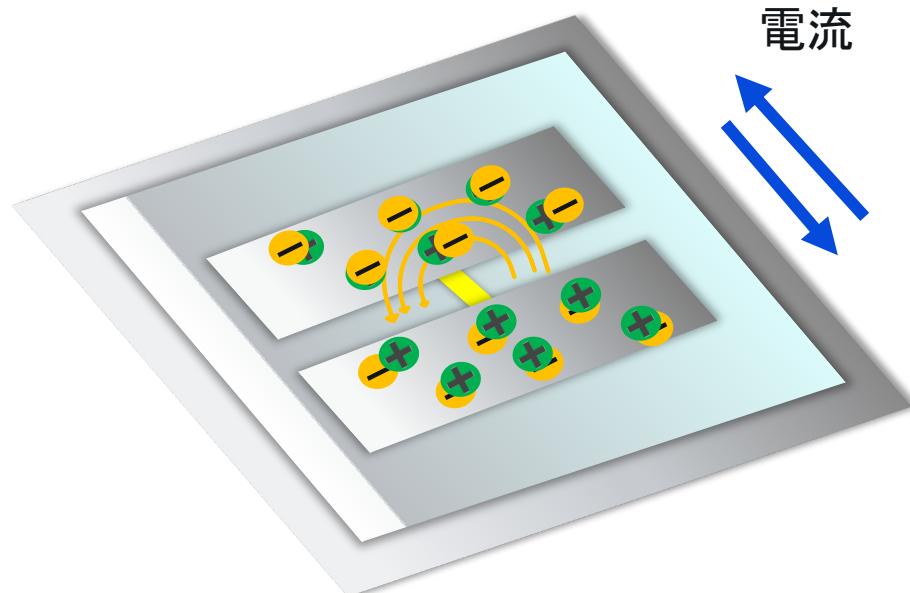
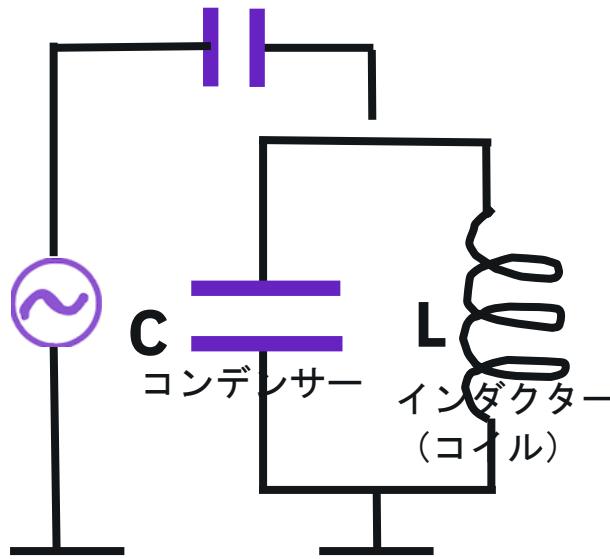


共振回路ともいいます！



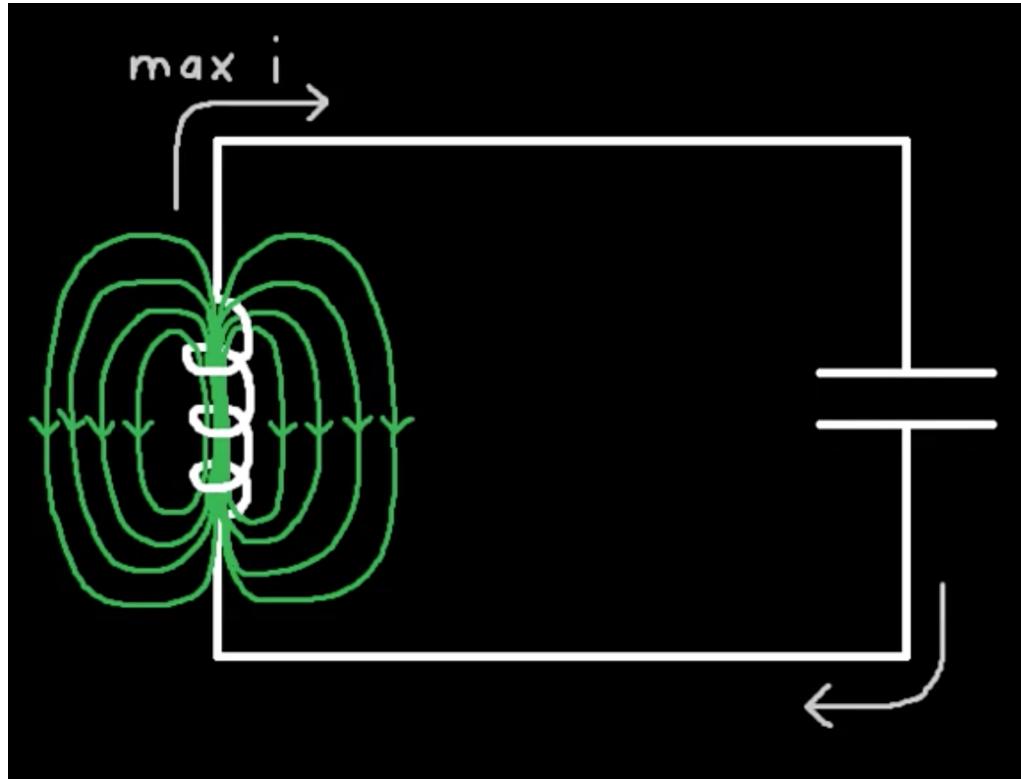
# 量子ビット回路の原型

IBM Quantum



# コンデンサーとインダクターの相互作用

IBM Quantum

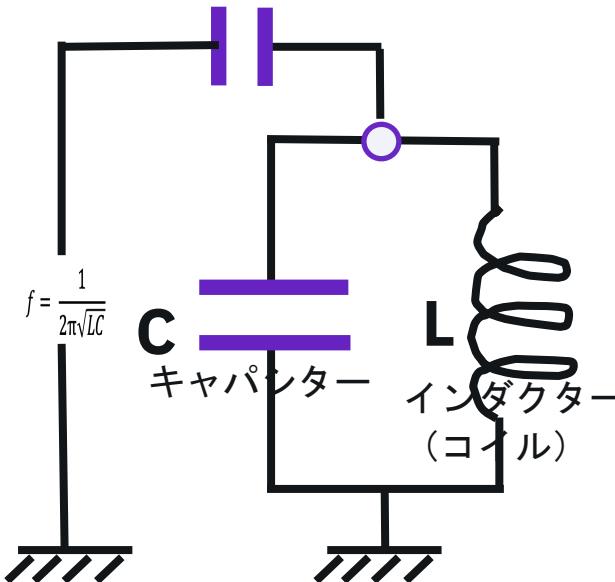


共振

# 量子ビットは共振回路

IBM Quantum

## 共振



共振周波数は

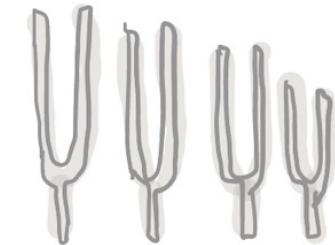
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$f = 440\text{Hz}$



