

日本語訳『Qiskit Textbook』勉強会

6.1章 Qiskit Pulseで量子ビットをキャリブレーションする

6.2章 Qiskit Pulseで高エネルギー状態へアクセスする

Kifumi Numata

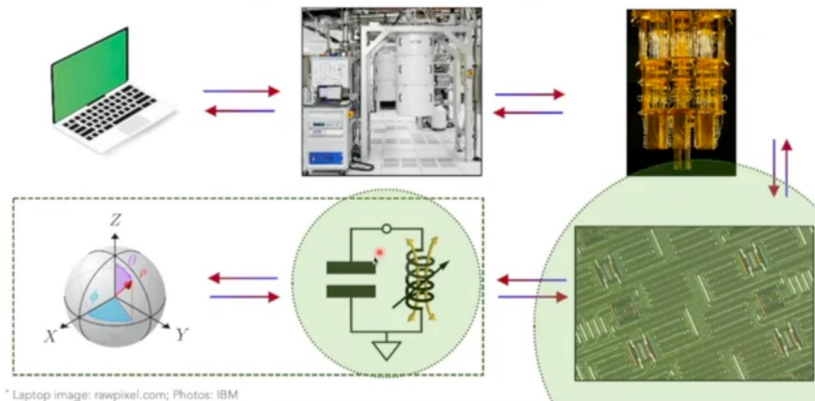
Oct 14, 2020

6.1章 Qiskit Pulseで量子ビットをキャリブレーションする

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。

cQED qubit in the cloud: Summary of flow

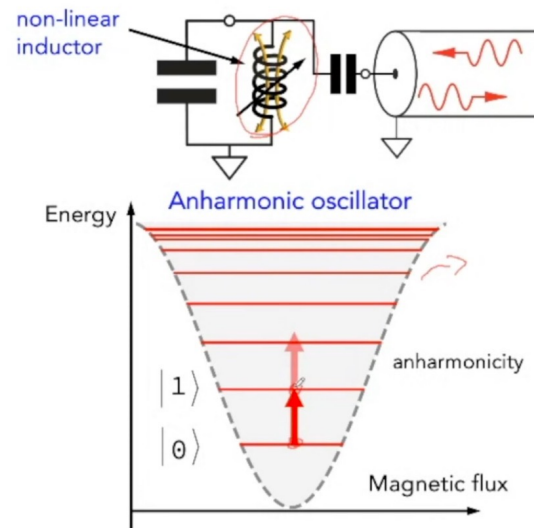


* Laptop image: rawpixel.com; Photos: IBM

出典 : Qiskit Global Summer School

16. Superconducting Qubits I: Quantizing a Harmonic Oscillator, Josephson Junctions - Part 1

Lecturer: Zlatko Mineev, PhD

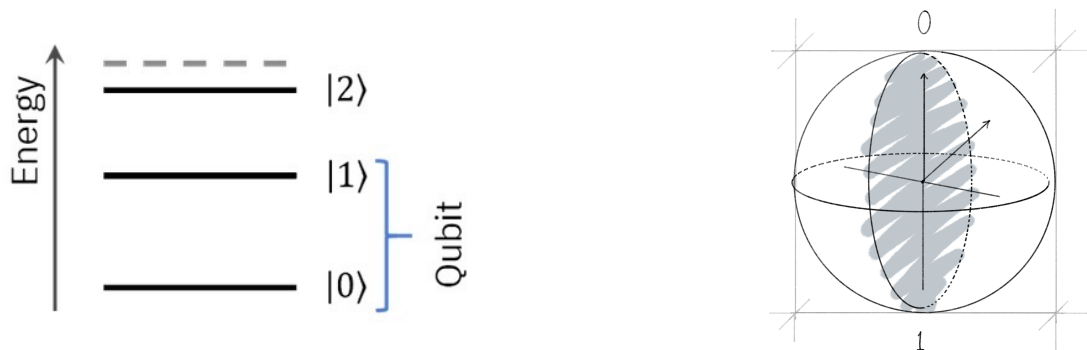


量子ビットに送るマイクロ波の
キャリブレーションをする

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。

1. $|0\rangle$ から $|1\rangle$ に励起させるエネルギーの波の周波数を校正。
2. 上記の波の振幅を校正して、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、更に周波数を校正。（ラムゼー実験）
4. 上記の波を何度も当てて、ノイズキャンセルする。（動的デカップリング）



1. $|0\rangle$ から $|1\rangle$ に励起させるマイクロ波（駆動パルス）の周波数を較正

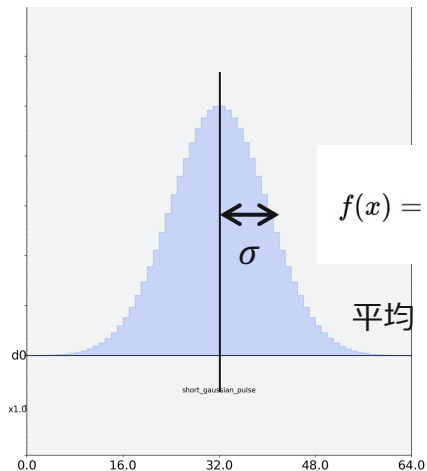
量子ビットは、一つずつ共鳴周波数が異なる。共鳴したところで、最もエネルギーが励起される。

1) まずバックエンド(ibmq_armonk)のデフォルト情報から大体の波の周波数をもらう：

ibmq_armonk（無償公開されている1量子ビットデバイス）
の推定周波数：4.97445 GHz（サンプリングタイム dt：0.22 ns）

2) 駆動パルスの形を決める

駆動パルス：ガウシアンパルス



- σ : $0.075\mu s$
- 幅 : 8σ
- 振幅 : 0.3
- 1MHz単位で40MHz幅をスweep

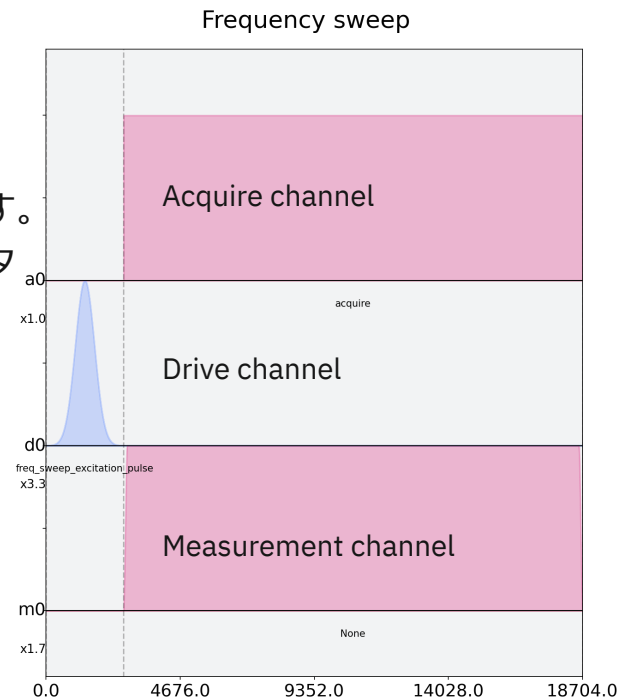
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

平均： μ , 分散： σ^2

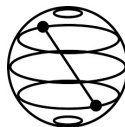
1. $|0\rangle$ から $|1\rangle$ に励起させるマイクロ波（駆動パルス）の周波数を較正

