

量子コンピュータのしくみ

理学部物理学科 4年 関山実

もくじ

1. 量子コンピュータってなに？
2. どういう原理？
3. どうやって動かすの？
4. 今後どうなるの？

量子コンピュータってなに？

量子コンピュータとは

- ・量子力学×コンピュータ
 - ・最近流行っている
 - ・さまざまな応用が期待される
 - ・計算が高速でできる
- etc.....



理研の国産量子コンピュータ・叡

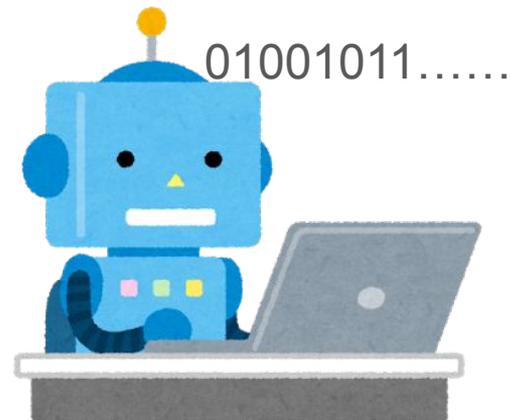
普通のパソコンと何が違うの？

- ・普通のパソコン

→0と1の数字の列(bit)を処理して計算

- ・量子コンピュータ

→”量子力学”的な情報(量子bit)を処理して計算



量子力学って何

量子bitとは

- ・量子力学的な性質を兼ね備えた”0”と”1”(量子bit)

- ・重ね合わせ状態

- このままでは”0”でも”1”でもない

- ・確率解釈

- “0”が出る確率50%

- “1”が出る確率50%

- 測定をするまで分からない

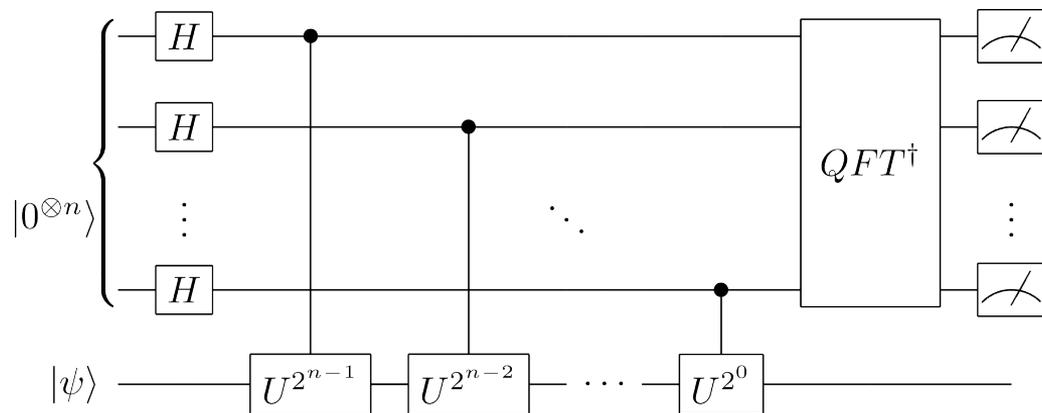
- ・量子もつれ(エンタングルメント)

$$\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

量子bitで何が嬉しいのか

- ・重ね合わせて**並列計算**ができる
- ・量子力学のシミュレーションを”**そのまま**”できる
- ・**素因数分解**などが高速

素因数分解に使われる
実際の量子回路



1章のまとめ

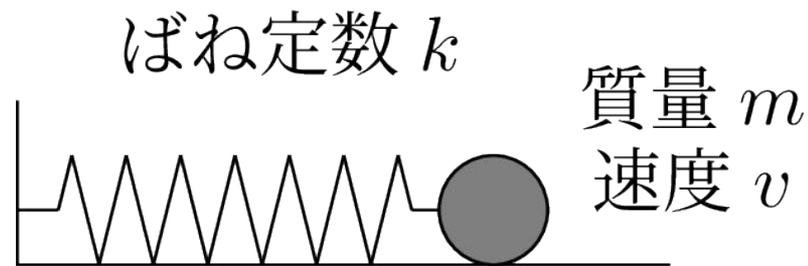
- ・量子力学的な情報(量子bit)を処理する
- ・高速な計算が期待されている

どういう原理？

量子力学入門

量子力学の前に.....

