

量子コンピュータ・量子センサー



東京大学 素粒子物理国際研究センター
寺師弘二

なぜ量子コンピュータを考えるのか？

- 素粒子現象を扱う高エネルギー物理とは、本来親和性が高い
- 計算科学にパラダイムシフトを起こす潜在的な可能性がある
→ 現在は「うまい使い方」を見つけている途上。。。
- 急速な技術の向上・激しい開発競争

➡ 新しいテクノロジーを取り入れた研究開発・
次世代を担う人材の育成

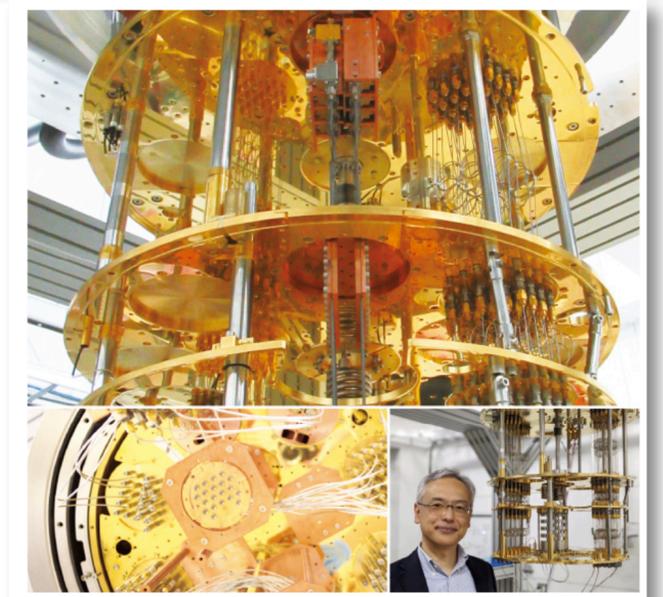
アウトライン

- 量子コンピュータ：ゲート式、アニーリング
- 超伝導量子ビット技術
- 量子コンピュータの応用
 - データ解析の例 (素粒子, 宇宙)
- 量子センサー
 - 典型系な量子センサー
 - 基礎科学への応用例

最後に、東京大学ICEPPの取り組みを紹介



理研量子コンピュータ研究センター誕生



国産量子コンピュータも進行中

量子コンピュータ

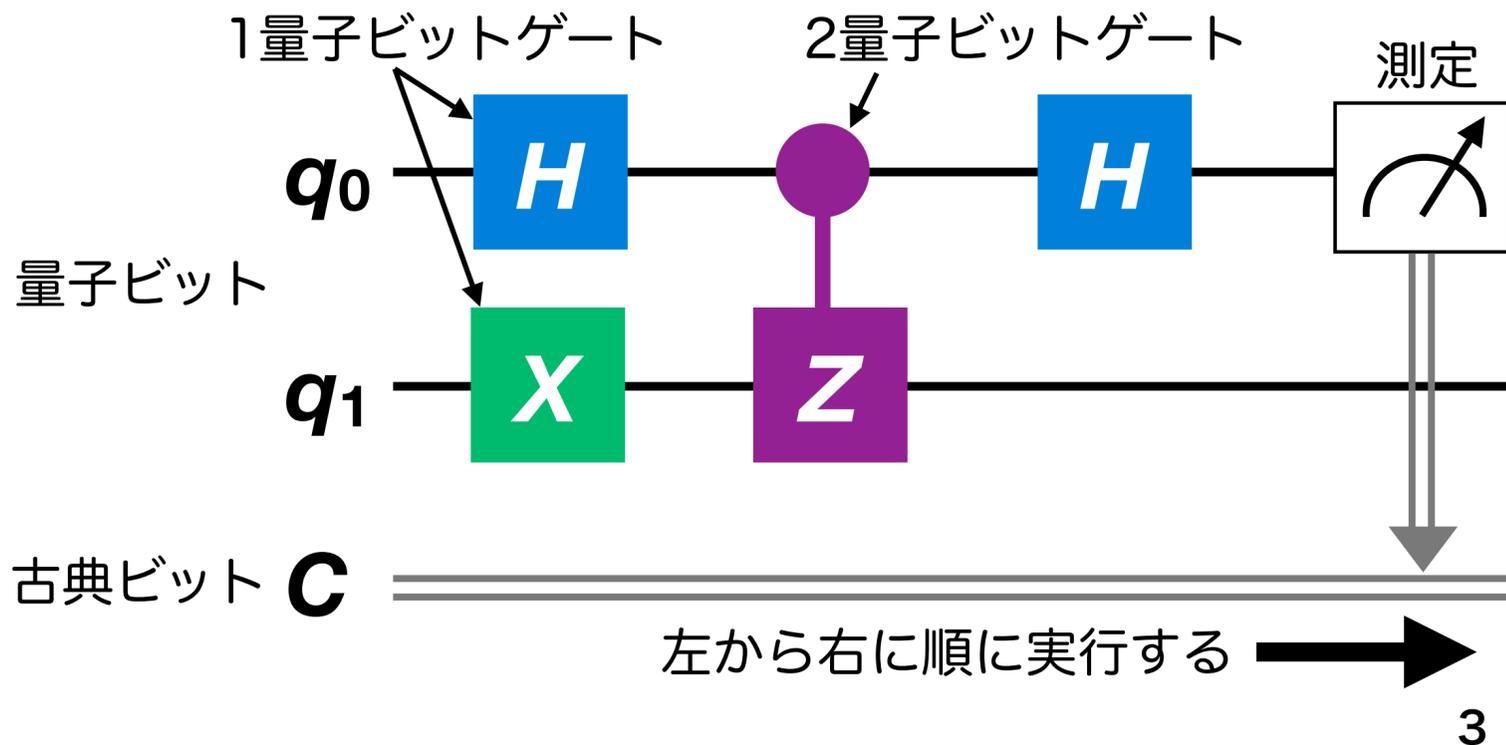
量子ビット(量子情報の基本単位)を使って

- $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の重ね合わせを使った量子並列計算
- 量子ビット間のエンタングルメント
- 波の干渉による量子振幅の増幅・減衰