3) 3チャンネルのスケジュールのセット

1. 駆動チャンネル：駆動パルスを照射
2. 測定チャンネル：別のパルスで測定。冷凍機の外にシグナルを出す。
3. 取得チャンネル：測定チャンネルの出力信号を受信。アナログデジタル変換



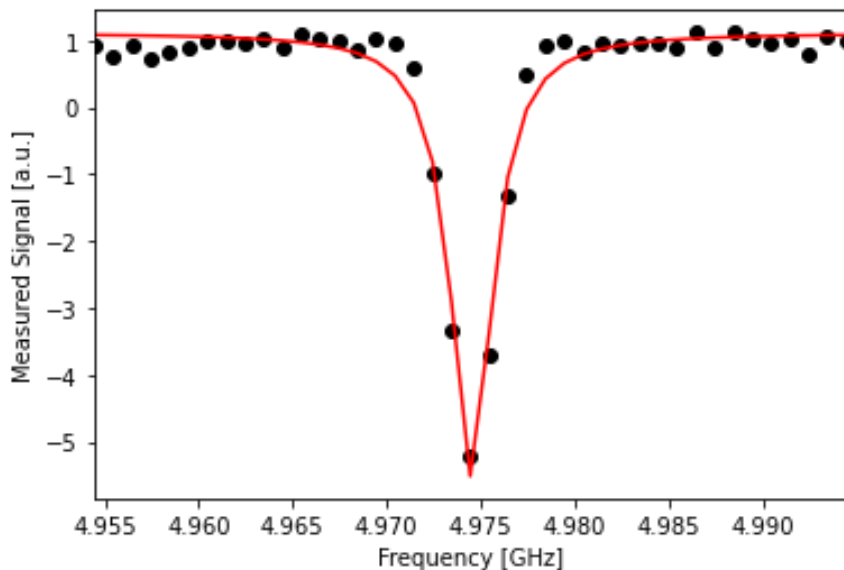
4) Qobjと呼ばれるプログラムオブジェクトにスケジュールをアセンブルして実行



1. $|0\rangle$ から $|1\rangle$ に励起させるマイクロ波（駆動パルス）の周波数を較正

5) 共鳴周波数ができました！

結果をフィッティング（共鳴応答曲線：ローレンツ分布）



We've updated our qubit frequency estimate from 4.97444 GHz to 4.97452 GHz.

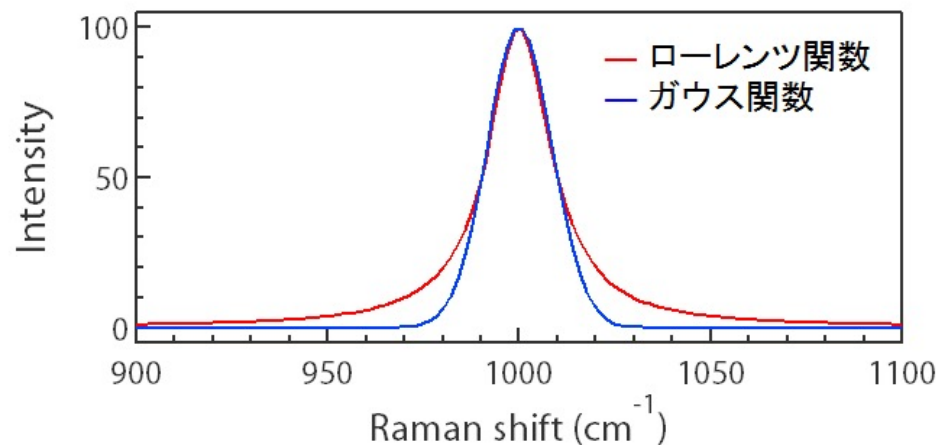
注) フィッティングがうまくいかない場合は、fittingの初期パラメーターを変えます。

```
fit_params, y_fit = \
    fit_function(frequencies_GHz,
                  np.real(sweep_values), # 結果の実数のみ
                  lambda x, A, q_freq, B, C: \
                      (A / np.pi) * (B / ((x - q_freq)**2 + B**2)) + C, #ローレンツ分布
                  [-5, 4.975, 1, 0.5] # フィッティングの初期パラメーター
    )
```

$|0\rangle$ から $|1\rangle$ への駆動パルスの周波数が較正できた！

ご参考：ローレンツ分布

$$\begin{aligned}\text{ローレンツ関数} & A \frac{w^2}{4(x - x_0)^2 + w^2} \\ \text{ガウス関数} & A \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(x - x_0)^2}{w^2} \right]\end{aligned}$$