ばね



自然長からの変位 x

ばねの全体のエネルギー

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$$
$$= \frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega^2 x^2}{2}$$

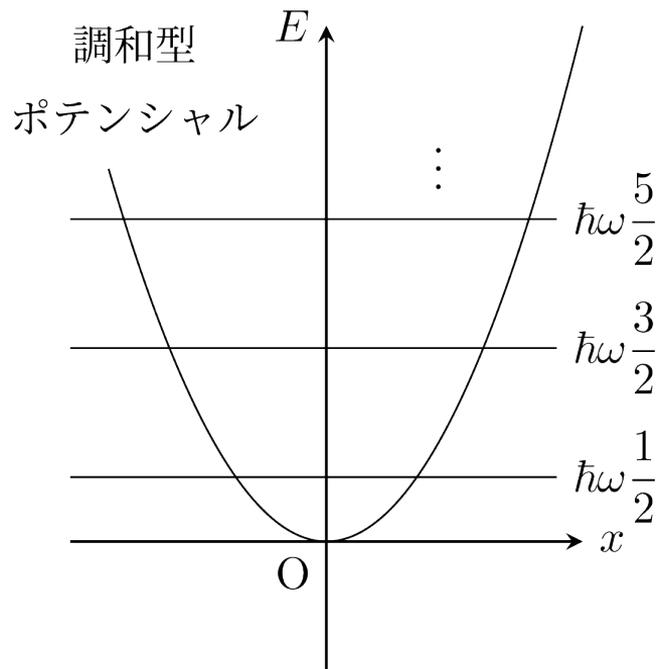
量子力学的なばね

このばねを、**正準量子化**する

$$[\hat{x}, \hat{p}] = \hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x} = i\hbar$$

$$\hat{E} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{m\omega^2 \hat{x}^2}{2}$$

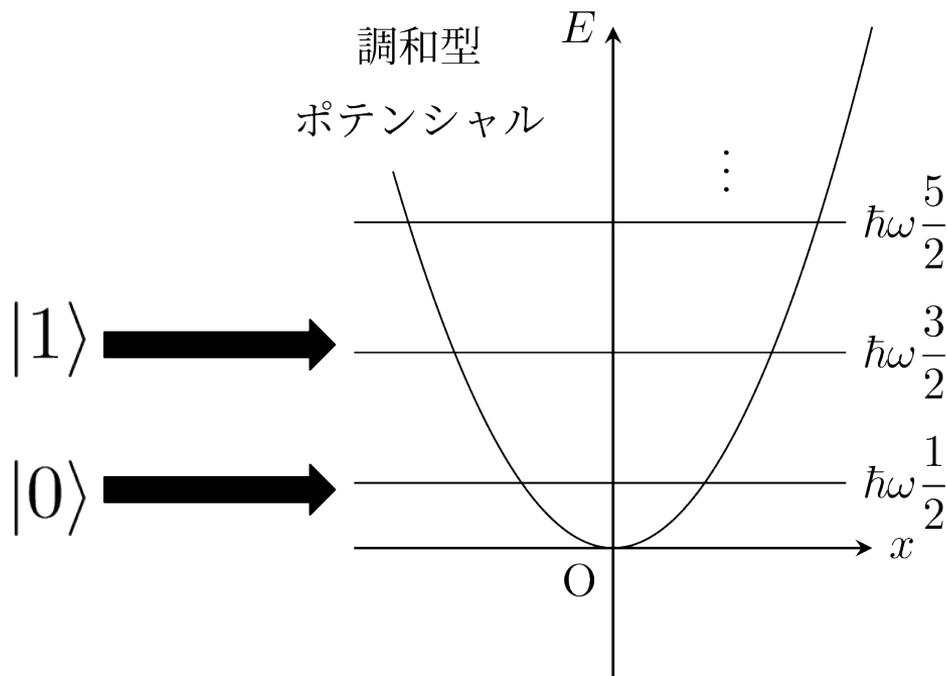
$$= \hbar\omega \left(\hat{N} + \frac{1}{2} \right)$$



離散準位

2つの準位に着目して
これをbitだと思おう

これらは量子力学の
性質をもつ量子bit



「ばね」をどう量子力学的に扱うか

いろいろな方法

・超伝導

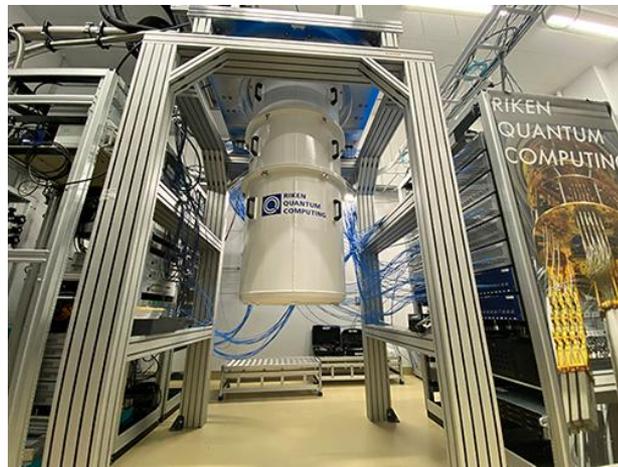
・光量子

・イオントラップ

etc.....

