

# 0と1を超える世界：量子コンピュータ入門

副題：量子をつかむっ！！

## 第三回 「現実の量子コンピュータ」



大野木哲也

大阪大学大学院理学研究科

講義プラン

- |          |                     |
|----------|---------------------|
| 5月25日（月） | 第一回「なぜ量子コンピュータか？」   |
| 6月29日（月） | 第二回「量子計算はどう動いているのか」 |
| 7月27日（月） | 第三回「現実の量子コンピュータ」    |

# はじめに

前回の内容：

- 計算の基礎の「量子回路」と「量子アルゴリズム」について解説。

今回の内容：

- 量子コンピュータの実例について学ぶ。

# 第三回 目次

1. 現実の量子コンピュータの原理
2. 現実の量子コンピュータの種類
3. 実機の例
4. 問題点
5. まとめ、参考図書など

# 1. 現実の量子コンピュータの原理

量子的自由度は何か？

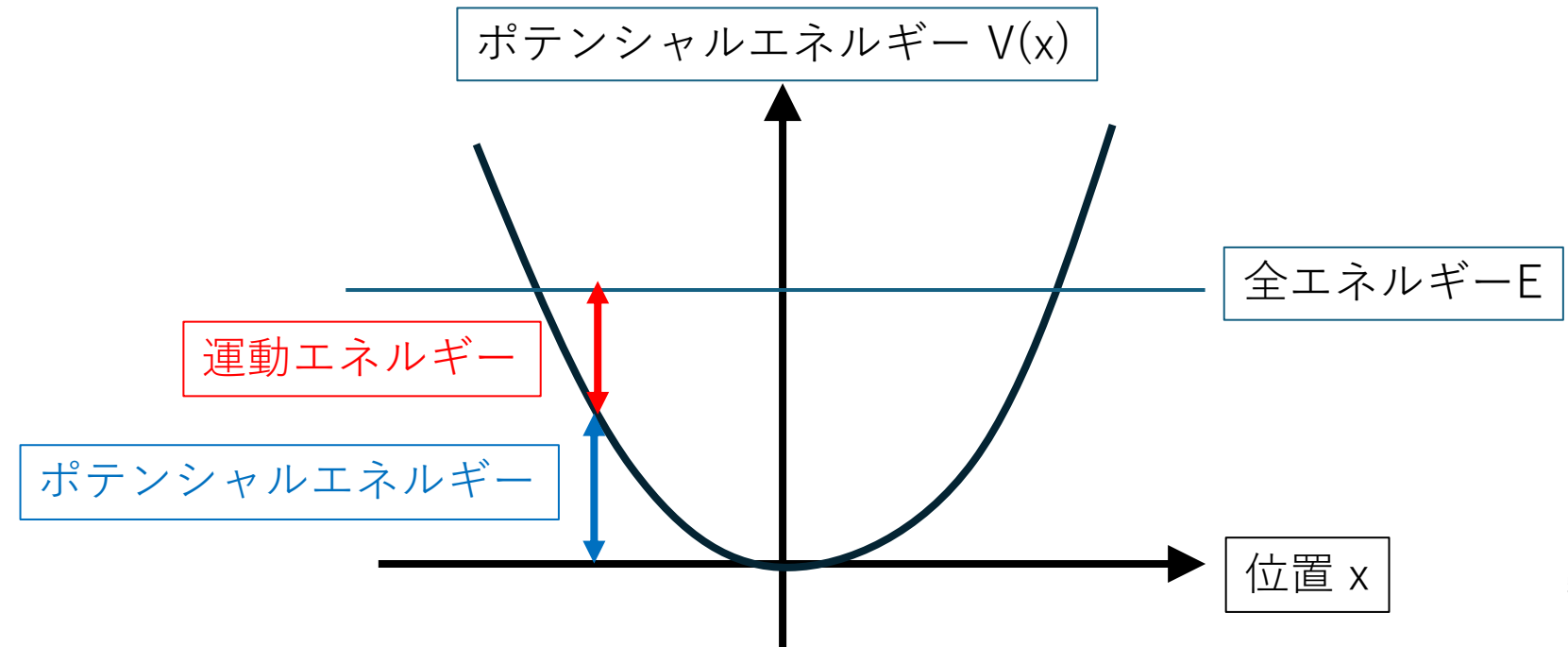
1. 電子または電子対のコヒーレント（集団励起）モード
2. 光子または光子のコヒーレント（集団励起）モード

