

Qiskit Pulse入門

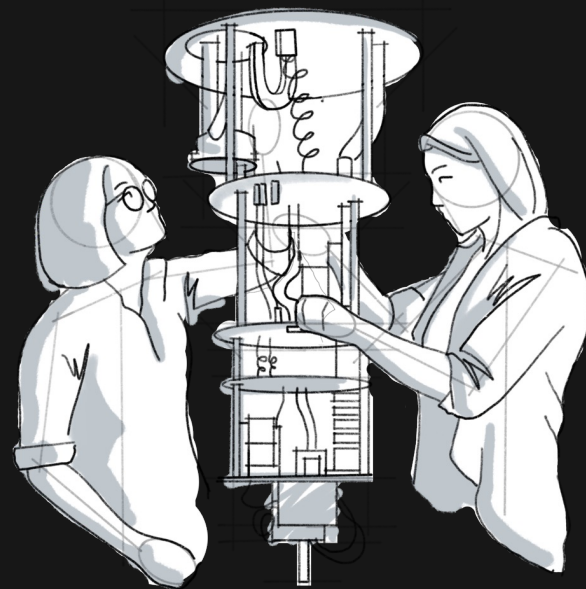
パルスによる量子ビットの制御

IBM 東京基礎研究所

沼田 祈史 (Kifumi Numata)

2022年12月23日(金)

IBM Quantum / © 2022 IBM Corporation



量子ビットを作るには？？

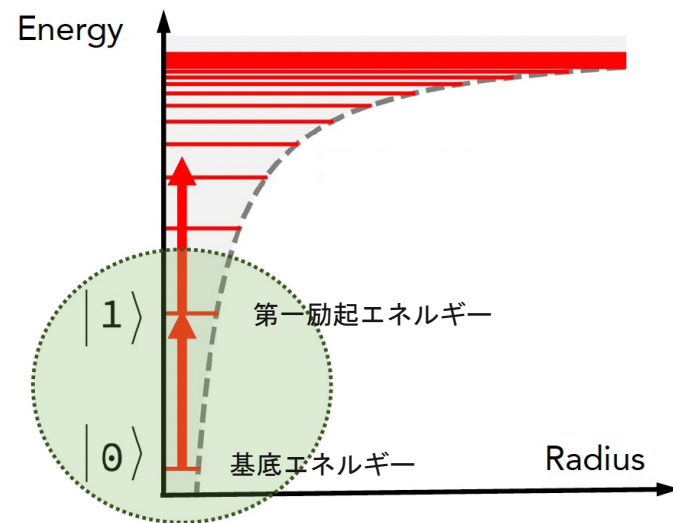
電子の量子力学的な性質をそのまま量子ビットにしたい！

- 飛び飛びのエネルギー準位。
- 波(確率振幅と位相)の性質。

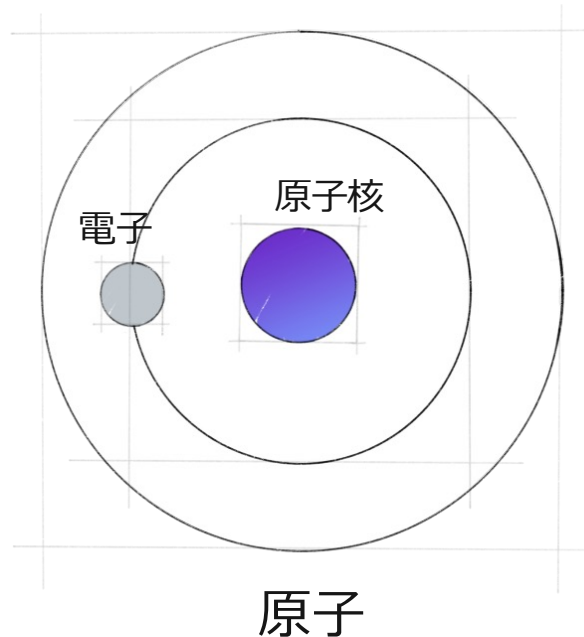
どのエネルギー準位にいるかで、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ を設定できる。

例)