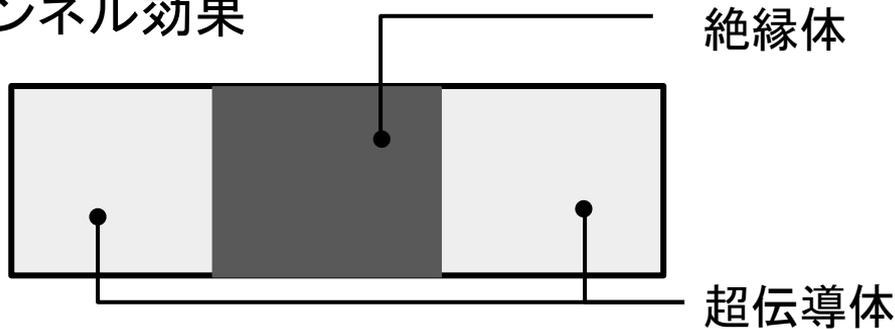


国産量子コンピュータも
この方式



ジョセフソン効果

超伝導のトンネル効果

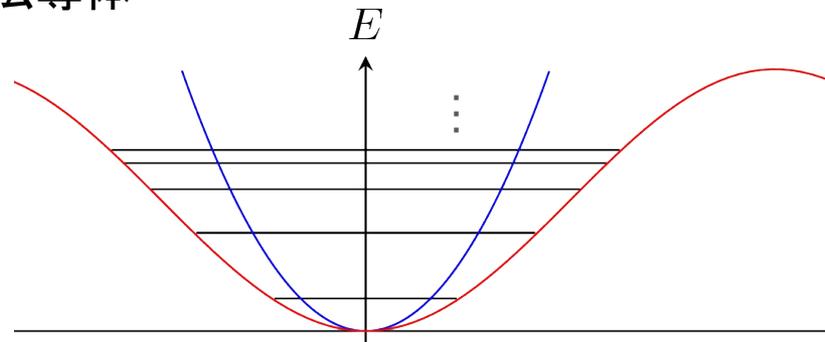


n : クーパー対密度
 θ : 位相差

$$\hat{E} = \frac{4e^2}{2C} \hat{n}^2 - E_J \cos \hat{\theta}$$

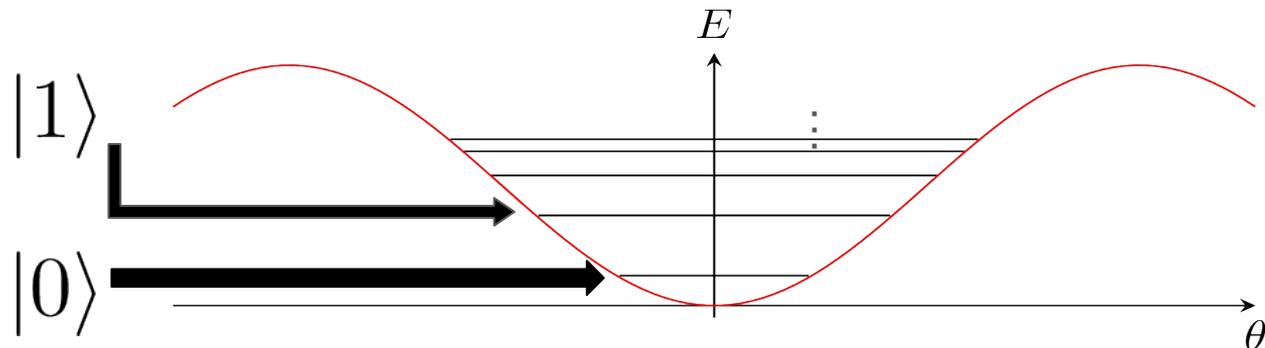
運動エネルギー

ポテンシャル



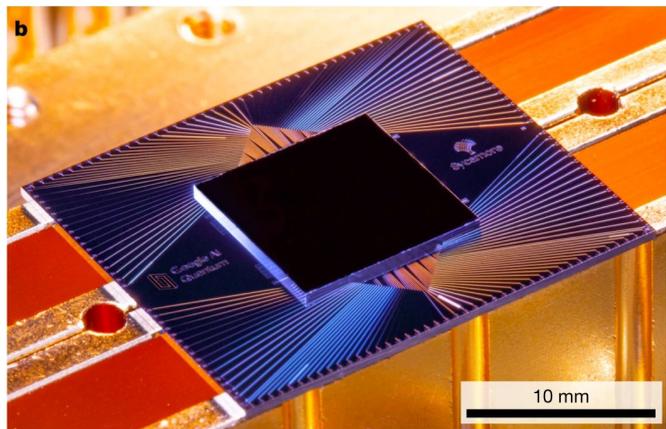
超伝導量子bit