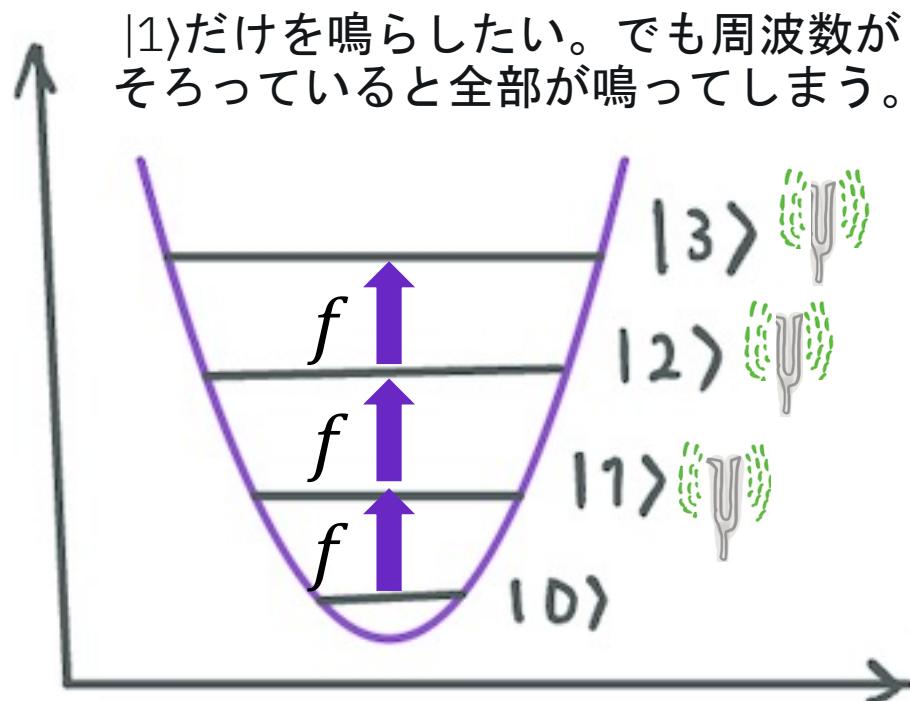
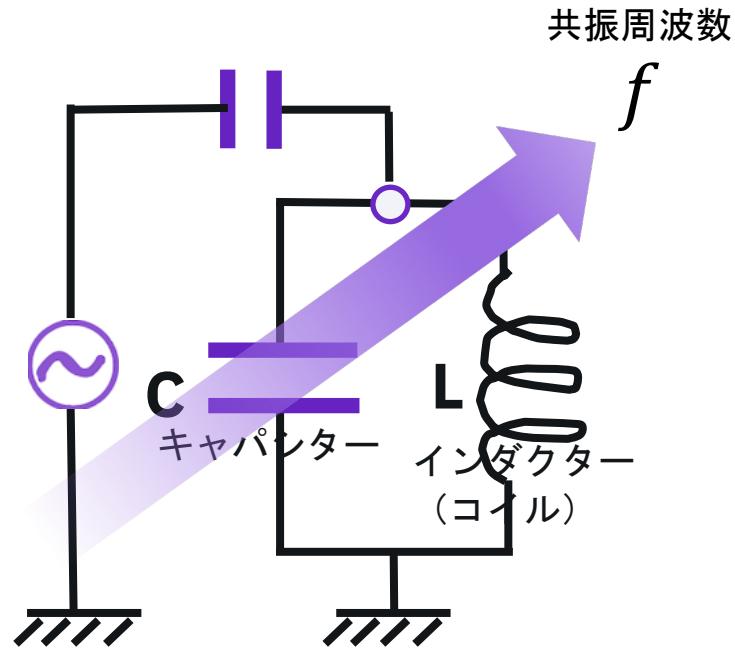
$f = 523\text{Hz}$

鳴らない

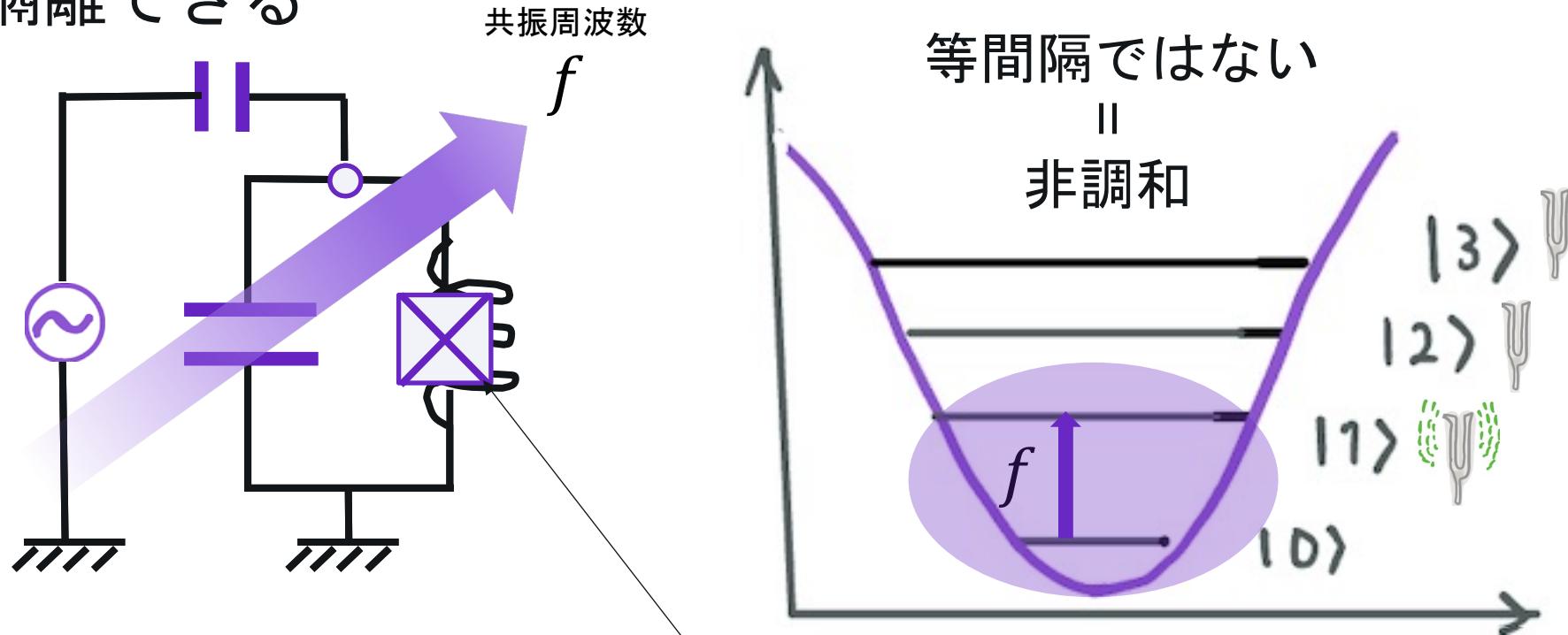


金属の厚みと長さを変えることで音叉の周波数を変えられるように  
量子ビットの回路もキャパシターやインダクターの厚み、長さ、コイル  
の巻き数などでかえられるってことだね！