- K殻とL殻
- スピン $|\uparrow\rangle$ と $|\downarrow\rangle$



ただし、扱いが難しい。



超伝導量子ビット

1) **超伝導**（超低温で金属の抵抗がゼロになる現象）を利用して電子の量子的な性質を壊れにくくする。



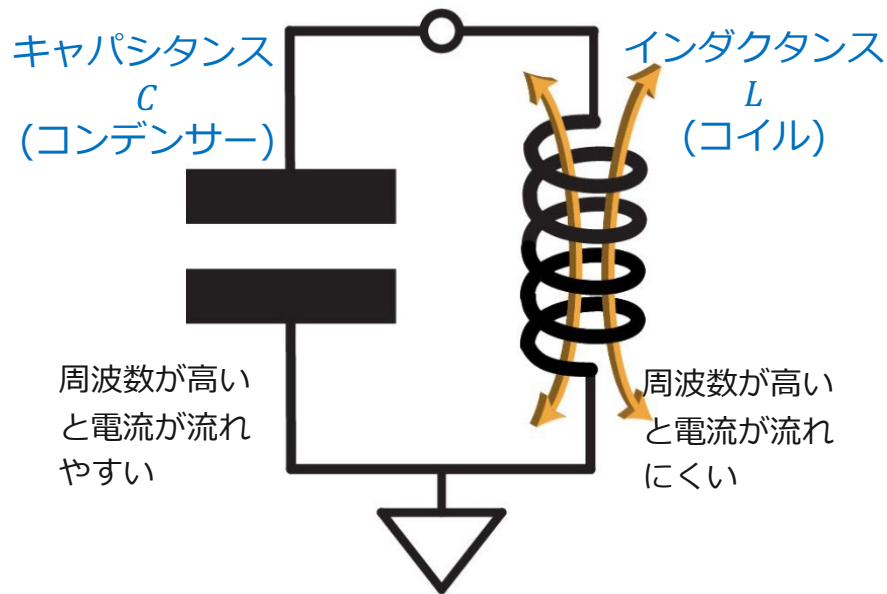
高温超伝導でIBMの研究員が
ノーベル賞を受賞(1987年)