## 電子または電子対を量子的自由度に用いる場合

力学においては、

$$[\text{全エネルギー}] = [\text{運動エネルギー}] + [\text{ポテンシャルエネルギー}]$$

は保存する。



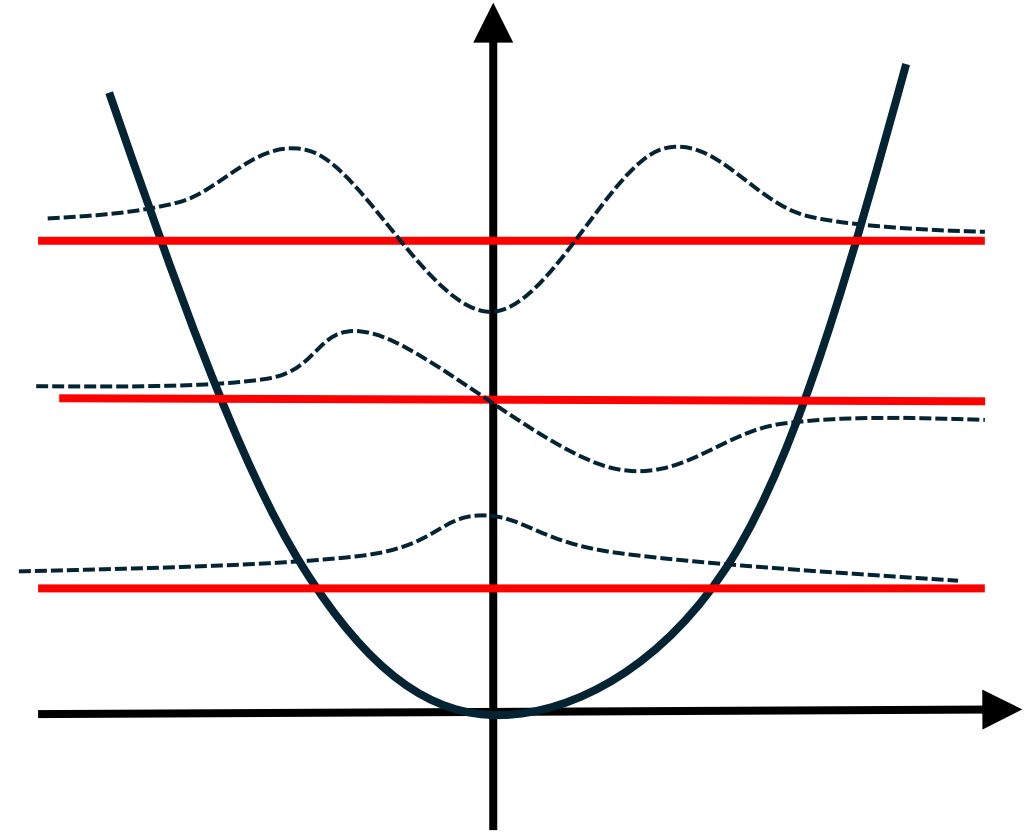
## 1. 現実の量子コンピュータの原理

量子力学では、物体（電子や電子対）は粒でもあり波でもある。

運動量  $\propto$  波の波長の逆数

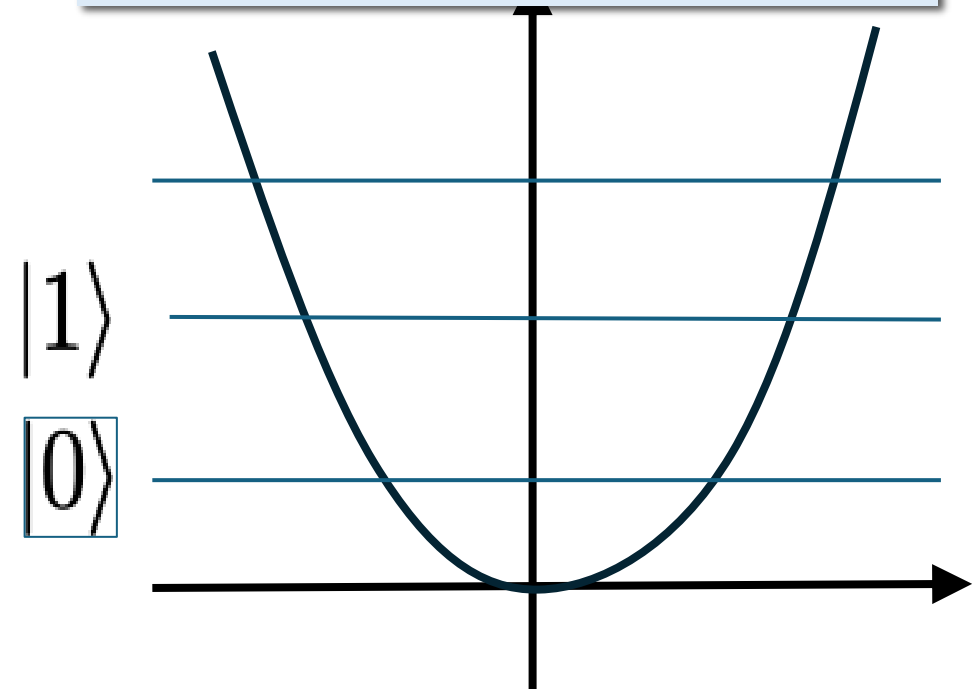
エネルギーが大きいほど波の波長は短くなる。  
（たくさん振動する。）

ギターの弦の振動や笛の中の空気の波の振動と同じように、波は両端の境界条件を決めたら、それに応じて何回空間的に振動するかの違いしか許されないの、その振動回数に応じた「固有振動」のみが許される。