これらを
量子bitに！



エネルギーの差が不均一なので
特定の準位にのみアクセス可能

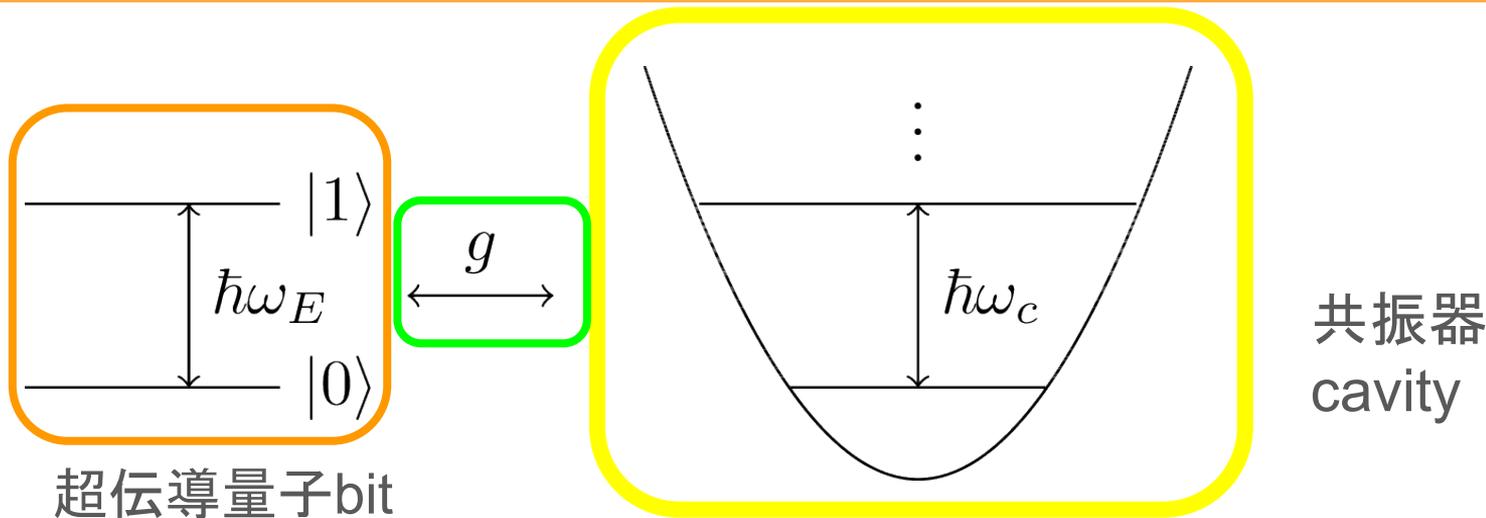
ただし、まだ操作できない



googleが開発した量子bit Sycamore

<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5>

光との結合



$$\hat{E} = \hbar\omega_E \sigma^\dagger \sigma + \hbar\omega_c a^\dagger a + \hbar g (\sigma^\dagger a + a^\dagger \sigma)$$

