

IBM-UTokyo
量子コンピューティング・駒場スクール

量子ハードウェア入門 (量子チップに迫る)

2025年9月29日

小林 有里
Asia Pacific Lead, Workforce & Education
IBM Quantum



もくじ

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

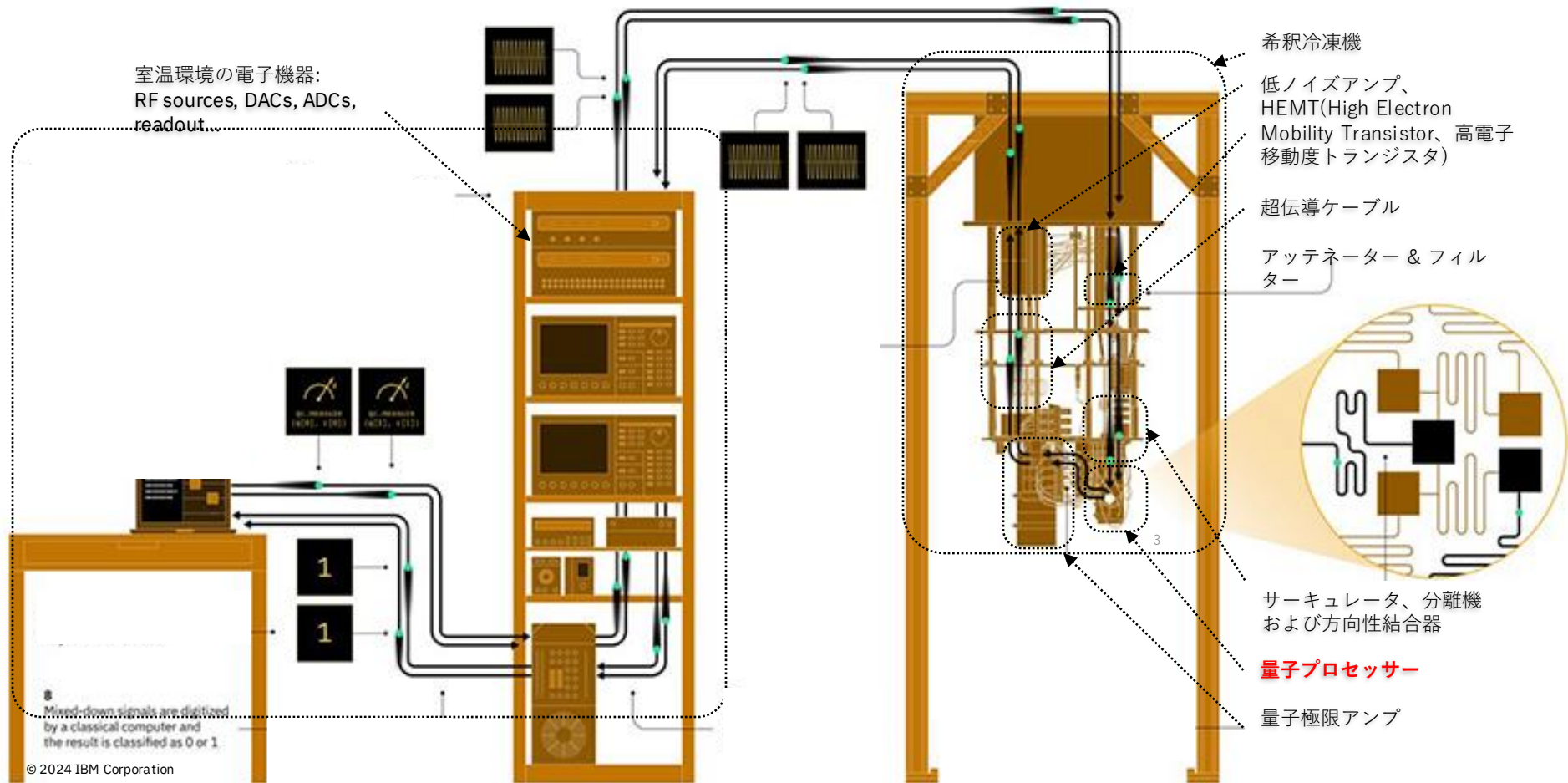
要件クリアにむけての挑戦

心臓部の量子チップ

飽くなき挑戦はつづく

量子コンピューターのハードウェア区分

IBM Quantum



東京大学 - IBM Quantum ハードウェアテストセンター

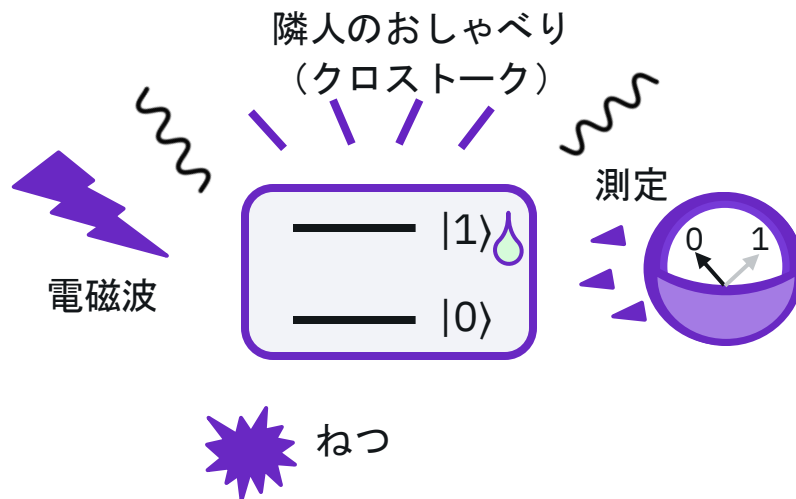
<https://itl.adm.u-tokyo.ac.jp/qhtc.html>



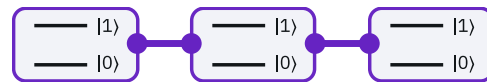
量子コンピューターがに課せられた要件とは？



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

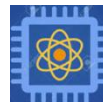


① 量子ビットが $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態がとれて連結してつかえること

② 初期化可能：繰り返し同じ状態を用意できること



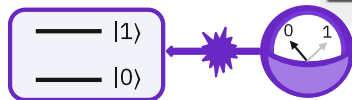
③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



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・ディヴィンチェンゾ) 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



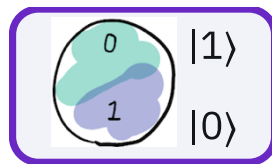
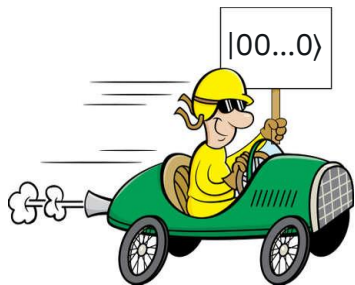
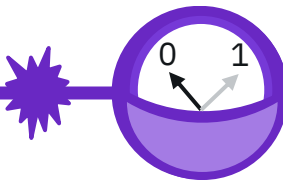
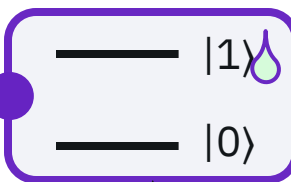
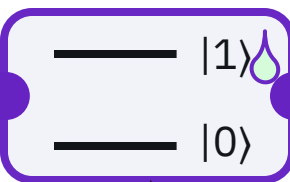
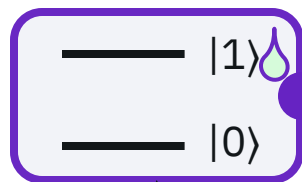
5つの要件のクリアは簡単ではない

量子ビット
(2準位系)

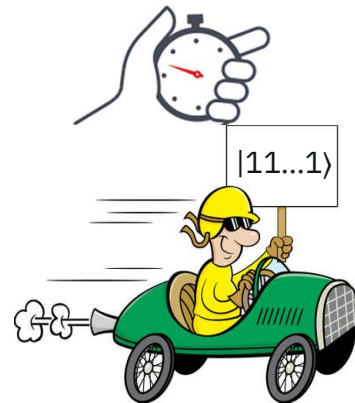
2量子ビット
もつれをつくる

測定
(読み取り)

ゲート操作



理想の量子状態 (コヒーレンス)



量子コンピューター5つの要件

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



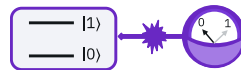
③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



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・ディヴィンチェンゾ) 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