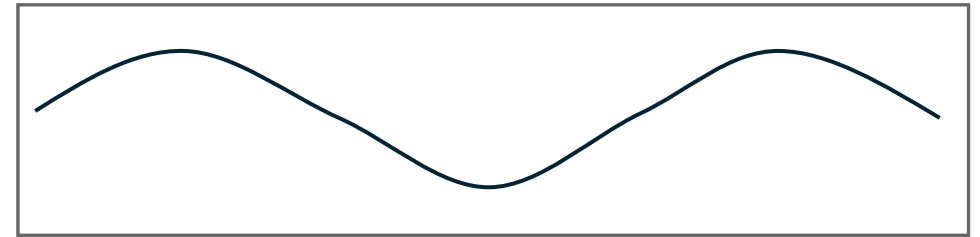
## 1. 現実の量子コンピュータの原理

- 許されるエネルギーは、飛び飛びになる。  
(古典力学との大きな違い)
- エネルギー固有状態のうちのある2つの状態を選んで量子ビットとして用いる。
- どのような「閉じ込められた量子力学系」を考えても良いので、そのチョイスに応じて、いろんな量子コンピュータが作れる。
- ただし、安定性、操作性、拡張性などが重要。



# 光（電磁場）を量子化する：モードと光子

- ・ 共振器に電磁場を閉じ込めると、決まった振動数  $\omega$  の「モード」だけが許される。
- ・ モードのエネルギーは  $E_n = (n + 1/2)\hbar\omega$  と等間隔に量子化され、量子数  $n$  が「光子の数」に対応する。



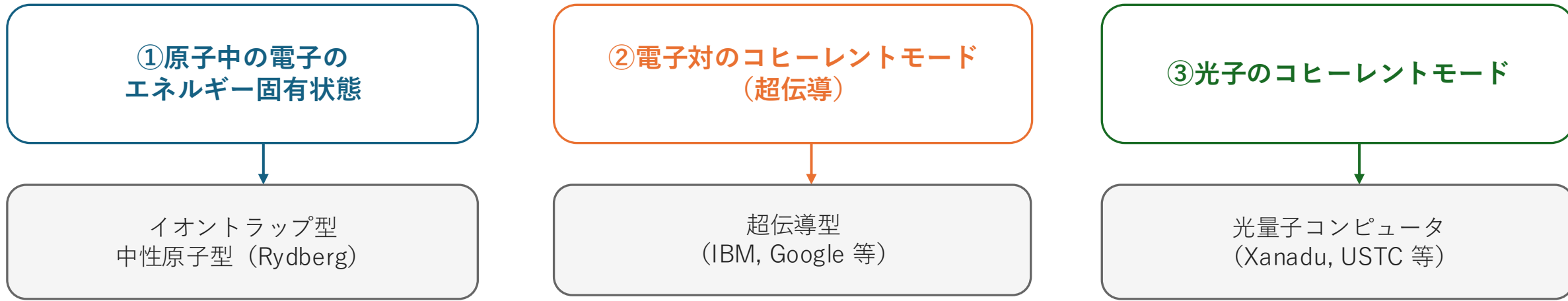
共振器内の定在波（モード）



# 量子コンピュータが使う3つの自由度

## 1. 現実の量子コンピュータの原理

「量子力学系」として何を選ぶかによって、量子ビットの正体は大きく3種類に分けられる。



- ①・②は「2つの準位を選んで $|0\rangle, |1\rangle$ とし、共鳴する電磁波でラビ遷移を起こして操作する」という考え方が共通。
- 一方③は準位遷移ではなく、光の重ね合わせ・干渉（ビームスプリッターや位相シフター）でモード間の変換を行うため、しくみが異なる。