を駆使して、古典計算機では難しい計算を可能にする

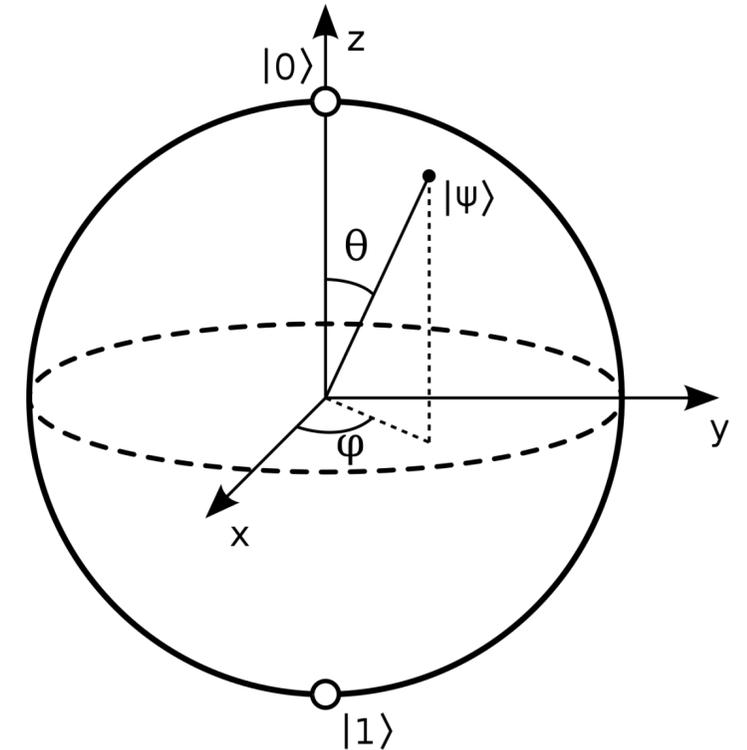
ゲート式量子コンピュータ

- ▶ 量子ゲート(ユニタリー演算)を作用させて所望の状態を作り、最後に測定する
- ▶ “汎用”量子コンピュータと呼ばれる

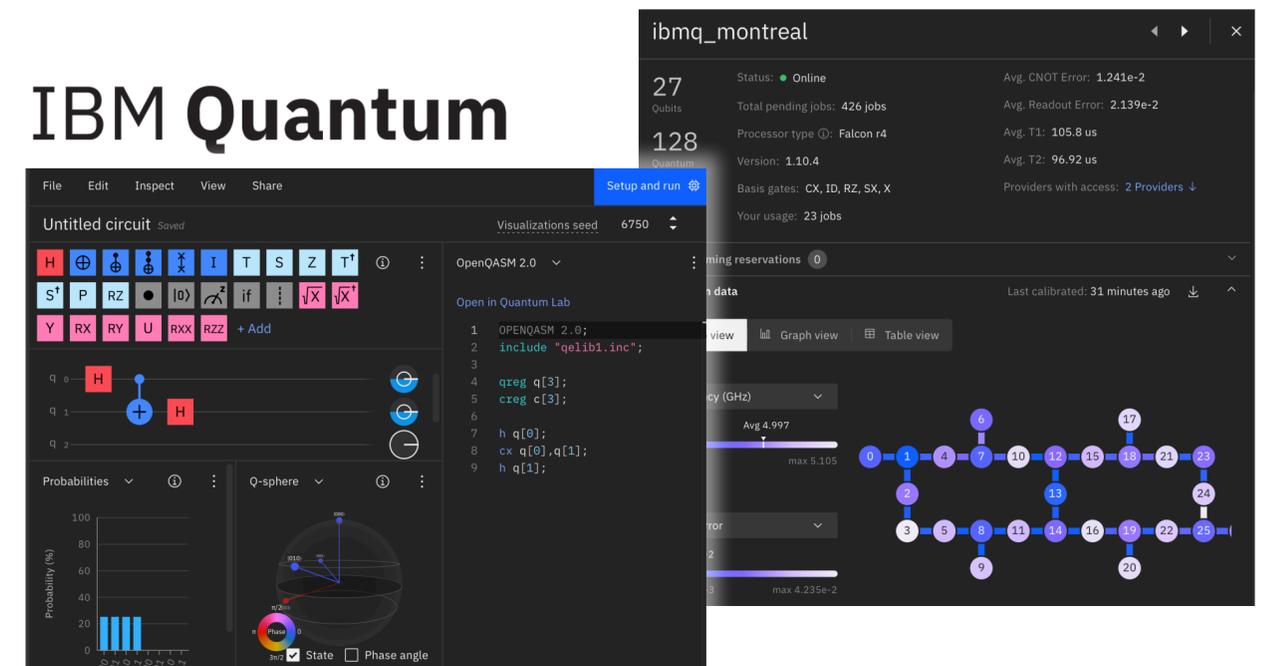


1量子ビットの状態:

$$|\psi\rangle = e^{i\gamma}(\cos(\theta/2)|0\rangle + e^{i\phi}\sin(\theta/2)|1\rangle)$$