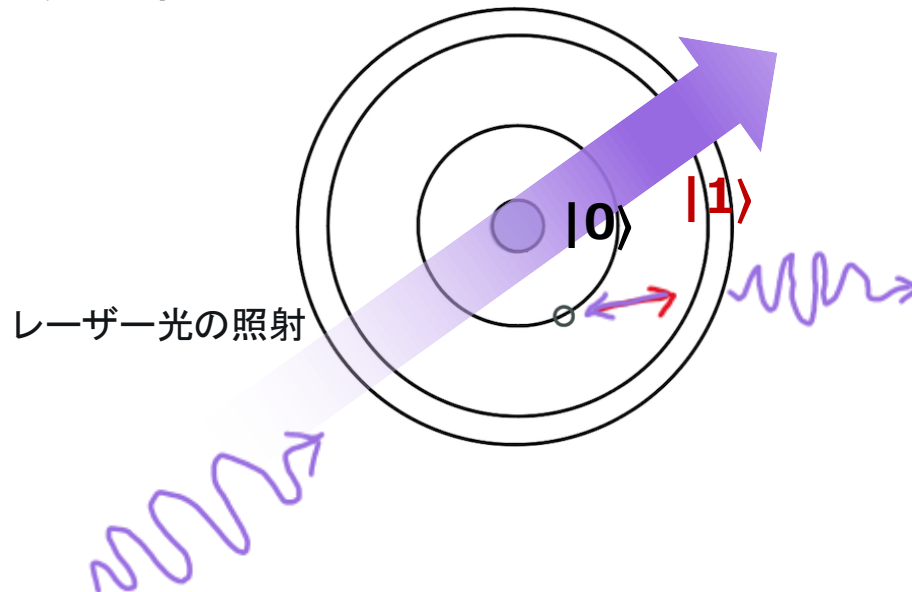


要件 1

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

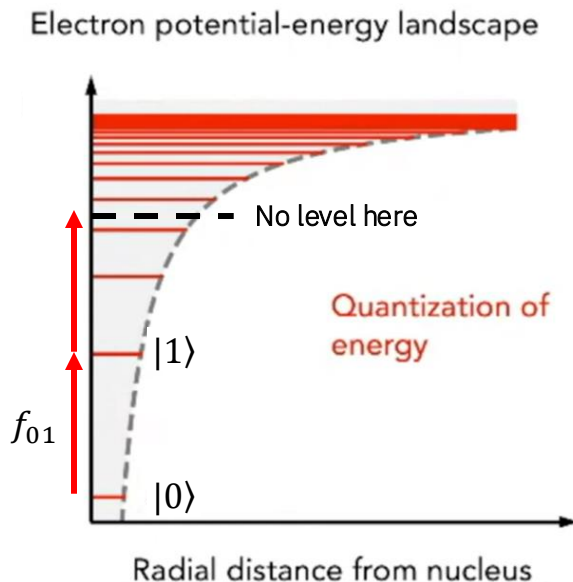
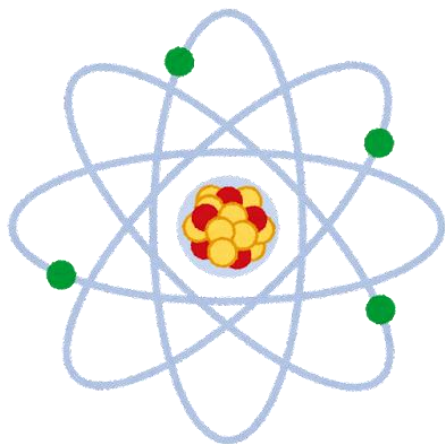
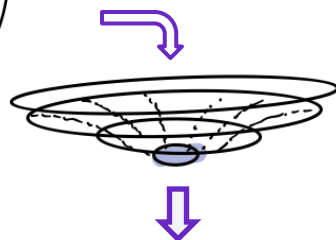
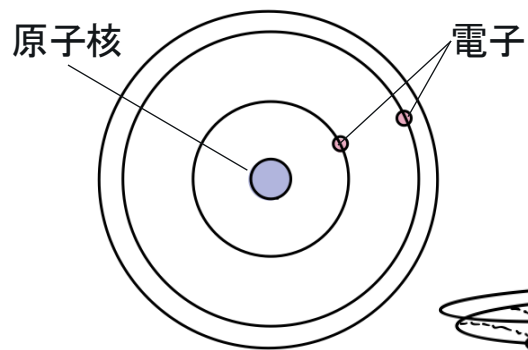


Image: Z. Mineev, IBM, 2022

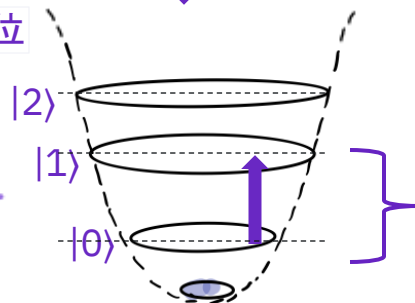
量子ビットのエネルギーレベル

- 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）

天然の原子は理想の量子ビットだった？

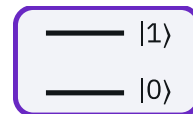


エネルギー準位



位置エネルギーの井戸

量子ビット

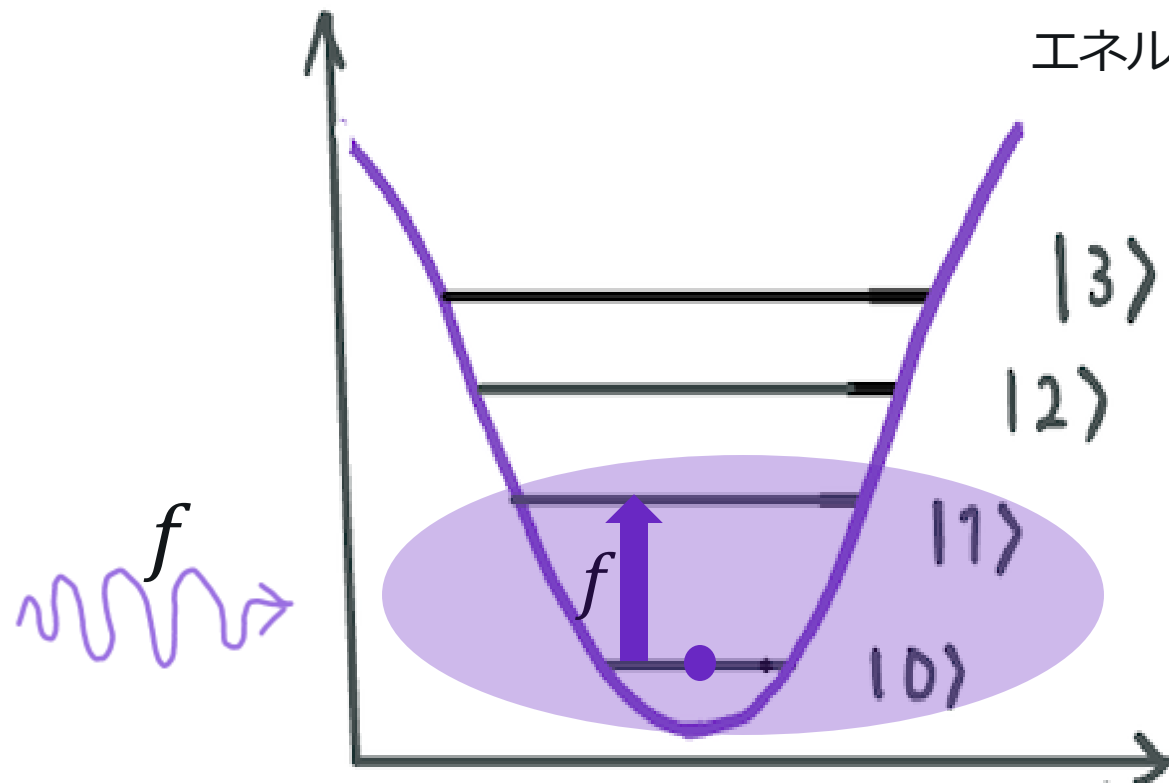


エネルギーレベルが等間隔
ではないように見えるけど...



量子ビットが2準位系であるためには

IBM Quantum



エネルギーレベルが等間隔ではない

||

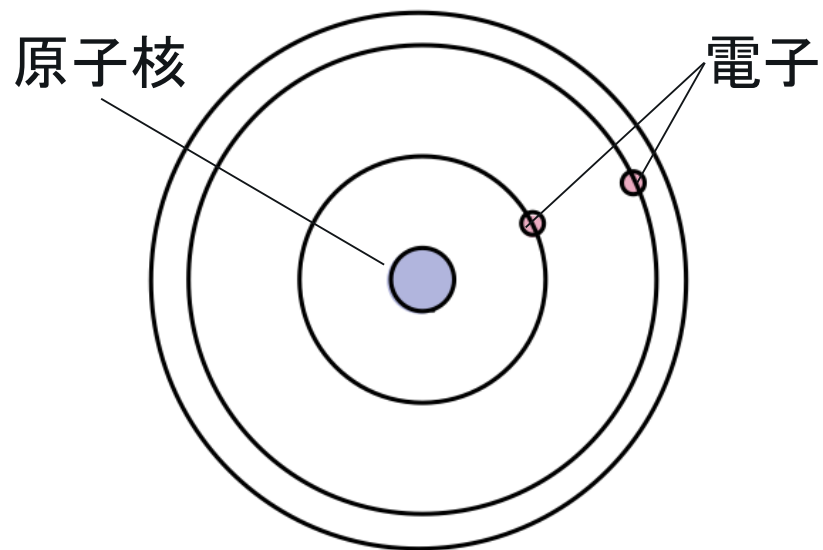
非調和 (アンハーモニック)

励起(れいき)

緩和(かんわ)

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

天然の原子を量子ビットにすればいい？

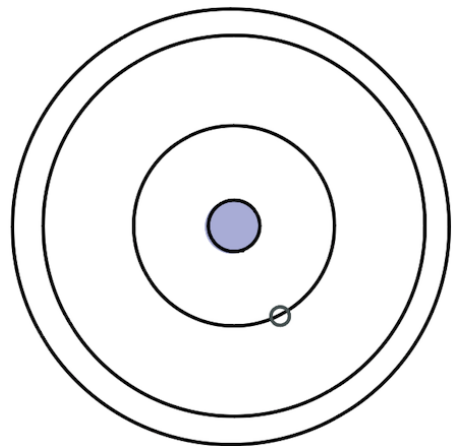


え？でもどうやって？



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？



C

コンデンサー



抵抗

L

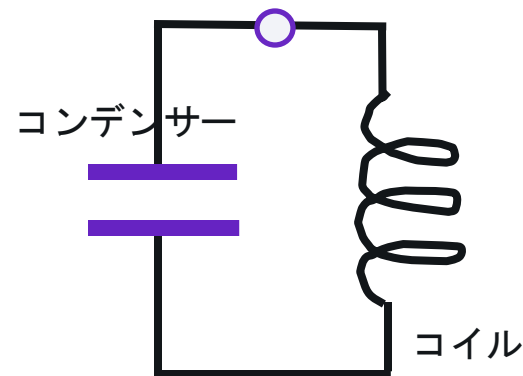


コイル
(インダクター)