# エネルギーレベルが等間隔だと…



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



などの部品：ジョセフソン・ジャンクション

# ジョセフソン・ジャンクション

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。

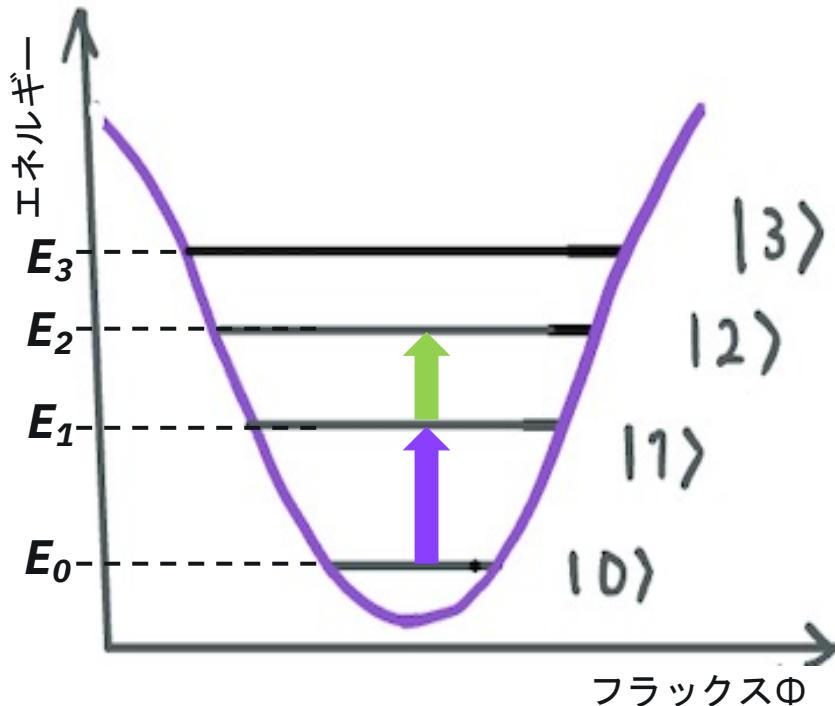


ジョセフソンさんは江崎玲於奈さんとともに、  
1973年にこの発見によって  
ノーベル物理学賞を受賞したんだよ。



# 非調和度 (Anharmonicity)

$|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ に遷移するためのエネルギーに対する $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ に遷移するためのエネルギーと $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ に遷移するためのエネルギー差の割合

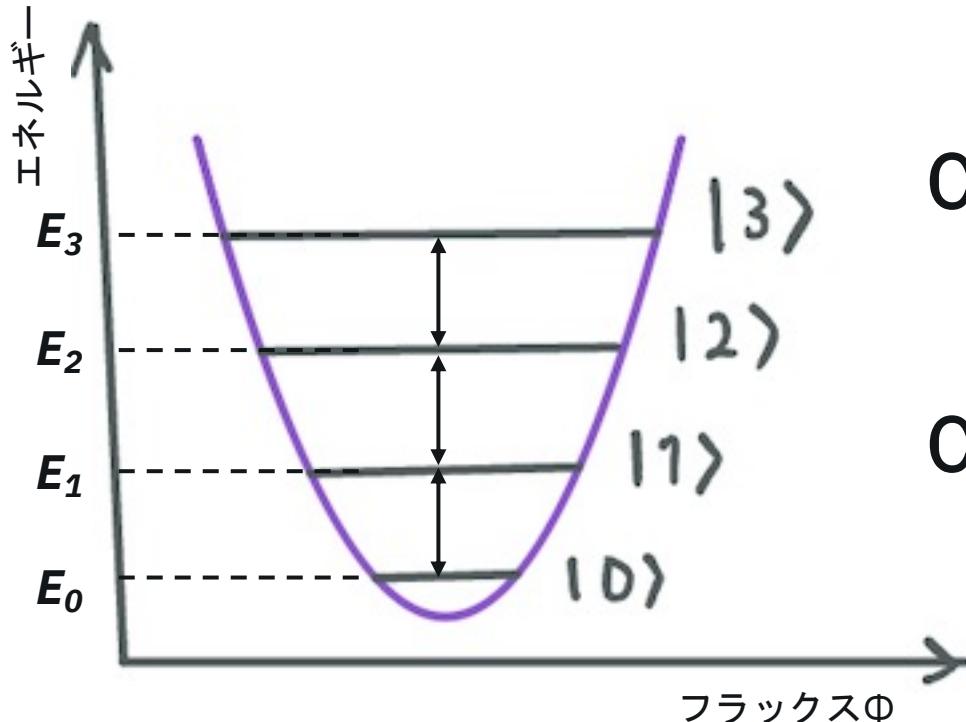


量子チップを設計する際の重要なパラメーターの一つ

$$\alpha = \frac{(E_2 - E_1) - (E_1 - E_0)}{(E_1 - E_0)}$$

非調和度の記号は通常  $\alpha$ (アルファ)で  
あらわします

# エネルギーレベルが等間隔のときの非調和度は 何になるでしょうか？



$$\alpha = \frac{(E_2 - E_1) - (E_1 - E_0)}{E_1 - E_0}$$

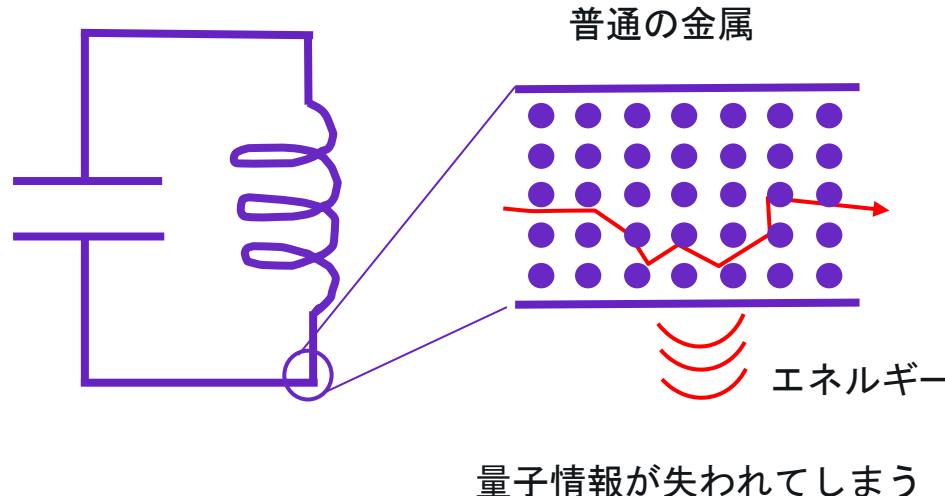
$$\alpha =$$

?