IBM Quantum

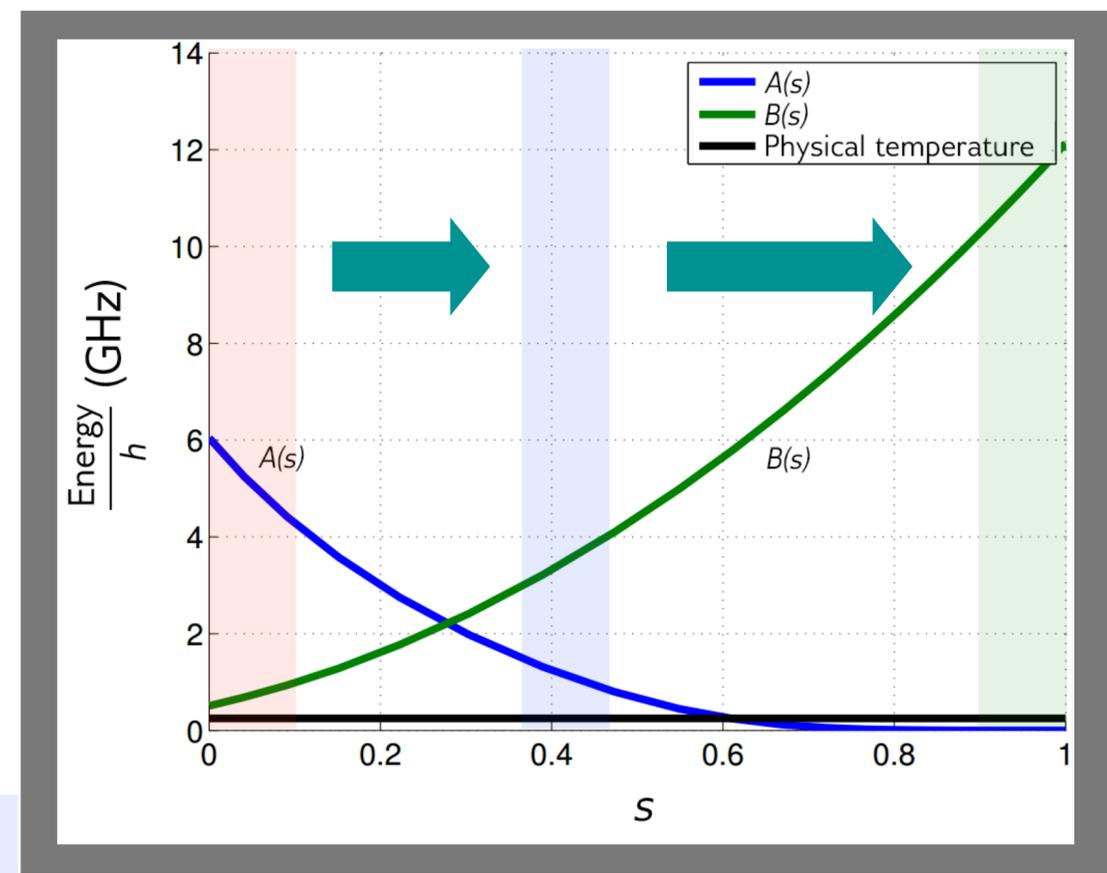
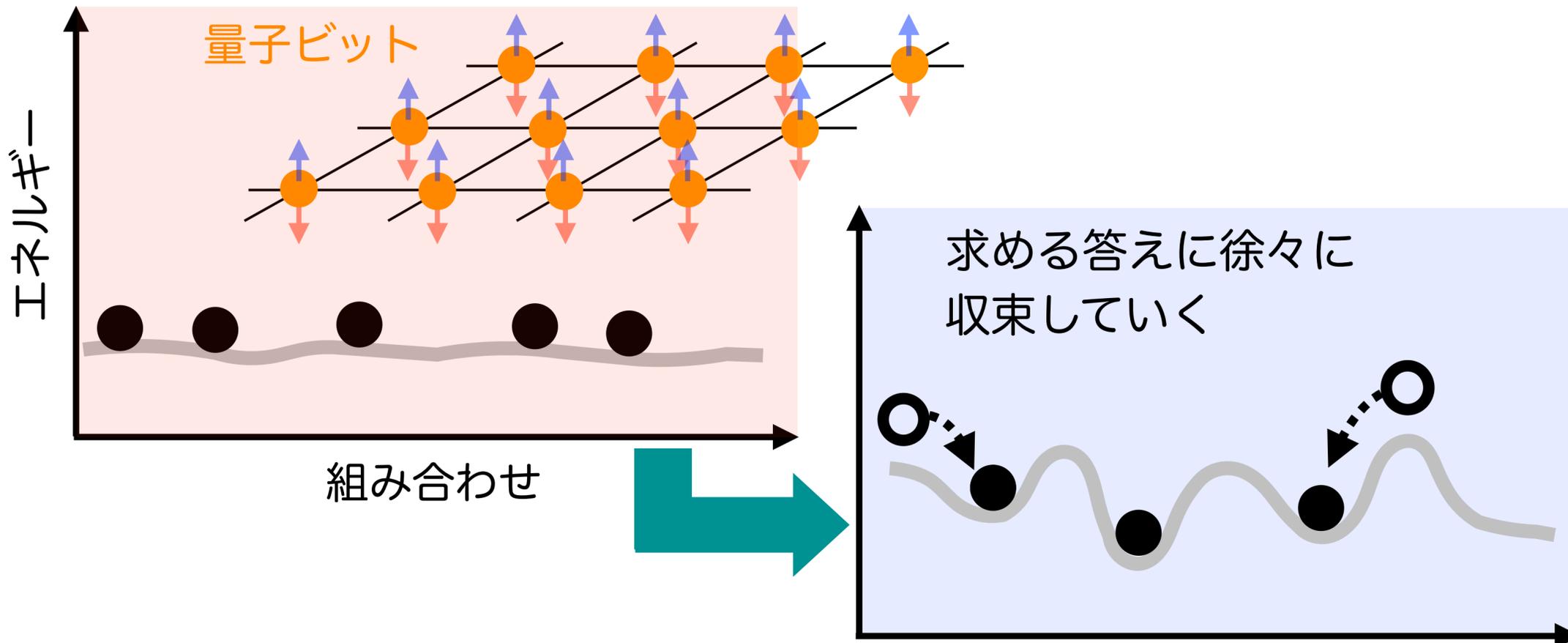


誰でも量子コンピュータを使って遊べます
(→ [IBM Quantum Experience](#))