相互作用

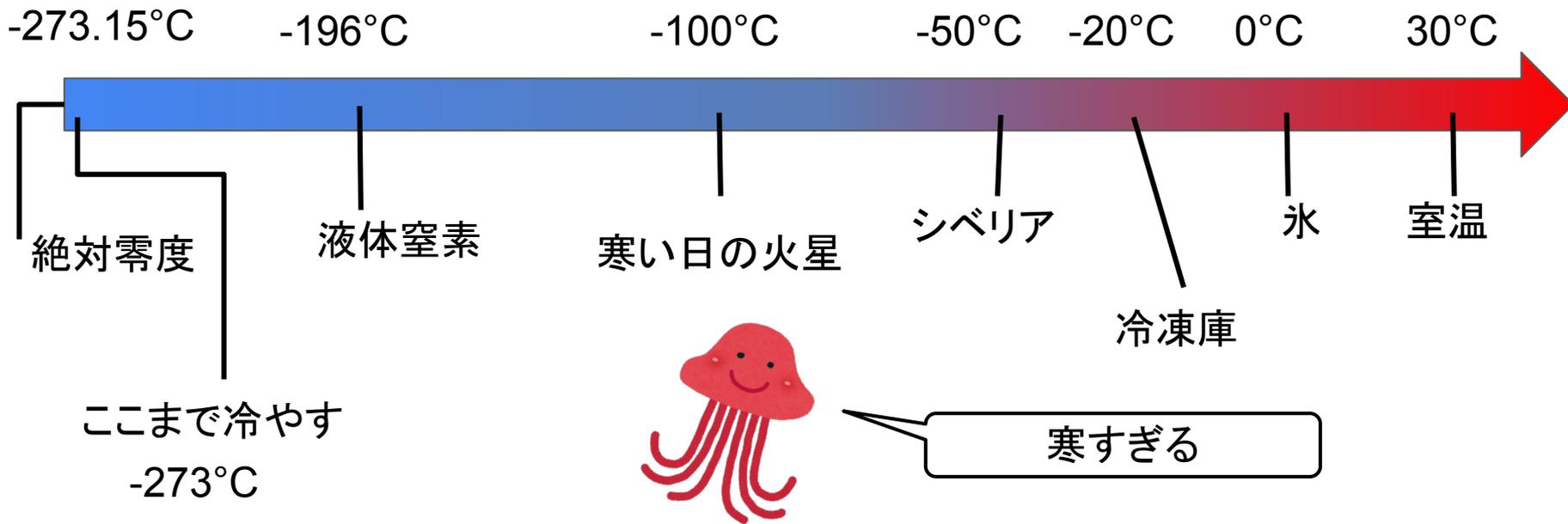
2章まとめ

- ・量子力学的なばねを用いる
- ・超伝導量子bit
- ・光と相互作用させる

どうやって動かすの？

超伝導を実現する

とにかく冷やす

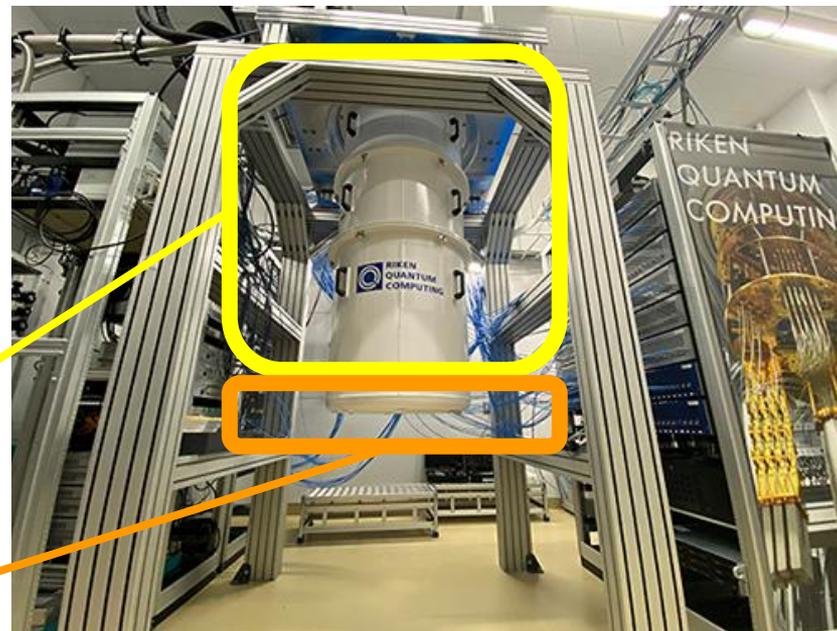