# なぜ超伝導体で回路をつくるの？(1)

IBM Quantum

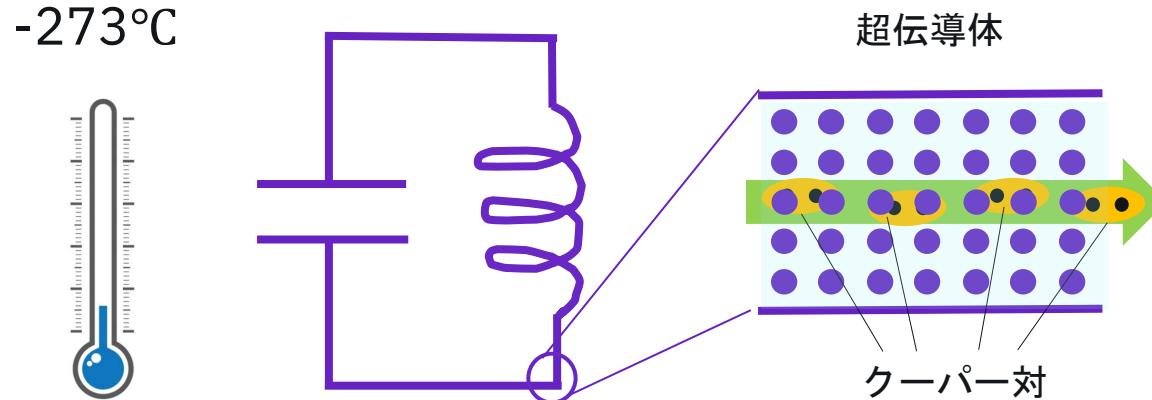
普通の金属で回路をつくると電気抵抗で量子情報が失われる



# 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

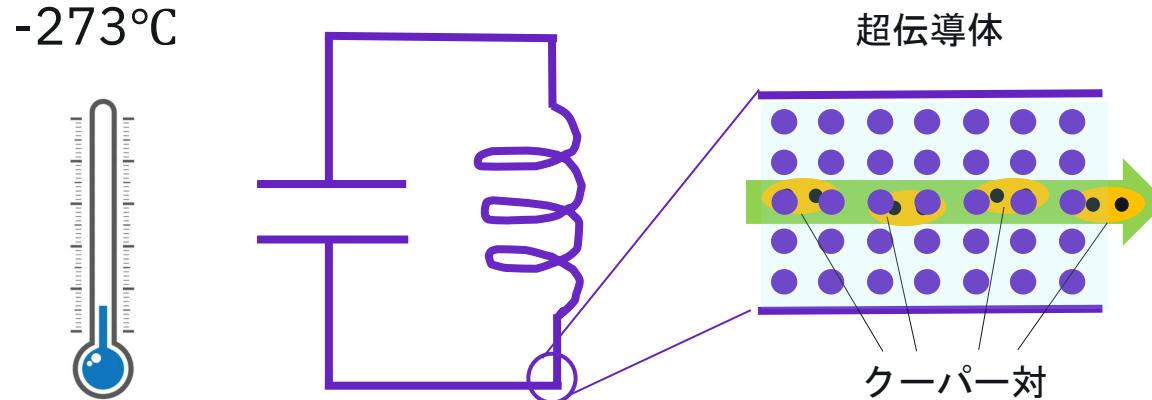


超伝導体（極低温）にすることで、  
情報ロスがゼロとなる

# 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庫



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



# 要件 2：初期化を繰り返し行える

IBM Quantum

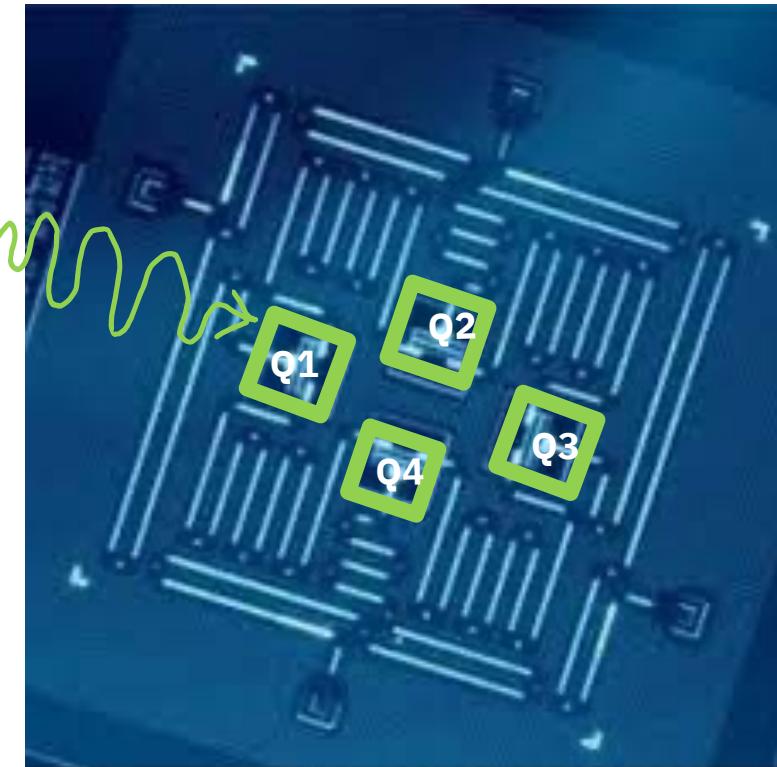
マイクロ波周波数帯のパルス信号を使う



任意波形生成装置 (AWG)

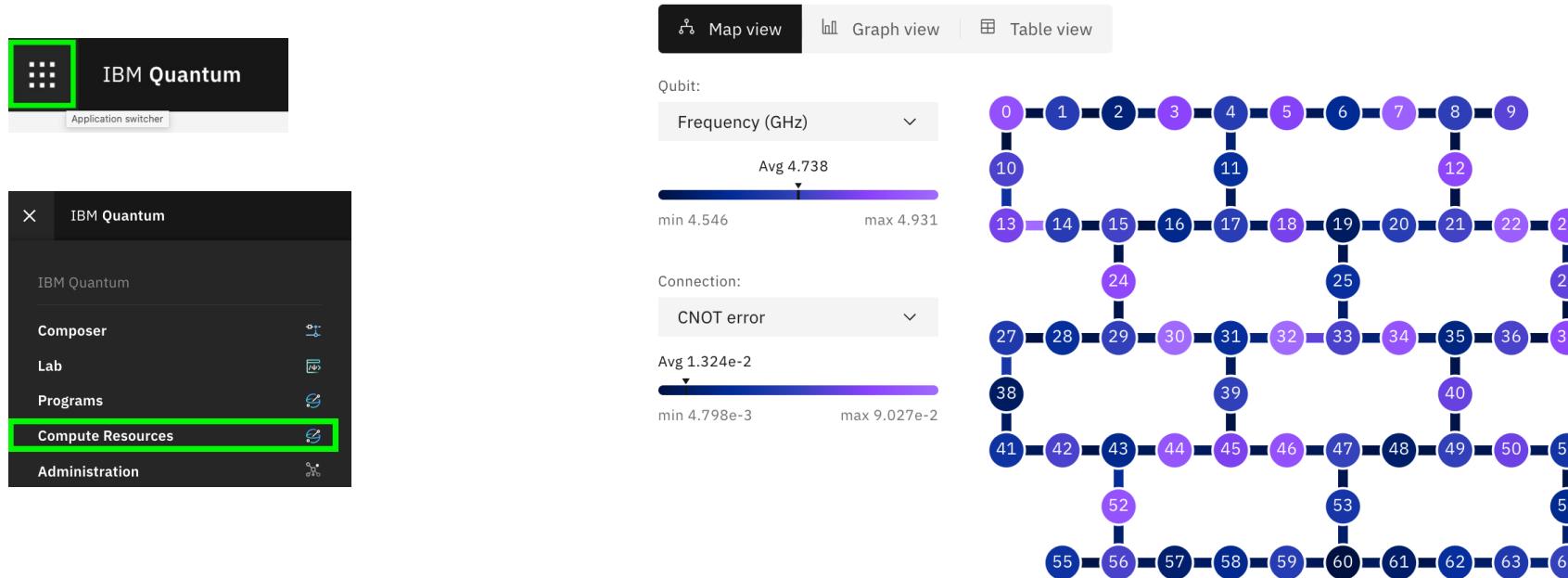
各量子ビットは $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ 遷移する固有の周波数をもつようチューニングされるパルスをつかって初期化することも可能