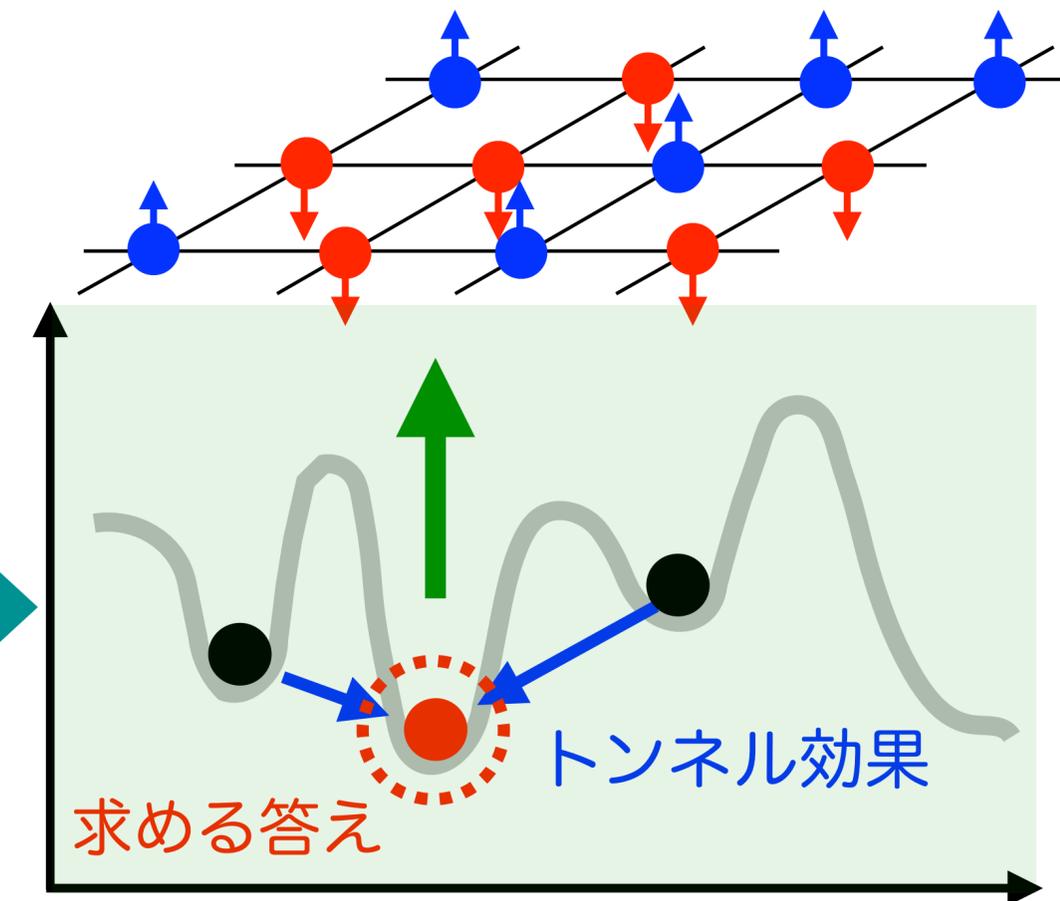
量子アニーリング

量子アニーリング

- ▶ 組み合わせの最適化問題に特化
- ▶ 2次形式の目的関数を最小化することで、問題を解く



- 全ての組み合わせが“答え”になっているハミルトニアンからスタート
- ハミルトニアンを、“解きたい問題”のハミルトニアンに断熱的に変えていく
- 量子トンネル効果を利用して、低いエネルギーを持つ解に到達する



IBM超伝導量子コンピュータ

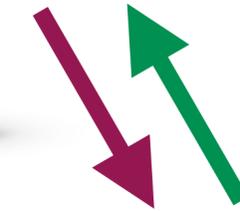
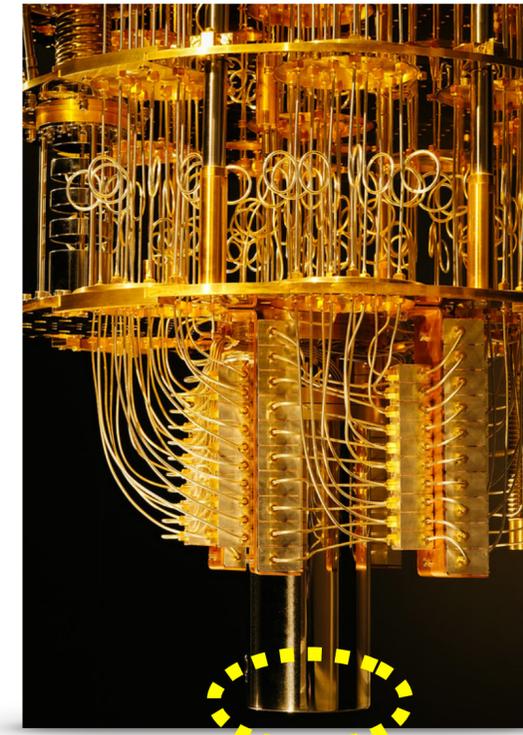
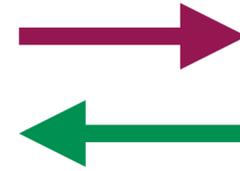
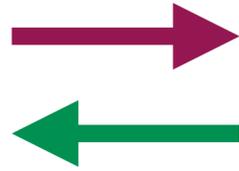
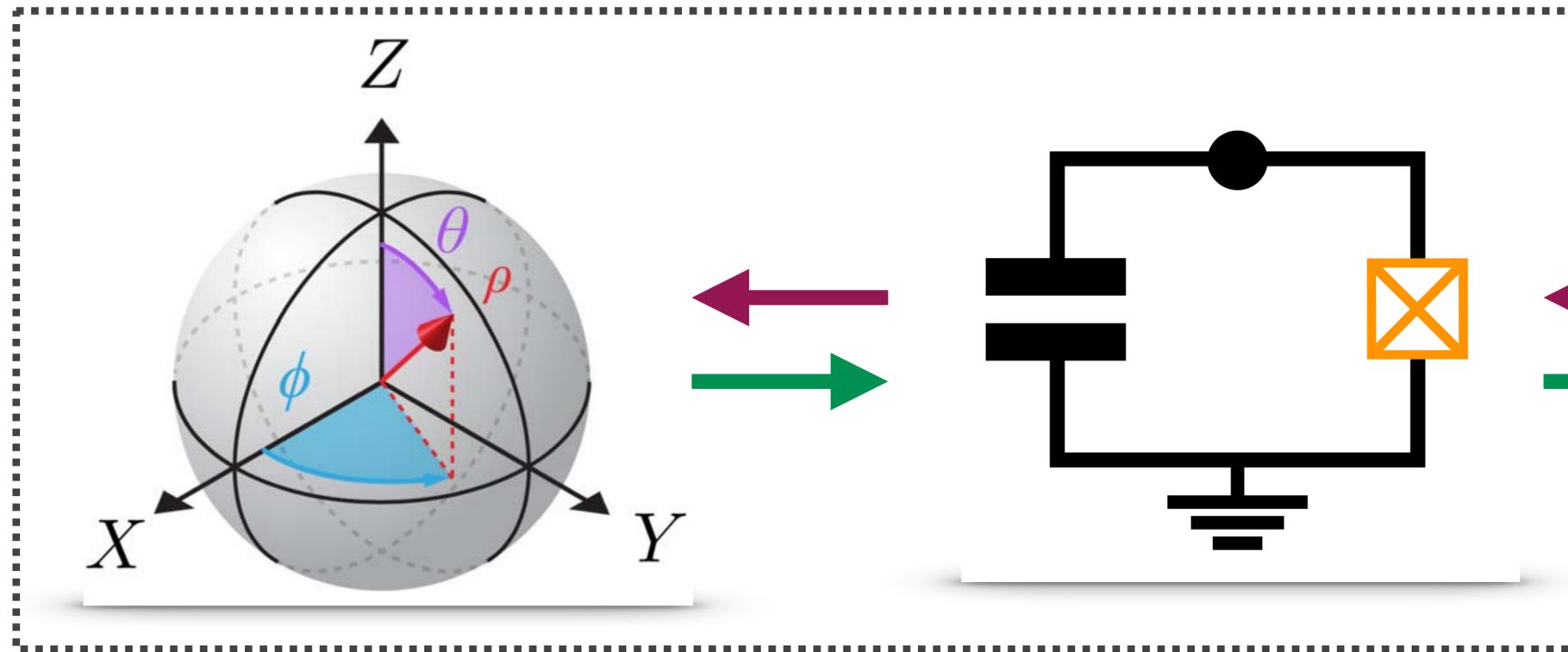