0.015Kの低温で量子状態を実現

超伝導量子ビット

2) 超伝導のLC共振回路

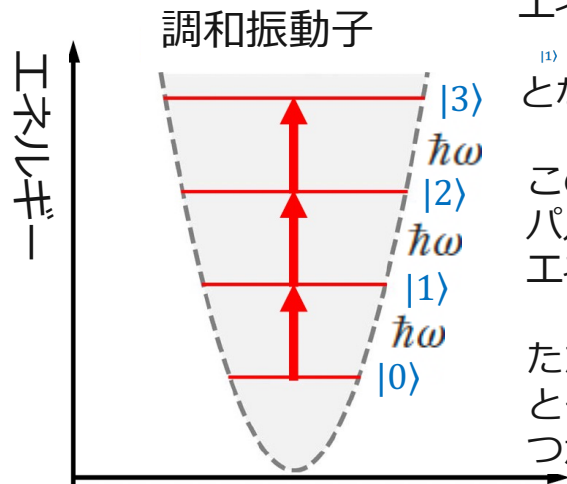


特定の周波数(共鳴周波数)で、交流電源から流れる電流が最小になり、コンデンサーとコイルの間で電流が振動する。

交流電源の角周波数 ω が以下のとき

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

コンデンサーとコイルの間に蓄えられるエネルギーが振動する。



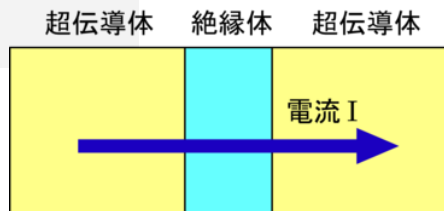
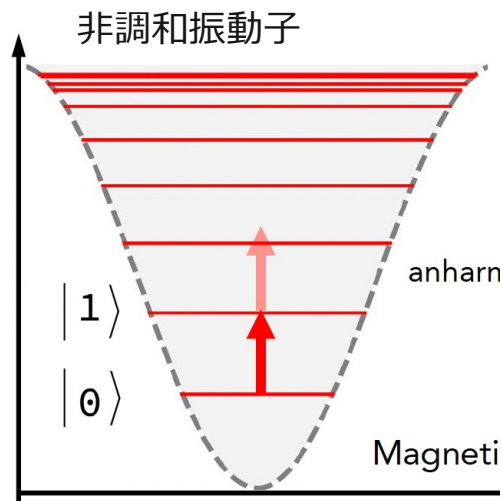
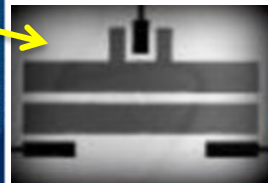
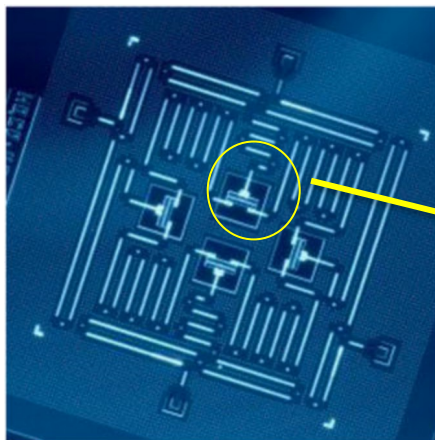
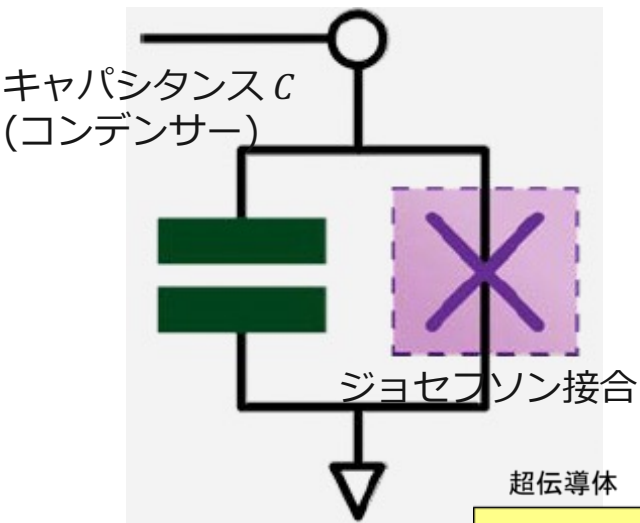
超伝導回路による量子化でエネルギー準位間隔が⁽¹⁾の量子的な調和振動子となる。