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！



# 実際の量子チップの周波数をチェックしてみよう！

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



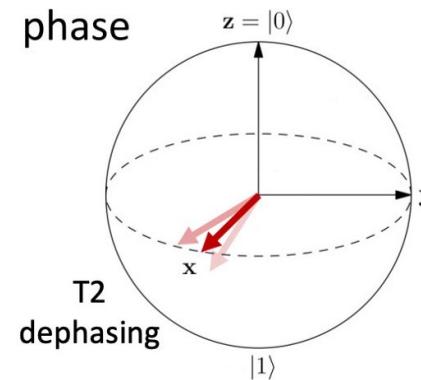
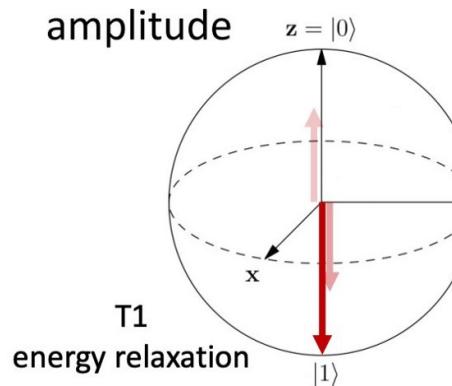
# 要件 3 理想の量子状態（コヒーレンス）の向上



# 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  
||  
さまざまなノイズ

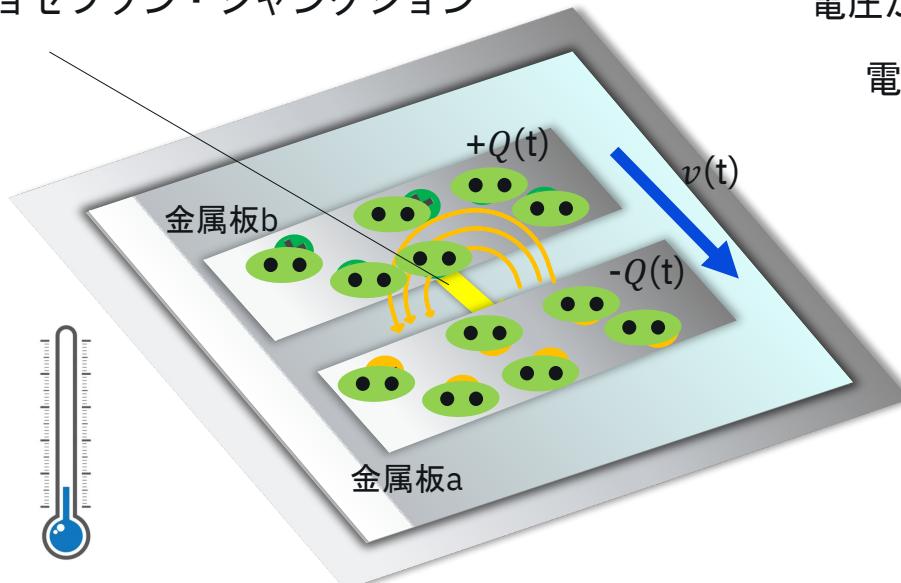
# ジョセフソンジャンクションが再び活躍！

IBM Quantum

電位差のあるところに電圧が生まれる  $v(t)$

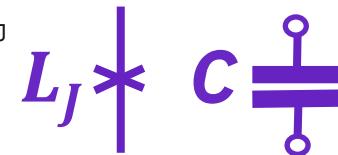
電圧がかかると電流  $I$  が流れる  $I$

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)

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

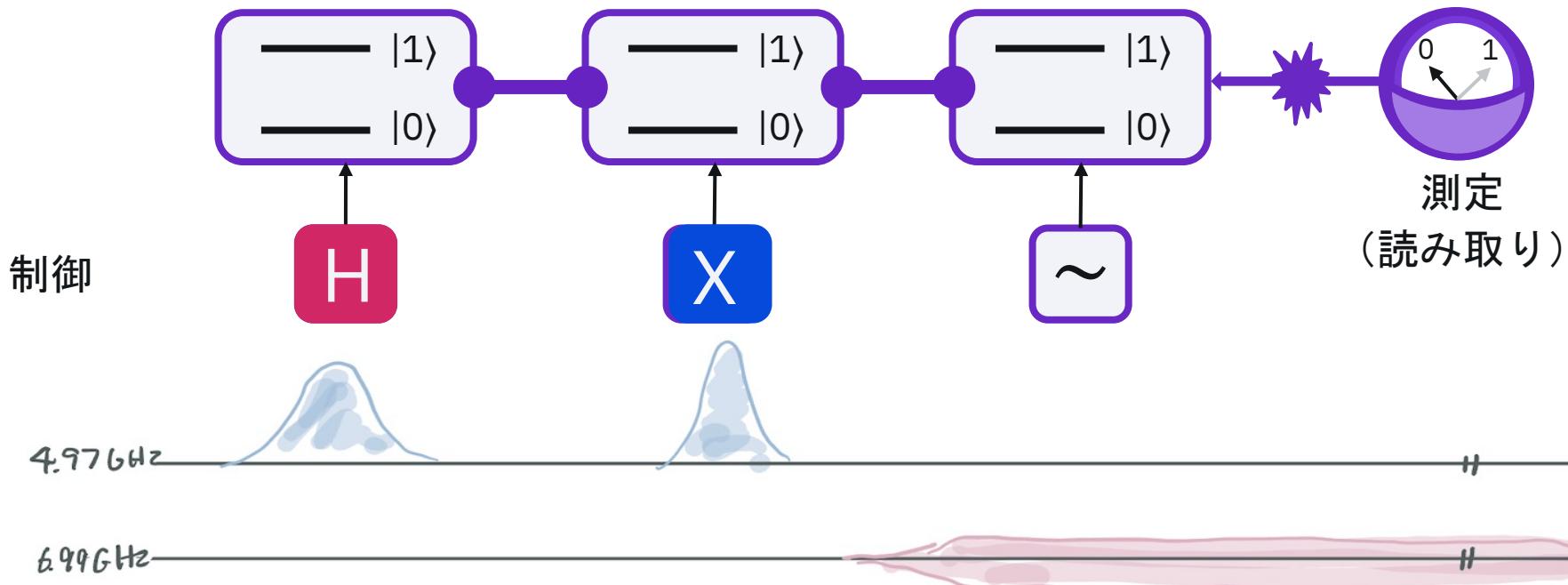
( $e$ :磁束の向きと反対に働く誘導起電力)

$E_J/E_C$  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！

# 要件 4 さまざまな量子ゲートがつくれる



# 量子ゲートもマイクロ波パルス信号



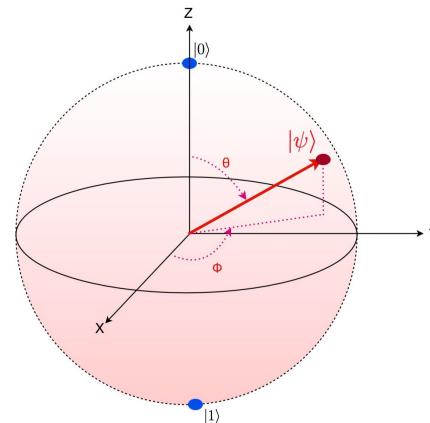
電気回路でできた量子ビットの状態を変化させるゲートも、  
実態はマイクロ波パルス信号。さまざまな量子ゲートがつくれる！