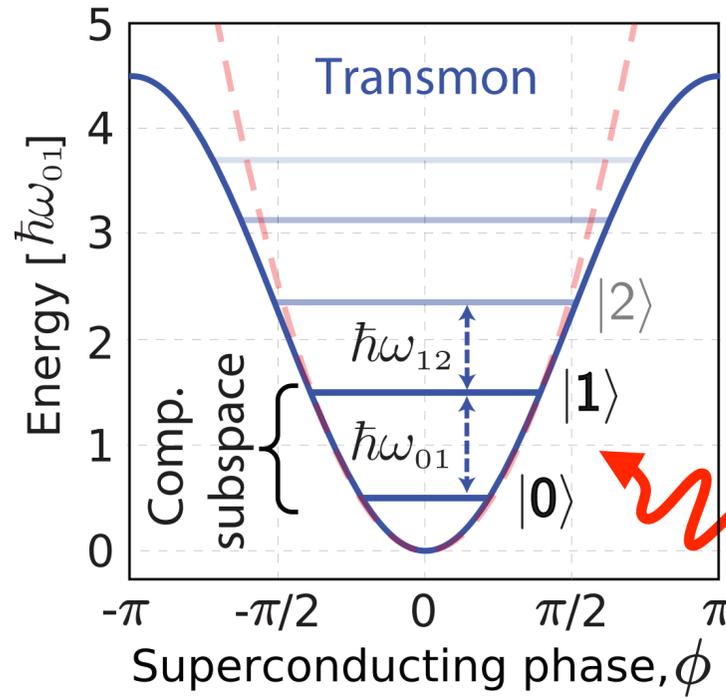
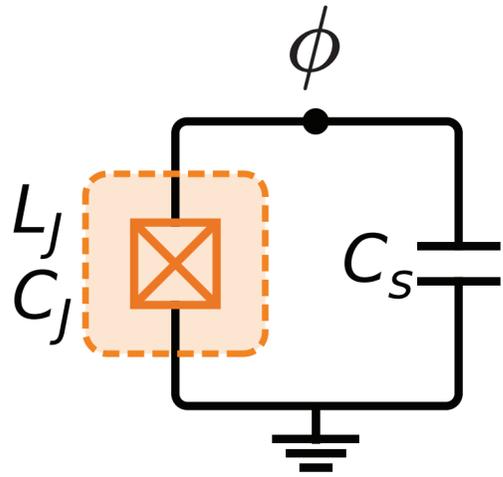
Photo: IBM