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 : $[-5, 4.975, 1, 0.5]$

2. $|0\rangle$ から $|1\rangle$ への駆動パルスの振幅を較正（ラビ実験を使う）

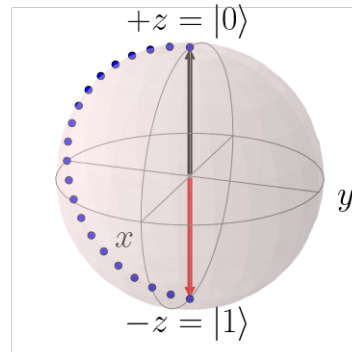
このパルスは、 π パルスと呼ばれる。

$|0\rangle$ から $|1\rangle$ へ、 $|1\rangle$ から $|0\rangle$ への変換、

つまり、**Xゲート**（X180ゲート、ビットフリップ演算）を作る！

前回得た周波数のパルスの振幅を少しずつ変化させると

$|0\rangle$ と $|1\rangle$ の間を行ったり来たりする：ラビ振動



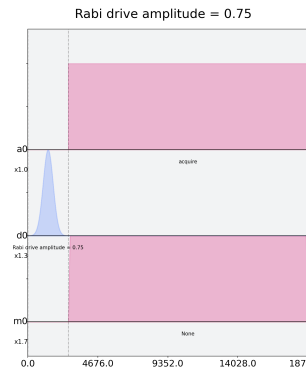
1) 振幅の最大値、ポイントの個数を設定

最大値：0.75

ポイント数：50個（0~0.75の振幅を等間隔で50個に分けた振幅をセット）

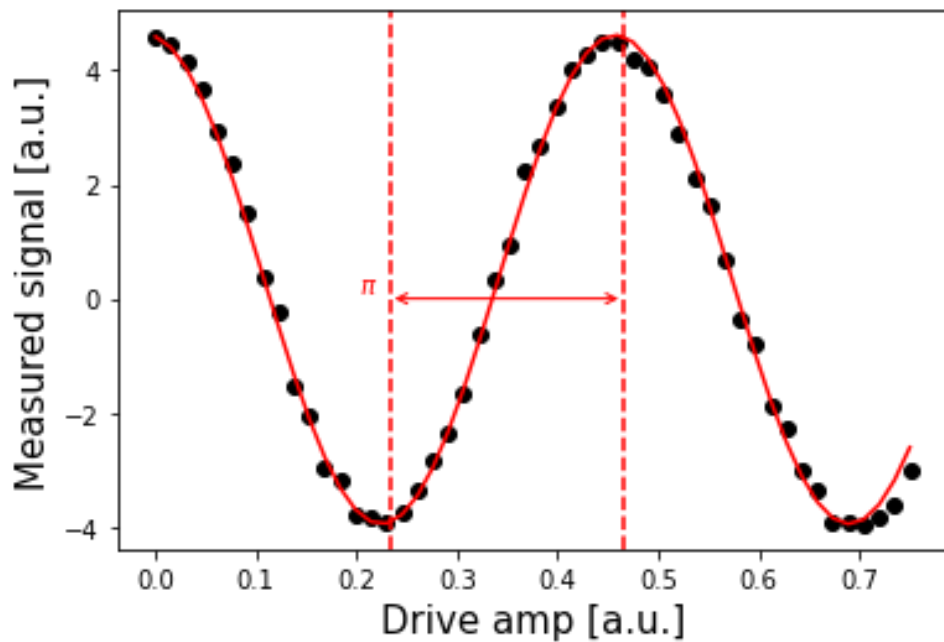
2) 実験スケジュールは前回と同じものを使う

パルスの振幅を変化させながらパルスを駆動して、毎回測定を行う。



3) ラビ振動が見られる！

結果をフィッティング（正弦曲線）：測定信号が最小から最大になる駆動振幅が π パルス。

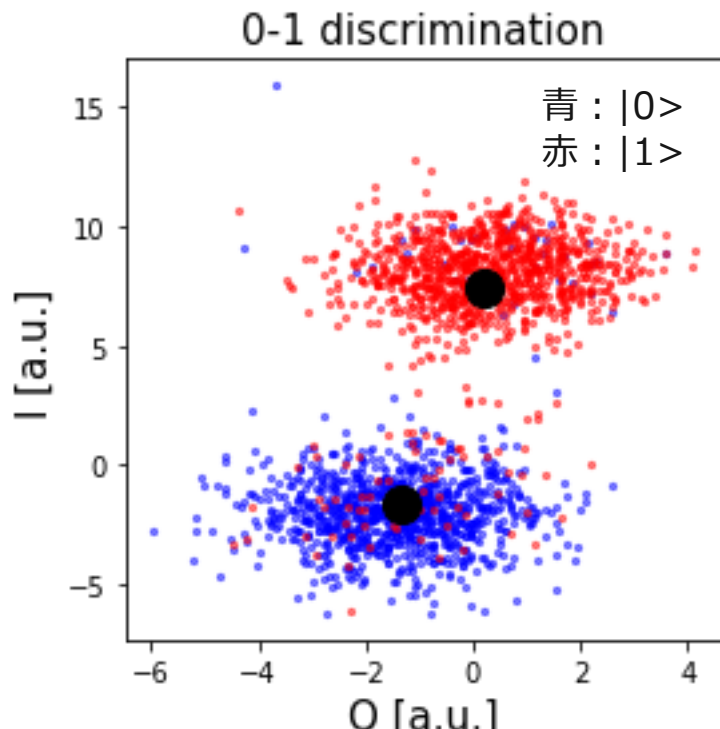


Pi Amplitude = 0.23270418861309325

Xゲート（ π パルス）が較正できた。

追加： π パルスを使って、 $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ の識別器（Discriminator）を作ってみる

$|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ をそれぞれ作って測定することを繰り返して、その測定された信号を実部（横軸）と虚部（縦軸）で図示。

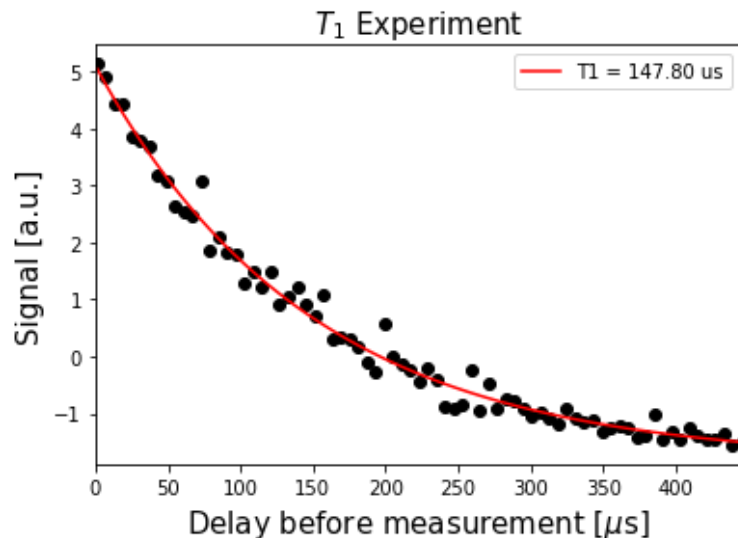


$|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ の平均点から等しい距離で識別する線を作成。
(次の章で詳しく紹介)

追加： π パルスを使って、 T_1 ($|1\rangle$ から $|0\rangle$ に落ちるまでの時間)を測定してみる。

T_1 ：励起状態から基底状態に減衰するのにかかる緩和時間（ $|1\rangle$ から $|0\rangle$ に落ちるまでの時間）
量子コンピューターで実行する意味のあるプログラムの実行時間として、重要です。

やり方： π パルスを適用した後、測定する時間を遅延させる。
遅延時間を変化させて信号をプロット。



指数関数にフィッティング：

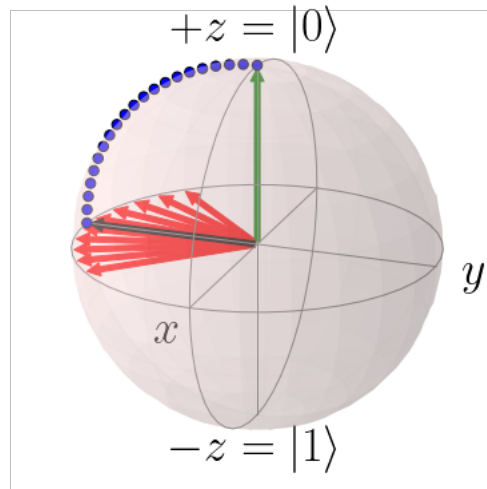
$$A \cdot \exp\left(-\frac{x}{T_1}\right) + C$$

シグナル強度が63%落ちたところが T_1 時間
 $T_1 = 147.80 \text{ us}$

3. $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の重ね合わせ状態を作って、更に駆動パルスを較正。 (ラムゼー実験)