# 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。

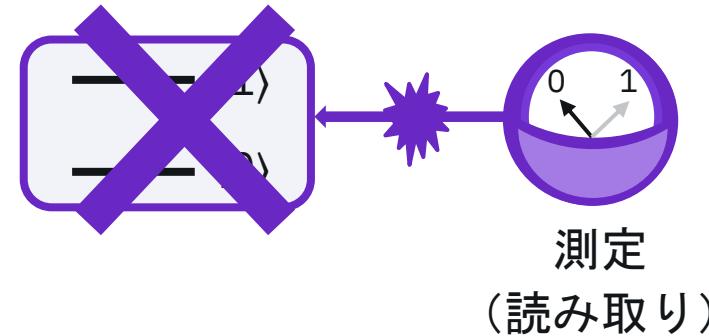
パルスの持続時間は、ブロッホ球の特定の軸に対する量子状態（ベクトル）の回転角度を制御する。したがって、異なるパルスで異なる量子ゲートをつくることができる。



## 要件 5 効果的な測定が可能であること



量子ビットは直接測定できない



量子は最初は複数の重ね合わせ状態であったものが、  
外界と接触することによる相互作用で状態が「崩壊」してしまう

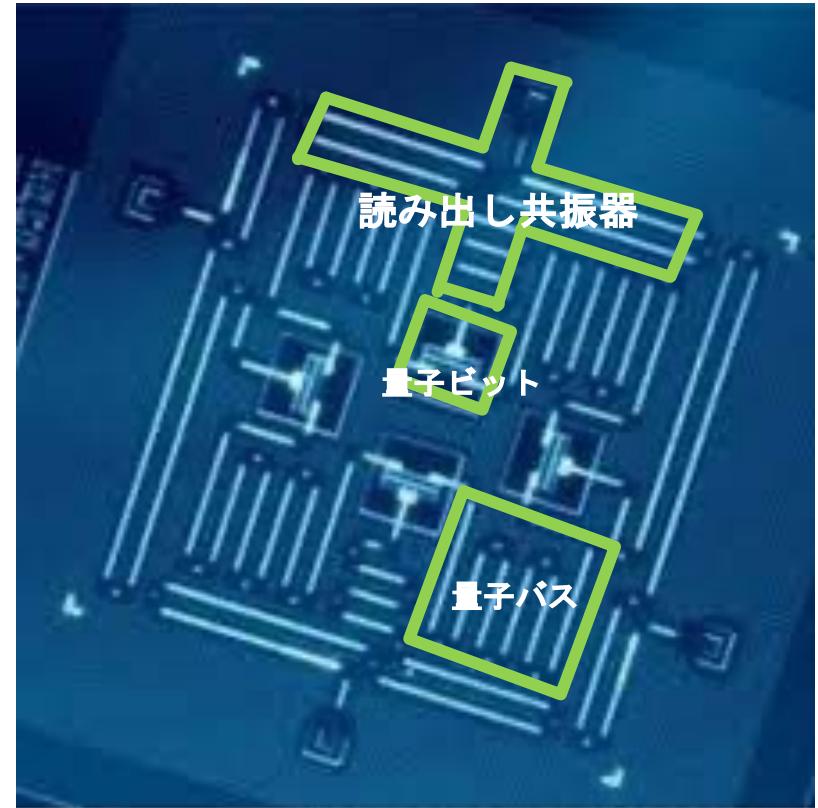
測定前の量子状態を復元することは不可能



# 測定のジレンマ

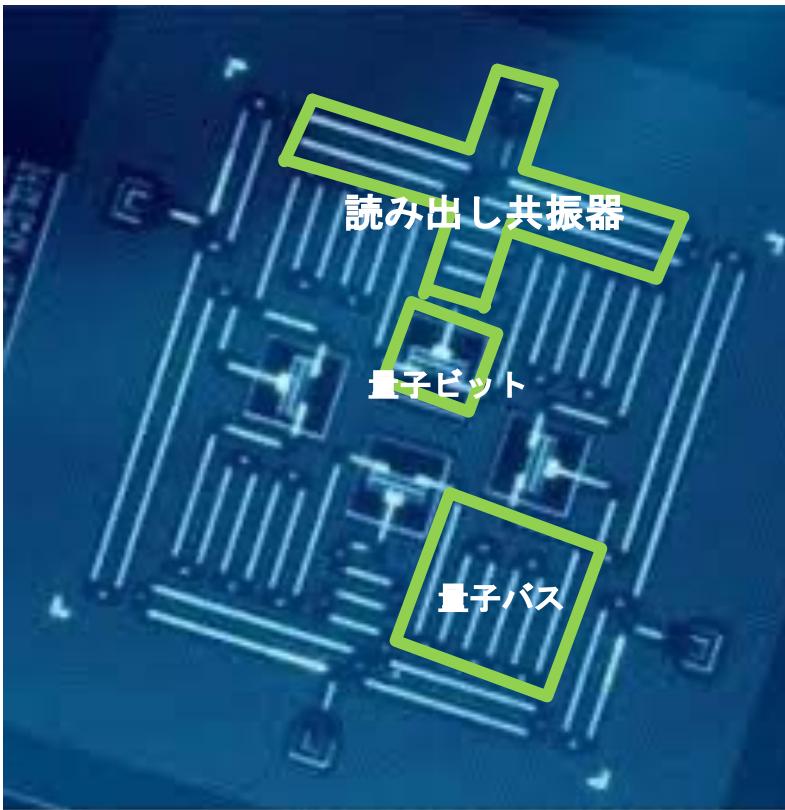
IBM Quantum

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

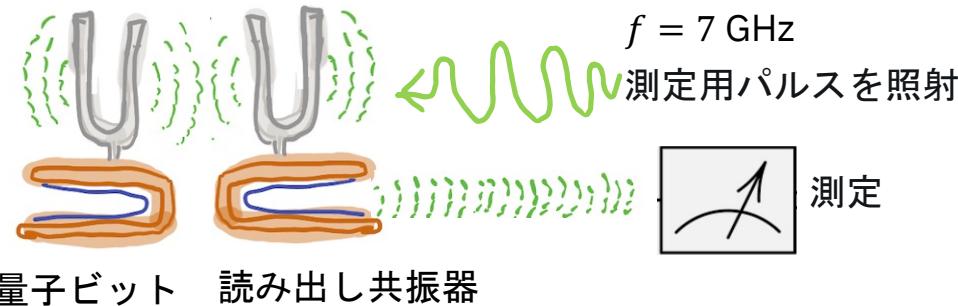
# 分散読み出しによる工夫



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



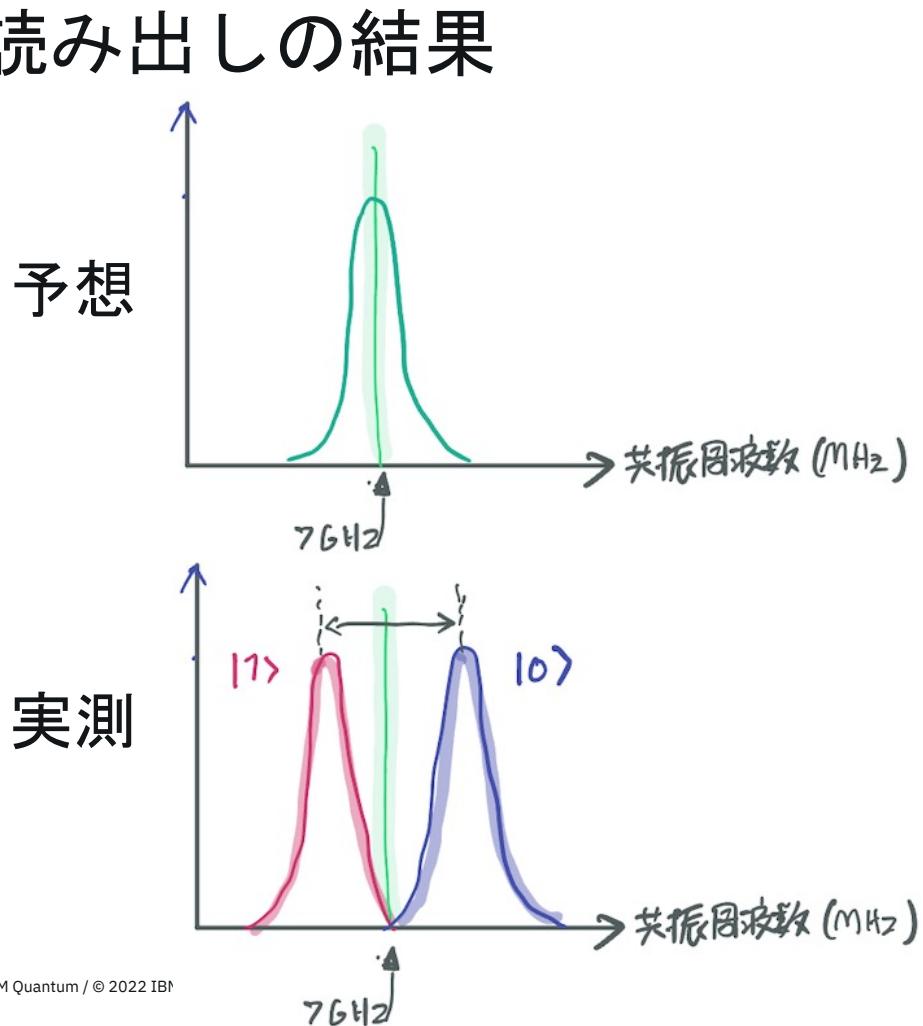
量子ビットには直接触れずに読み出し共振器の周波数のみを測定する！

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