Z. Mineev, Superconducting Qubits, Introduction to Circuit Quantum Electrodynamics

超伝導量子ビットとは？

超伝導ジョセフソン接合 (=非線形インダクタ) を持つLC共振回路



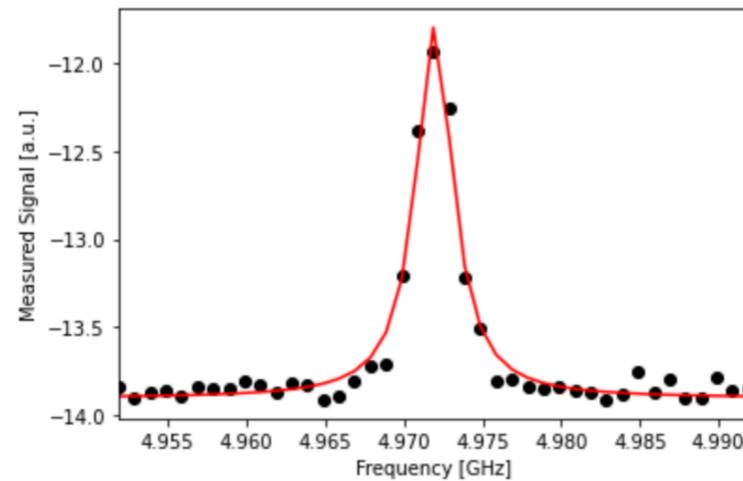
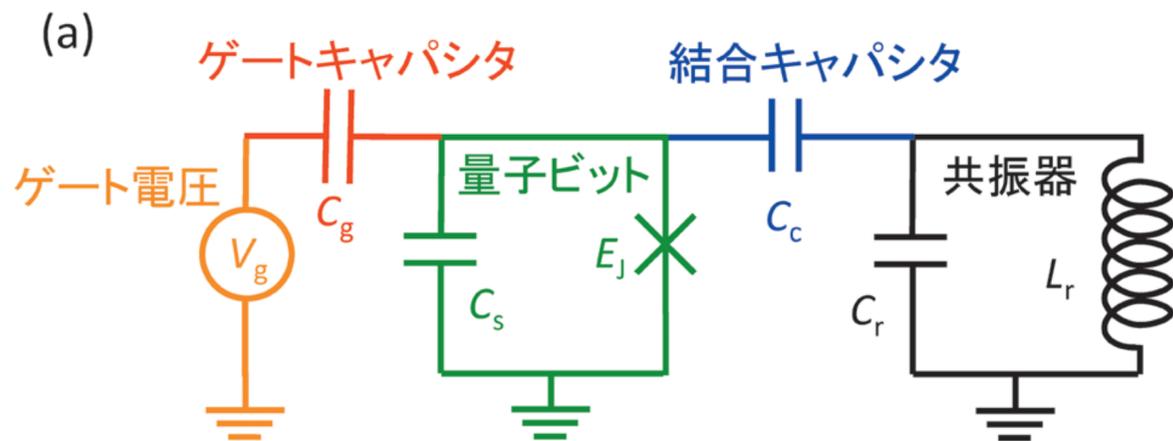
$$H = 4E_C n^2 - E_J \cos \phi$$

$$E_C = \frac{e^2}{2(C_s + C_J)} \quad E_J = I_c \frac{\Phi_0}{2\pi}$$

$\alpha = \omega_{12} - \omega_{01} \sim 300$ MHzの非調和度

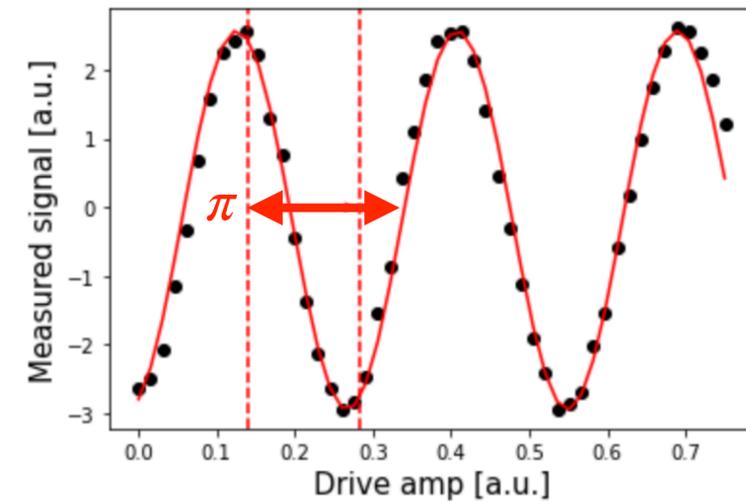
$E_J \gg E_C \rightarrow$ トランズモン超伝導量子ビット

マイクロ波の周波数領域(~GHz)にあるパルス信号で、量子ビットの|0>-|1>遷移や位相操作を行う

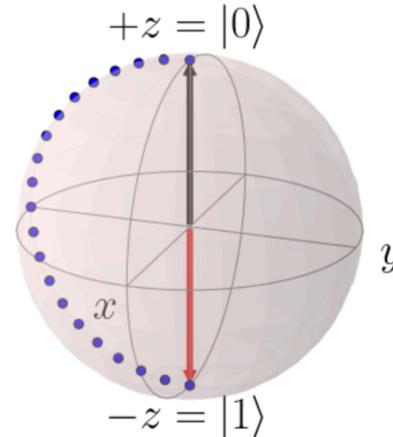


量子ビットの遷移周波数

ラビ振動



|0>-|1>間の遷移に対応するパルス波の振幅



基礎物理への量子コンピュータの応用

事象選別などのデータ解析：

- ▶ ヒッグス粒子の識別 (量子アニーリング [1/2](#), [変分量子](#), [量子カーネル](#))
- ▶ 超対称性粒子生成の識別 ([変分量子](#))
- ▶ $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ 反応の識別 ([量子カーネル](#))
- ▶ 天体现象の分類 ([量子アニーリング](#), [量子カーネル](#))
- ▶ 検出器データのUnfolding ([量子アニーリング](#))

検出器データの再構成：

- ▶ 荷電粒子の飛跡 ([量子アニーリング](#), 量子グラフネットワーク [1/2](#), [量子AM](#), [デジタルアニーリング](#))
- ▶ プライマリ衝突点 ([量子アニーリング](#))
- ▶ カロリメータエネルギー ([量子敵対ネットワーク](#))
- ▶ ジェット ([量子アルゴリズム](#))