？
謎の部品

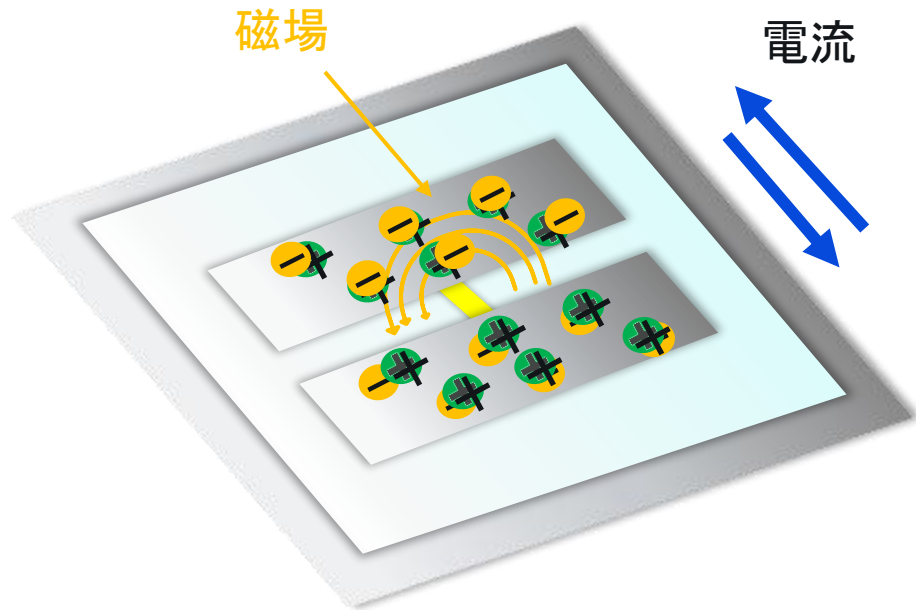
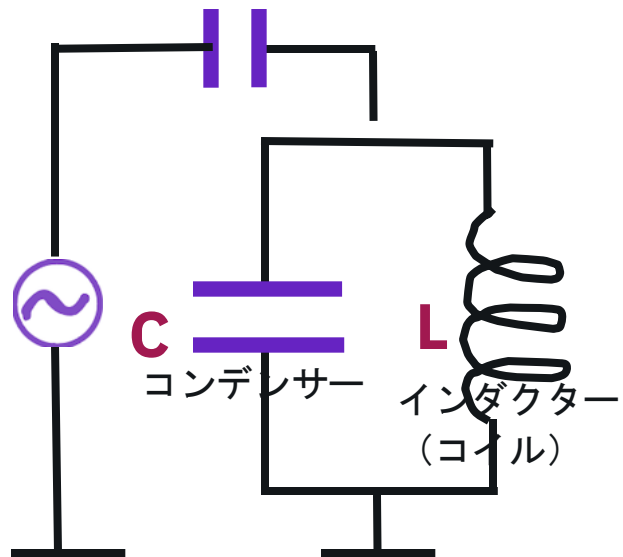
LC回路



共振回路ともいいます！

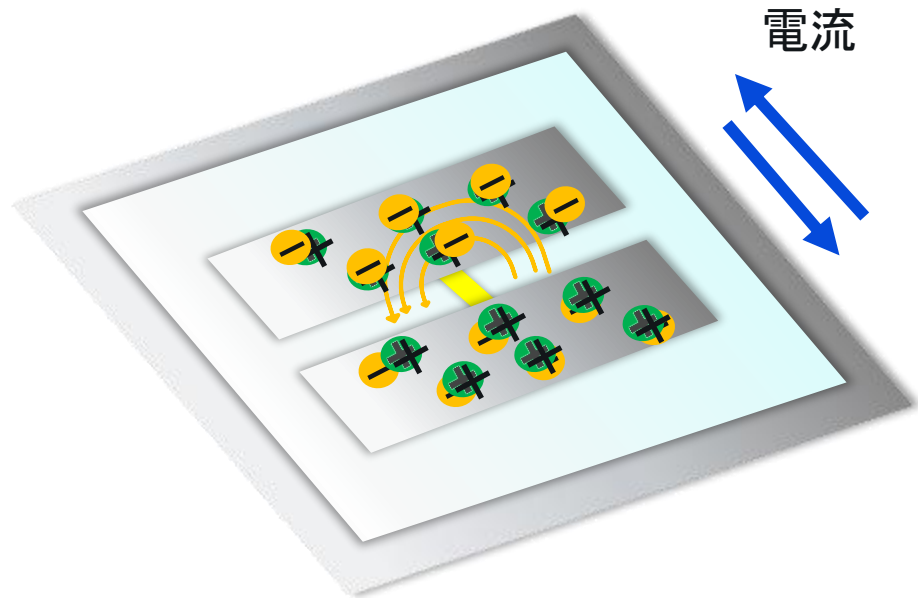
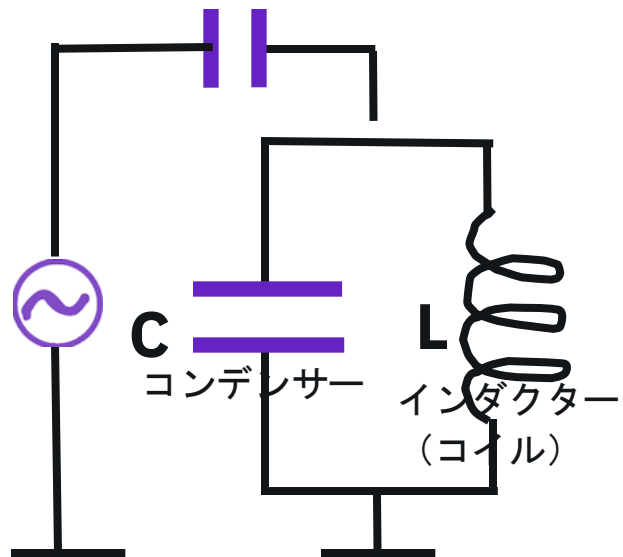
量子ビット回路の原型

IBM Quantum

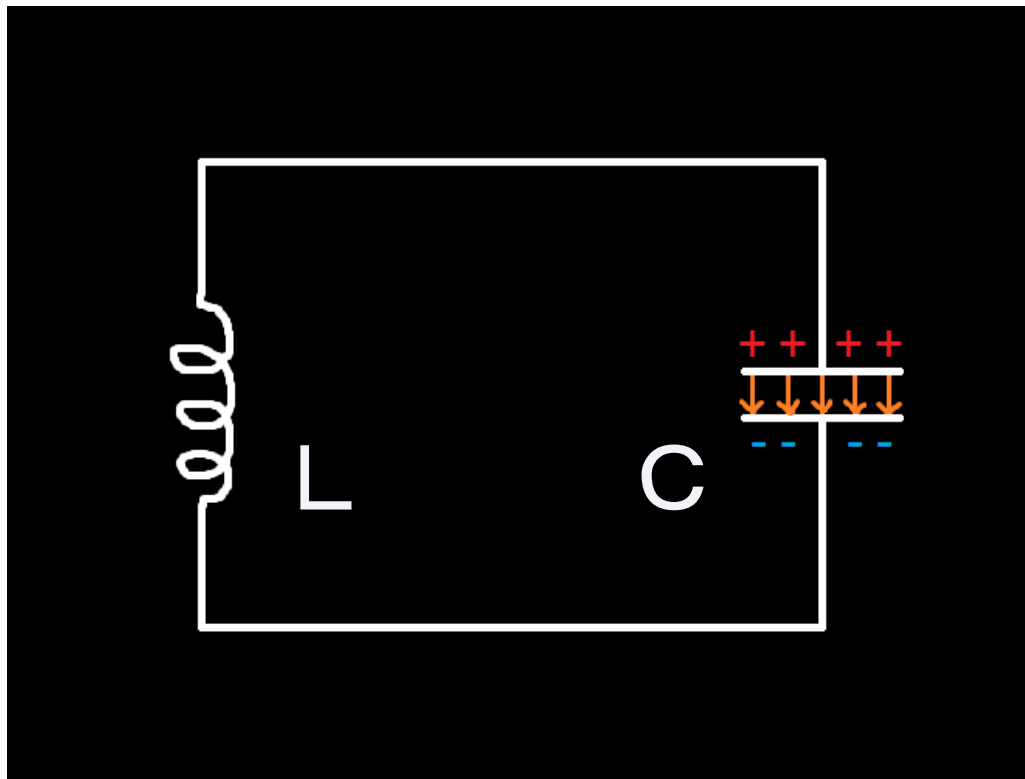


量子ビット回路の原型

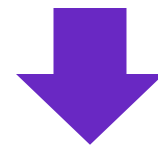
IBM Quantum



LC回路は共振回路



電流 i MAX

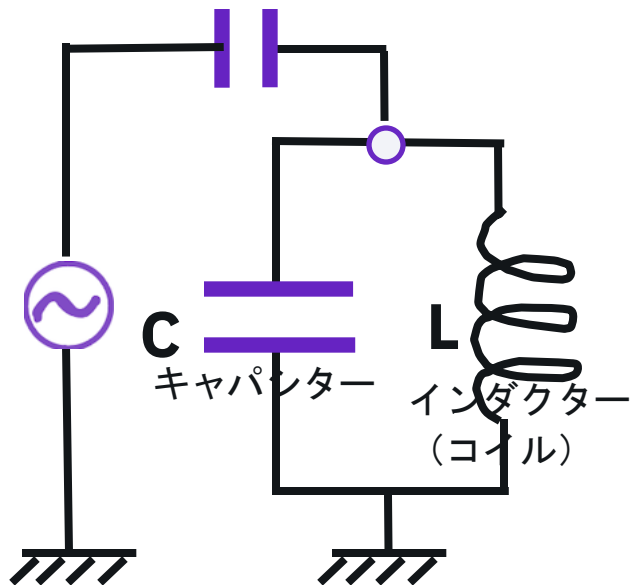


磁場 MAX

共振

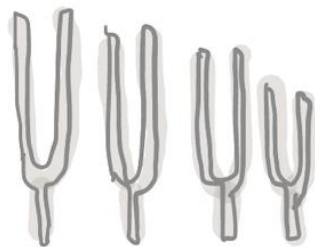
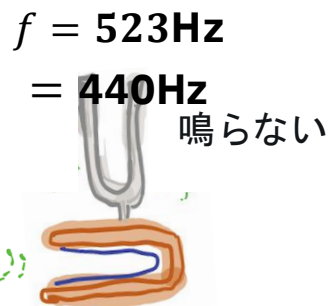
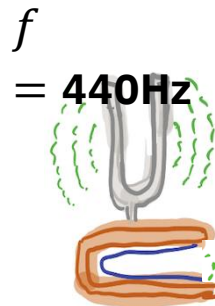
量子ビットは共振回路

