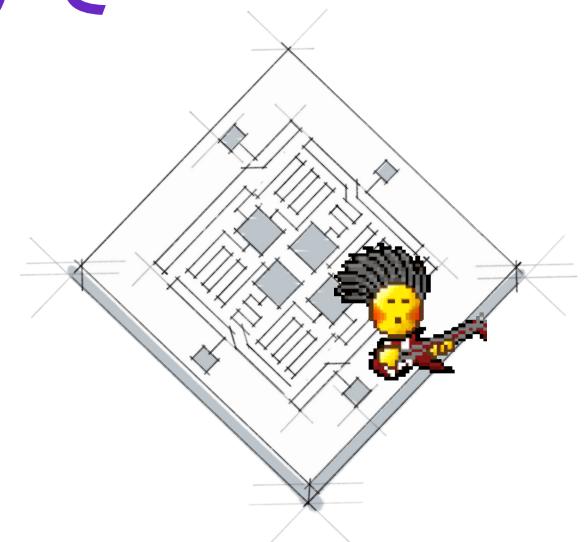


Kawasaki Quantum Summer Camp

# 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

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

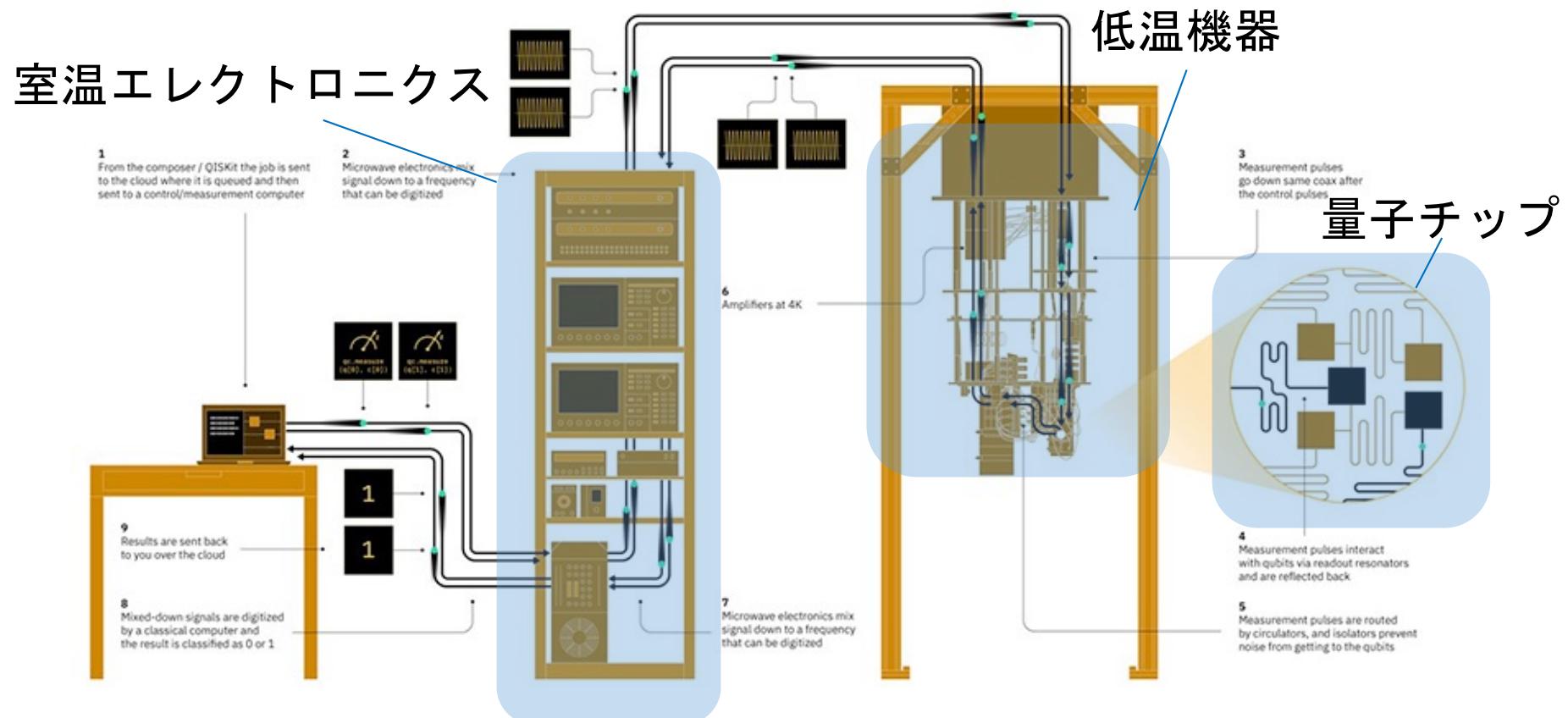
要件クリアにむけての挑戦

量子チップのデザイン

# 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



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

# 今日のゴール

IBM Quantum

**なんとなく、雰囲気だけでも量子コンピュータ  
をちょっとなり理解できた気になる。**

# 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

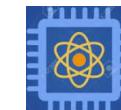
① 量子ビットが $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態がとれて連結してつかえること



② 初期化可能：繰り返し同じ状態を用意できること



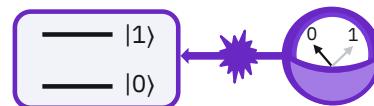
③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



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



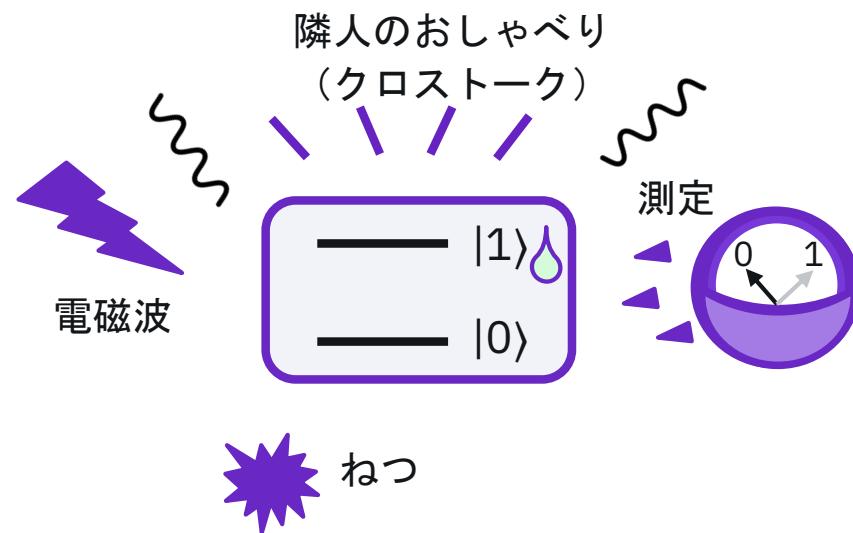
# 量子コンピューター5つの要件

IBM Quantum

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



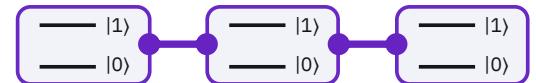
# 厄介な現実：量子ビットは繊細で環境の影響を受けやすい



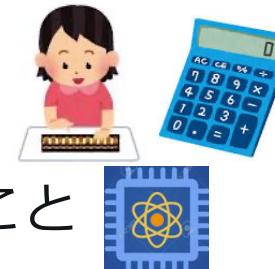
# 量子コンピューター 5つの要件

IBM Quantum

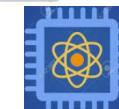
① 量子ビットが $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態がとれて連結してつかえること



② 初期化可能：繰り返し同じ状態を用意できること



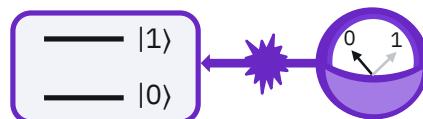
③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