冷えるといいことがある

- ・超伝導が使える
- ・熱によるノイズが減る

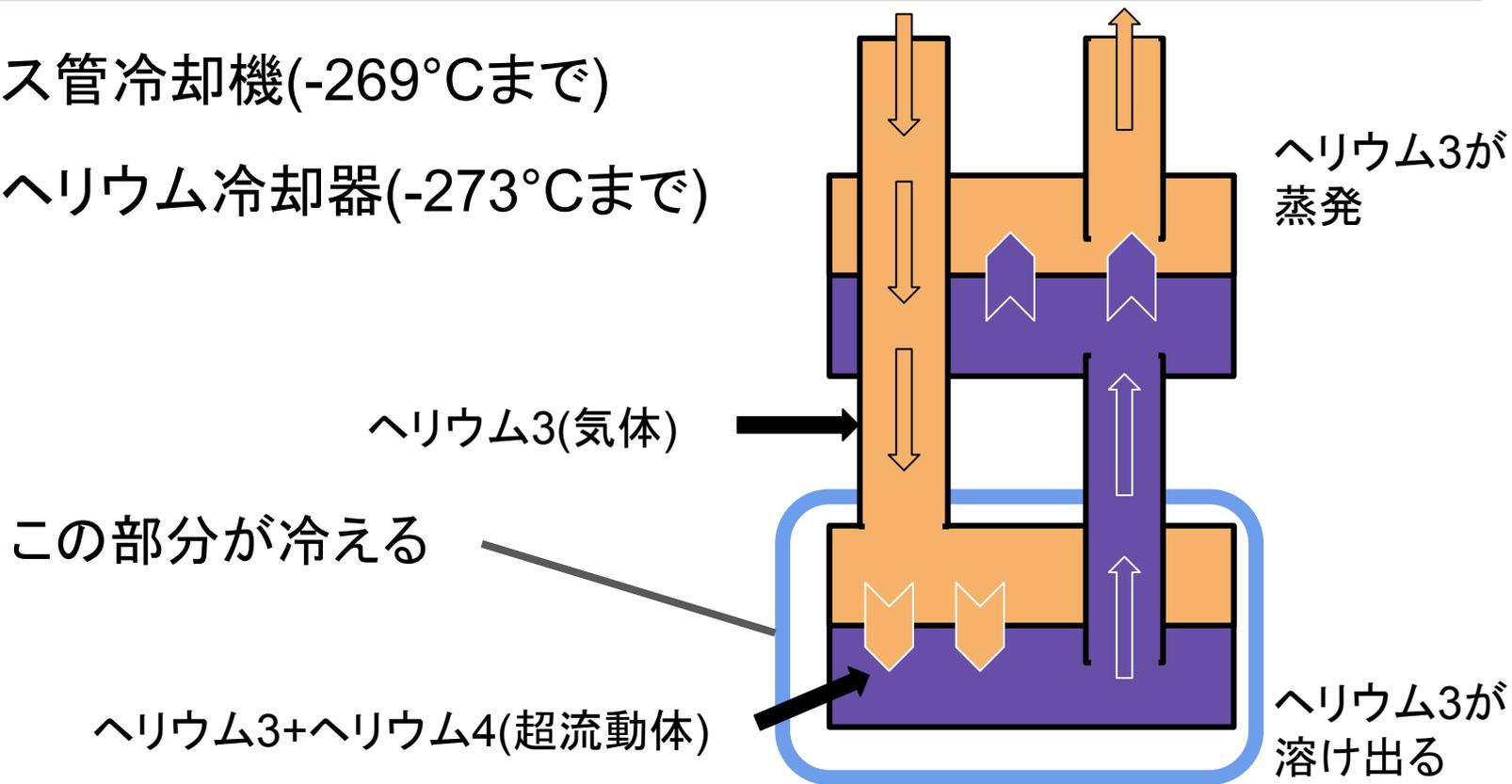
この写真の大部分は冷却器

量子bitのチップは底のほうの
一部だけ



冷却の物理

1. パルス管冷却機(-269°Cまで)
2. 液体ヘリウム冷却器(-273°Cまで)