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

$|1\rangle$ のときはマイナス方向に  
 $|0\rangle$ のときはプラス方向に

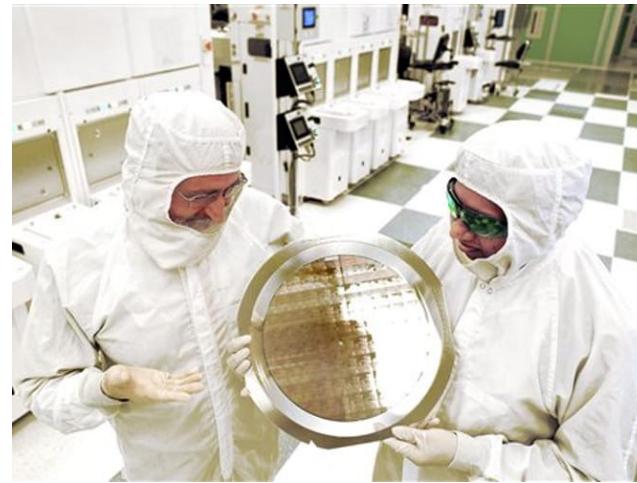
へえ！読み出し共振からの応答だけで  
量子ビットの状態を非破壊的に測定で  
きるって事だね！



# 超伝導型量子ビットのその他利点

IBM Quantum

既存の半導体製造工程をそのまま利用できます。



# 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！

量子ハードウェア技術者の  
挑戦はまだまだつづく！  
益田さんの講義も楽しみ！



# 回路量子電磁力学(Circuit QED)について

IBM Quantum

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！

# まとめ

- 量子チップは人工の原子
- 非調和な共振回路で実現できる
- 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
- 既存の半導体製造施設でつくれる

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](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](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>