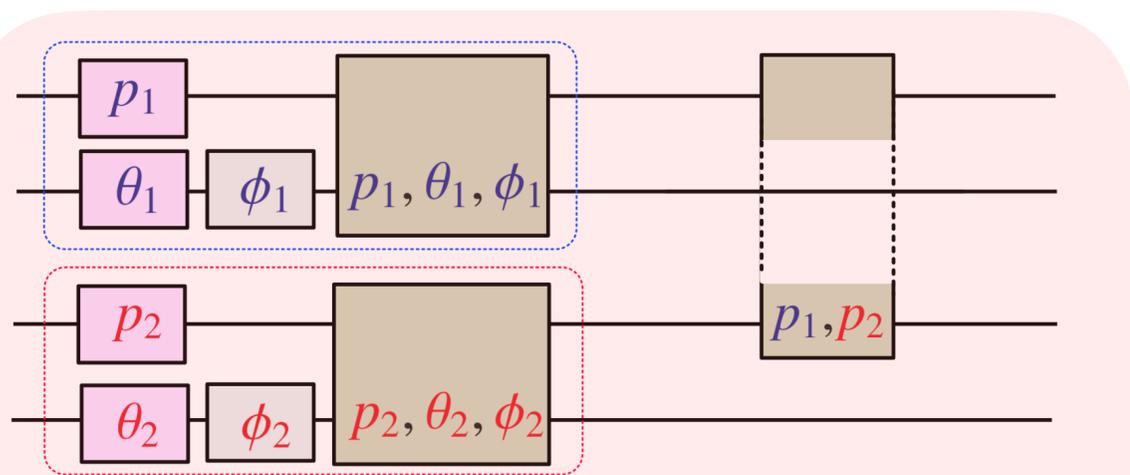
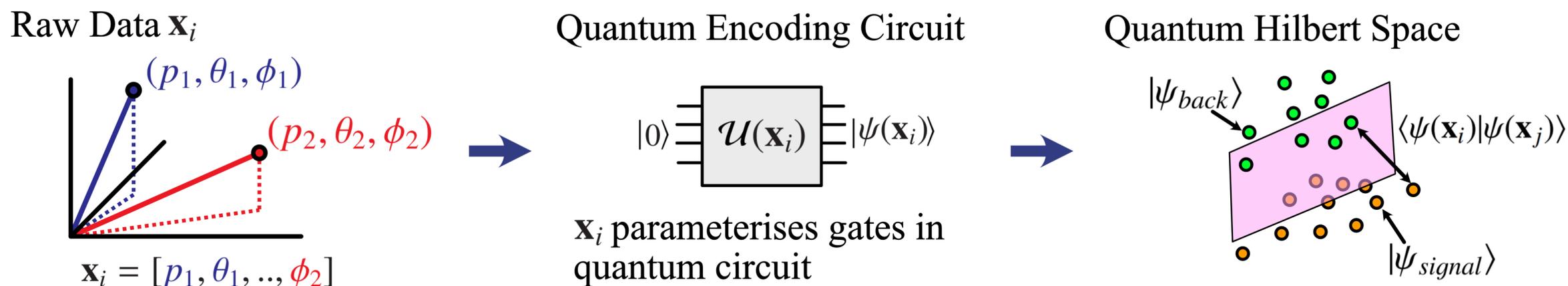
場のシミュレーション計算：

- ▶ 格子ゲージ理論, Schwinger模型, SU(2)ゲージ理論, EFT計算, etc.etc...
- ▶ パartonシャワー ([1](#), [2](#))
- ▶ 原子核シミュレーション

いくつか応用例を紹介します

量子サポートベクターマシンによる $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ ($B \rightarrow K^+K^-$) 信号と $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ 背景事象の識別

- ▶ 終状態粒子の運動量 $\{p, \theta, \phi\}$ を入力データ x として、量子状態にエンコードする
- ▶ エンコードした量子状態 $|\psi(x)\rangle$ から、量子回路を測定してカーネル行列 $K(x_i, x_j) = |\langle \psi(x_i) | \psi(x_j) \rangle|^2$ を求める
- ▶ 古典学習により、信号と背景事象を分離するサポートベクターを決定する



各粒子ごとに情報をエンコードし、その後で粒子間をエンタングルさせる

SVM	エンコーディング	AUC
量子	Combinatorial	0.827
	この論文の手法	0.877
古典	RBFカーネル	0.865

データに適した量子状態へのエンコーディングが、性能を向上させることの好例

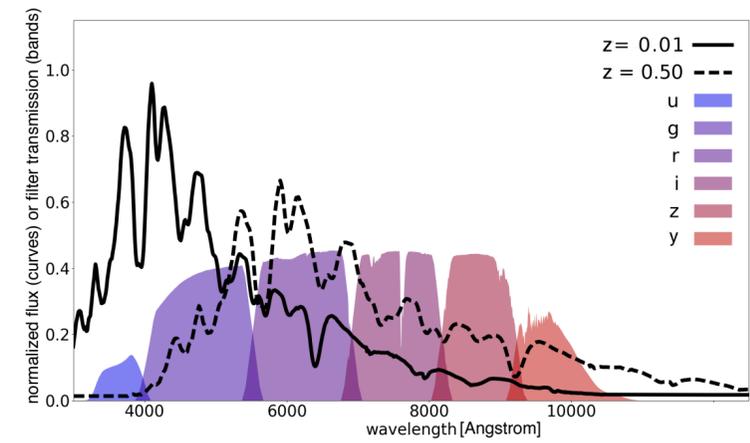
➡ 古典計算と同等の計算能力を持ちうる

超新星爆発の分類

arXiv:2101.09581

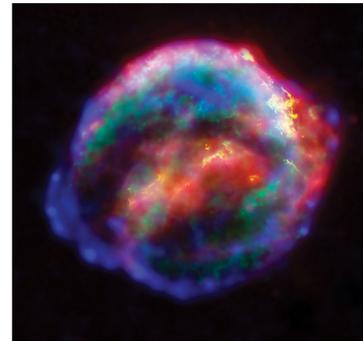
光スペクトルを用いた超新星の分類

- ▶ LSST(Large Synoptic Survey Telescope)での測定(シミュレーション)を元に分類
- ▶ 6つの周波数帯での時系列フラックスデータを、67次元変数の入力データに変換