# 3つの自由度の比較：具体例・利点・欠点

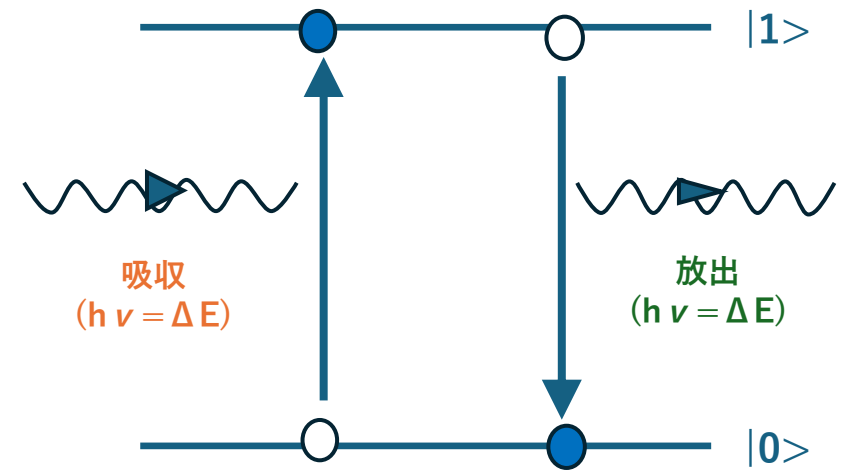
## 1. 現実の量子コンピュータの原理

| 自由度                    | 具体例                                    | 利点                                           | 欠点                                                                        |
|------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| ①原子の電子準位<br>(イオン/中性原子) | IonQ,<br>Quantinuum<br>QuEra, Pasqal   | 原子は完全に均一。コヒーレンス時間が長い（秒～分）。中性原子は結合トポロジを再構成可能。 | レーザーで1個ずつ制御するためゲート速度が遅い（ $\mu\text{s}$ ～ $\text{ms}$ ）。大規模化で光学系が複雑に。      |
| ②電子のコヒーレントモード<br>(超伝導) | IBM Heron<br>Google<br>Sycamore/WilLOW | 半導体プロセスが応用でき集積・量産しやすい。ゲートが高速（ $\text{ns}$ ）。 | 希釈冷凍機で $10\sim 20\text{mK}$ まで冷却が必須。コヒーレンス時間が短い（ $\sim 100\mu\text{s}$ ）。 |
| ③光子のコヒーレントモード          | Xanadu<br>Borealis/Aurora<br>USTC 九章   | 室温・大気中で動作。光ファイバーで伝送しやすくネットワーク向き。             | 光子同士がほぼ相互作用せず2量子ビットゲートが確率的。光子損失が誤りの主因。                                    |

# 電子系の制御原理：光の吸収・放出

## 1. 現実の量子コンピュータの原理

- ・ 光子のエネルギー  $h\nu$  が準位差  $\Delta E$  に一致する（共鳴する）とき、量子ビットは  $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$  を行き来する（吸収・放出）。
- ・ この「共鳴で準位を行き来させる」しくみが、超伝導・イオントラップの制御に共通する原理。