このエネルギーに相当するパルス波を入力することでエネルギー準位が推移。

ただし、これでは $|0\rangle$ と $|1\rangle$ とそれ以外の準位と区別がつかない。

超伝導量子ビット

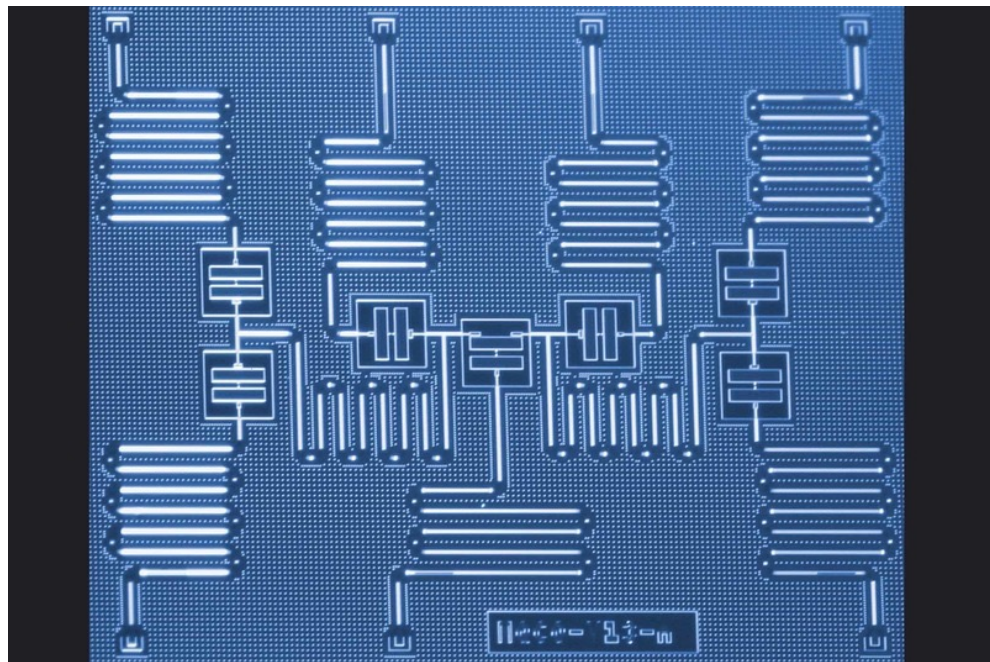
3) ジョセフソン接合で非調和振動子に。



ジョセフソン接合

ジョセフソン接合で非線形効果が入り、
非調和振動子にすることで、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ 以外の
エネルギーレベルに推移しないようにする。

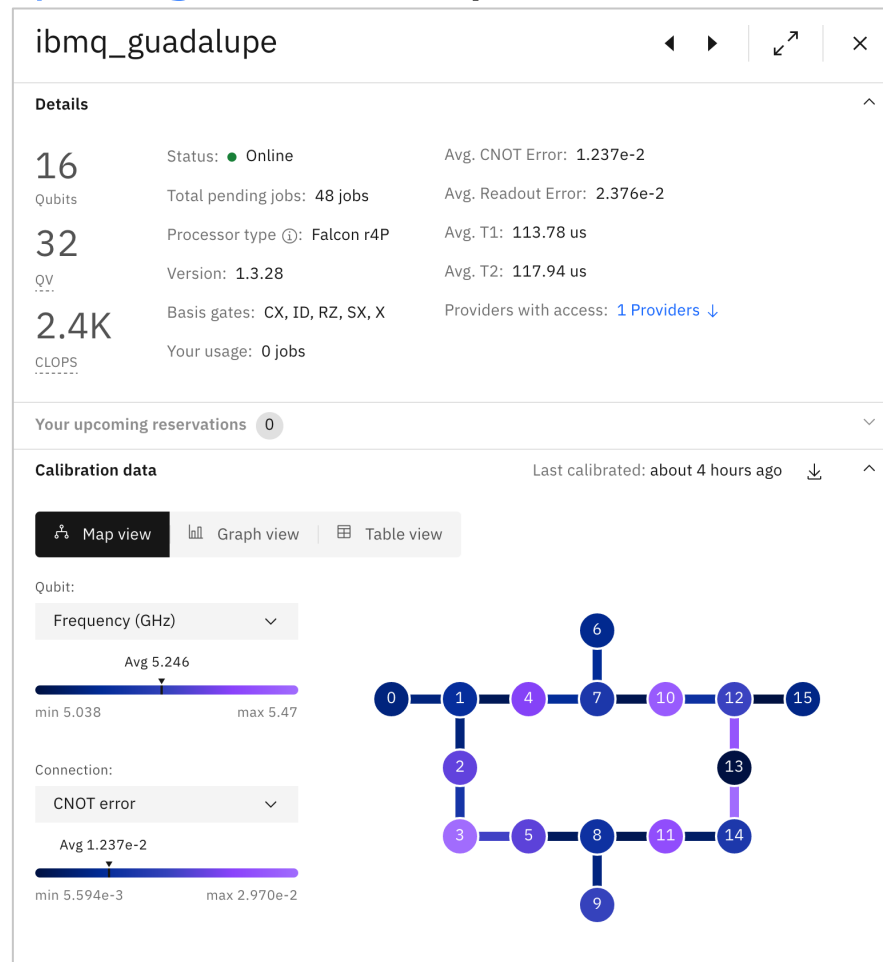
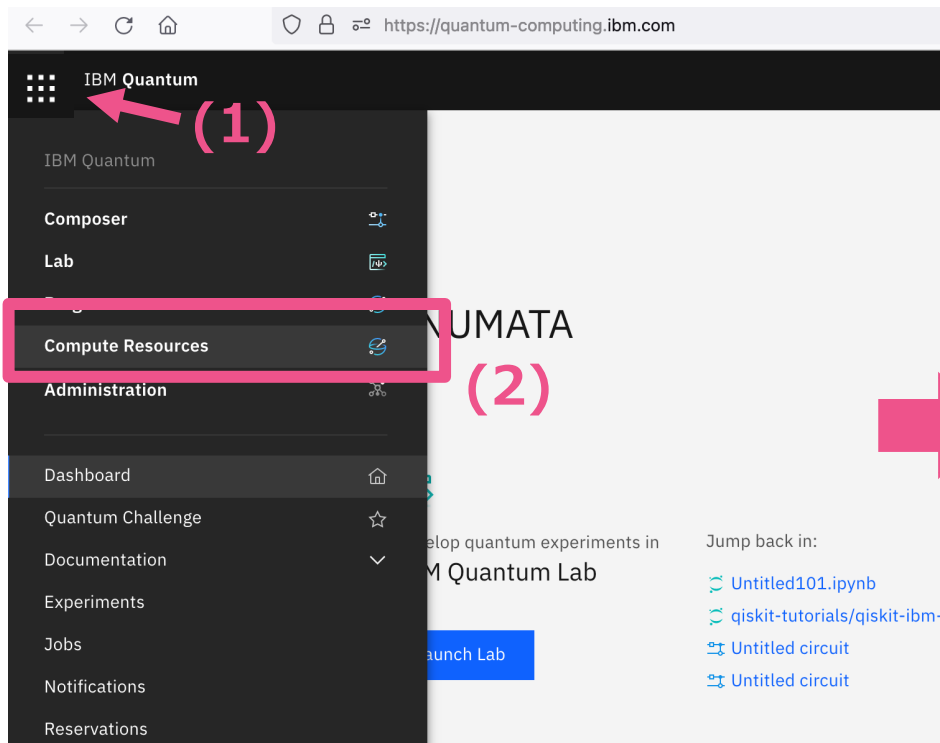
超伝導型量子ビットは、一つずつ共鳴周波数が異なります。
共鳴する周波数のマイクロ波の照射により、それぞれエネルギー準位が $|0\rangle$ と $|1\rangle$ へ励起されます。