共振



共振周波数は

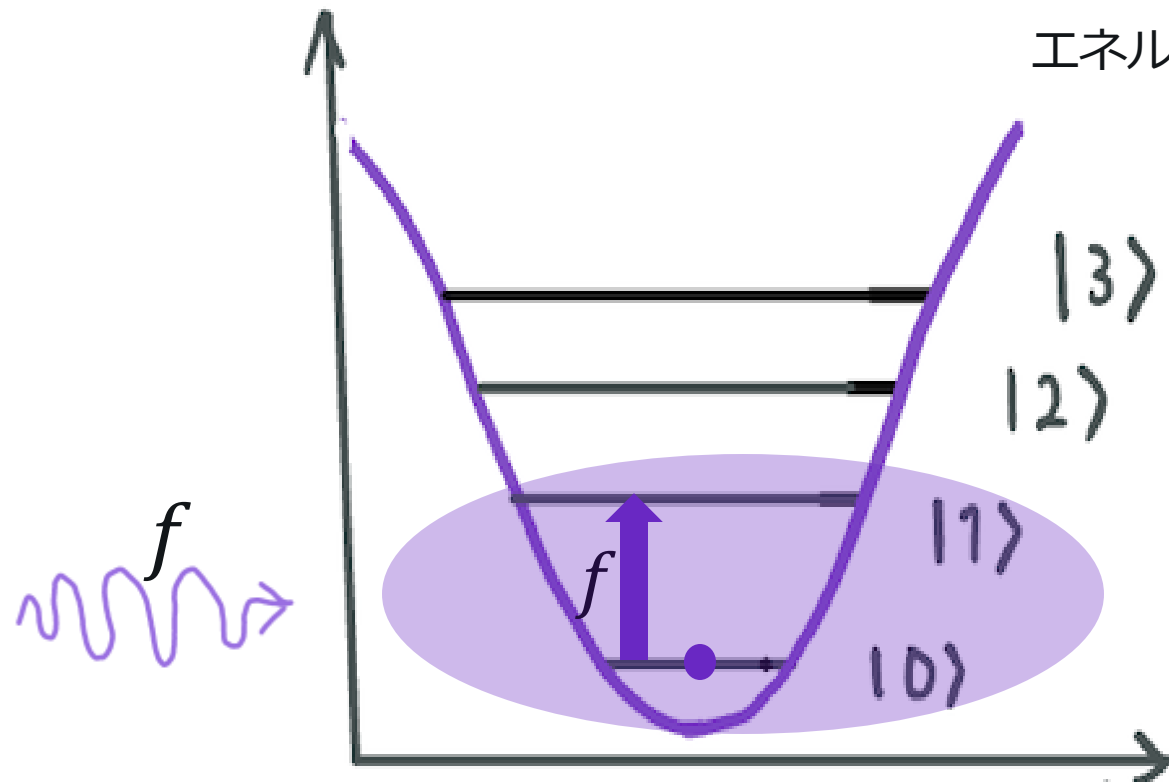
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



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！

量子ビットが2準位系であるためには

IBM Quantum



エネルギーレベルが等間隔ではない

||

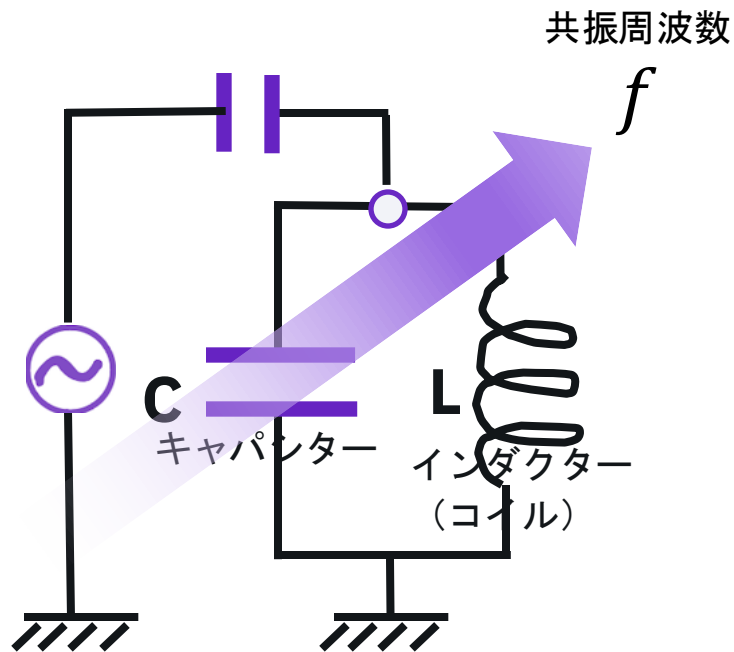
非調和 (アンハーモニック)

励起(れいき)

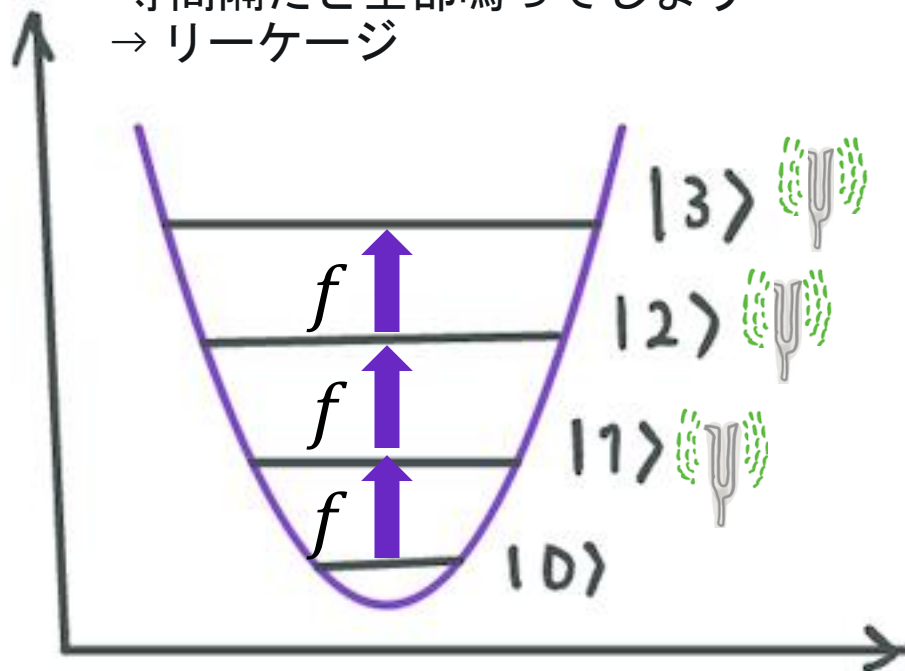
緩和(かんわ)

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

エネルギーレベルが等間隔だと...