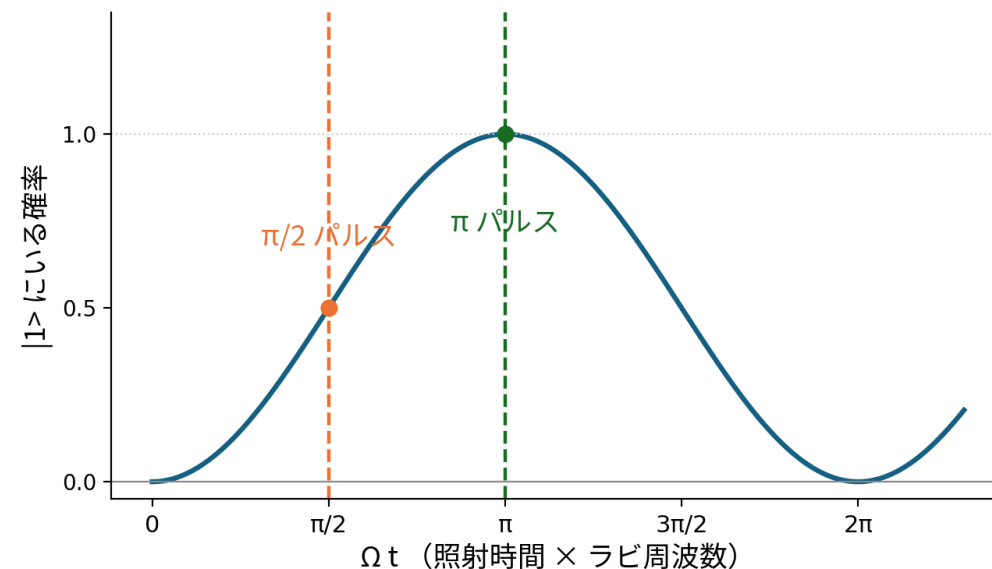


共鳴のときだけ効率よく遷移する

# ラビ振動・ラビ遷移とは

## 1. 現実の量子コンピュータの原理

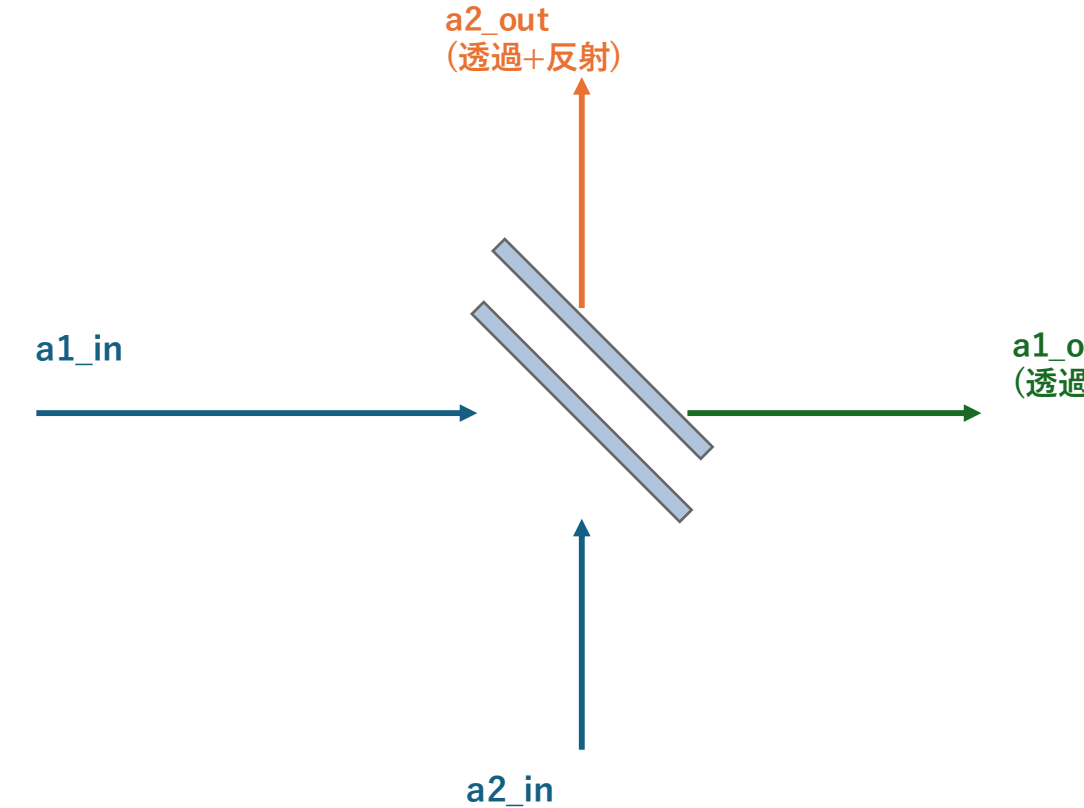
- ・ 共鳴した電磁波を当て続けると、量子ビットは $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の間を周期的に振動する（ラビ振動）。
- ・ 照射時間を選べば狙った状態が作れる： $\pi$ パルスで完全反転、 $\pi/2$ パルスで等しい重ね合わせ。



# 光子系の制御原理：ビームスプリッター

- ・ 半透明の鏡で光を反射・透過に分ける。量的には「反射した」「透過した」の重ね合わせになる（量子干渉）。
- ・ 位相シフター（1つのモードに位相を足す素子）と組み合わせると、任意のユニタリ変換を作れる。