一つずつ異なる周波数の音叉を持っていると考えると分かりやすい。



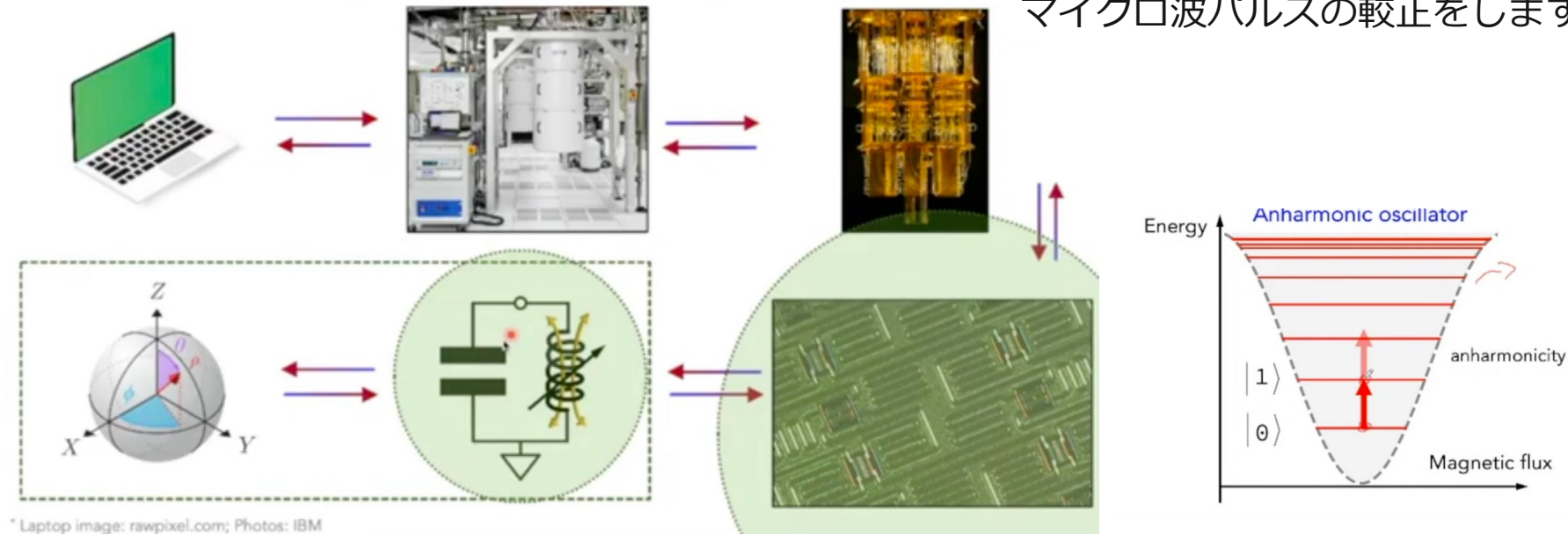
IBM Quantum (<https://quantum-computing.ibm.com/>) から 実デバイスの周波数を確認してみる