どうやって操作するのか

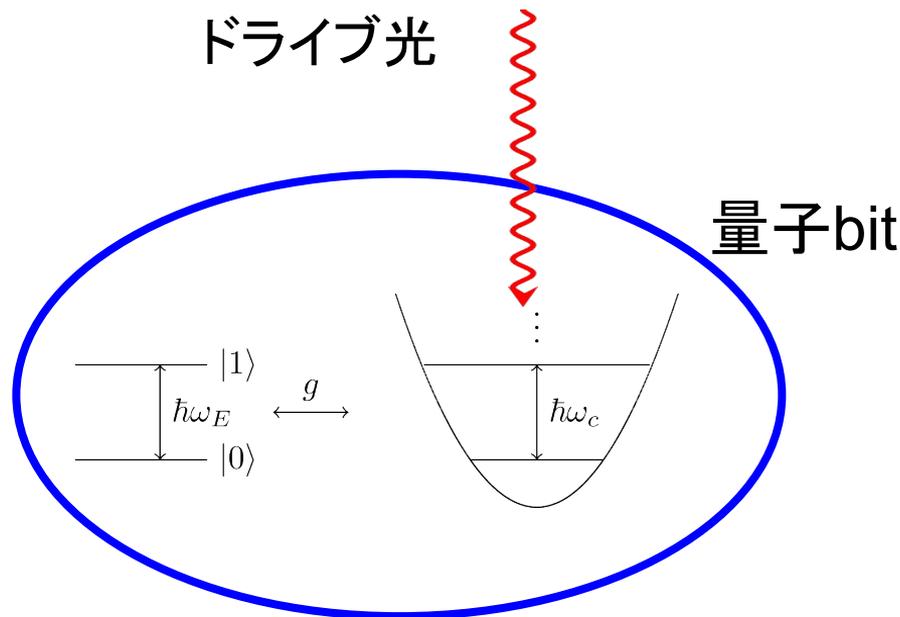
- ・光をあてる

→ 共鳴を起こす

- ・光の周波数

- ・照射時間

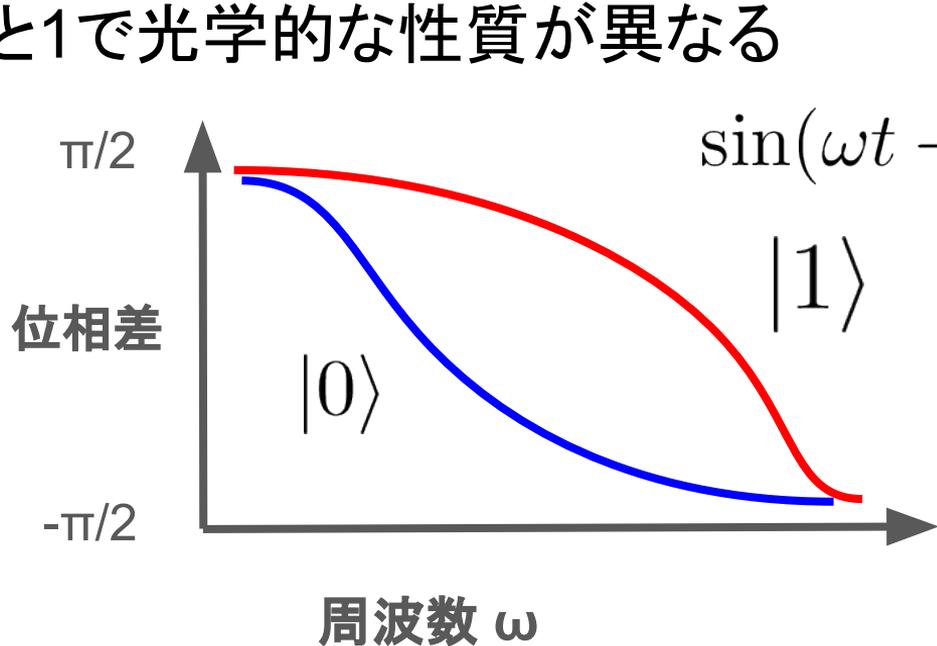
で量子bitを制御



どうやって測定するのか

・やっぱり光をあてる

0と1で光学的な性質が異なる



位相差

$$\sin(\omega t + \phi) = I \sin \omega t + Q \cos \omega t$$

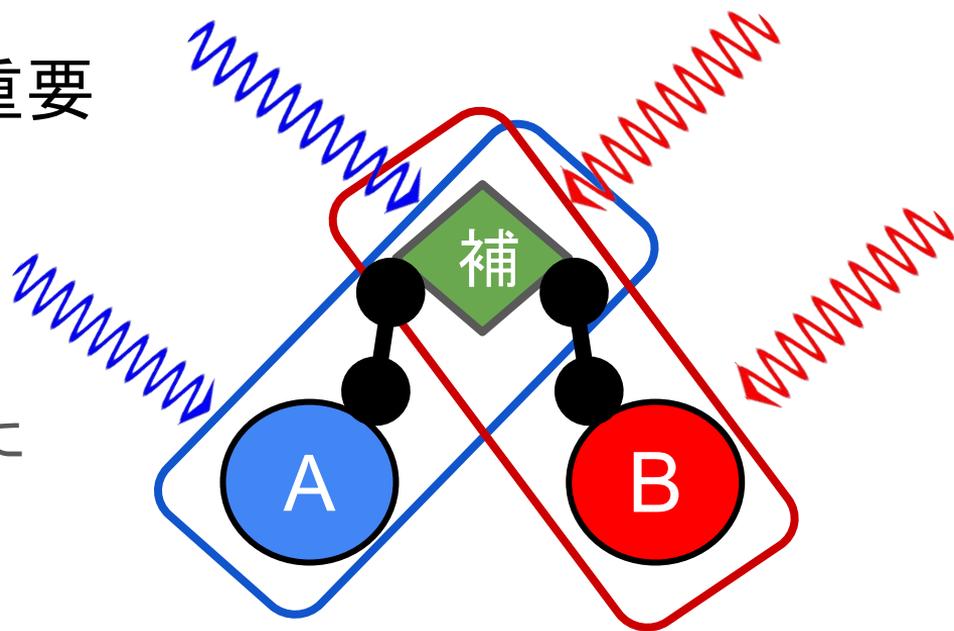
出てきた光と
元の光とを比べる

エンタングルメント

・やっぱりやっぱり光をあてる

光学的な制御が非常に重要

AとBをもつれさせるために
補助量子bitを使う



3章のまとめ

- ・とにかく冷やす
- ・とにかく光をあてる

今後どうなるの？

課題は山積み

- ・エラー訂正
- ・緩和時間
- ・量子通信
- ・そもそも古典コンピュータより

本当に”優れている”のか