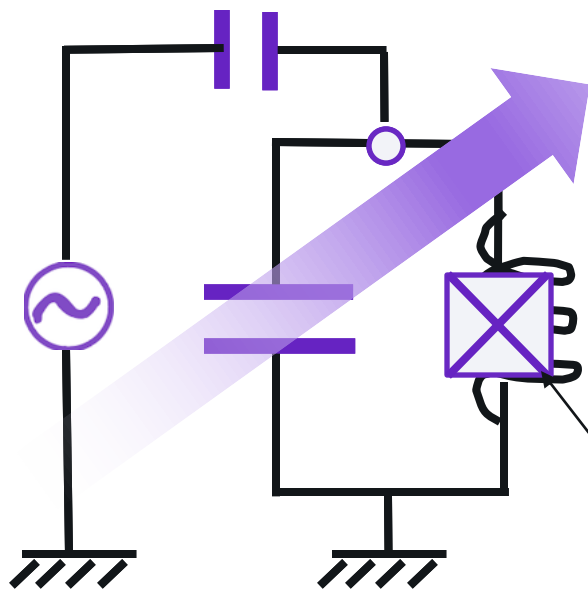


$|1\rangle$ だけを鳴らしたい。
等間隔だと全部鳴ってしまう
→ リークage



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

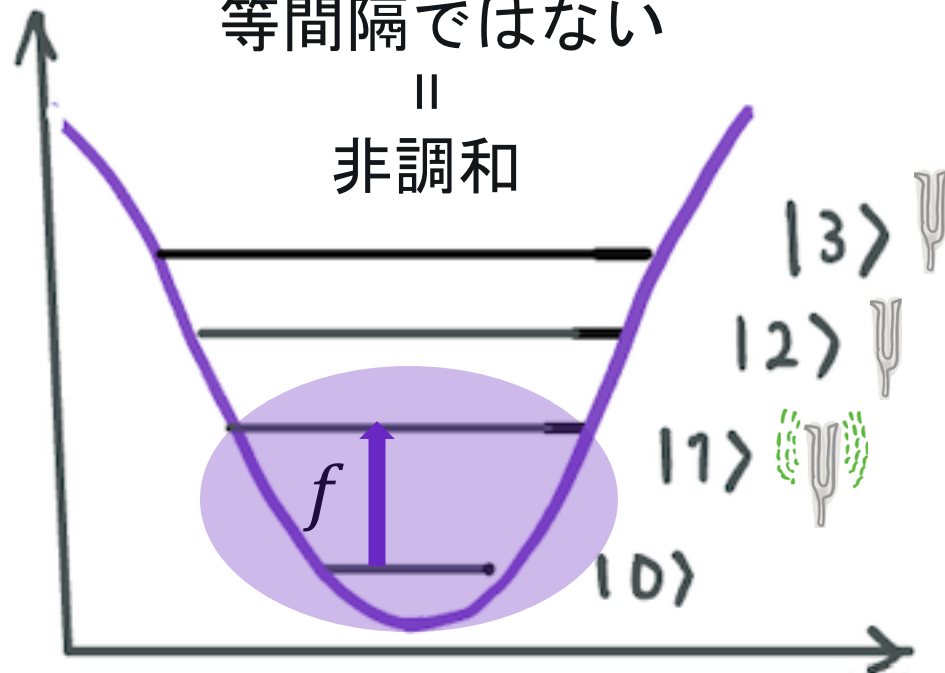
共振周波数

 f 

等間隔ではない

||

非調和



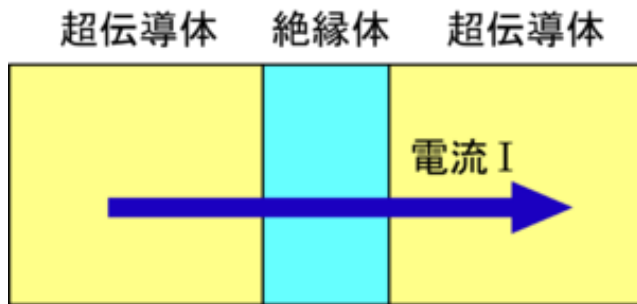
なぞの部品: ジョセフソン・ジャンクション

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（トンネル効果）。

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

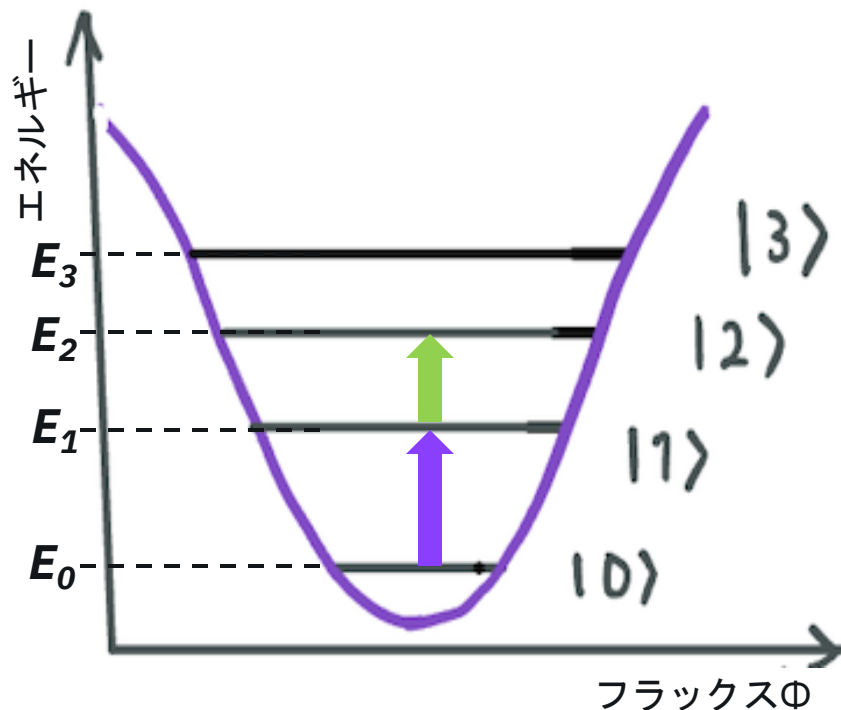
量子トンネル

ジョセフソンさんは江崎玲於奈さんとともに、1973年にこの効果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

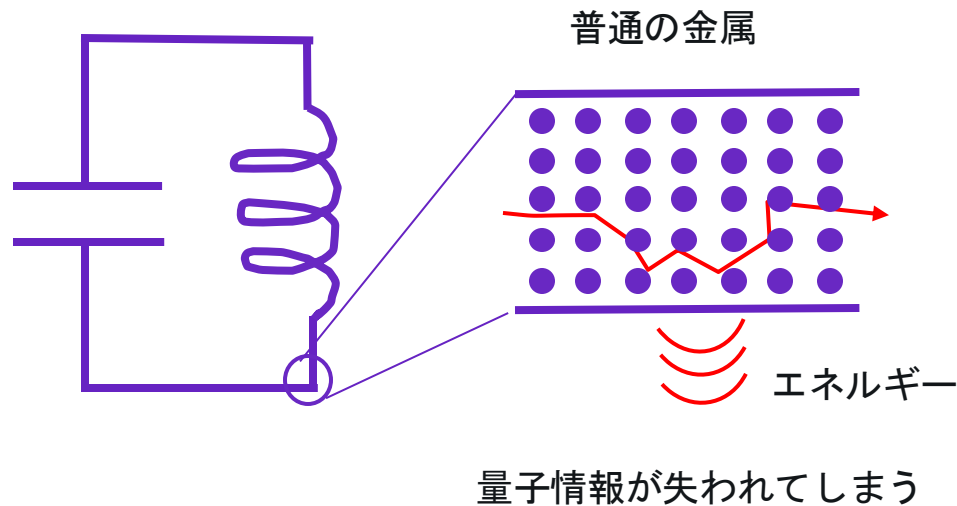
$$\alpha = f_{12} - f_{01}$$

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

非調和度の記号は通常 **α(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)

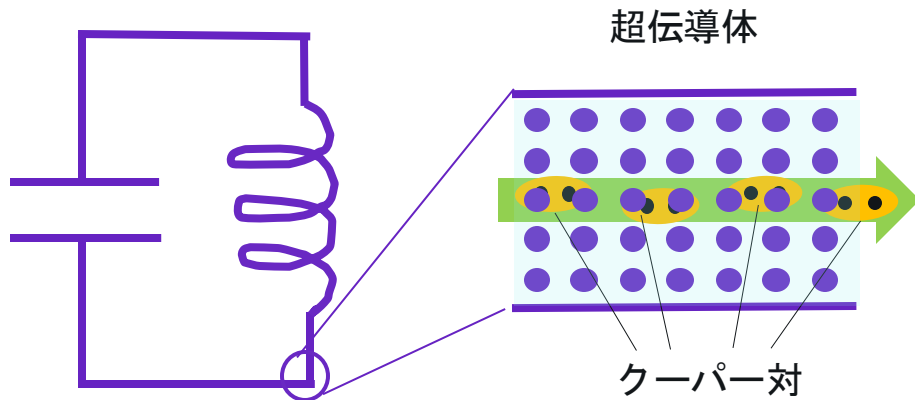
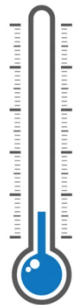
普通の金属で回路をつくと電気抵抗で量子情報が失われる



なぜ超伝導体で回路をつくるの？(2)

超伝導体でつくることによって電気抵抗がなくなり情報ロスがゼロに

-273°C

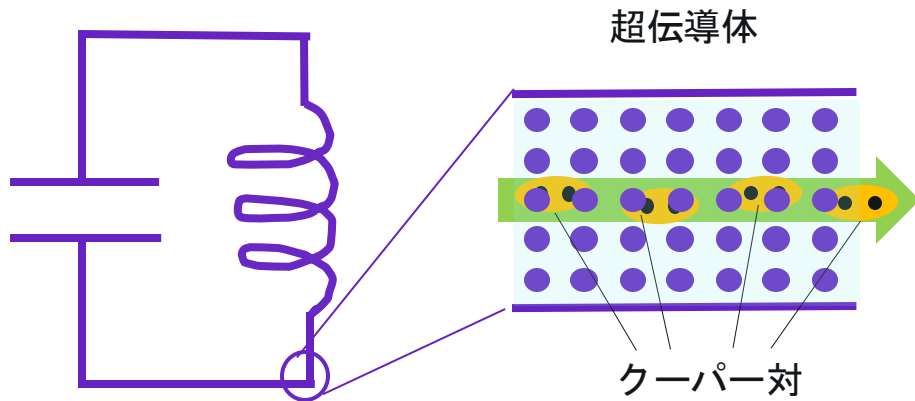
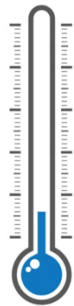


超伝導体（極低温）にすることで、
情報ロスがゼロとなる

なぜ超伝導体で回路をつくるの？(2)

超伝導体でつくすることで電気抵抗がなくなり情報ロスがゼロに

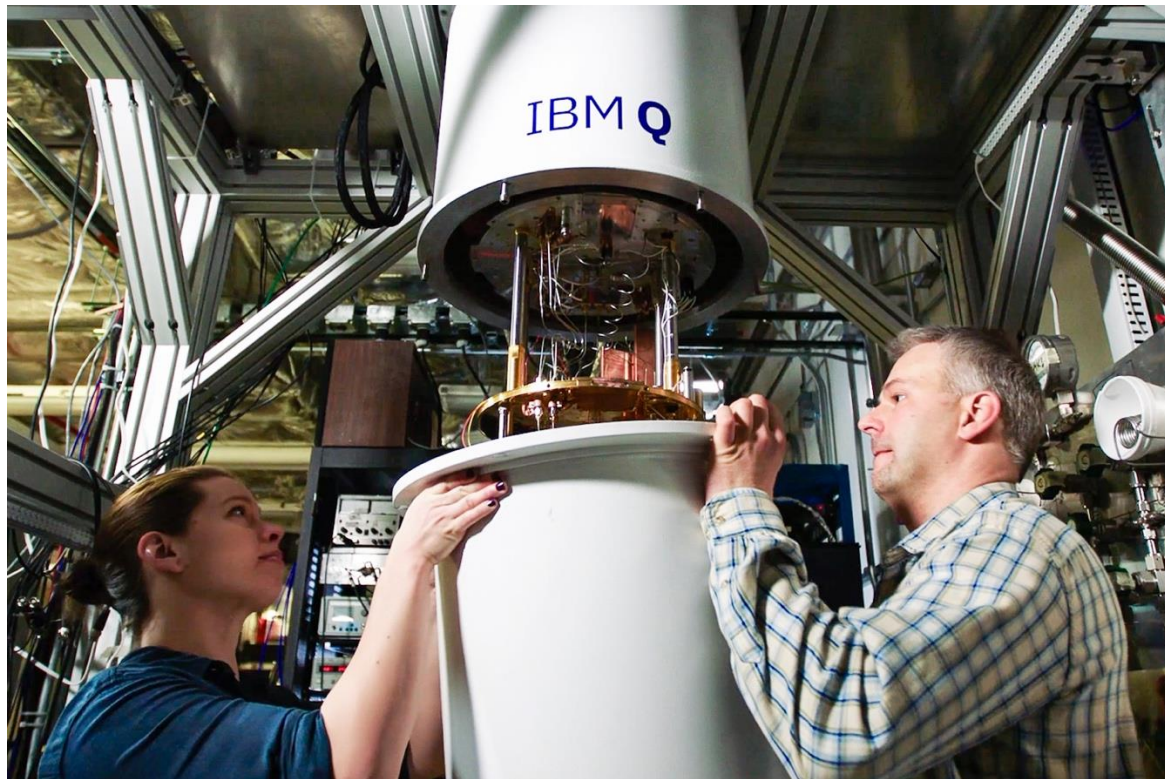
-273°C



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釈冷凍庫

IBM Quantum



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



量子コンピューター5つの要件

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



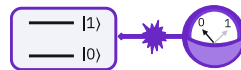
③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



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・ディヴィンチェンゾ) 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