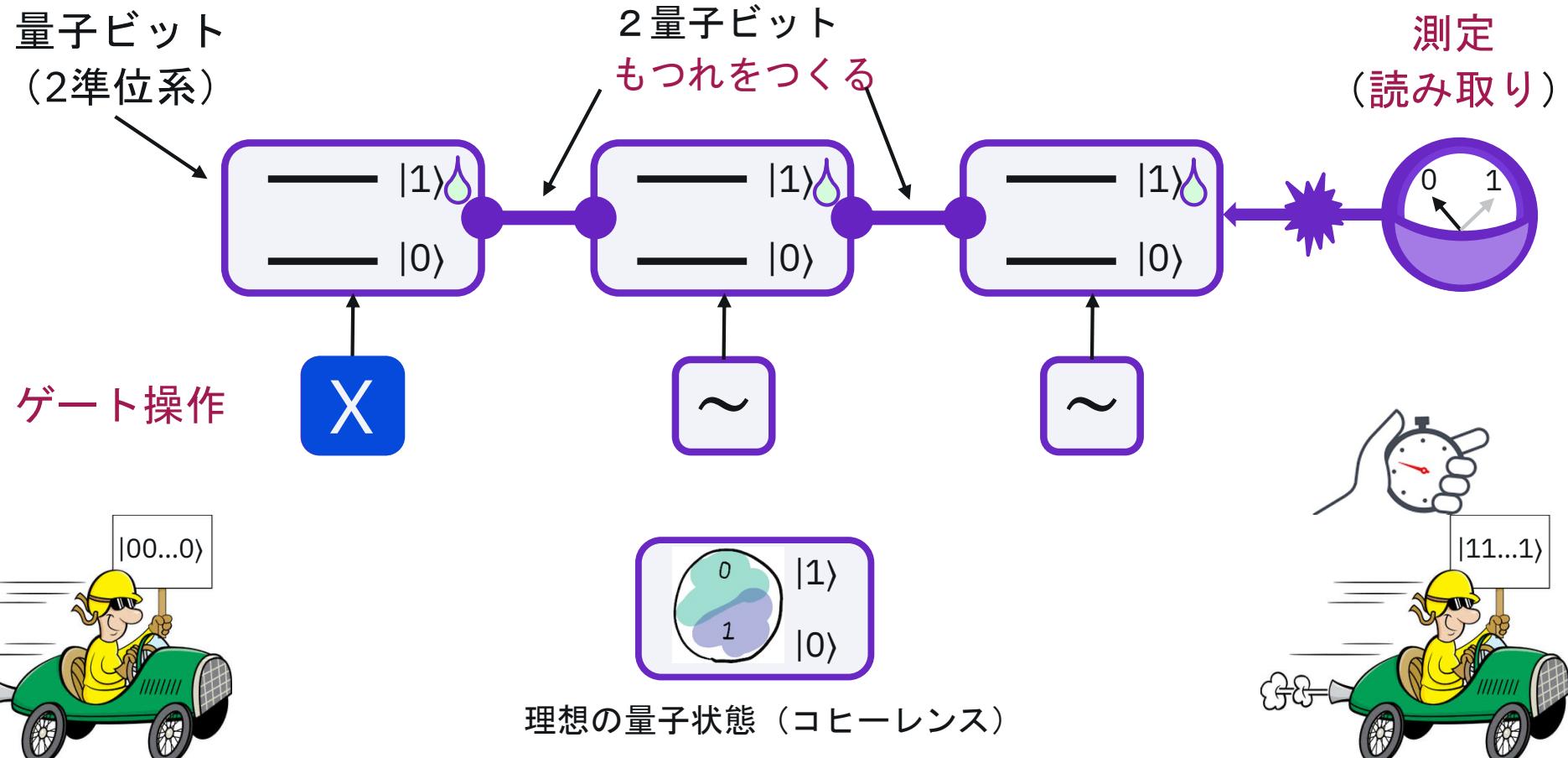
④ 様々な種類の量子ゲートをつくれること



⑤ 効果的な測定ができること



# 5つの要件のクリアは簡単ではない



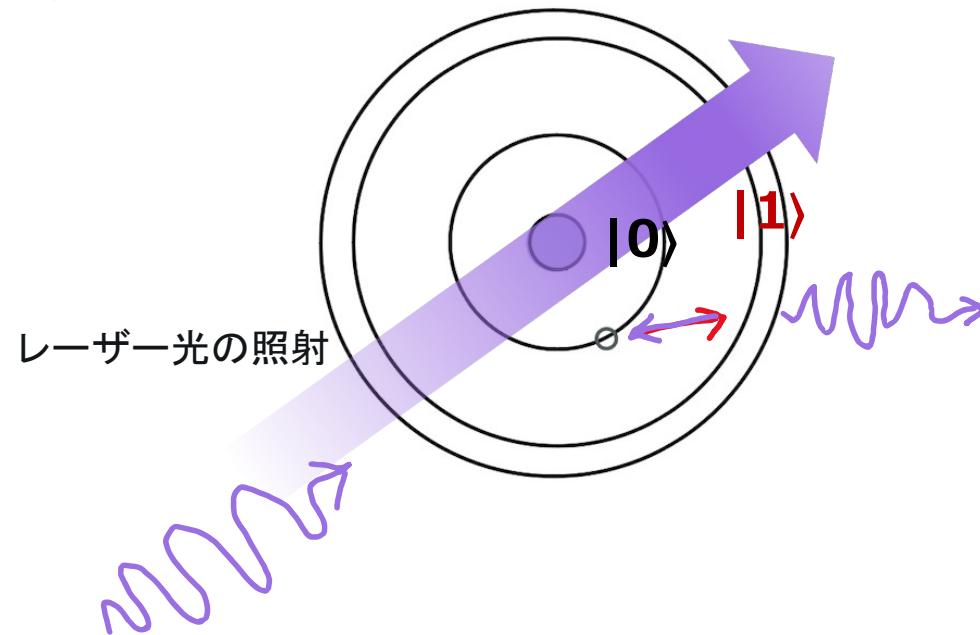
- 要件 1  $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態(2準位系) を用意する
- 要件 2 初期化を可能とする