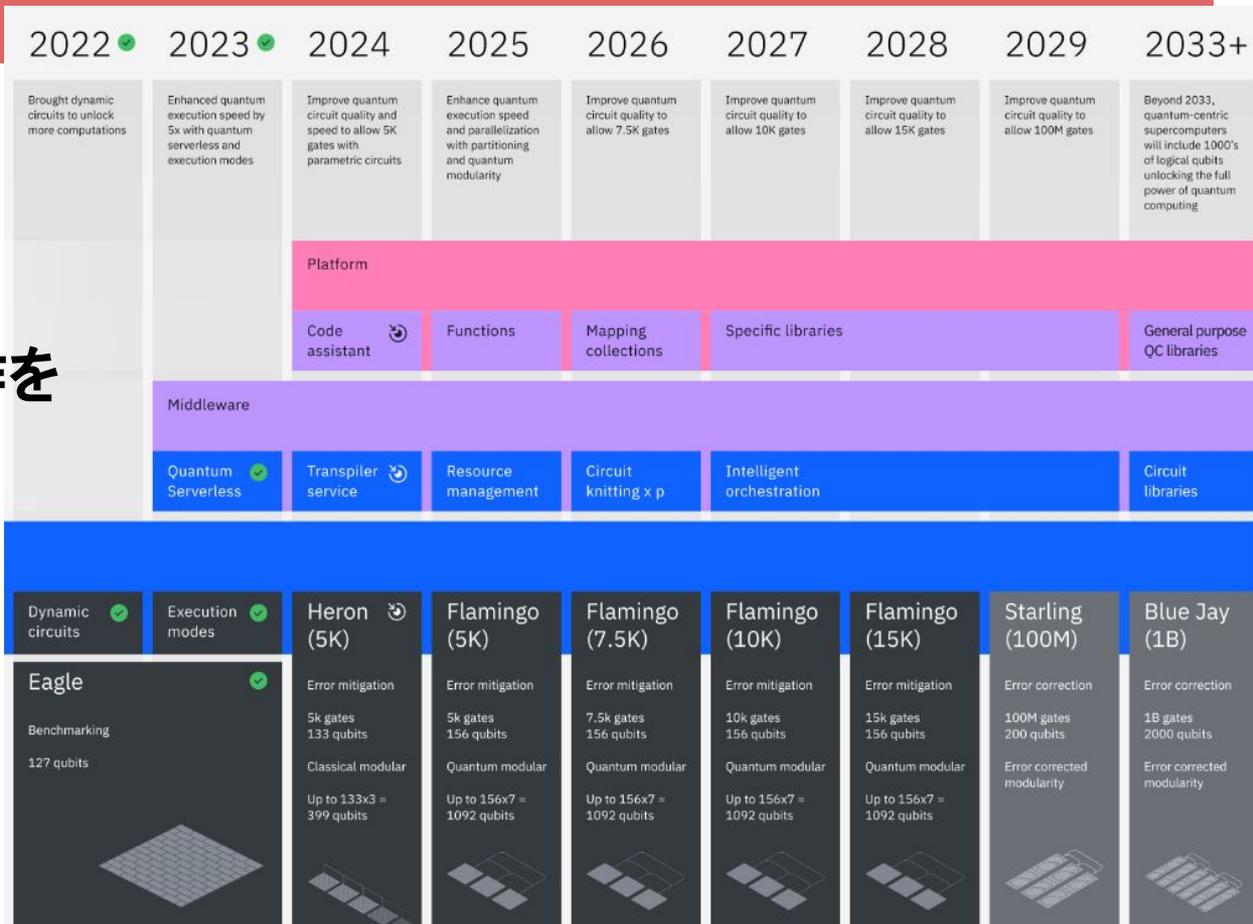


けわしい

ロードマップ

・IBMは2029年までに
「200論理量子bitに
1000万回のゲート操作を
可能にする」
と宣言している

<https://www.ibm.com/quantum/technology>



今後の展望

- ・ **万能な量子コンピュータ**が出てくるのは
まだまだ先の話
- ・ **今ある量子コンピュータ(もどき)**を
活用する方法を模索

まとめ

- ・量子力学に基づいている
- ・超冷やす
- ・光で制御
- ・現状はまだまだ

参考文献

- 共振器量子電磁力学

越野和樹 SGCライブラリ162

- **Practical Guide for Building Superconducting Quantum Devices**

Yvonne Y. Gao, M. Adriaan Rol, Steven Touzard, and Chen Wang PRX Quantum 2, 040202

- キッテル 熱物理学 第2版

Charles Kittel 丸善書房