$\pi/2$ パルス (ラムゼー・パルス : X軸周りの90度回転) を適用

→ 待つ → 2回目の $\pi/2$ パルスを適用

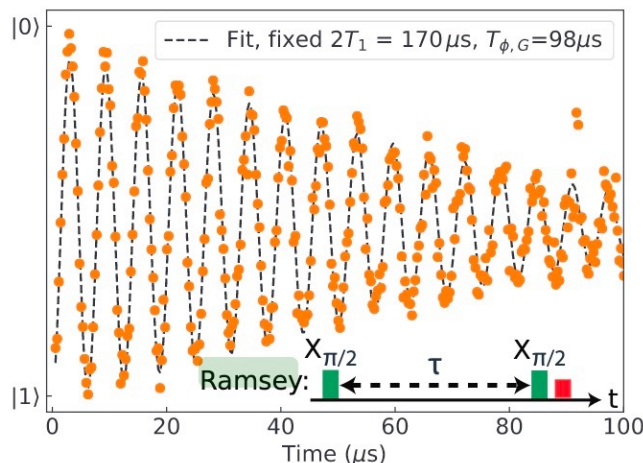


$\pi/2$ パルスを適用すると、位相が周期的に回転する。

待つ時間を変化させて、2回目の $\pi/2$ パルスを適用すると

$|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ の間での振動が見られる。

この振動の周期が、励起エネルギーの周波数の逆数。



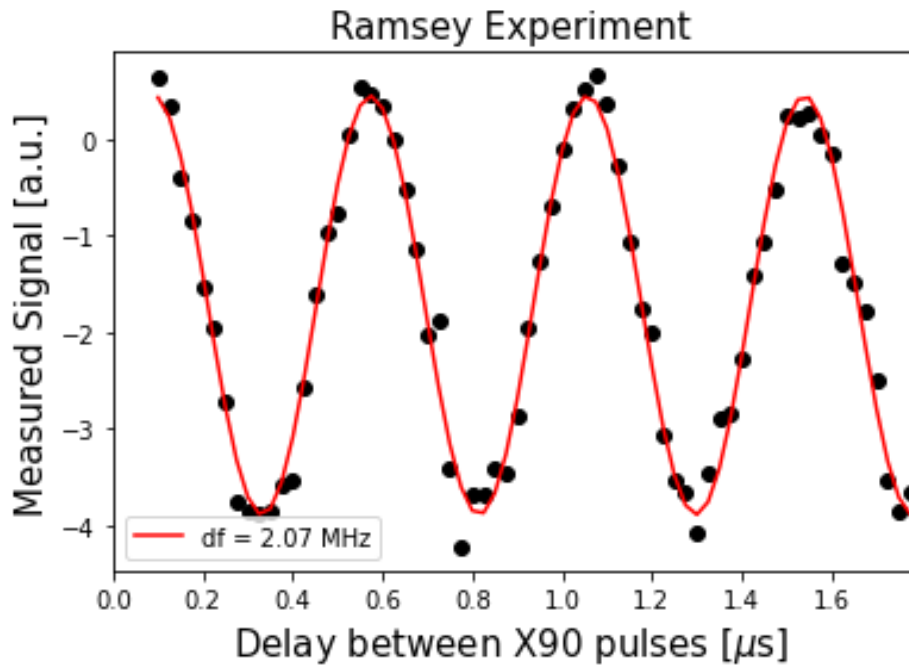
- 2回続けて $\pi/2$ パルス :
 $|0\rangle \rightarrow |-i\rangle \rightarrow |1\rangle$
- 待っている間に $\pi/2$ 位相が変化 :
 $|0\rangle \rightarrow |-i\rangle \rightarrow |+\rangle \rightarrow |+\rangle$
- 待っている間に π 位相が変化 :
 $|0\rangle \rightarrow |-i\rangle \rightarrow |i\rangle \rightarrow |0\rangle$

実験トリック：すでに得ている駆動パルスの周波数から、少しずれた周波数(2MHz)を使う
→ その振動数近辺で振動するはず。この周波数 Δf を求める。

ラムゼー実験の設定

最大遅延時間：1.8 μ s、タイムステップ：0.025 μ s

オフレゾナンス周波数：2MHz



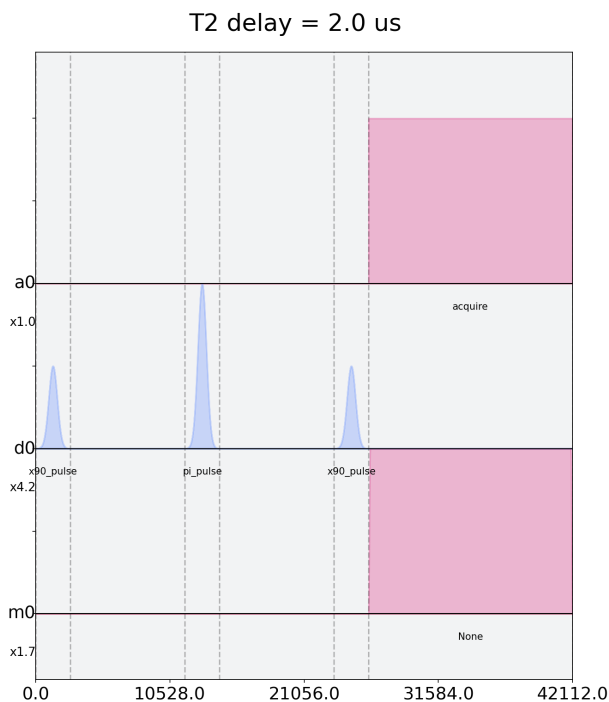
結果をフィッティング（正弦曲線）

$$A \cdot \cos(2\pi \cdot \Delta f_{\text{MHz}} \cdot x - C) + B$$

Our updated qubit frequency is now 4.97459 GHz. It used to be 4.97452 GHz

追加：T2（重ね合わせが壊れるまでの時間）を測定してみる。

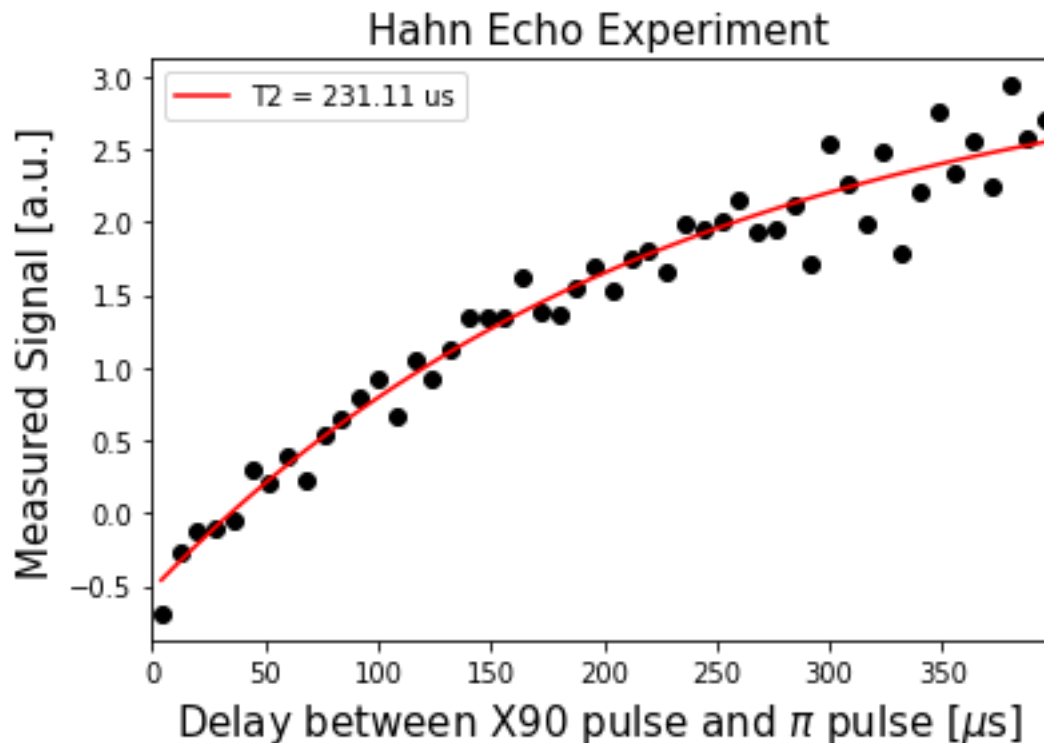
$\pi/2$ パルス \rightarrow （時間 τ 待つ） \rightarrow π パルス \rightarrow （時間 τ 待つ） \rightarrow $\pi/2$ パルスを適用
：ハーン・エコー実験



この時間 τ は、コヒーレンスタイムと呼ばれる。

続けて $\pi/2$ パルス \rightarrow π パルス \rightarrow $\pi/2$ パルス を実行する場合：
 $|0\rangle \rightarrow \quad \quad \quad |-i\rangle \quad \rightarrow \quad |+i\rangle \quad \rightarrow \quad |0\rangle$