## 1. 現実の量子コンピュータの原理



斜めの半透明鏡（BS）  
反射光にだけ位相  $i$  が付く（標準的な取り方の一例）

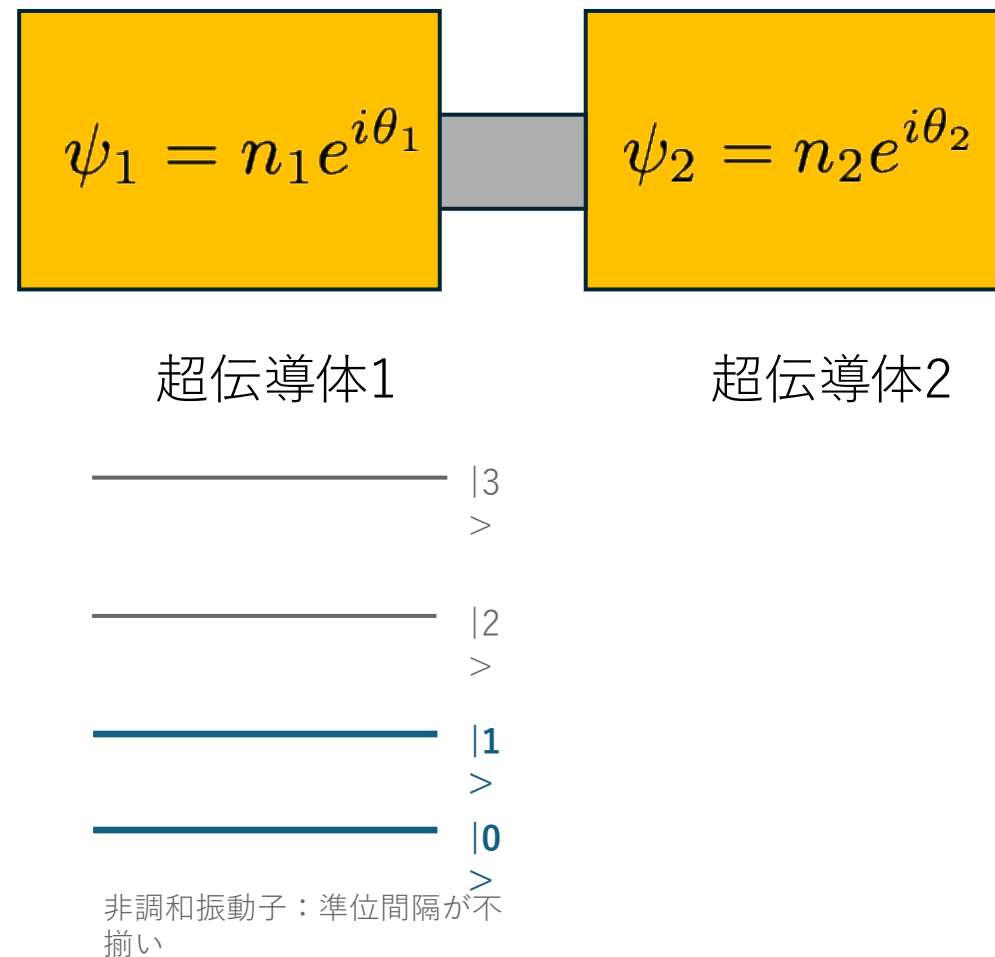
## 2. 現実の量子コンピュータの種類

1. 超伝導量子コンピュータ
2. イオントラップ型
3. 中性原子型
4. 光量子コンピュータ

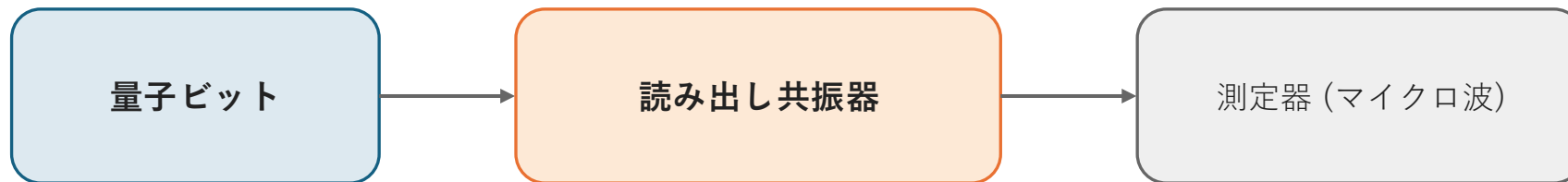
# 超伝導型：原理

- ・ 超伝導体はクーパー対が集団で1つの波動関数として振る舞う（巨視的コヒーレンス）。
- ・ ジョセフソン接合（非線形なインダクタ）にコンデンサーをつなぐと、非調和なLC振動回路ができる。
- ・ 非調和性のおかげで、最も低い2つの準位だけを  $|0\rangle, |1\rangle$  として選び出せる。

## 2. 現実の量子コンピュータの種類



- ・ GHz帯の共鳴マイクロ波パルスで  $|0\rangle \Leftrightarrow |1\rangle$  を操作する（ラビ遷移）。
- ・ 読み出し共振器の共鳴周波数のわずかなシフトを利用し、量子ビットを壊さずに測定する（分散読み出し）。
- ・ 動作には希釈冷凍機で10～20mKまでの冷却が必要。