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

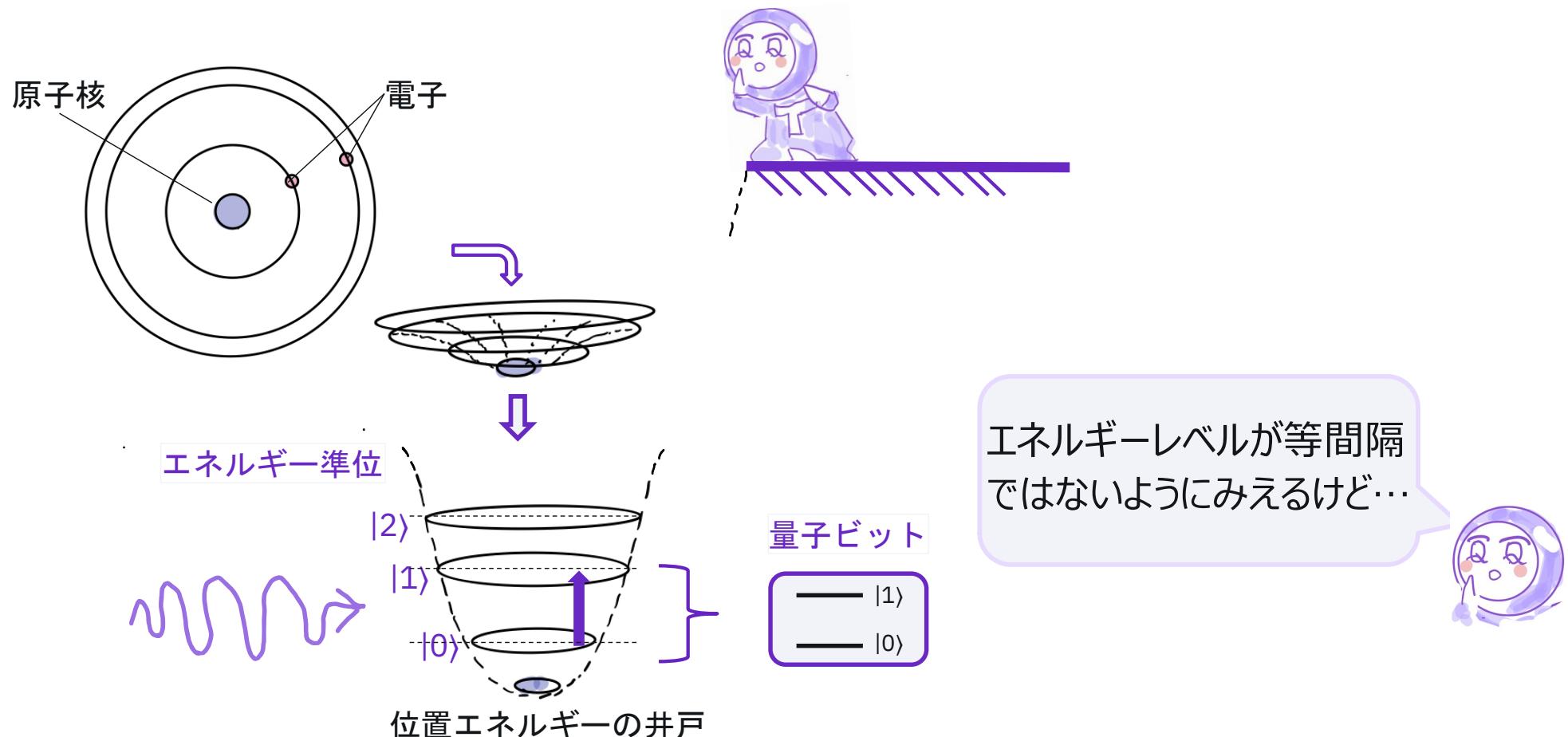
どうやって用意する？

ヒント：自然界の原子



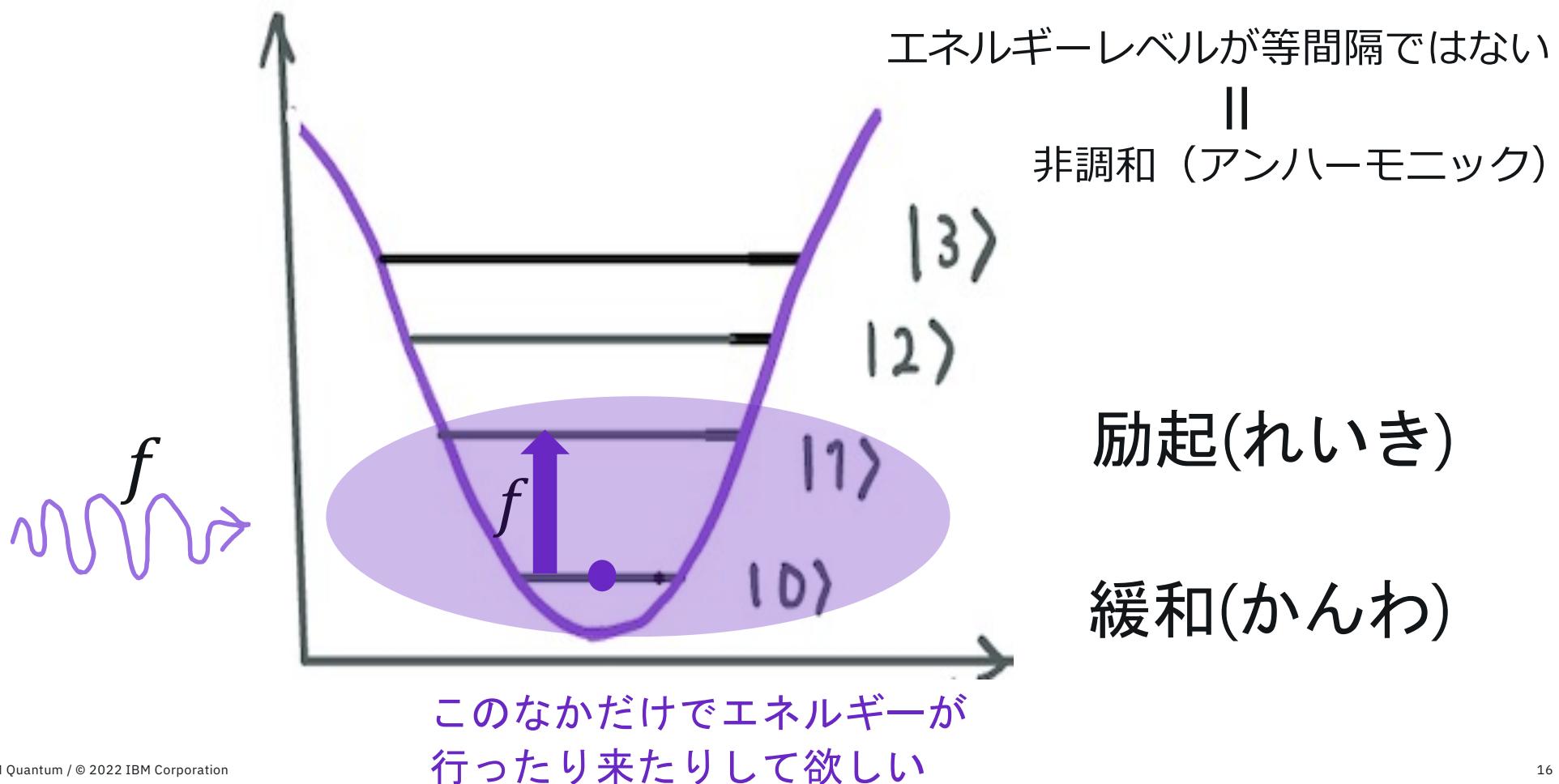
# 天然の原子は理想の量子ビットだった？

IBM Quantum



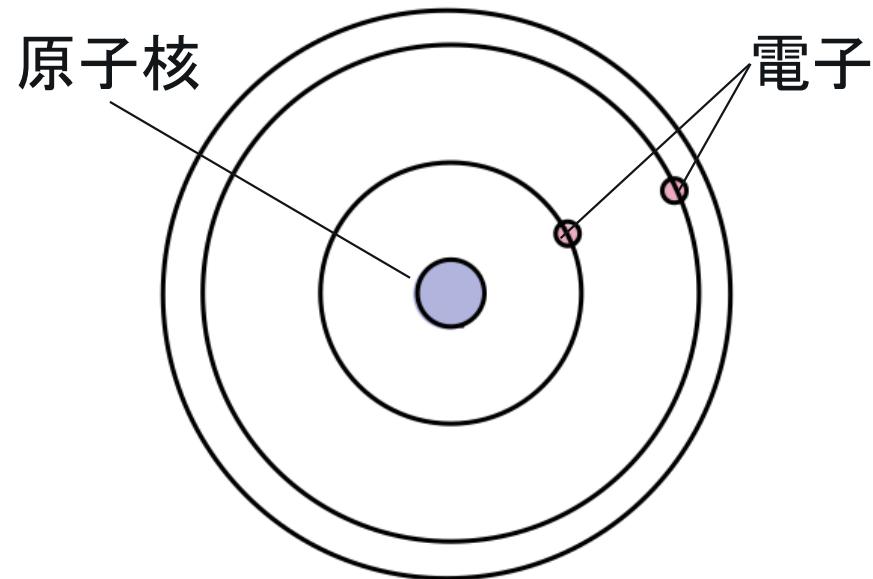
# 量子ビットが2準位系であるためには

IBM Quantum



# 天然の原子を量子ビットにすればいい？

IBM Quantum



エネルギーレベルが等間隔  
ではないようにみえるけど…



2022/08/09 プレスリリース

## 単一原子レベルで世界最速の2量子ビットゲートに成功 – 超高速量子コンピュータ実現へのブレークスルー – (大森賢治グループ) 【記者会見動画付き】

Like 20

ツイート

B! 22



### 【関連動画】

記者会見の動画は下記URLからご覧ください。

<https://www.youtube.com/watch?v=oAzgWoWIkGY>

大森グループホームページ

[https://groups.ims.ac.jp/organization/ohmori\\_g/](https://groups.ims.ac.jp/organization/ohmori_g/)

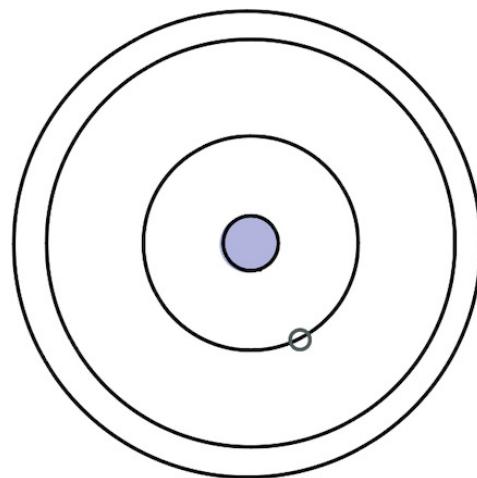
### 発表のポイント

- ・「ほぼ絶対零度に冷却したミクロン間隔の原子2個を、超高速レーザーで操作する」という全く新しい方法によって、世界最速の2量子ビットゲート（量子コンピューティングに必要不可欠な基本演算要素）を実行することに成功した。
- ・過去20年あらゆる量子コンピュータ・ハードウェアは、計算精度を劣化させる外部ノイズの影響から逃れるために、より速いゲートを追いかけてきた。
- ・冷却原子型の量子コンピュータは現時点では開発が先行している超伝導型やイオントラップ型の限界を打ち破る画期的なハードウェアとして急速に世界の産学官の注目を集めており、今回の超高速ゲートの実現はこの潮流を大きく加速させるものである。

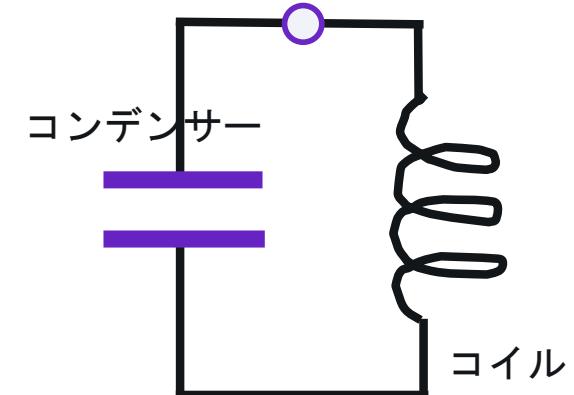
人工の原子は電気回路でつくることができる

# 人工の原子をつくるには？

IBM Quantum



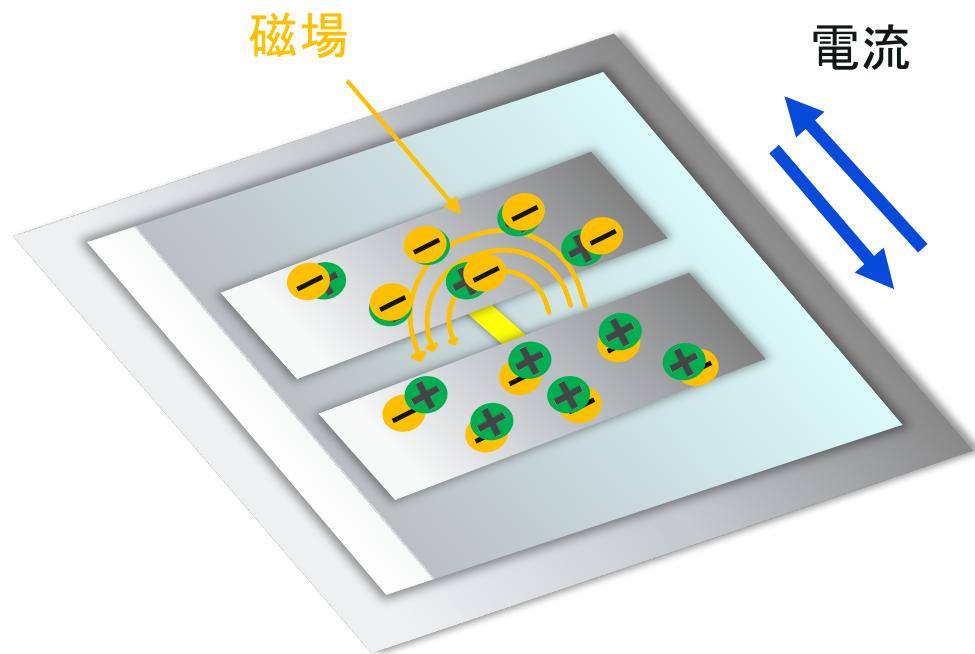
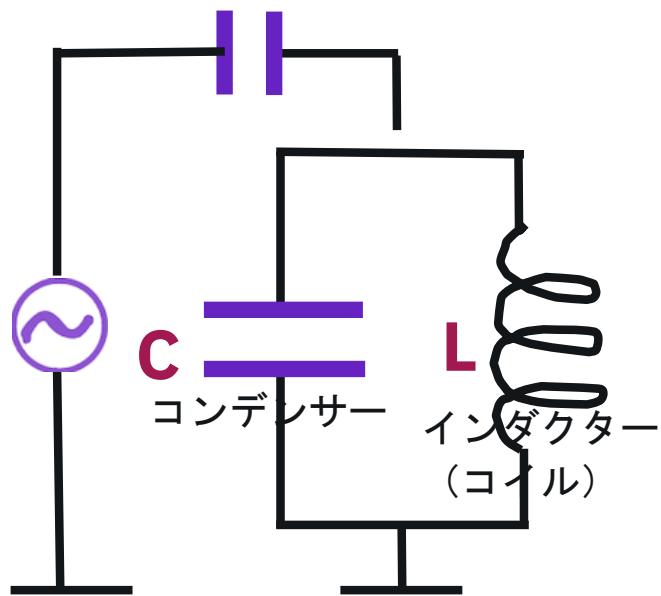
LC回路