結果をフィッティング



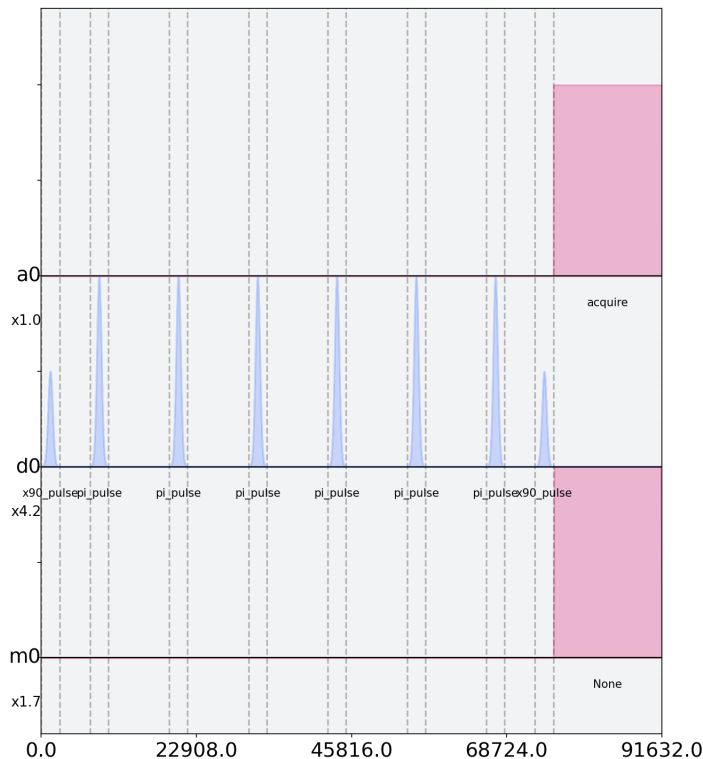
指数関数にフィッティング：

$$A \cdot \exp\left(-\frac{x}{T_2}\right) + B$$

シグナル強度が63%落ちたところがT2時間
 $T_2 = 231.11 \text{ us}$

4. π パルスを複数回当ててノイズキャンセルする (動的デカップリング)

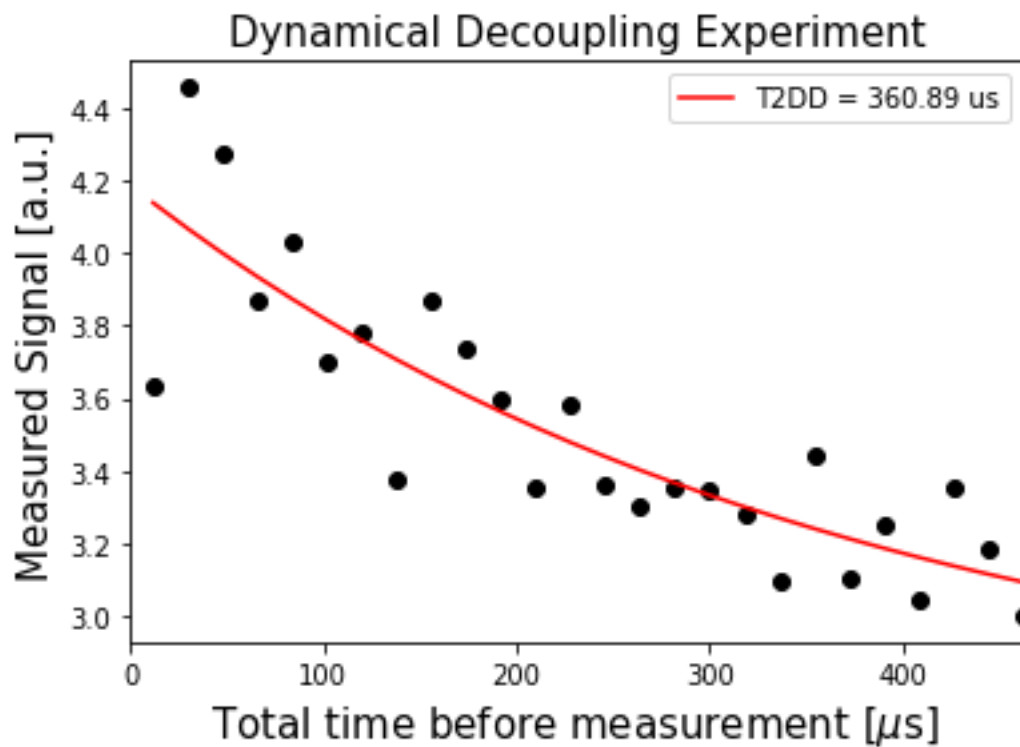
T2DD delay = 1.0 us



π パルスを何回も続けて適用するテクニックは、動的デカップリングとして一般に知られている。

ノイズのさまざまな周波数をキャンセルし、量子ビットからより長いコヒーレンス時間を抽出するために使われます。

実験では6回 π パルスを続けて適用。
T2時間を測定。



$T_2 = 360.89 \mu\text{s}$
延びました！

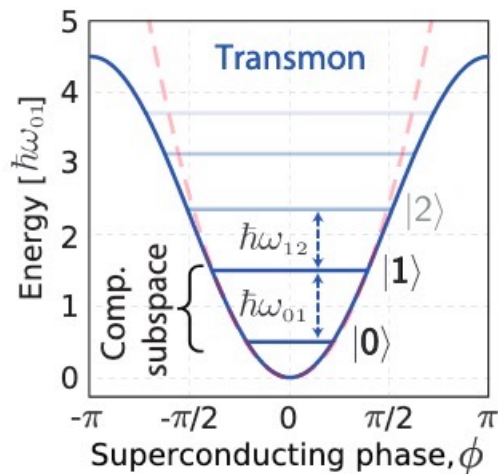
まとめ : Qiskit Pulse

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（較正）ができました。

1. $|0\rangle$ から $|1\rangle$ に励起させるパルスの共鳴周波数を較正。
2. 上記のパルスの振幅を較正して、 π パルス（Xゲート）を較正。（ラビ実験）
 - T1時間($|1\rangle$ から $|0\rangle$ に落ちるまでの時間)を測定
3. $\pi/2$ パルスで、重ね合わせ状態を作り、更に周波数を較正。（ラムゼー実験）
 - T2時間（重ね合わせが壊れるまでの時間）を測定
4. π パルスを何度も当てて、ノイズキャンセルする。（動的デカップリング）

6.2章 Qiskit Pulseで高エネルギー状態へアクセスする

Qiskit Pulseで高エネルギー状態 $|2\rangle$ を作る



IBMの量子デバイスは、 $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ のさらに上の**エネルギー状態 $|2\rangle$** を作ることができます。

Qiskit Pulseを使って、ibmq_armonk (無償公開されている1量子ビットデバイス) で $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ を作って、分類する識別器を作成します。

Qutrit : 3つの直交する量子状態の重ね合わせとして存在する量子情報の単位。
$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle + \gamma|2\rangle$$

注 : 現在のTextbookのコードは最新バージョン(現在0.22.0) のQiskitでは動きません。
(v0.22.0対応のコードUpdateまで時間がありませんでした。)

今回は、Qiskit 0.19.6, Terra 0.14.2, Ignis 0.3.3を使って実際に実験した結果をご紹介します。

方針

1. $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の識別器を作成

- 前章と同じ実験を行って、周波数の較正、 π パルスの較正を行う。
- $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態を作って線形判別分析（Linear Discriminant Analysis, LDA）で分類してみる。

2. $|0\rangle$ と $|1\rangle$ と $|2\rangle$ の識別器を作成

- $|1\rangle$ から $|2\rangle$ に励起させるエネルギーの波の周波数を較正。さらにこの波の π パルスの較正。
- 線形判別分析で $|0\rangle$ と $|1\rangle$ と $|2\rangle$ の状態を分類。