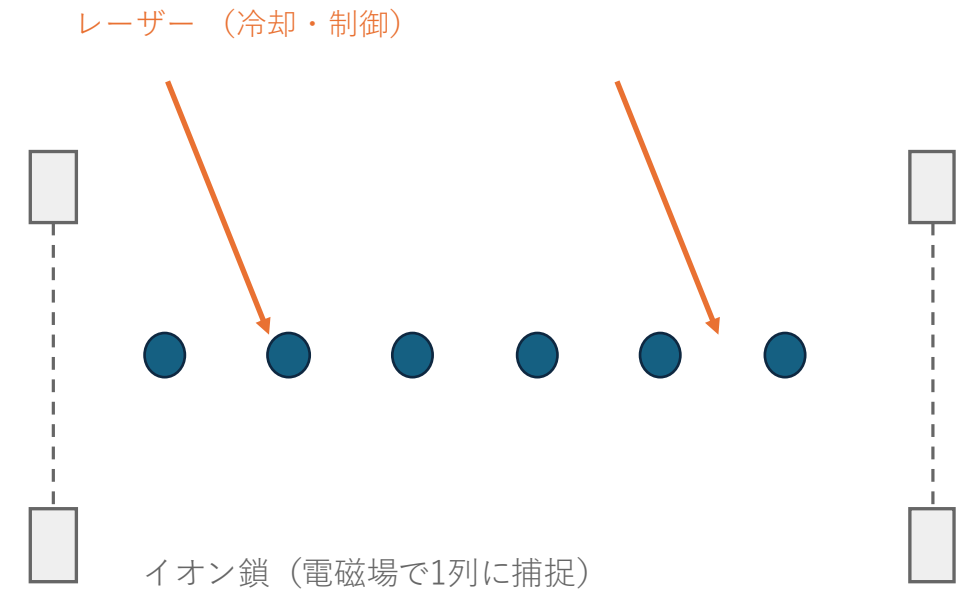




# イオントラップ型：原理と制御

- ・ 電磁場（パウルトラップ）でイオンを真空中に並べ、内部の2つのエネルギー準位を  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$  とする。
- ・ 共鳴レーザーでラビ振動を起こして操作し、蛍光の明暗で状態を測定する。
- ・ ゲート速度は遅い（ $\mu\text{s}\sim\text{ms}$ ）が、世界最高水準の精度（99.9%超）を達成。

## 2. 現実の量子コンピュータの種類

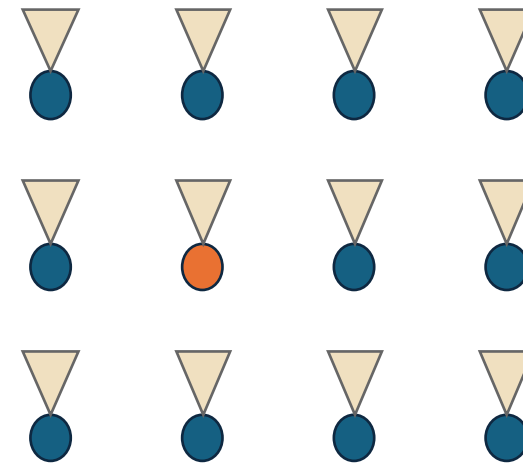


# 中性原子型：原理とゲート

- ・ 光ピンセットで中性原子を並べ、基底状態と Rydberg 状態を  $|0\rangle, |1\rangle$  とする。
- ・ Rydberg 遮蔽を利用して 2 量子ビットゲートを実現する。
- ・ 原子の配置をソフト的に再構成できるのが強み。近年、物理量子ビット数の伸びが著しい。

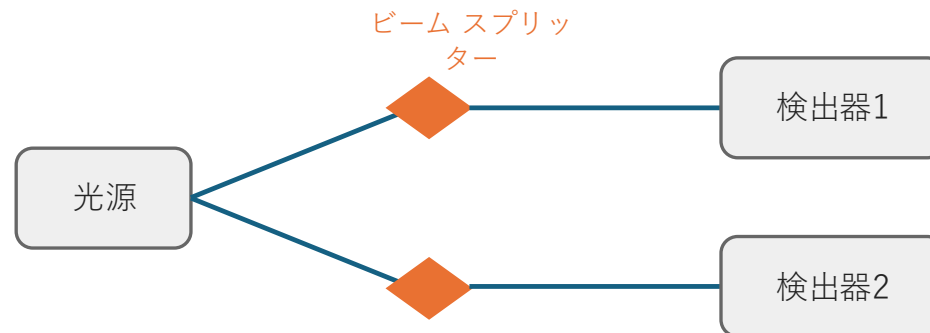
## 2. 現実の量子コンピュータの種類

### レーザー光ピンセット



光ピンセットで並べた中性原子（オレンジ＝Rydberg励起）

- ・ 光子の偏光・経路を量子ビットとして使う。室温で動作し、光ファイバーで運べる。
- ・ ビームスプリッターと位相シフターでユニタリ変換、単一光子検出器で測定する。
- ・ 2量子ビットゲートは確率的（測定誘起型）。現状はボソンサンプリングで優位性を実証する段階。



光子 = 量子ビット（偏光 or 経路）

### 3. 実機の例

1. 超伝導量子コンピュータ
2. イオントラップ型
3. 中性原子型
4. 光量子コンピュータ

# 実機の例：海外の量子コンピュータ

## 3. 実機の例

### 超伝導型：IBM Quantum System Two

156量子ビット（Heron r2, 2024）。世界中にクラウド提供。

### イオントラップ型：Quantinuum H2/Helios

56～98量子ビット。ゲート精度99.9%超で世界最高水準。

### 中性原子型：QuEra Aquila

256原子。2026年に論理量子ビットでの誤り訂正を実証。

### 光量子型：Xanadu Borealis/Aurora

216スクイーズド光モード。世界初のクラウド公開型光量子機。



#### 大阪大学QIQB「純国産」量子コンピュータ

開発：大阪大学 量子情報・量子生命研究センター(QIQB)、理研、QuEL、アルバック / 量子ビット数：稼働時の初号機、2026年に144量子ビットを予定

量子チップ（理研提供）・制御装置（QuEL製）・希釈冷凍機（アルバック・クライオ製）・量子クラウドソフトまで主要部品を全て国内で開発した初の「純国産」機。2025年7月28日稼働開始、大阪・関西万博でも一般公開。