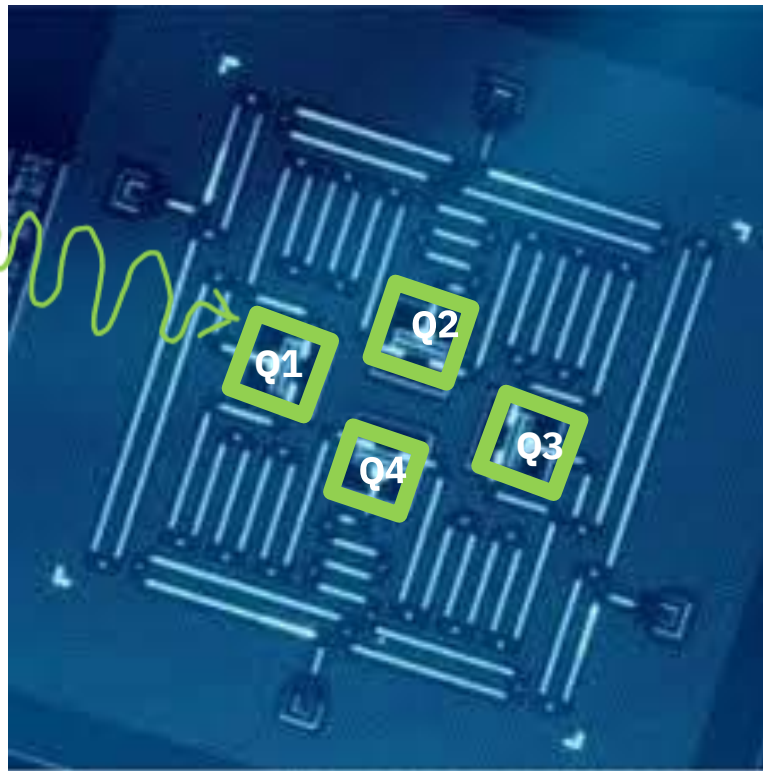
マイクロ波周波数帯のパルス信号を使う



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

これでデヴィンチェンゾさんの
条件 1 と 2 をクリアできたわけだね！



量子コンピューター5つの要件

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



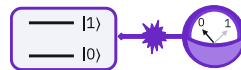
③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



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・ディヴィンチェンゾ) 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



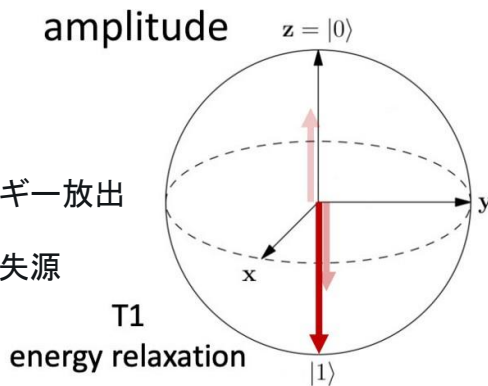
コヒーレンスタイムとは？

T1 励起状態を維持できる時間

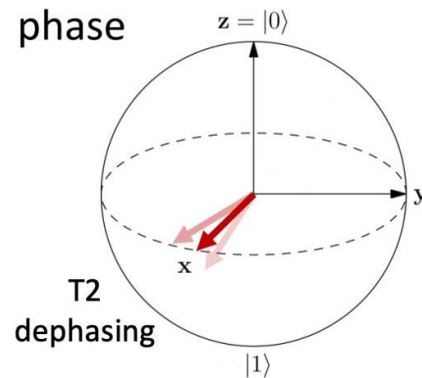
T2 重ね合せを維持できる時間

緩和の原因

- 自然のエネルギー放出
- 不純物等の損失源



phase



Decoherenceの原因

- 熱雑音
- 磁場ノイズ

コヒーレンスタイムの維持が課題



どうやったらコヒーレンスタイムを改善できるのか？

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 $v(t)$

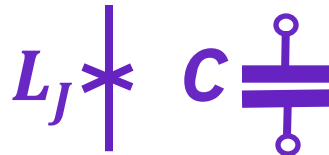
ジョセフソン・ジャンクション

電圧がかかると電流 I が流れる

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

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

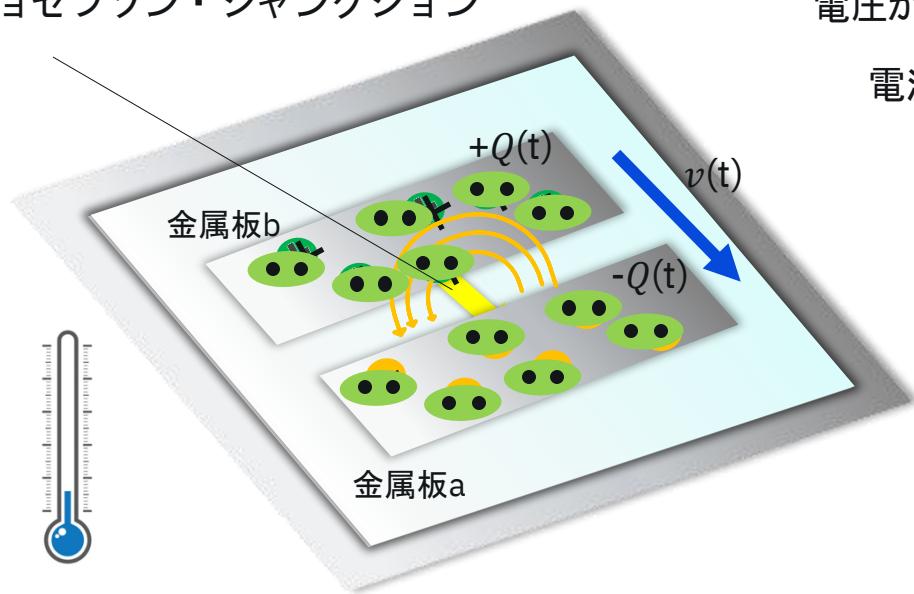


充電エネルギー E_C

(クーパー対を1つ追加するのに必要なエネルギー)

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

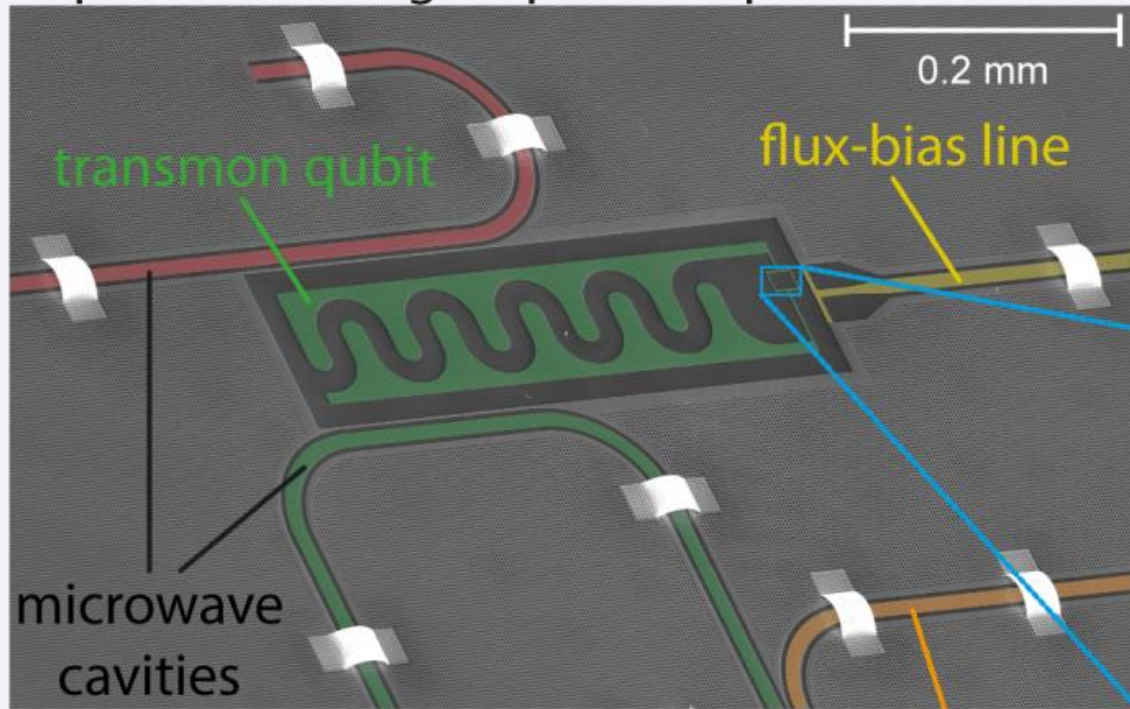
(e :磁束の向きと反対に働く誘導起電力)



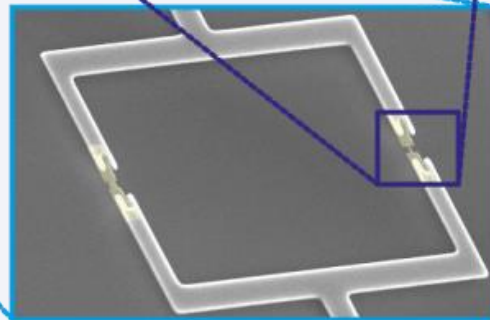
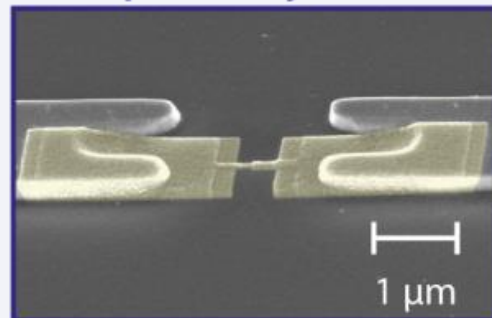
E_J/E_C 比率を高めるとノイズへの耐性が増して、コヒーレンスタイムが向上する！

トランズモン型量子ビットの誕生

superconducting chip close up:



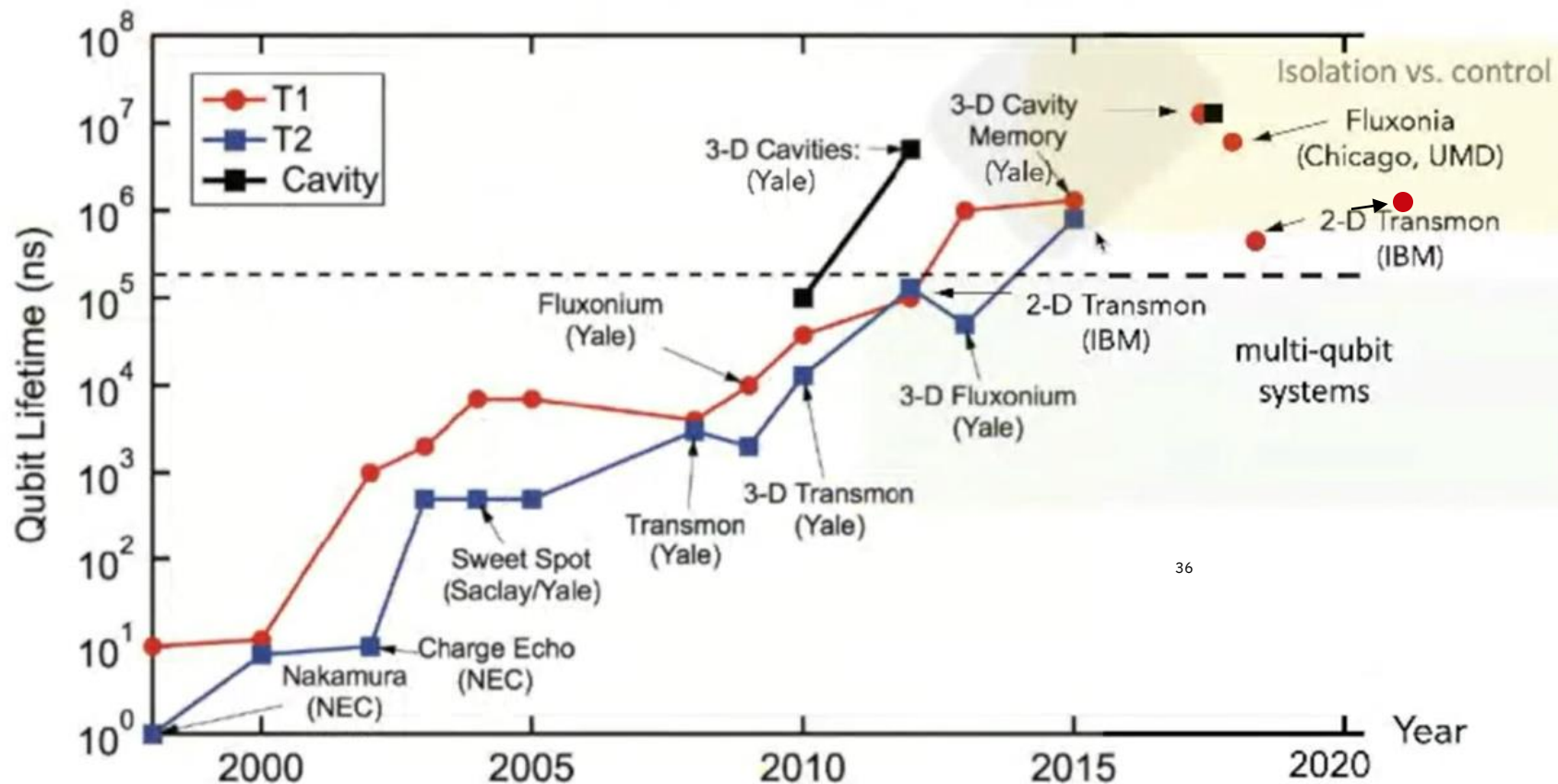
Josephson junction



input / output

SQUID loop

超伝導量子ビットのコヒーレンス時間の変遷



36

量子コンピューター5つの要件

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



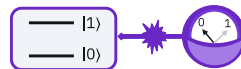
③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



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

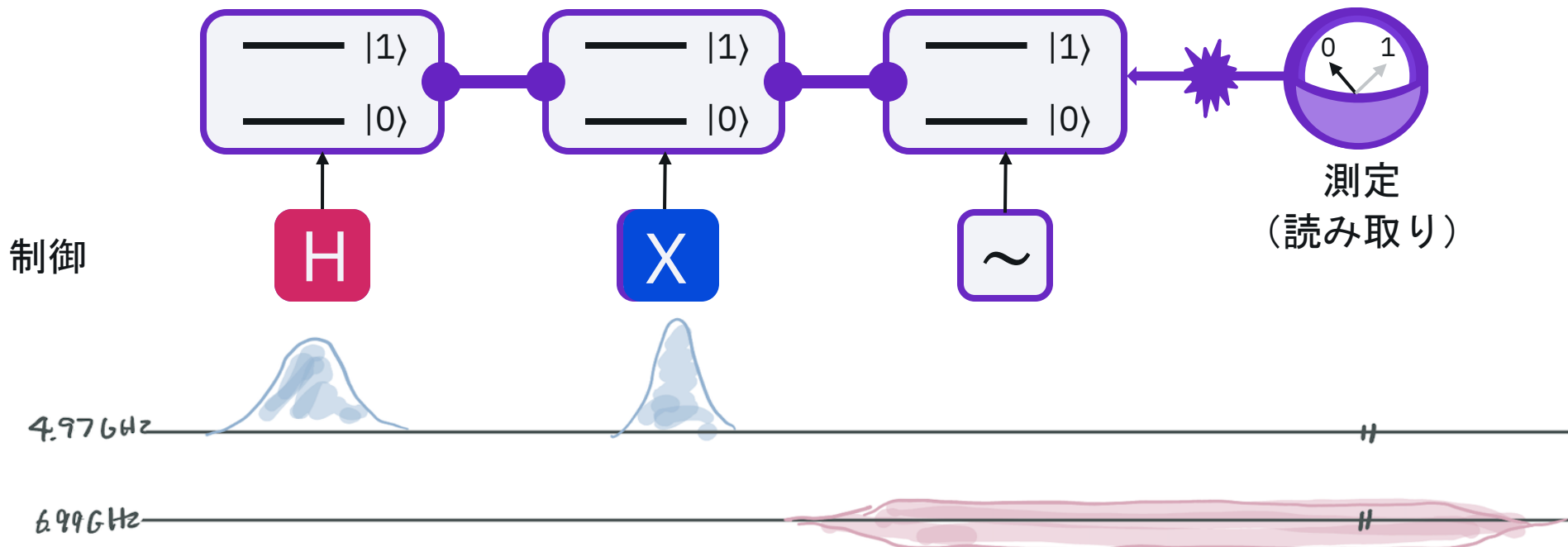


David DiVincenzo (デビット・ディヴィンチェンゾ) さんが
2000年(20年以上前)に量子コンピューターの基準*を提唱

*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

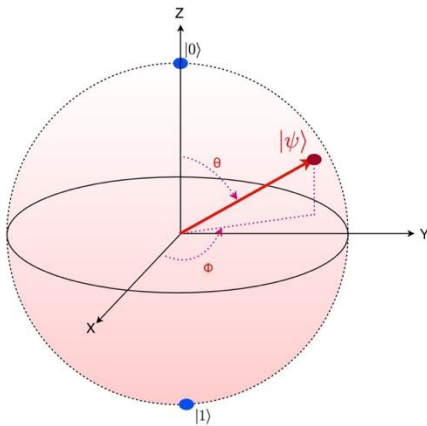


電気回路でできた量子ビットの状態を変化させるゲートも、
実態はマイクロ波パルス信号。さまざまな量子ゲートがしてくれる！

色々なゲートを色々なパルスでつくる

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

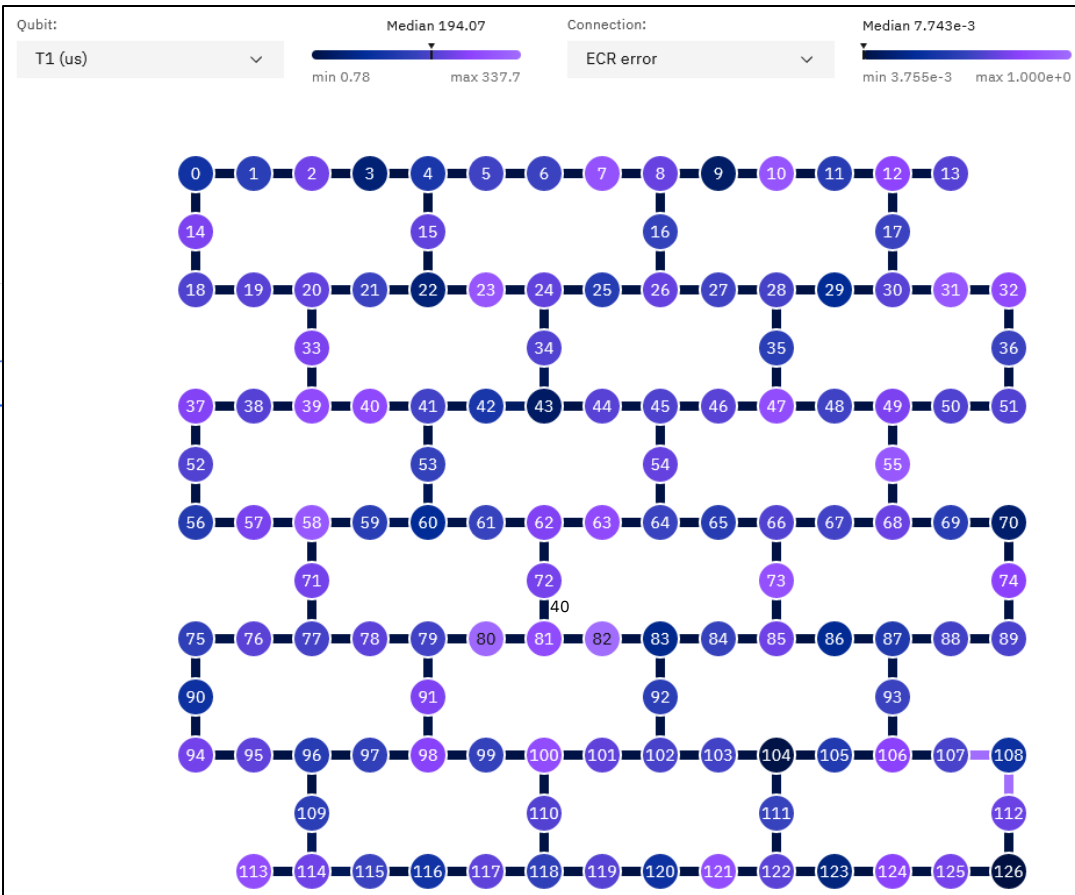
IBM Quantum Platform

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

ibm_brisbane

Details

Qubits	2Q error (best)	2Q error (layered)
127	3.01E-3	1.92E-2
Status	Region	Total pending jobs
● Online	Washington DC (us-east)	503
Basis gates	Median ECR error	Median SX error
ecr, id, rz, sx, x	6.84E-3	2.441E-4
Median T1	Median T2	
233.45 us	124.73 us	