$|0\rangle$ から $|1\rangle$ のパルスを較正（復習）

1. Backendからデバイスのデフォルトの量子ビット周波数を取ってくる。

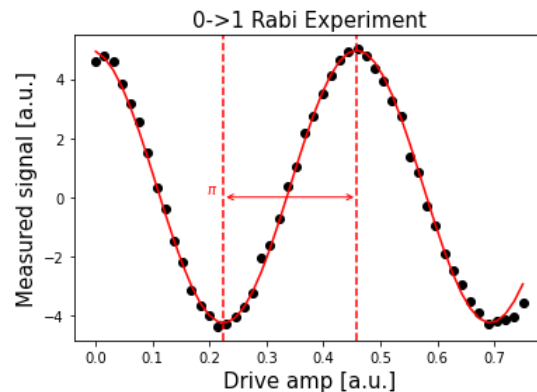
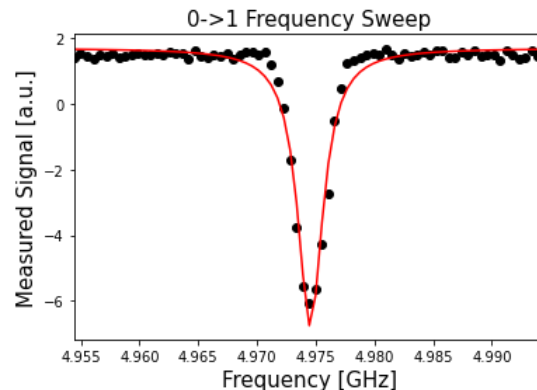
だいたい4.9744515 GHz

2. 上記周波数の前後40MHzの枠で周波数スイープ。

4.9745319 GHzに較正。

3. ラビ実験で π パルスの較正。

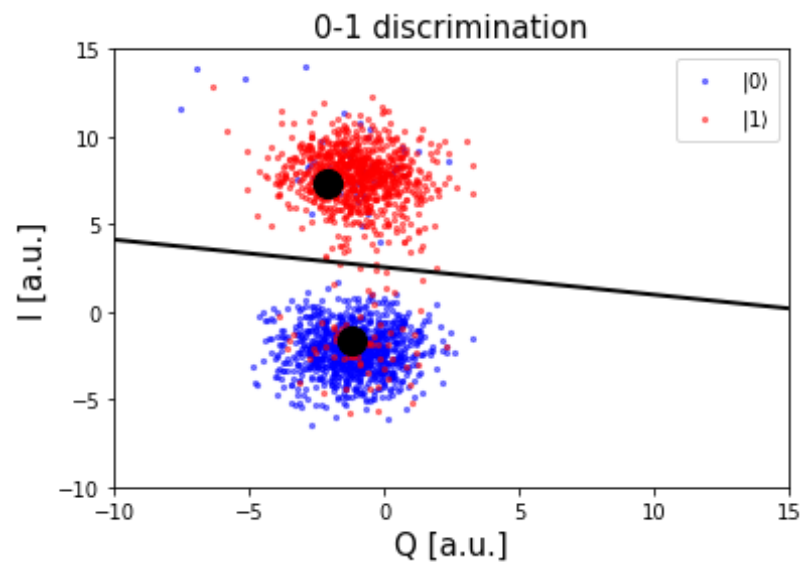
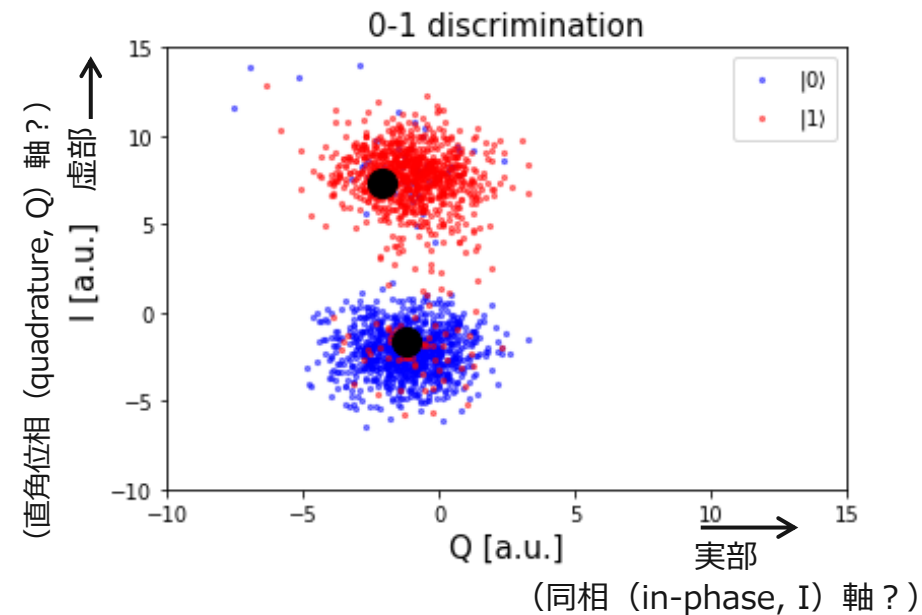
Pi Amplitude (0->1) = 0.22427075596906584



注: a.u. = arbitrary units

識別器の作り方： $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の場合

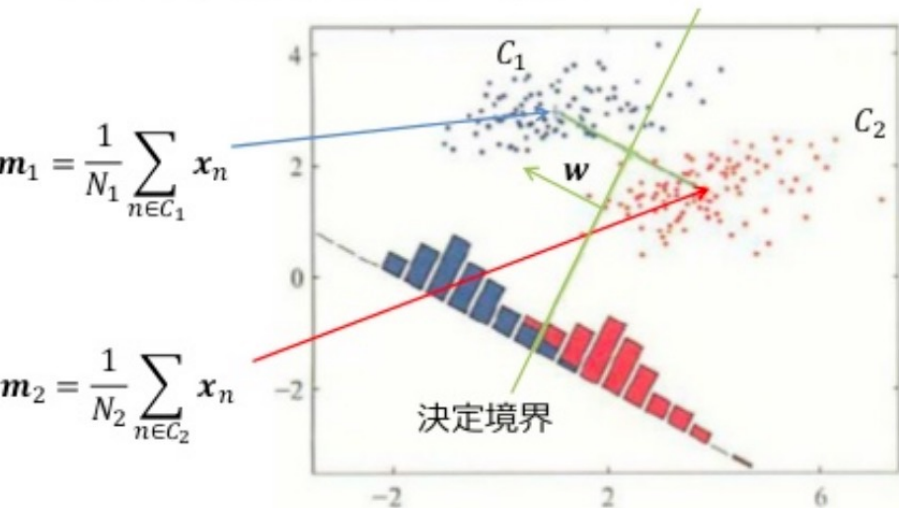
1. $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の状態を作り、平均をとらずに、測定値を個別に取得。
(パルスの較正の時は、ショット数1024に対して各周波数や振幅ごとに平均を取っていた)
2. 測定データを実部と虚部に分けて、プロット。(平均は大きなドット)
3. 機械学習のライブラリー “scikit.learn”を使って、線形判別分析で2グループを分ける線を求める。