出典：大阪大学QIQB, [qiqb.osaka-u.ac.jp](http://qiqb.osaka-u.ac.jp)



#### 理研・富士通 超伝導量子コンピュータ

開発：理化学研究所・富士通（理研RQC-富士通連携センター） / 量子ビット数：256（2025年4月、外部提供機として世界最大級）、2026年度に1,000量子ビットが目標

2023年公開の国産初号機64量子ビットを高密度実装技術で拡張。「Fujitsu Hybrid Quantum Computing Platform」を通じて企業・研究機関に提供中。将来的に数万量子ビット規模を目指す。

出典：理化学研究所・富士通プレスリリース(2025年4月22日), [riken.jp](http://riken.jp)

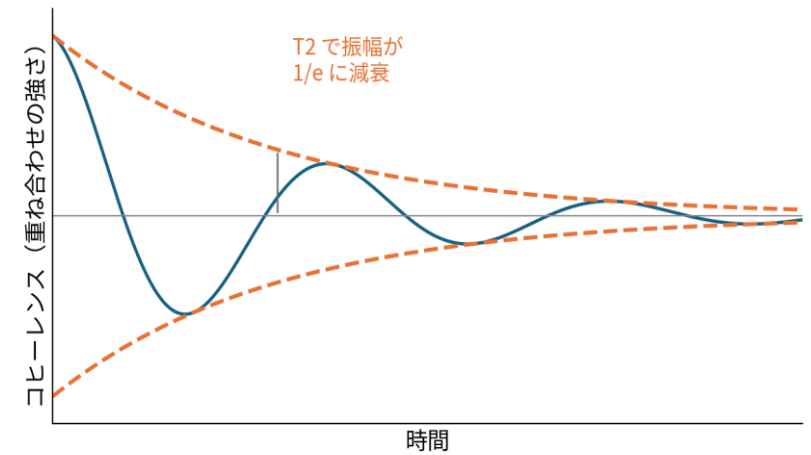
# 4方式の比較（まとめ）

| 方式       | 代表的な量子ビット数        | 動作環境              | 利点                                    | 課題                                       |
|----------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|
| 超伝導型     | 100～150+（物理量子ビット） | 希釈冷凍機で 10～20 mK   | 半導体プロセスが応用でき集積・量産しやすい。ゲートが高速（ns）。     | コヒーレンス時間が短い（～100 $\mu$ s）。大規模な配線・冷却系が必要。 |
| イオントラップ型 | 数十～約100           | 真空チェンバー＋レーザー冷却    | ゲート精度が最高水準。コヒーレンス時間が長い（秒～分）。原子は完全に均一。 | ゲート速度が遅い（ $\mu$ s～ms）。多数イオンの制御・配線が複雑。    |
| 光量子型     | 数百モード             | 室温動作（検出器のみ低温）     | 室温で動作し、光ファイバーで接続・伝送しやすくネットワーク向き。      | 2量子ビットゲートが確率的。光子損失。汎用計算には大規模な資源が必要。      |
| 中性原子型    | 数百～1000+（急速に増加中）  | 室温設置可能（真空チェンバーのみ） | 配置をソフト的に再構成可能。原子は均一。近年スケーリングが最速。      | Rydberg状態が不安定でゲート忠実度がイオンよりやや低い。          |

# デコヒーレンスとノイズの問題

- ・ デコヒーレンス：周囲との相互作用で重ね合わせの情報が失われる現象。 $T_1$ ・ $T_2$ という時間スケールで特徴づけられる。
- ・ 対策：極低温化などのハード的対策と、複数の物理量子ビットで1つの「論理量子ビット」を作る量子誤り訂正を組み合わせる。
- ・ 現在の実機の多くは本格的な誤り訂正の手前の「NISQ」段階にある。

## 4. 問題点



重ね合わせの振幅が時間とともに減衰していくイメージ



## 5. まとめと参考文献

- ・ 量子力学的な「閉じ込められた系」の選び方で様々な実装方式の量子コンピュータができる。
- ・ 代表的な4方式（超伝導型・イオントラップ型・中性原子型・光量子型）は、量子ビットの正体・制御方法・測定方法・得意分野がそれぞれ大きく異なる。
- ・ 現状はどの方式も発展途上で、真の実用化には「デコヒーレンス」との闘い＝誤り訂正技術の確立が最大の課題。

- Quantum Native Dojo 中川裕也、曾師彦 講談社
- 量子光学と量子情報科学 古澤明、武田俊太郎 サイエンス社
- 量子力学ノート 佐藤文隆 サイエンス社