Qiskit Pulse

まるで実験室にいるかのように、量子ビットのキャリブレーション（校正）ができる。

つまり、量子ビットに送る
マイクロ波パルスの校正をします。

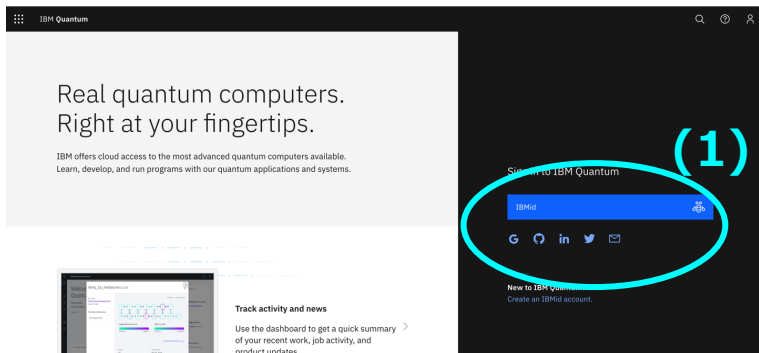


演習：IBM Quantum Labでの実行

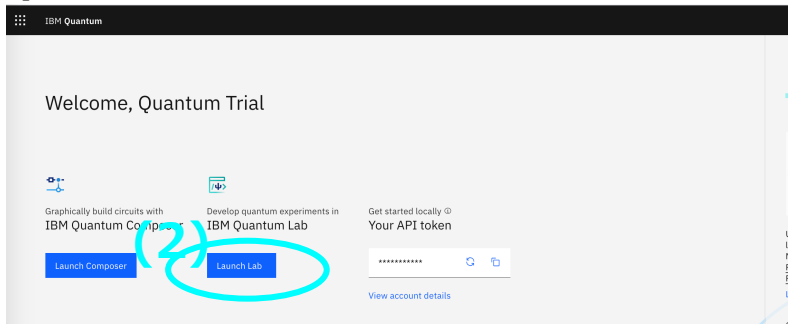
Notebookをこちらからダウンロードします：<https://github.com/kifumi/pulse-example>

(1) IBM Quantumにログインします。

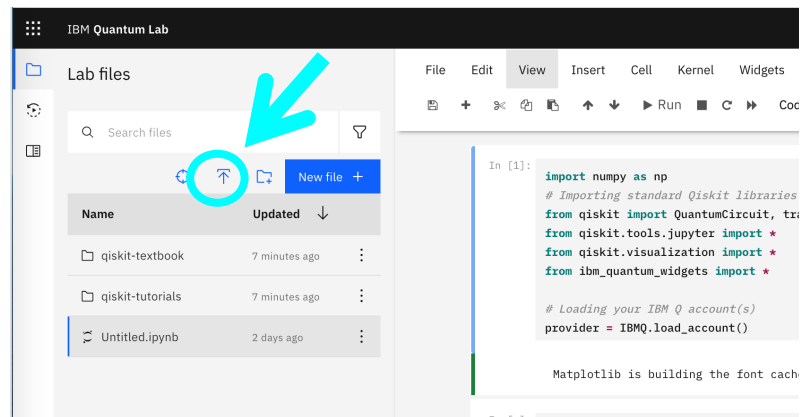
URL: <https://quantum-computing.ibm.com/>