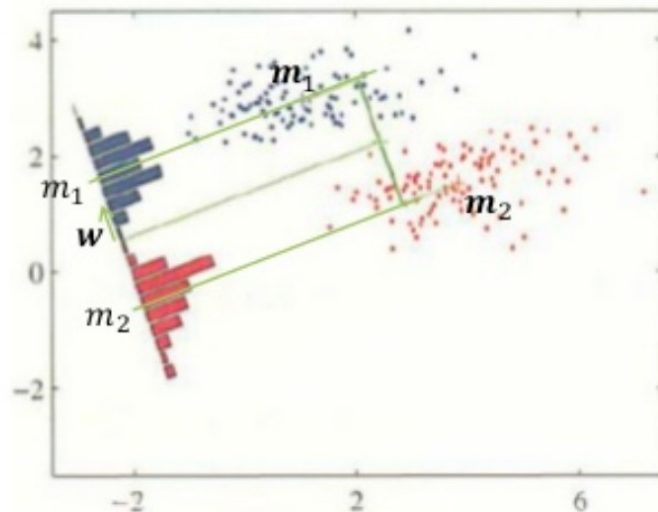
注: a.u. = arbitrary units

線形判別分析 (Linear Discriminant Analysis, LDA)

各クラスの平均から最大の距離の線とすると
重なり合う部分が多く残ってしまう。



- ・各クラスの平均の差が最大
(各クラスがなるべく離れる) かつ
- ・クラス内の分散が最小
(各クラスのデータが密集)
になるwに射影。



データを線形変換した射影wを求めて、境界線を求める

$|2\rangle$ の状態を作る

2つの方法がある：

方法 1) $|0\rangle$ 状態に高い電圧をかけながら、周波数スイープをすると

$|1\rangle$ と $|2\rangle$ の2つのピークが観測される。

→ ibmq_armonk の最大駆動電力では、この遷移を起こせない。

方法 2) $|0\rangle$ 状態に $0 \rightarrow 1$ π パルスを適用して $|1\rangle$ 状態を作る。

$|1\rangle$ 状態に周波数スイープを実行すると、

$0 \rightarrow 1$ 周波数より低いところで、 $1 \rightarrow 2$ 周波数に対応した単一ピークが観測される。

$|2\rangle$ の状態を作る

2つの方法がある：

方法 1) $|0\rangle$ 状態に高い電圧をかけながら、周波数スイープをすると

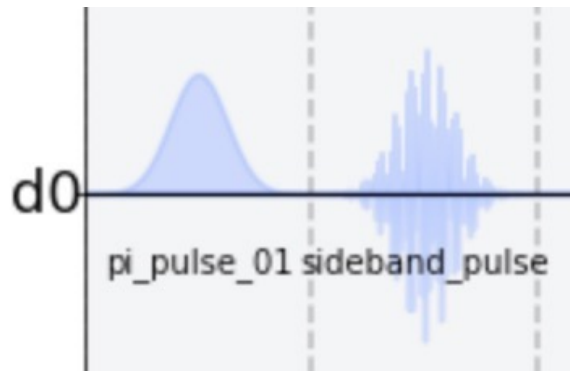
$|1\rangle$ と $|2\rangle$ の2つのピークが観測される。

→ ibmq_armonk の最大駆動電力では、この遷移を起こせない。

方法 2) $|0\rangle$ 状態に $0 \rightarrow 1$ π パルスを適用して $|1\rangle$ 状態を作る。

$|1\rangle$ 状態に周波数スイープを実行すると、

$0 \rightarrow 1$ 周波数より低いところで、 $1 \rightarrow 2$ 周波数に対応した単一ピークが観測される。

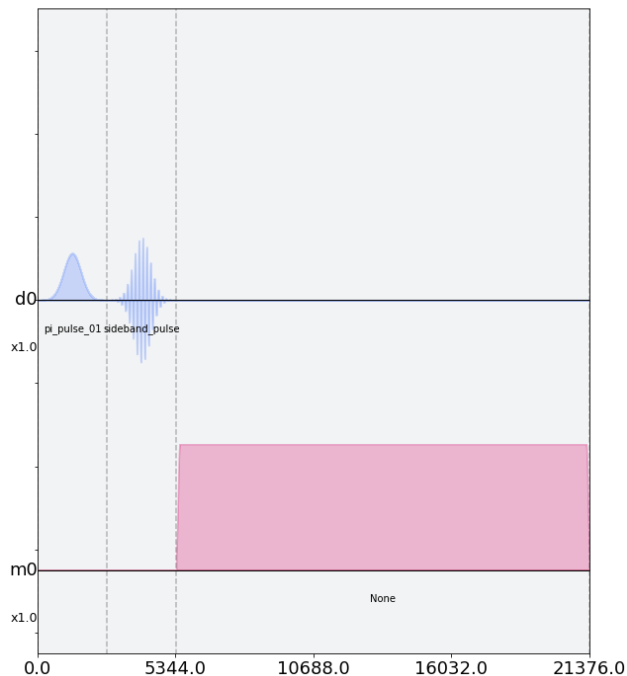


一度、 $0 \rightarrow 1$ π パルスで $|1\rangle$ を作った後、
同じスケジュール内でその周波数の前後にスイープさせたい
ので、上からサイン波をかけた波に変形（サイドバンド方式）

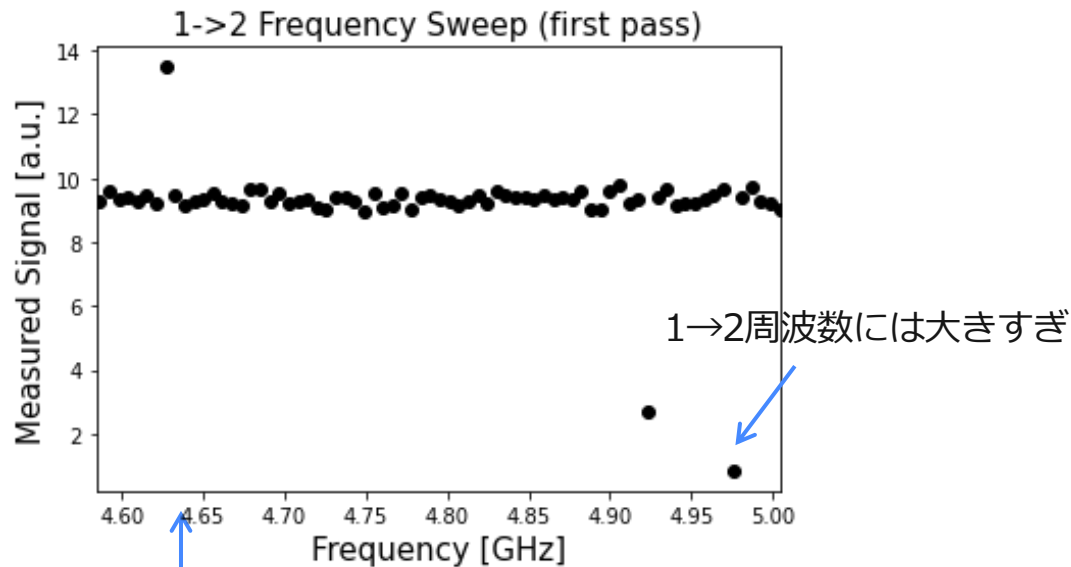
$|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ のパルス : 4.9745319 GHz
の前後 400MHz下から30MHz上までをスイープ