共振回路ともいいます！

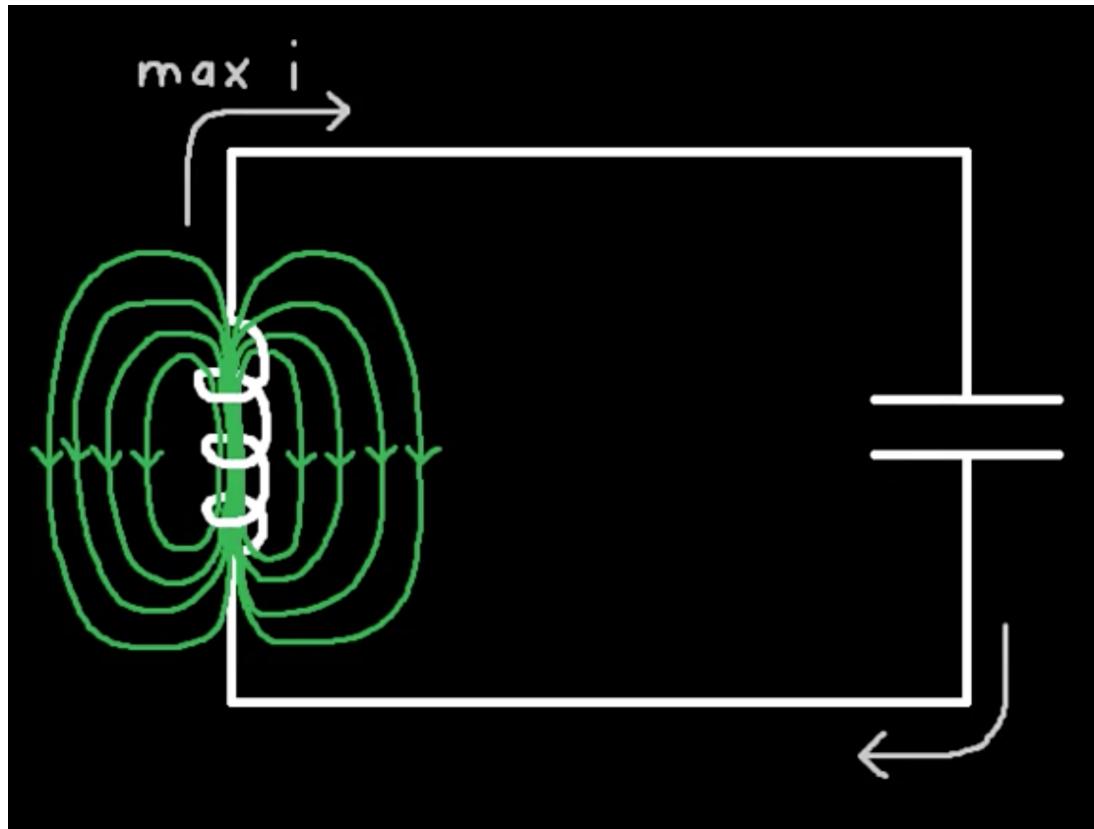
# 量子ビット回路の原型

IBM Quantum

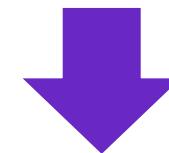


# LC回路は共振回路

IBM Quantum



電流  $i$  MAX

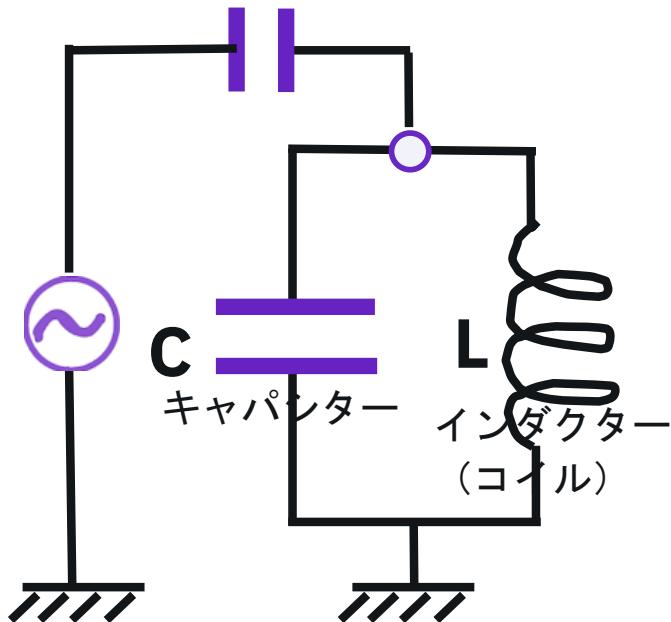


磁場 MAX

共振

# 量子ビットは共振回路

IBM Quantum



共振周波数は

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

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



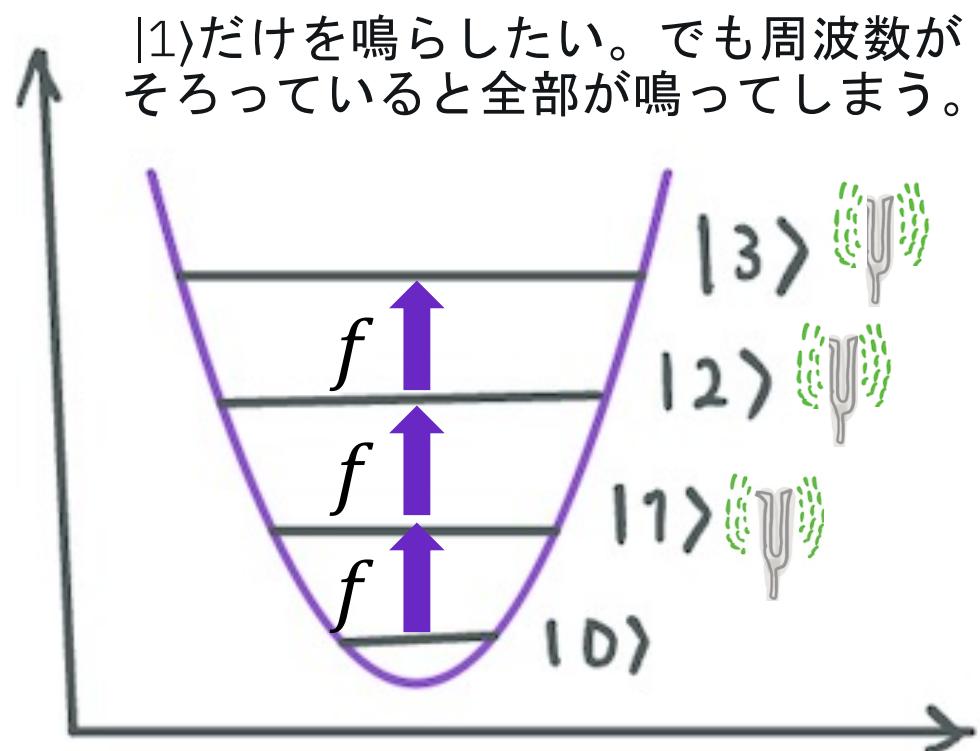
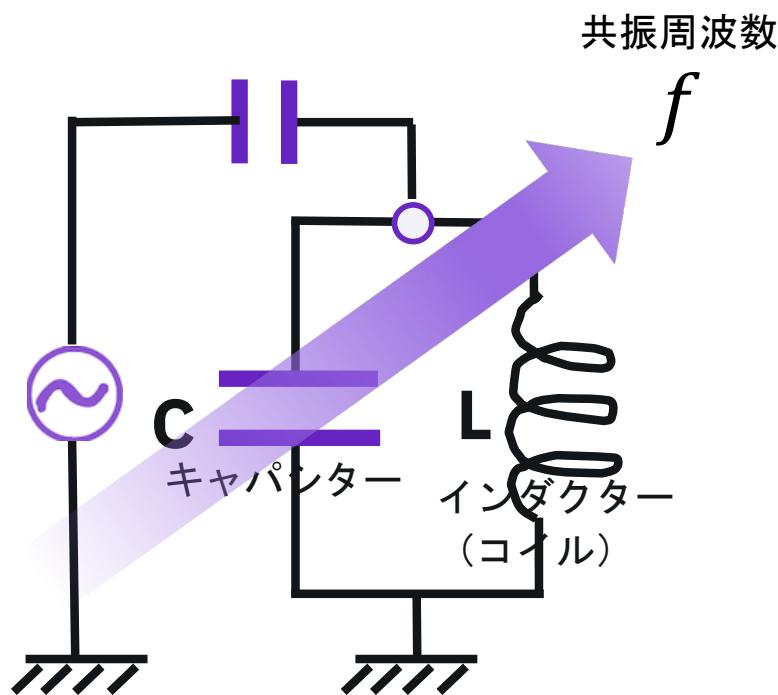
$$f = 523\text{Hz}$$