(2) 青の右側「Launch Lab」をクリック。



(3) 左側 ↑ の「Upload file」から、ご自分のローカルに保存したハンズオンコンテンツ「**NQC22_pulse.ipynb**」を探して、アップロードします。



(4) ファイル名「**NQC22_pulse.ipynb**」をダブルクリックして開きます。

Qiskit テキストブックの該当章の最初の部分を学びます。



Overview Learn Community Documentation

The new Qiskit Textbook beta is now available. [Try it out now](#)



Qiskit Pulseによる量子ビットの較正

Qiskitは量子コンピューティングのオープンソース化されたフレームワークです(参照 1)。Qiskitを使用して、量子回路を構築し、シミュレーションし、量子デバイス上で実行することが可能です。

Qiskit Pulseは、特定のハードウェアに依存しない一般の量子デバイスに対してパルスレベルの制御(例: 入力信号の連続時間ダイナミクスの制御)を指定する言語を提供します(参照 2)。

このチュートリアルでは、QiskitとQiskit Pulseを使った単一量子ビットのキャリブレーションと特性評価実験の実装について説明します。これらは通常、デバイスが製造されシステムに取り付けられた直後にラボで行われる最初の実験です。このチュートリアルは教育的であり、学生は二準位系のダイナミクスを実験的に調べることに使えます。すべての単位は標準SI系（つまり、Hz、秒など）です。

それぞれの実験でシステムに関する詳細情報を取得し、通常、それを後続の実験で使用します。そのため、このnotebookは基本的に順番に実行する必要があります。

目次

- はじめに
- 周波数スイープを使った量子ビット周波数の探索
- 較正と π パルスの利用
 - ラビ実験を使った π パルスの較正
 - 0か1の決定
 - 反転回復法を使った T_1 の測定

Q

目次

- はじめに
- 周波数スイープを使った量子ビット周波数の探索
- 較正と π パルスの利用
 - ラビ実験を使った π パルスの較正
我々の π パルス！
 - 0か1の決定
 - 反転回復法を使った T_1 の測定
- 量子ビットコヒーレンスの決定
 - ラムゼー実験を使った正確な量子ビット周波数の測定
 - ハーン・エコーを使った T_2 の測定
- 動的デカップリング
- References

IBM Quantum Labを開く

Jupyter Notebookのダウンロード ↓

GitHubに貢献する ↗

Try the new textbook beta ↗

テキストブックの和訳版はコードが最新ではないので、「[NQC22_pulse.ipynb](#)」を参照ください。
(実機での実行は順番待ちで時間がかかる場合があります)

Qiskit Pulseによる量子ビットの較正

本日



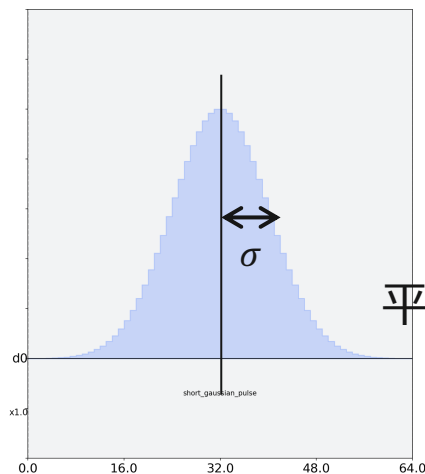
1. $|0\rangle$ から $|1\rangle$ に励起させるエネルギーの波(マイクロ波)の**周波数**を較正。
2. 上記の波の**振幅**を較正して、Xゲートを作る。(ラビ実験)
3. 上記の波の半分の振幅で、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の重ね合わせ状態を作り、**更に周波数**を較正。(ラムゼー実験)