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

量子コンピューター5つの要件全部

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



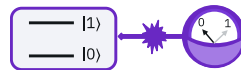
③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



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

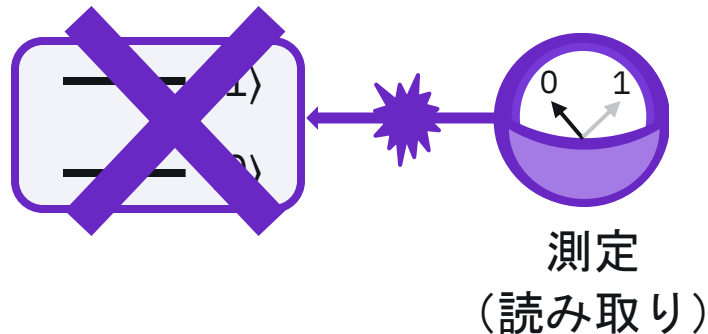


David DiVincenzo (デビット・ディヴィンチェンゾ) さんが
2000年(20年以上前)に量子コンピューターの基準*を提唱

*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

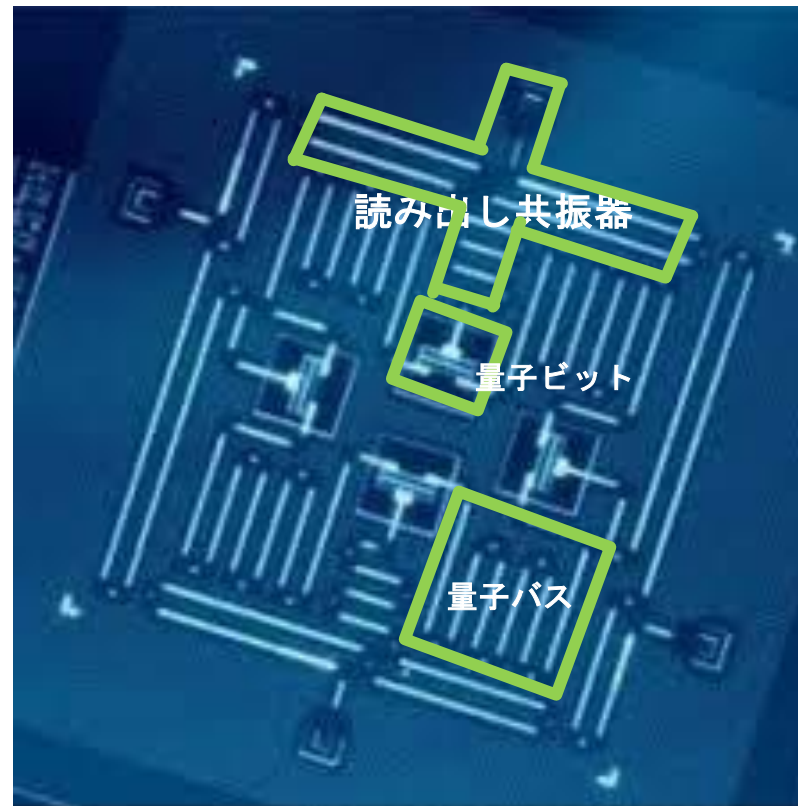


量子は最初は複数の重ね合わせ状態であったものが、
外界と接触することによる相互作用で状態が「崩壊」してしまう

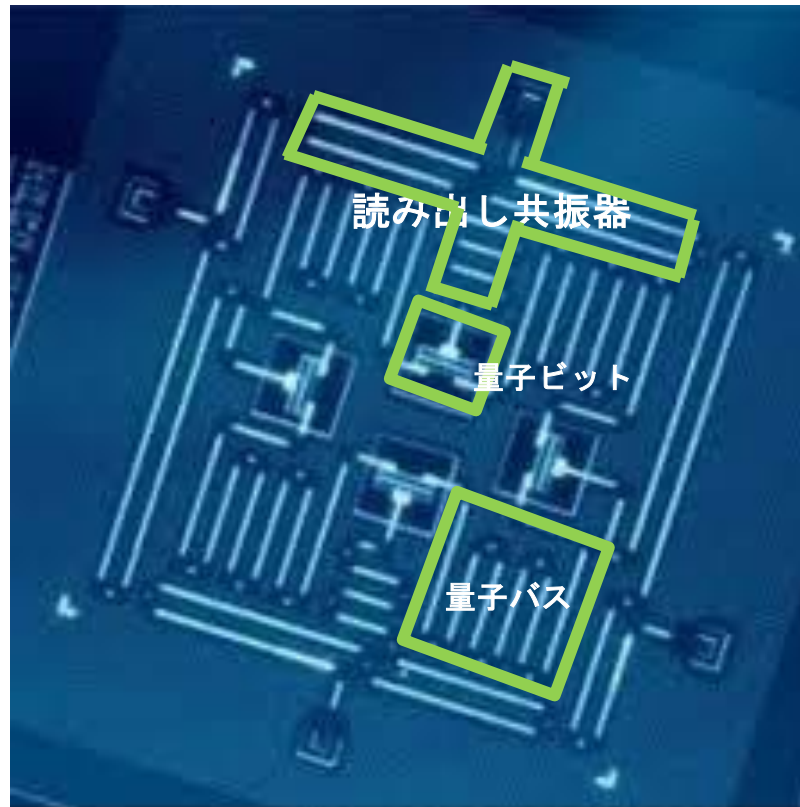
測定前の量子状態を復元することは不可能



本物の量子チップの
写真にヒントが隠さ
れています

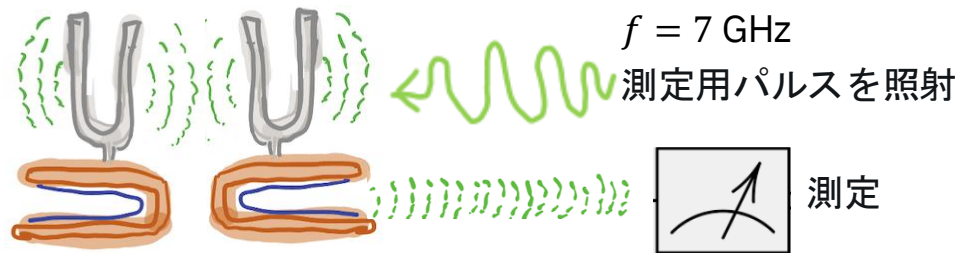


分散読み出しによる工夫



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！

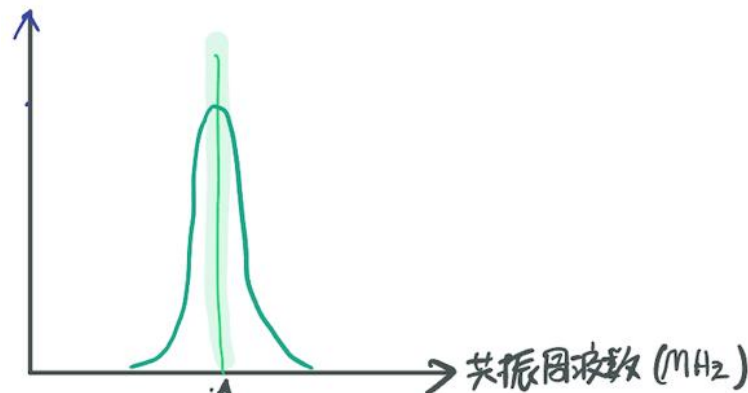
読み出しの結果がどうなるか予測できますか？

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？



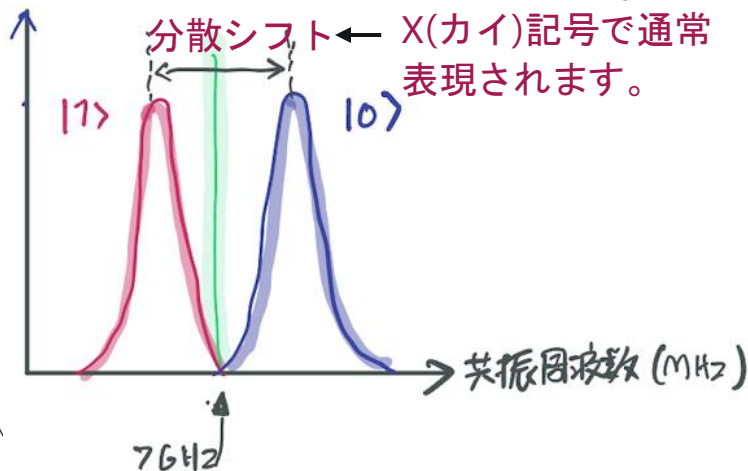
読み出しの結果

予想



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

実測



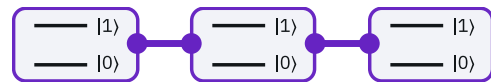
|1>のときはマイナス方向に

|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！



量子コンピューター 5つの要件クリア！

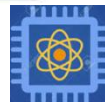


① 量子ビットが $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態がとれて連結してつかえること

② 初期化可能：繰り返し同じ状態を用意できること



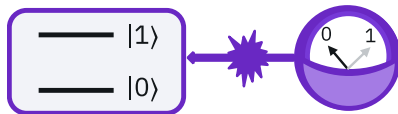
③ 理想の量子状態（コヒーレンス）をながく保てること



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



やった！



<https://www.youtube.com/watch?v=H4VnP1uL-eU>



DiVincenzo Qiskit YouTube



超伝導型量子ビットのその他利点

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！



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、**本来は大学院レベルの学問**です。

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。

- 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

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

IBM Quantum