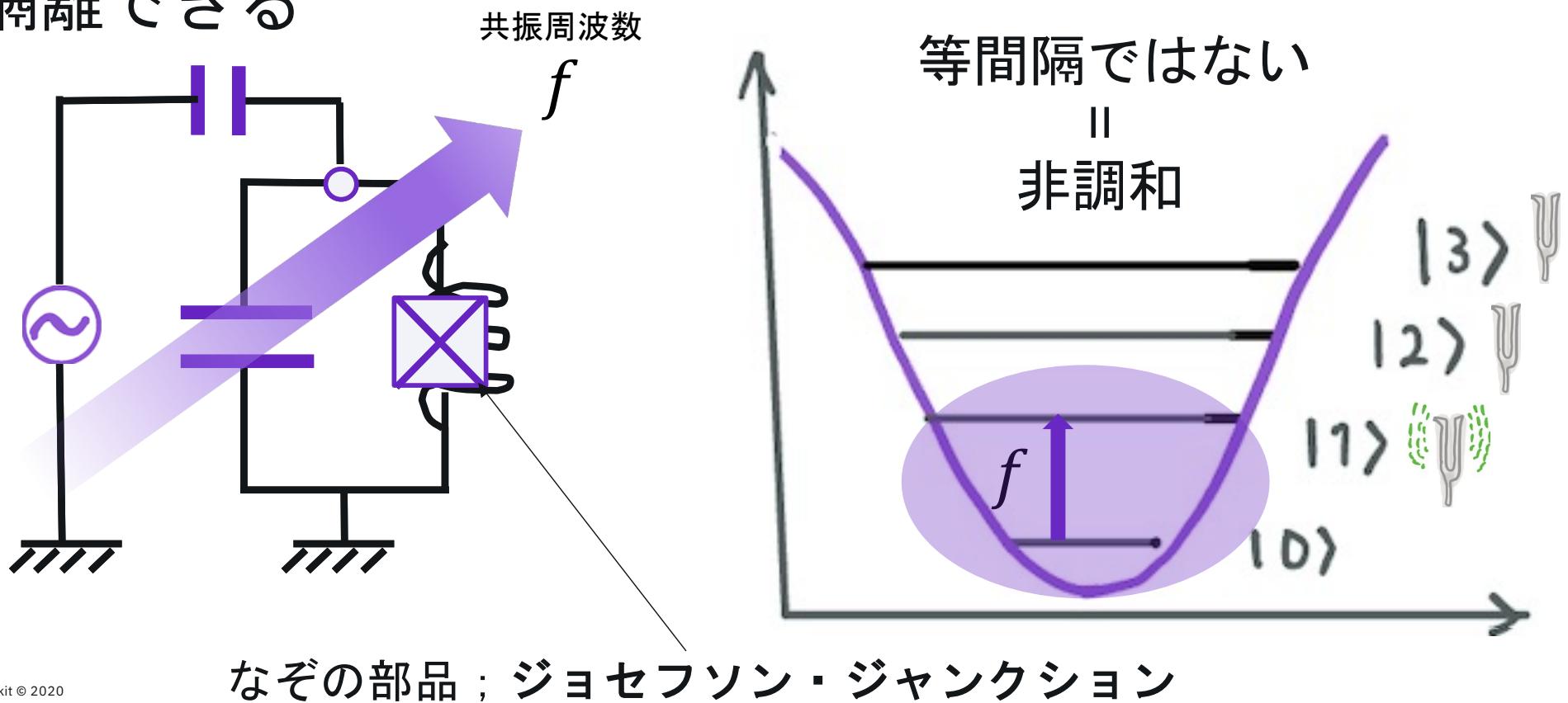
鳴らない

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



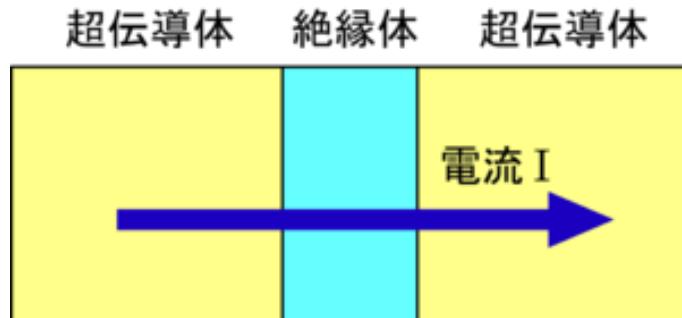
# ジョセフソン・ジャンクション

IBM Quantum

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。



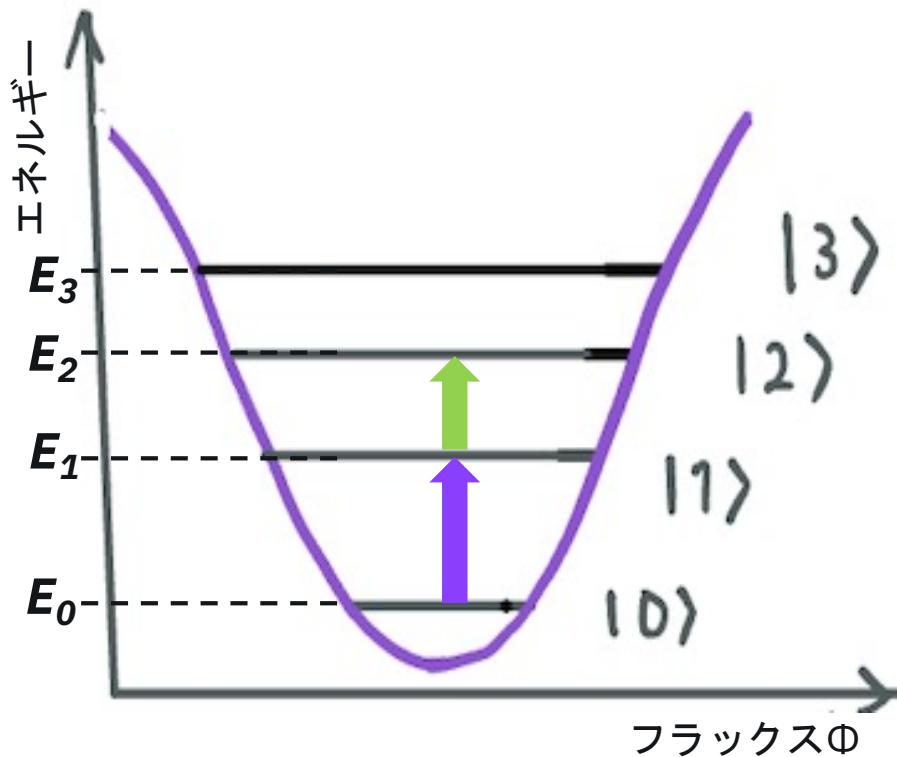
画像出典 : wikipedia.org

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。



# 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



量子チップを設計する際の重要な  
パラメーターの一つ

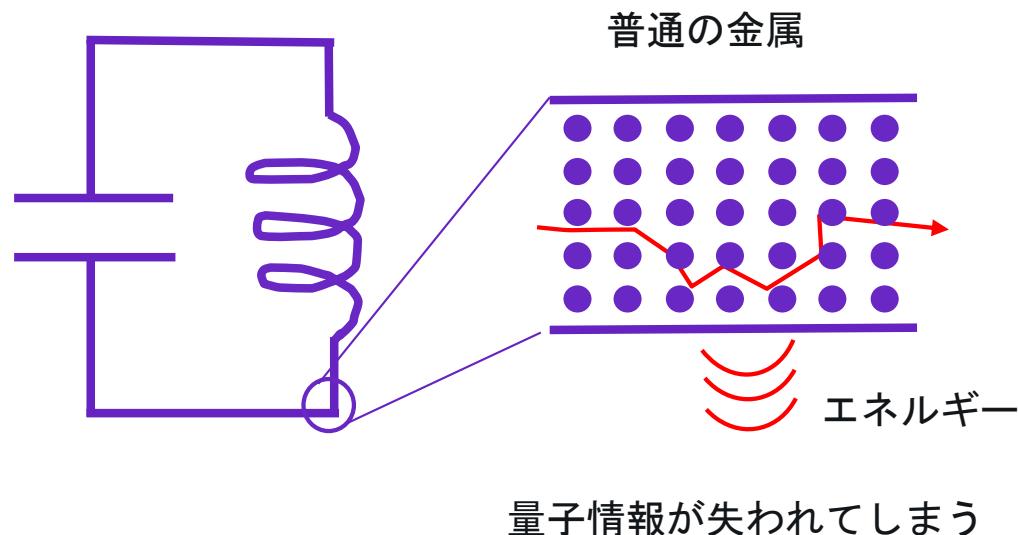
$$\alpha = f_{12} - f_{01}$$

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

非調和度の記号は通常  $\alpha$ (アルファ)で  
あらわします

# なぜ超伝導体で回路をつくるの？(1)

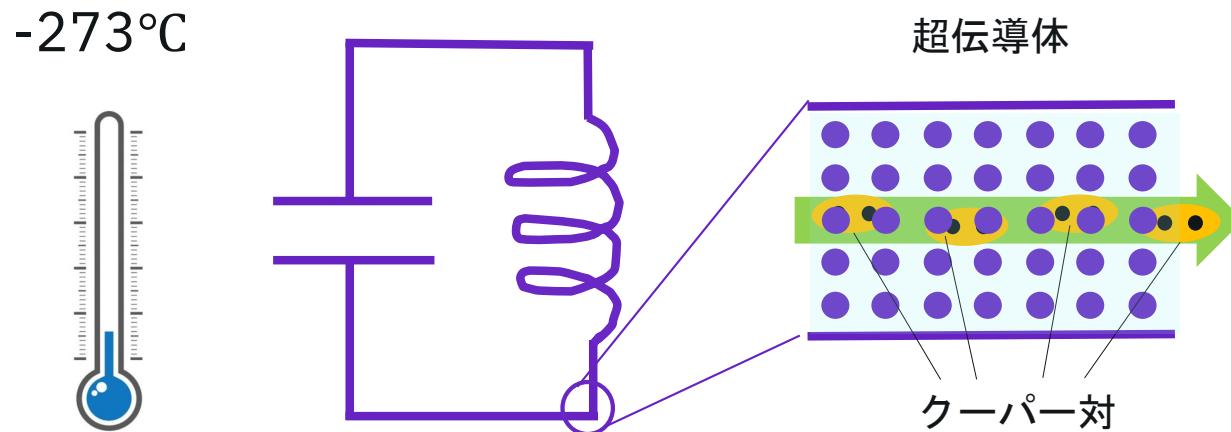
普通の金属で回路をつくると電気抵抗で量子情報が失われる