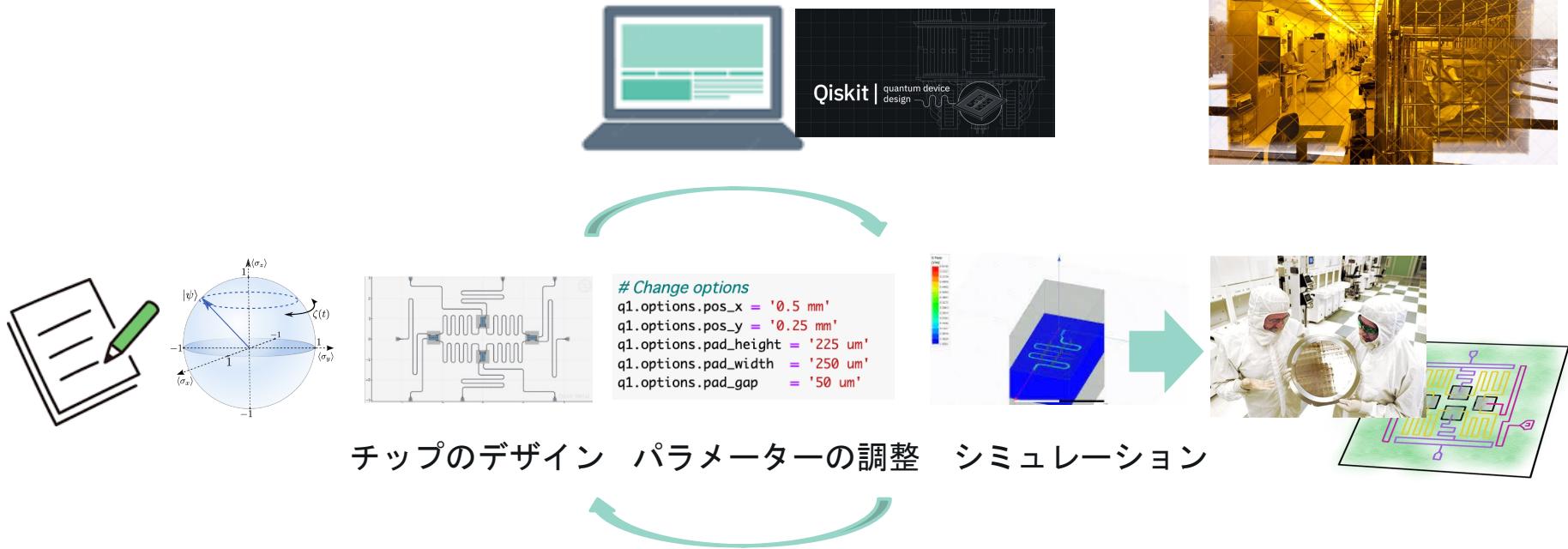
# Thank you

このあとの授業ではいよいよ量子チップの  
設計について益田さんが講義します！



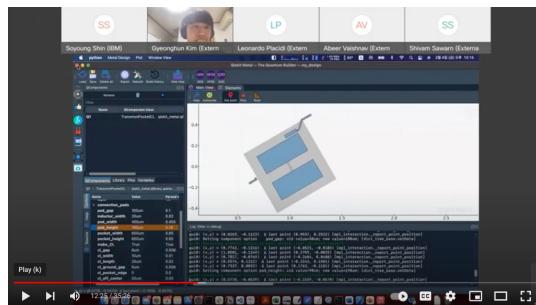
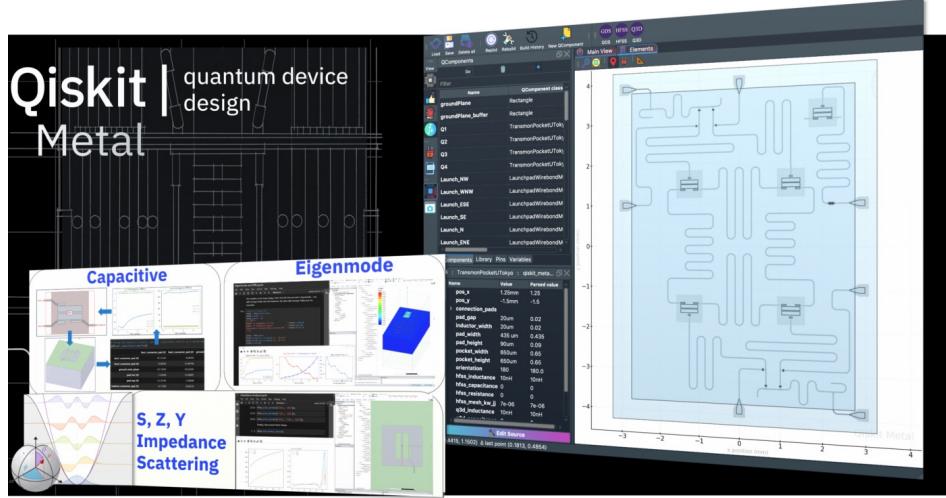
# 量子チップができるまで

IBM Quantum



# Qiskit Metal | 量子チップの設計を容易に

IBM Quantum

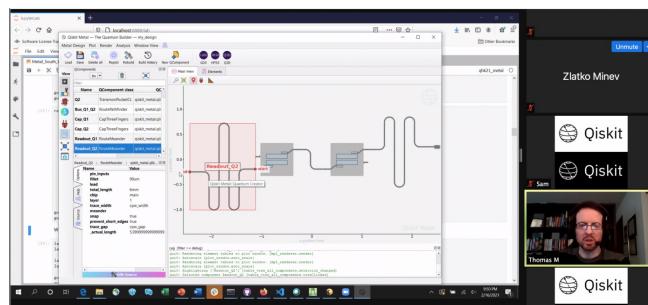


Qiskit Metal勉強会の様子

IBM Quantum / © 2022 IBM Corporation

量子コンピュータ-に特化した初の電子設計自動化（EDA）ツール。超伝導量子デバイスを容易に、そして独自の仕様で設計できるようにすることを目的としています。

ハードウェア研究促進のために東京大学様に納品された量子チップ **TSURU**もQiskit Metalをつかって設計されました。



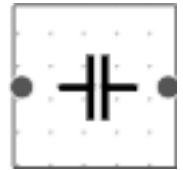
Qiskit Metal Hackathonで参加者が  
デザインした2量子ビットのトランズモン

Communityでは積極的にQiskit Metalを活用し、量子ハードウェア研究の教育ツールとしても役立てています

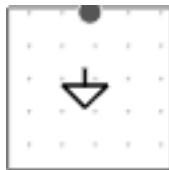
Qiskit Metal

For designing quantum hardware and processors.

# コンポーネント



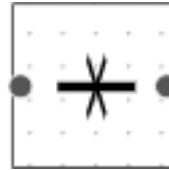
Capacitor



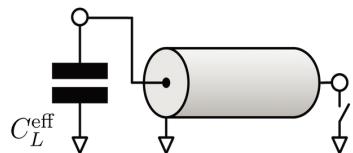
Ground



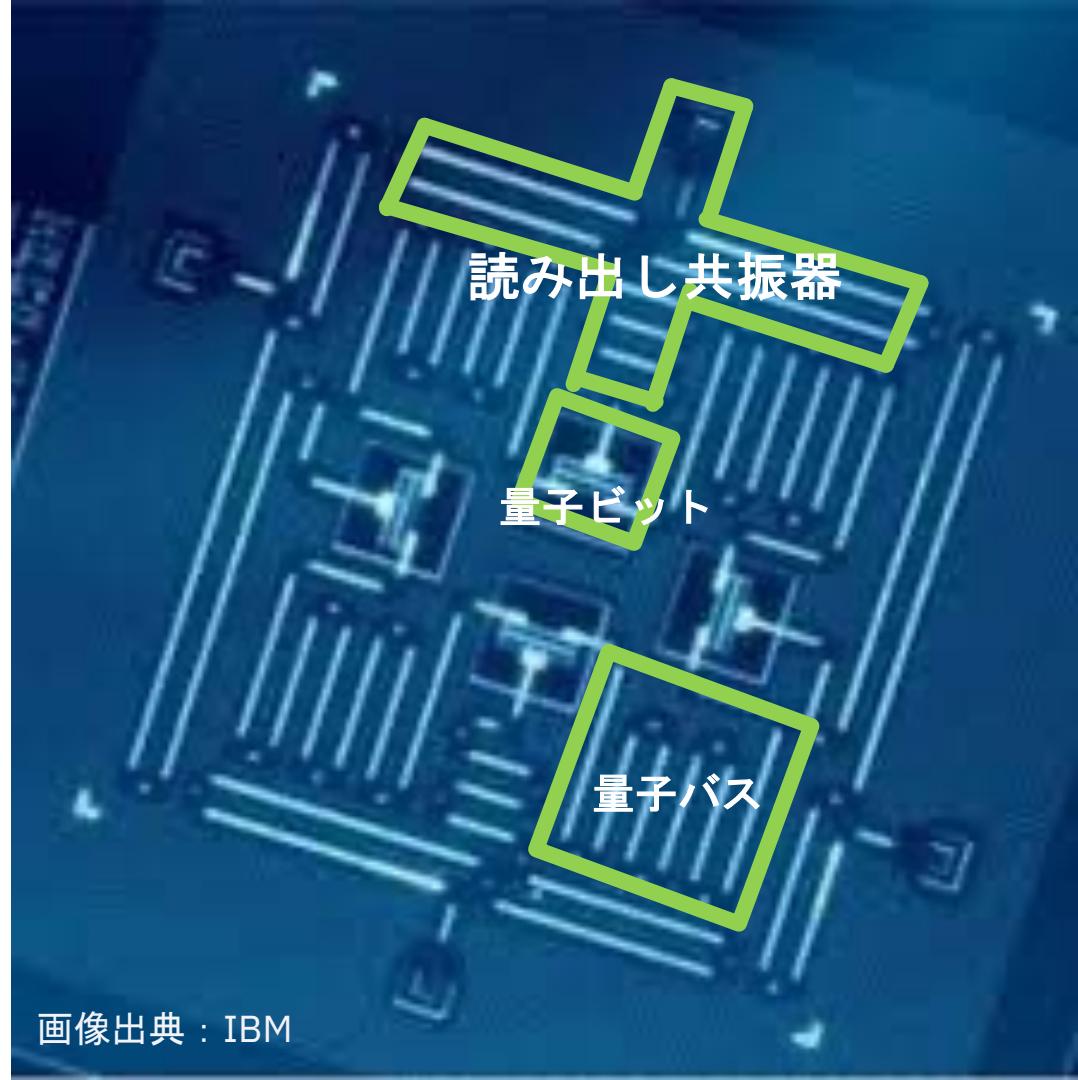
Inductor



Josephson Junction



Readout resonator



画像出典：IBM