スケジュール

Frequency = 5004531941.726498



結果



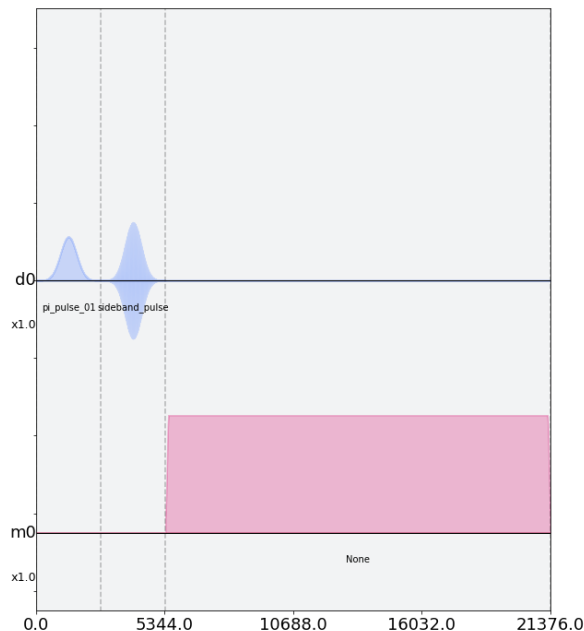
$|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ のパルスの周波数に対応

Freq. dips: [4.62682924e+09]

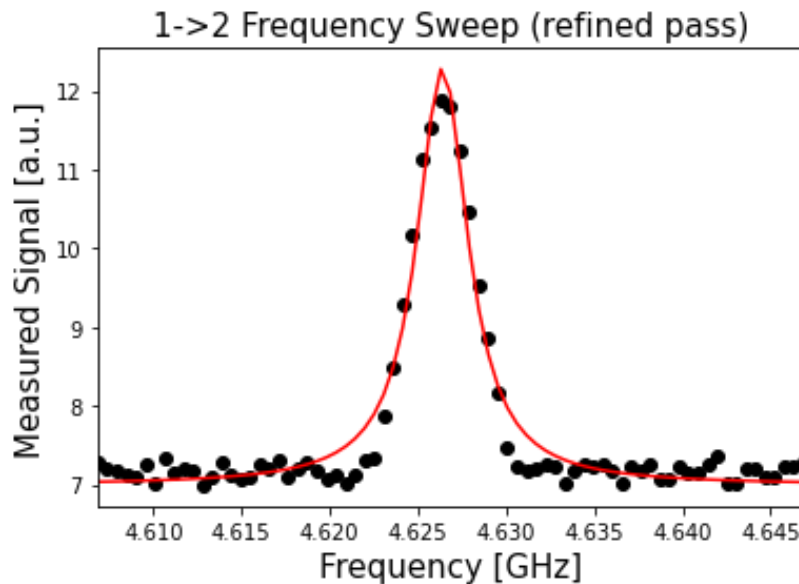
だいたい求めた周波数（4.6268GHz近辺）でより狭い範囲でスイープ
（上下20MHzずつ）

スケジュール

Frequency = 4646829239.023795



$|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ のパルスの周波数が求まる！



結果をフィッティング（ローレンツ分布）

Our updated estimate for the 1- \rightarrow 2 transition frequency is 4.6263859 GHz.

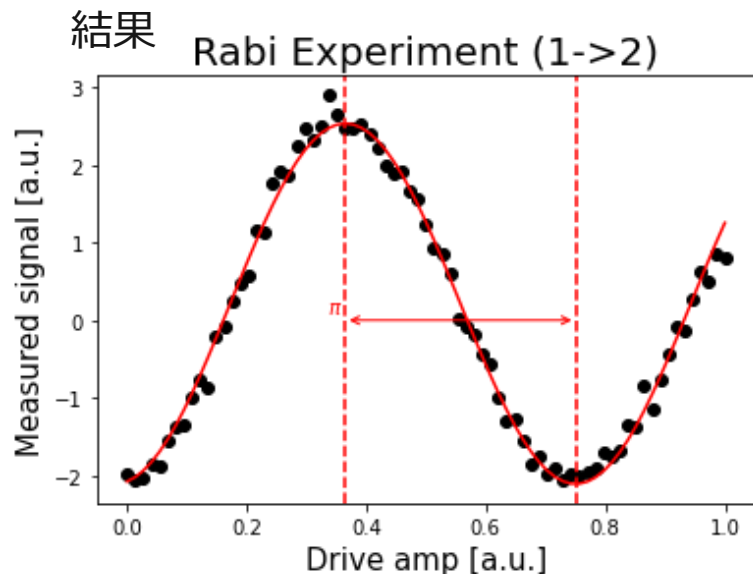
$|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ のラビ実験 (π パルスを校正)

共鳴周波数の実験と同じように、

$|0\rangle$ 状態に $0 \rightarrow 1$ π パルスを適用して $|1\rangle$ 状態を作った後、

$|1\rangle$ 状態に今、求めた $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ 励起のパルスの振幅をスイープして、 π パルスの振幅を求める。

$0 \rightarrow 1$ π パルスの後に $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ 励起パルスにサイン波をかけるサイドバンド方式。



Pi Amplitude (1- \rightarrow 2) = 0.3650972609718836

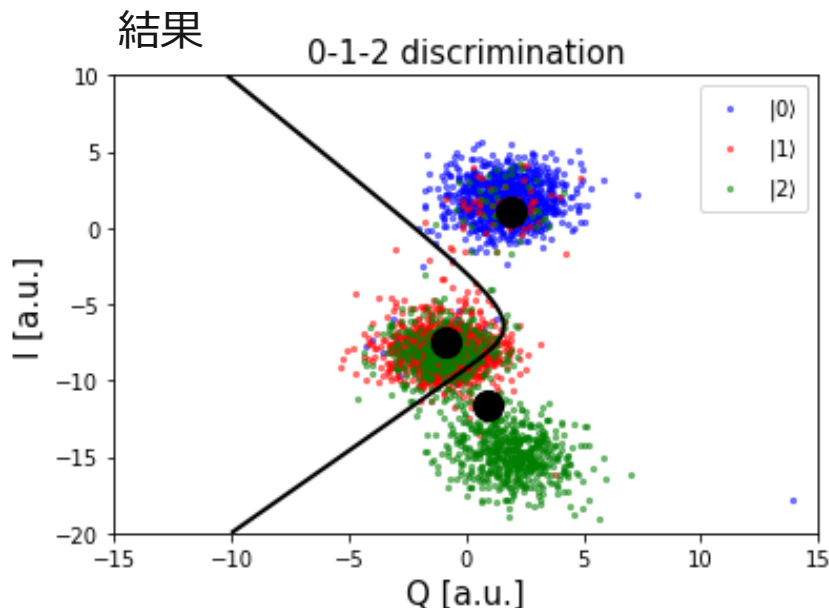
次 :

$|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ のパルス、 $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ のパルス
ともに校正ができたので、識別器を作る。

$|0\rangle$ と $|1\rangle$ と $|2\rangle$ の識別器を作る

1. 各状態を作って測定：
 - $|0\rangle$ 状態を直接測定。
 - $0 \rightarrow 1$ π パルスを適用し、 $|1\rangle$ を作って測定。
 - 上記後に、 $1 \rightarrow 2$ π パルスを適用し、 $|2\rangle$ を作って測定。
2. 測定データを実部と虚部に分けて、プロット。（平均は大きなドット）
3. 線形判別分析でグループを分ける線を求める。

Qiskit ignisにdiscriminator 機能が追加されているので
今後はそれを使えるはず。



まとめ

量子ボリューム (QV)

そのデバイスでランダムな回路を正常に計算できる最大のWidthまたはDepth。

Qiskit Pulseで量子ビットをキャリブレーション

自分の π パルス (Xゲート) が作れ、コヒーレントタイムの測定も行える。

さらに高エネルギー状態 $|2\rangle$ も実現

$|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ の識別器の作り方を学んだ。