# 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

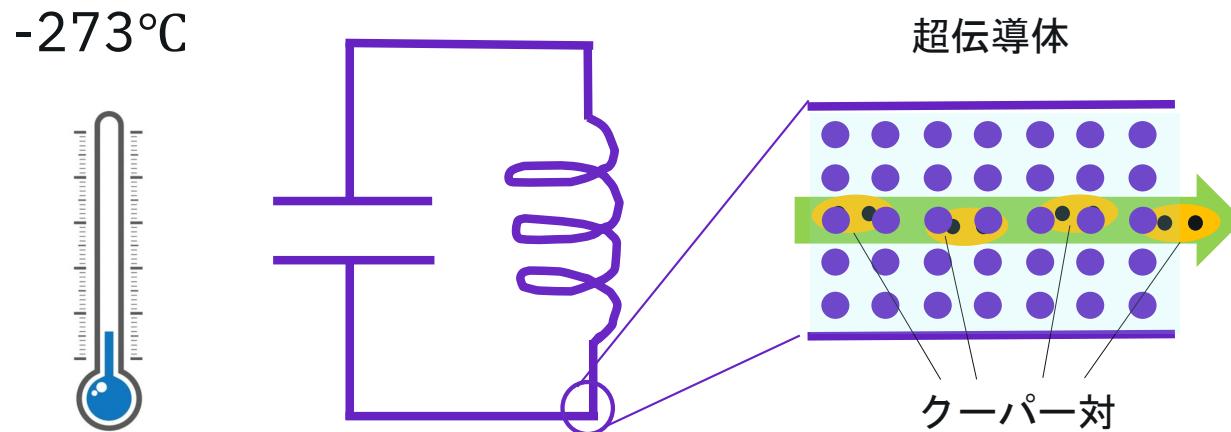


超伝導体（極低温）にすることで、  
情報ロスがゼロとなる

# なぜ超伝導体で回路をつくるの？(2)

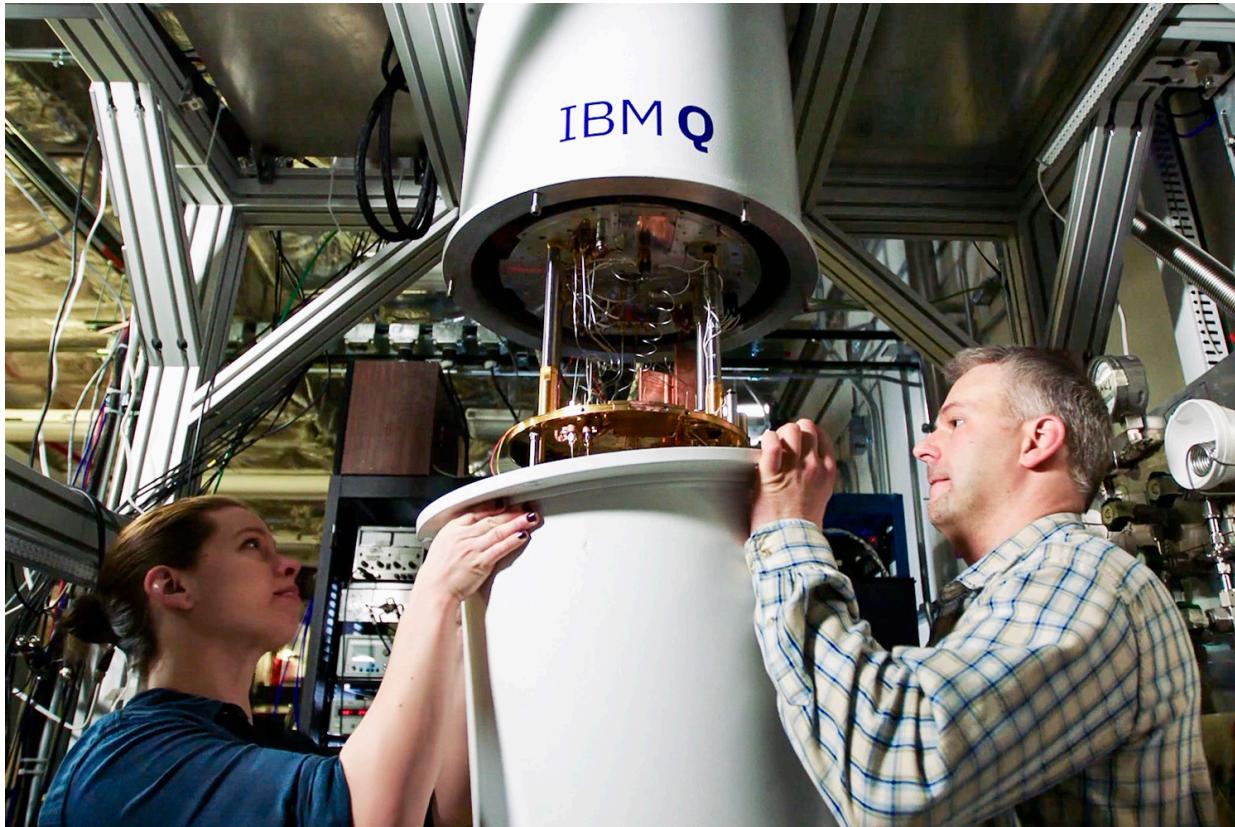
IBM Quantum

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



IBM Quantum / © 2022 IBM Corporation

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ったんだね



## 要件 2：初期化を繰り返し行える

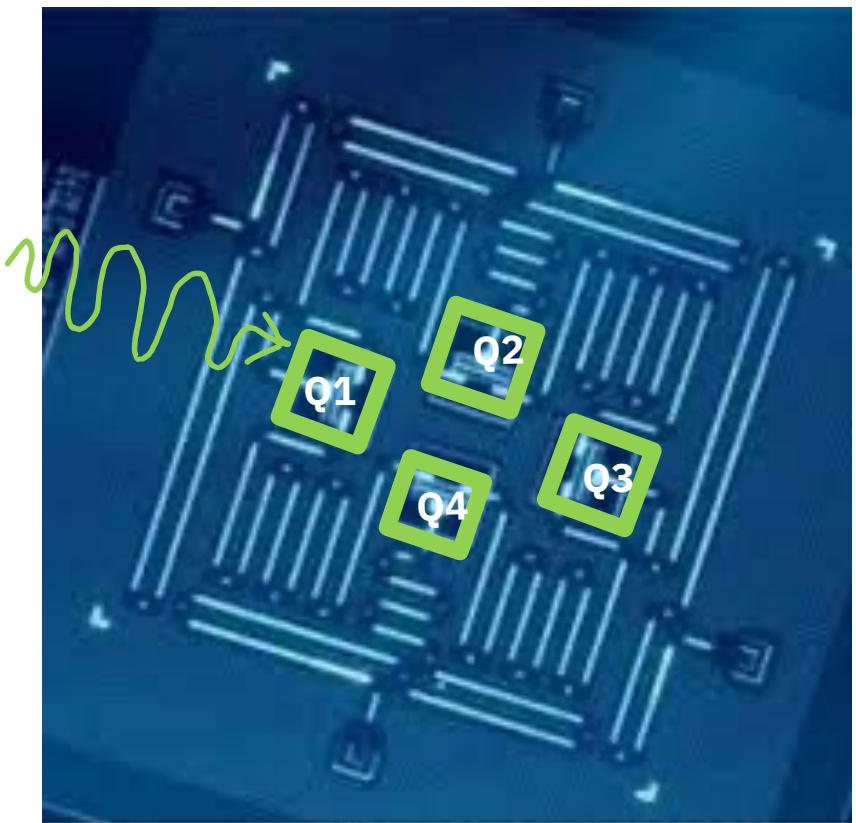
マイクロ波周波数帯のパルス信号を使う



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

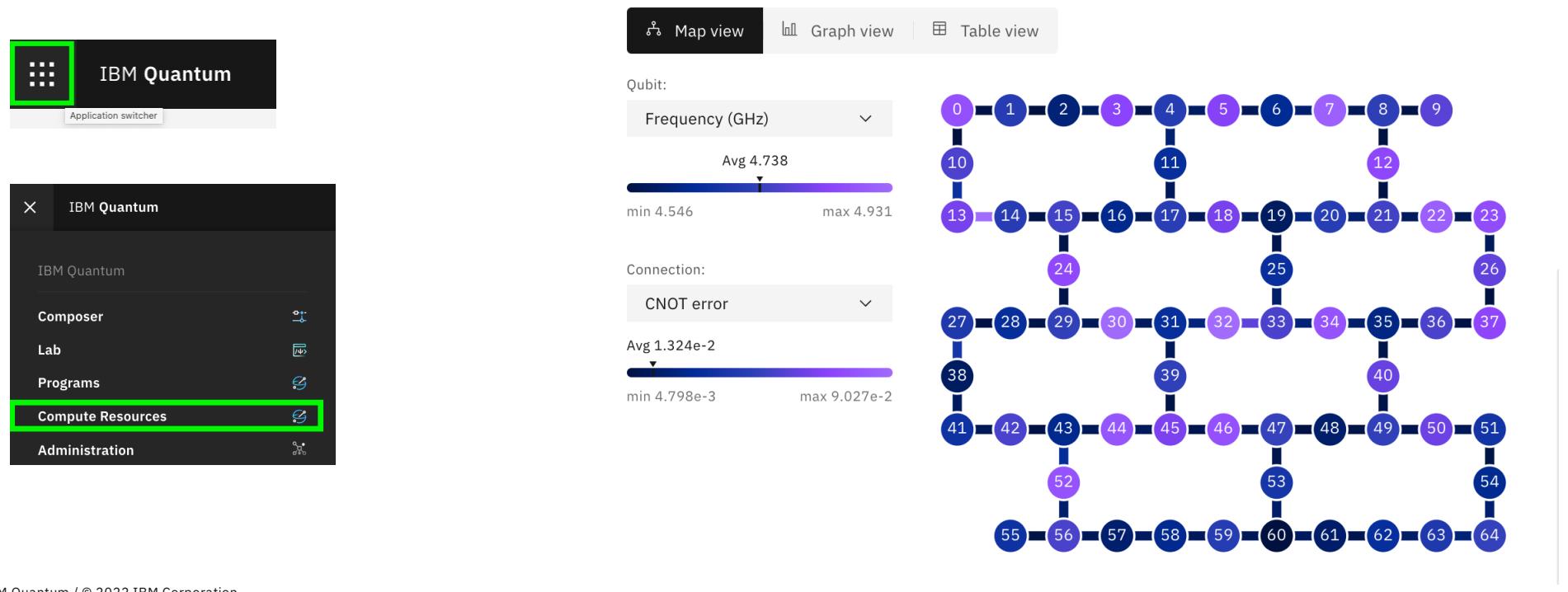
これでディヴィンチェンゾさんの条件 1 と 2 をクリアーできたわけだね！



# 実際の量子チップの周波数をチェックしてみよう！

IBM Quantum

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