1. 周波数スイープを使った量子ビット周波数の探索

駆動パルスの形を決め、スイープする周波数幅を決める

駆動パルス：ガウシアンパルス

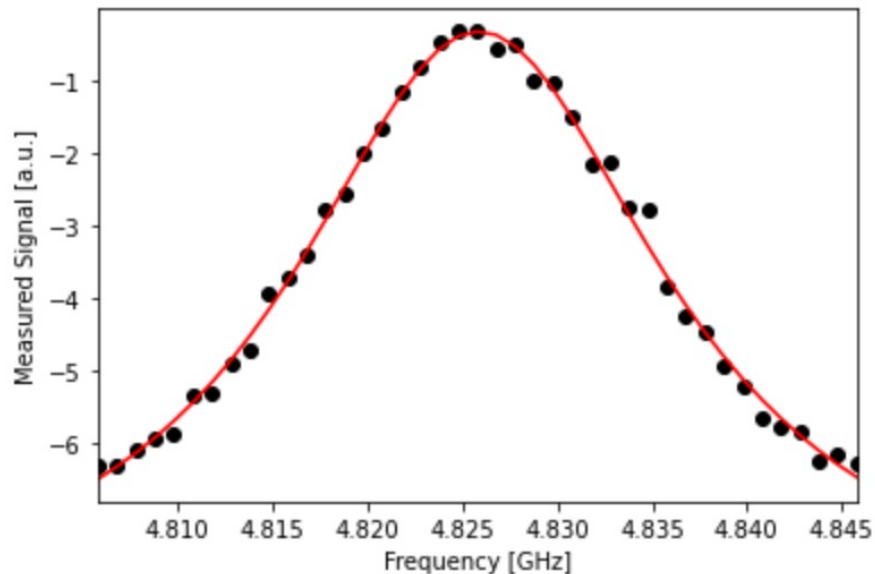
- シグマ幅 σ : $0.015\mu s$
- 長さ : 8σ
- 振幅 : 0.05
- 1MHz単位で40MHz幅をスイープ



平均 : μ , 分散 : σ^2

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

結果をフィッティング（共鳴応答曲線：ローレンツ分布）して、
最も大きく測定された周波数が新しくキャリブレーションされた周波数



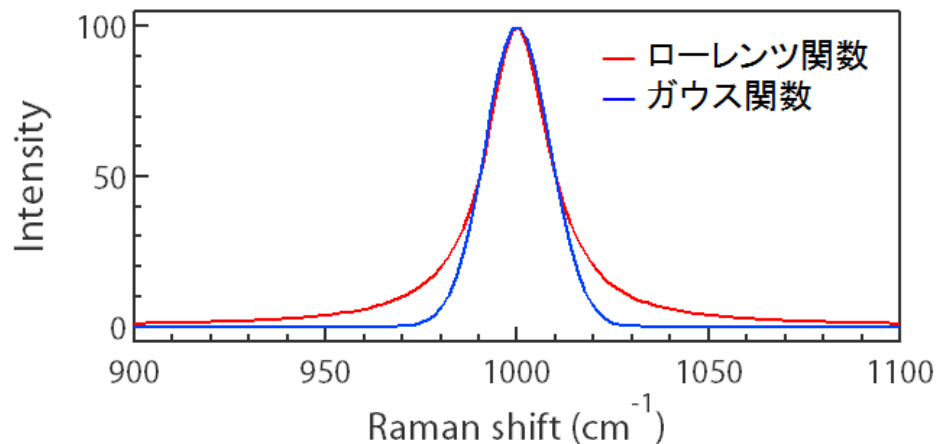
We've updated our qubit frequency estimate from 4.82578 GHz to 4.82586 GHz.

|0>から|1>への駆動パルスの周波数がキャリブレーションできました。

ご参考：ローレンツ分布

ローレンツ関数 $A \frac{w^2}{4(x - x_0)^2 + w^2}$

ガウス関数 $A \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(x - x_0)^2}{w^2} \right]$



今回のフィッティング関数

$$= \frac{A}{\sqrt{\pi}} \frac{B}{(x - q_{freq})^2 + B^2} + C$$

$[A, q_{freq}, B, C]$ の初期値 : $[1, 4.975, 1, -2]$