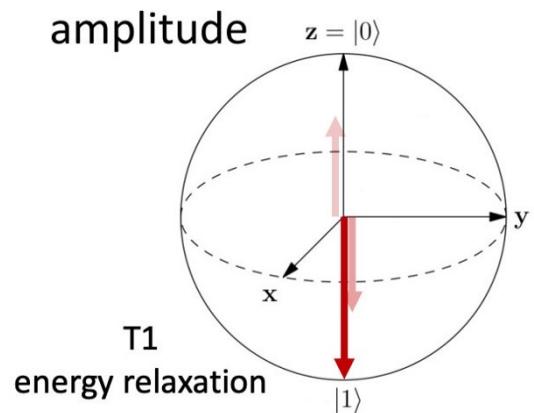


## 要件 3 理想の量子状態（コヒーレンス）の向上

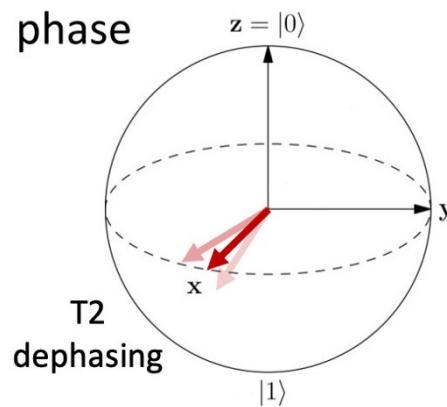


# コヒーレンスタイムとは？

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

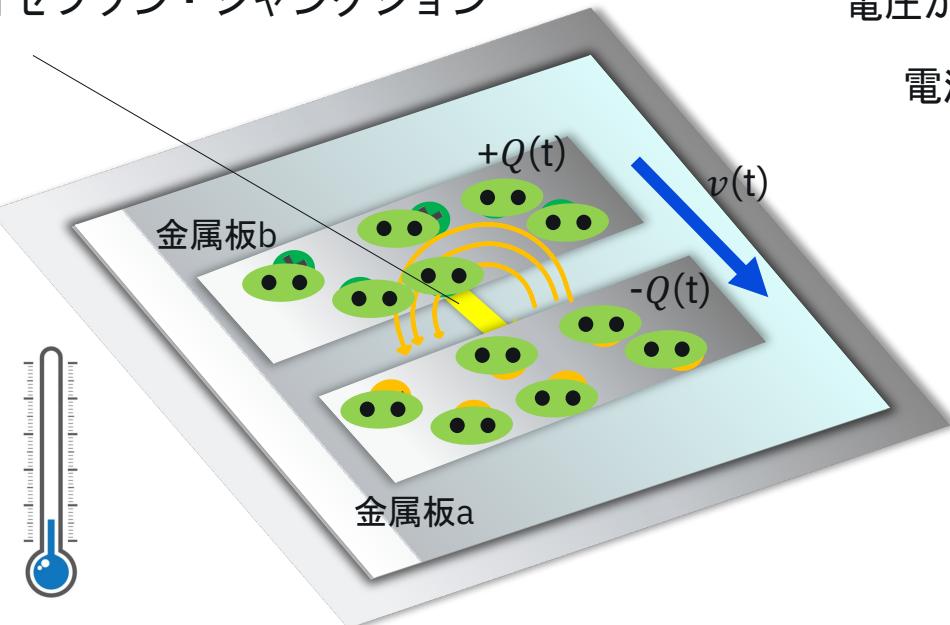


コヒーレンスタイムに悪影響を及ぼすもの  
||  
さまざまなノイズ

# ジョセフソンジャンクションが再び活躍！

IBM Quantum

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

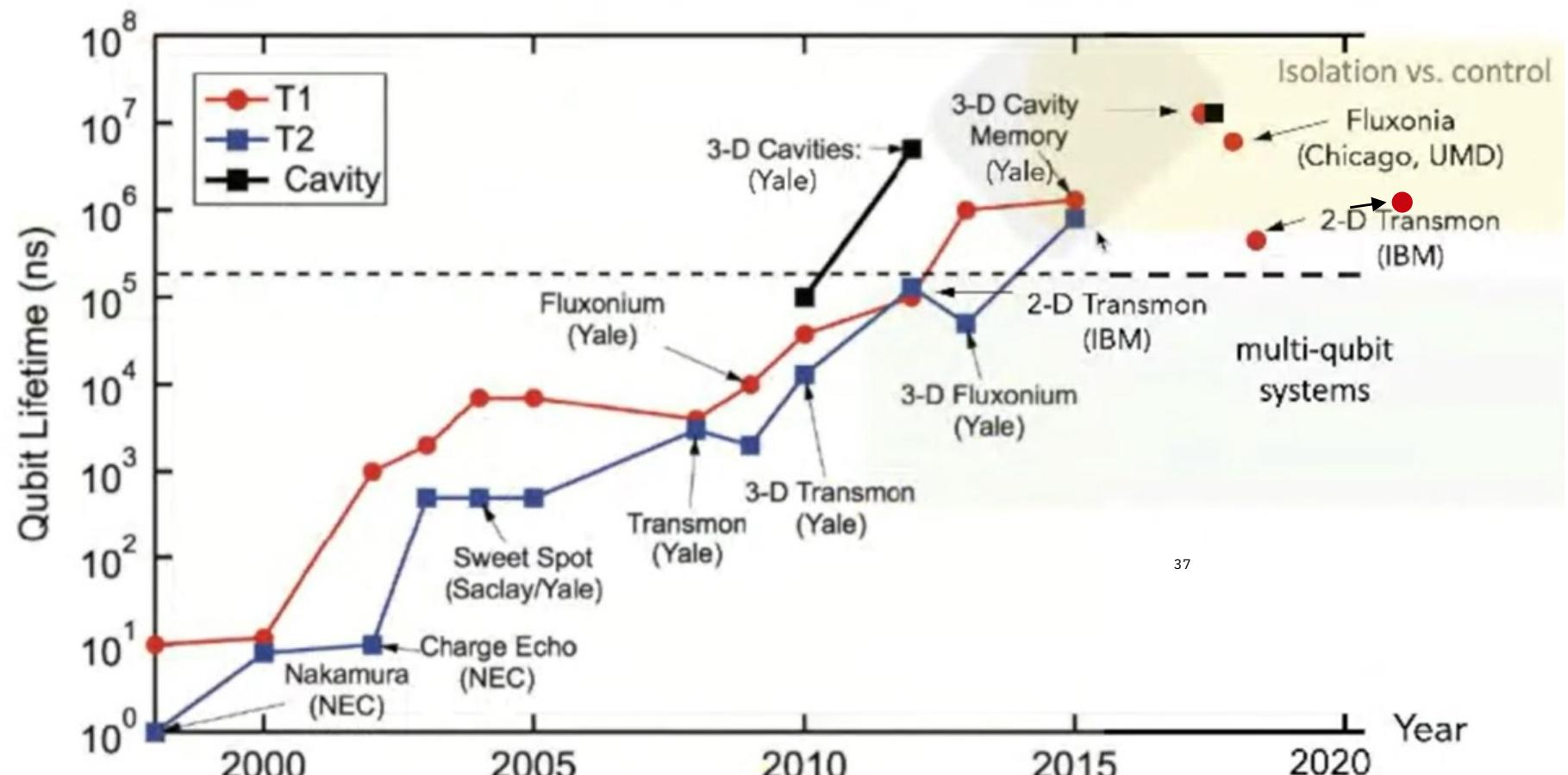
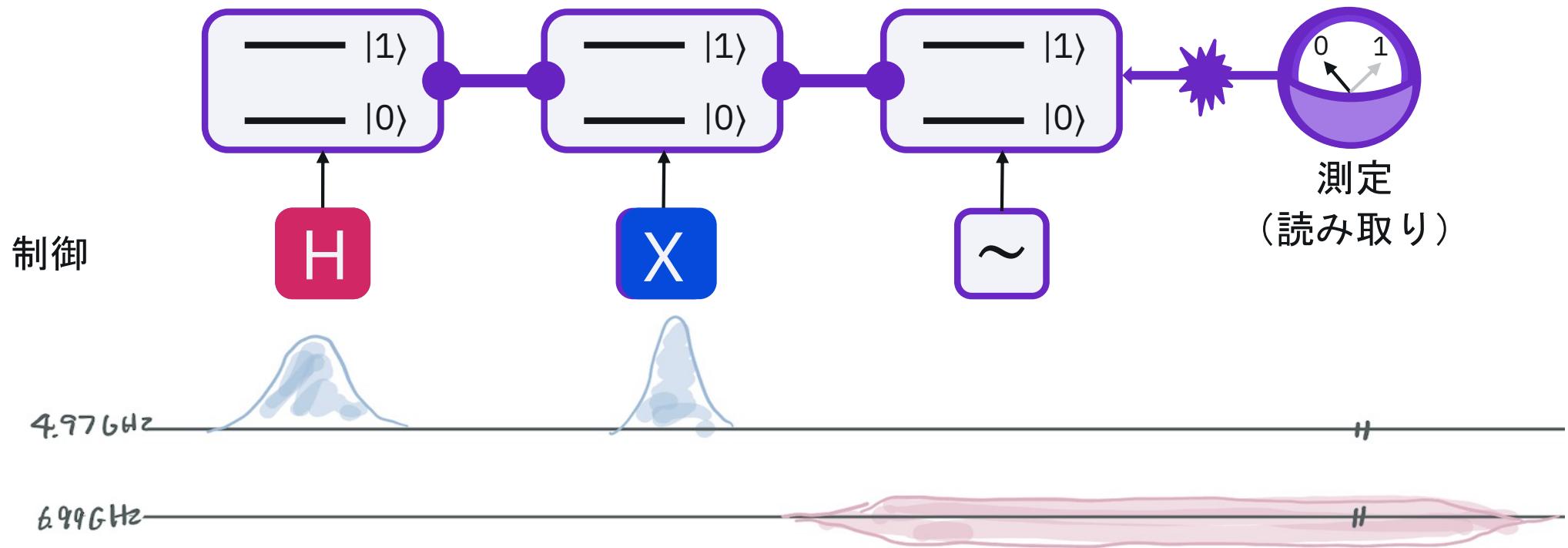


Image made by Devoret and Schoelkopf (2013), updated by Reagor (2015), and updated by Minev (2020), and updated

## 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



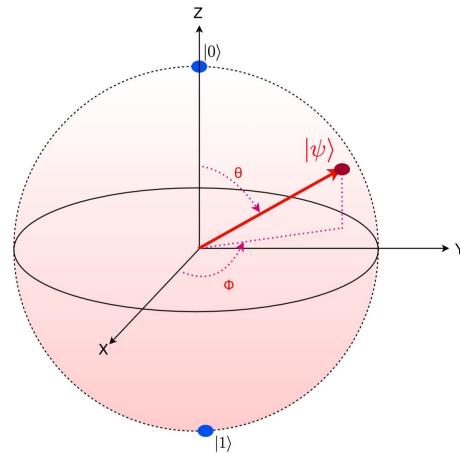
電気回路でできた量子ビットの状態を変化させるゲートも、  
実態はマイクロ波パルス信号。さまざまな量子ゲートがつくれる！

# 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。



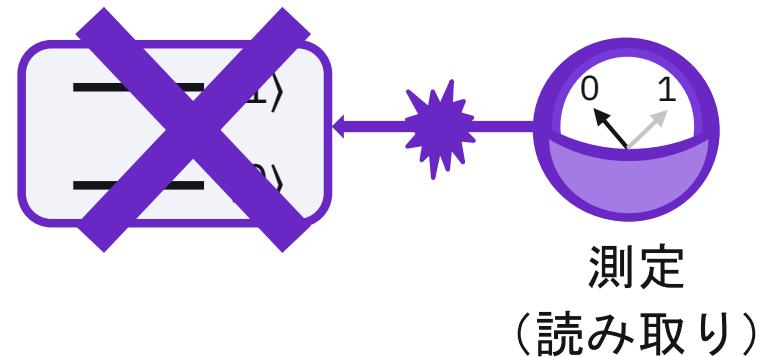
## 要件 5 効果的な測定が可能であること



# 測定のジレンマ

IBM Quantum

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

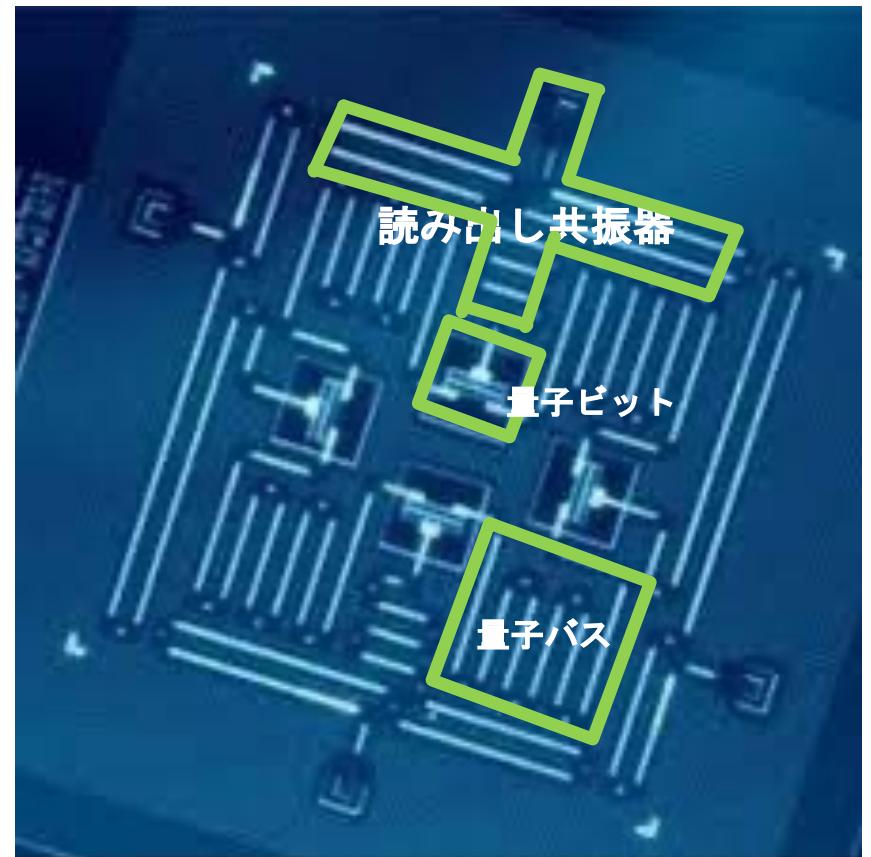
測定前の量子状態を復元することは不可能



# 測定のジレンマ

IBM Quantum

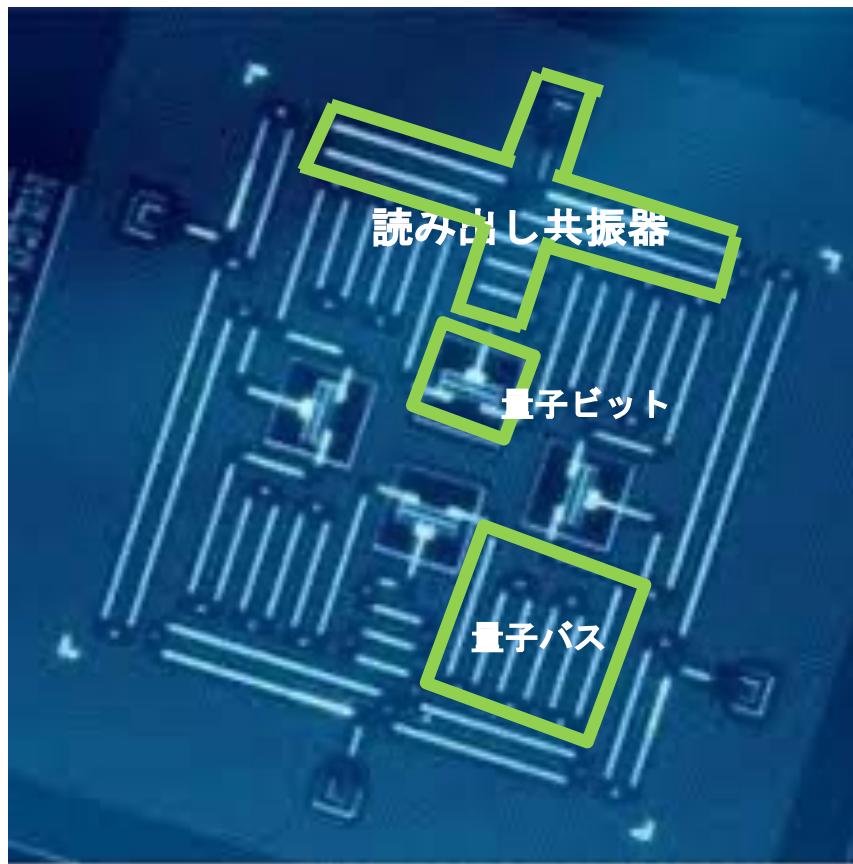
本物の量子チップの  
写真にヒントが隠され  
ています



画像出典：IBM

# 分散読み出しによる工夫

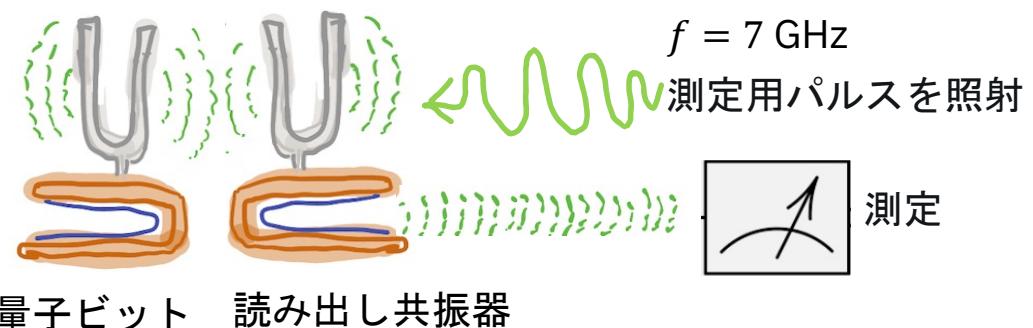
IBM Quantum



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 読み出し共振器

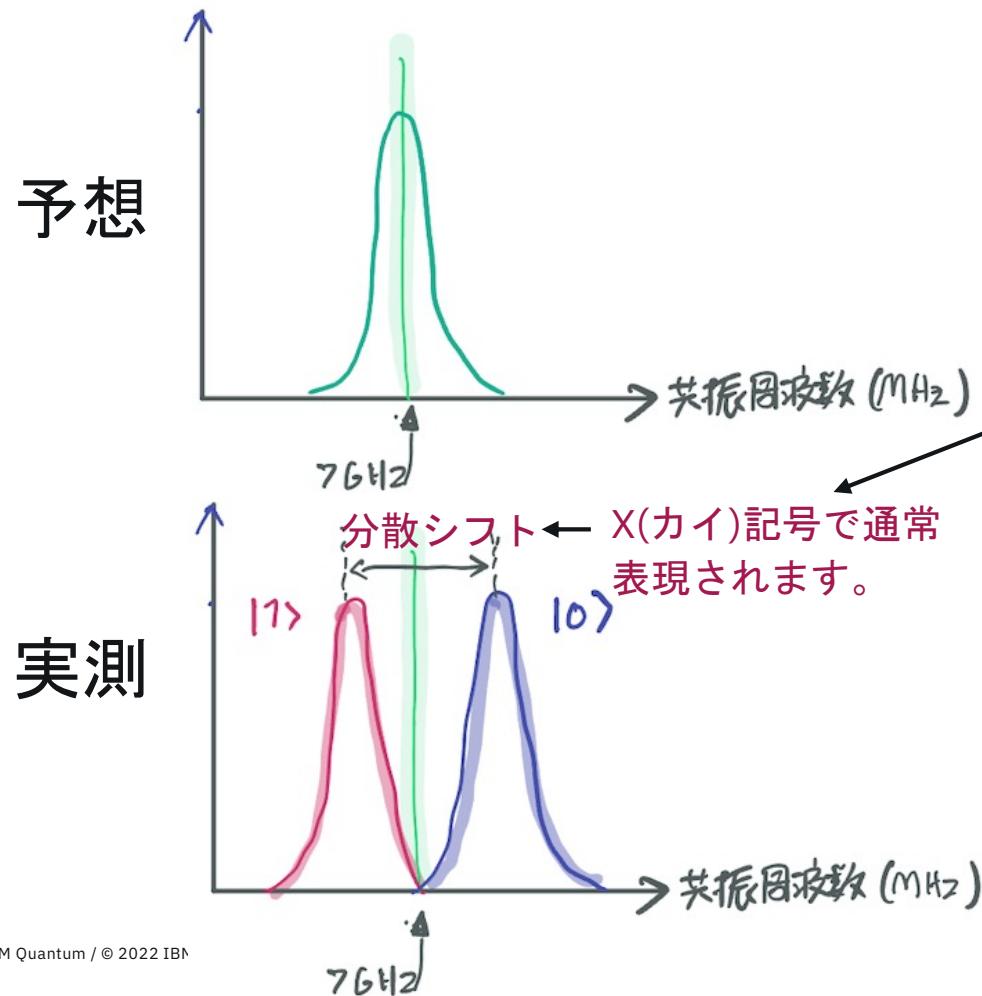
量子ビットには直接触れずに読み出し共振器の周波数のみを測定する！

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分散シフトする

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

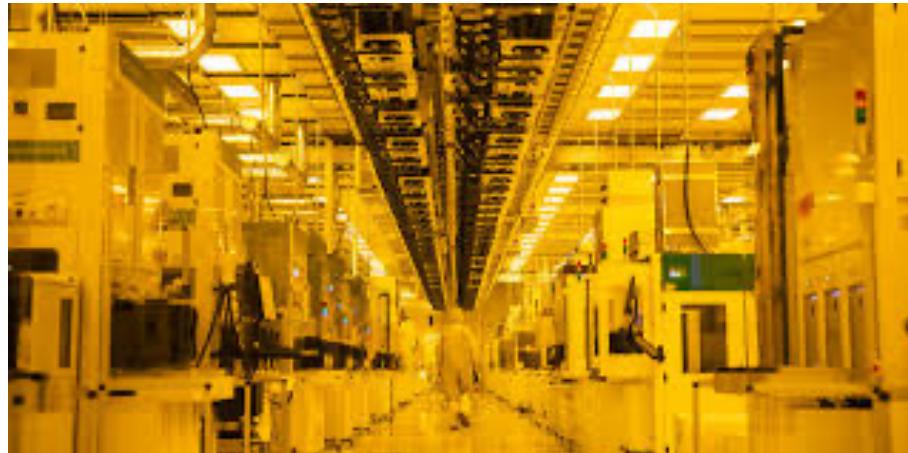
へえ！読み出し共振からの応答だけで量子ビットの状態を非破壊的に測定できるって事だね！



# 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！  
徳成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

# 参考文献

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-VvgHl5ZqVmhb\\_FcSqmLujsjb](https://www.youtube.com/playlist?list=PLOFEBzvs-VvgHl5ZqVmhb_FcSqmLujsjb)

**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>

IBM Quantum

# Thank you

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