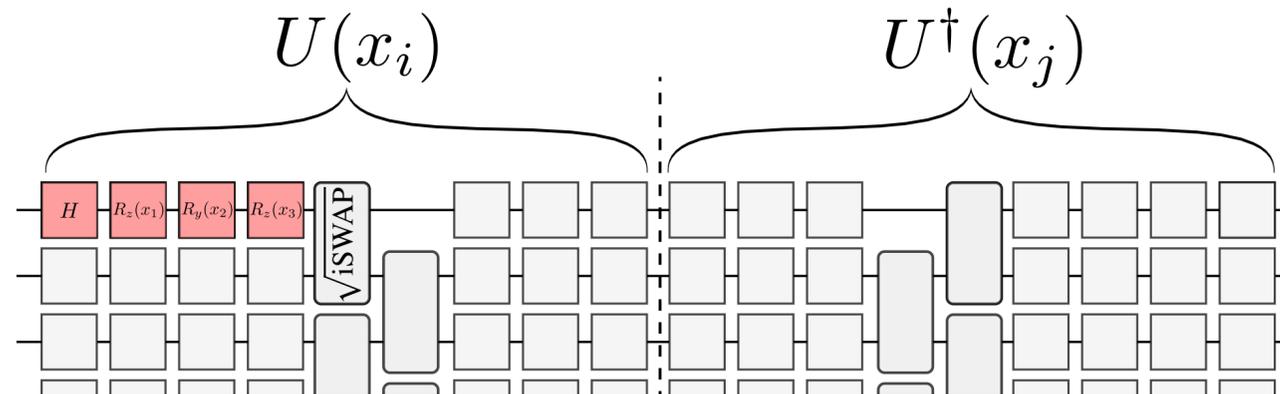


タイプ Ia

タイプ II

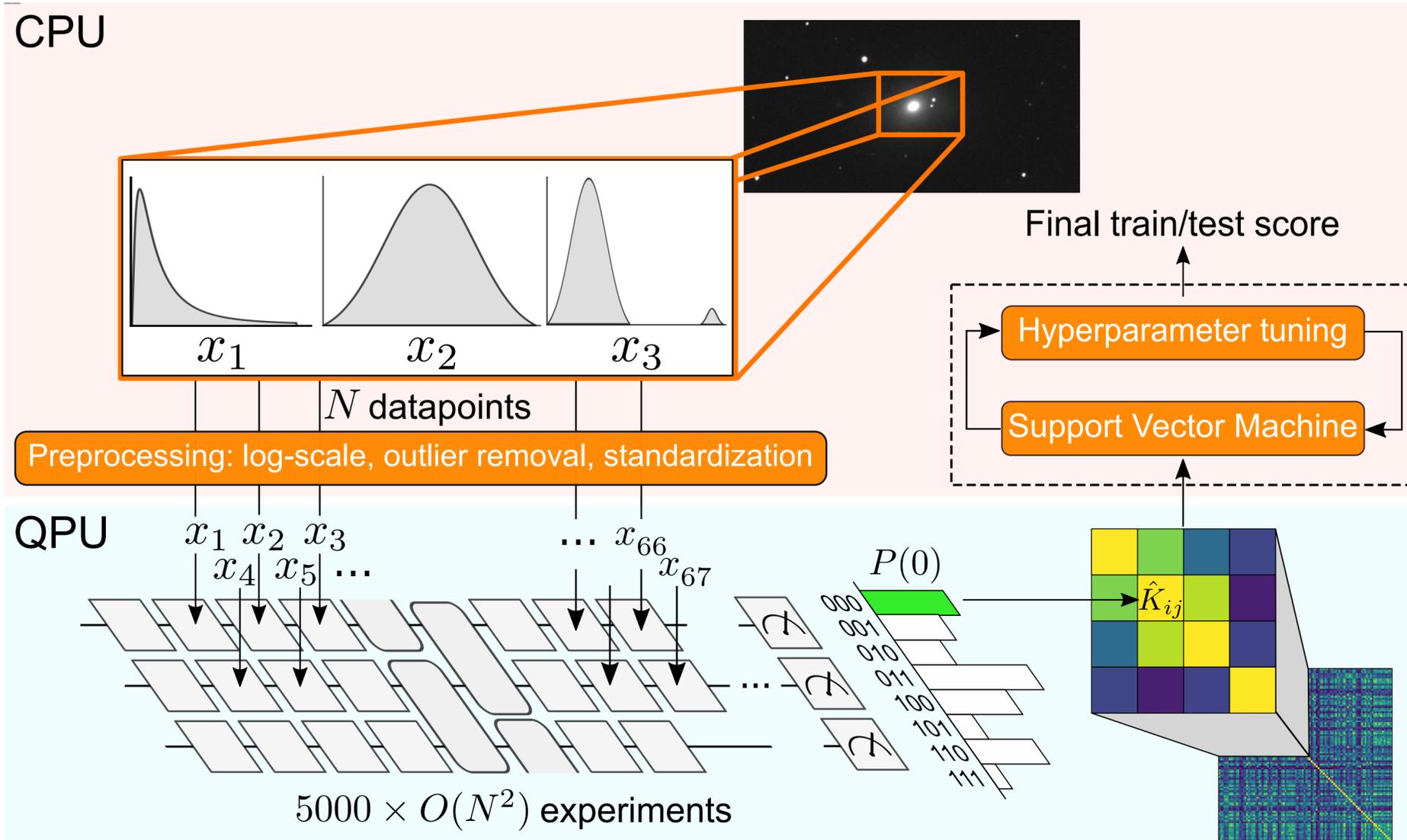


- Google Sycamore(量子超越実験)と同じプロセッサで、10,14,17量子ビットを使用
- カーネル行列 $K(x_i, x_j) = |\langle 0 | U^\dagger(x_j) | U(x_i) | 0 \rangle|^2$ を計算して、SVMで分類



実機での性能は、ノイズ無しのシミュレータ計算と同等

CPU



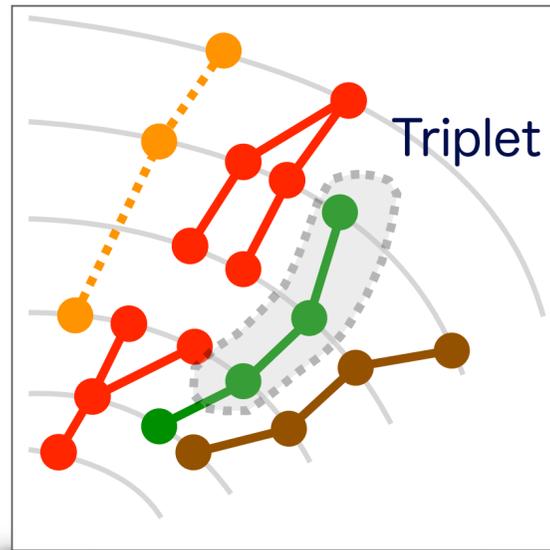
この例でも量子加速は実証できていないが、
多変数の大きなデータを実機で解析したことに意義

荷電粒子の飛跡再構成

Tripletの組み合わせ最適化問題として、飛跡を再構成する

量子アニーリング

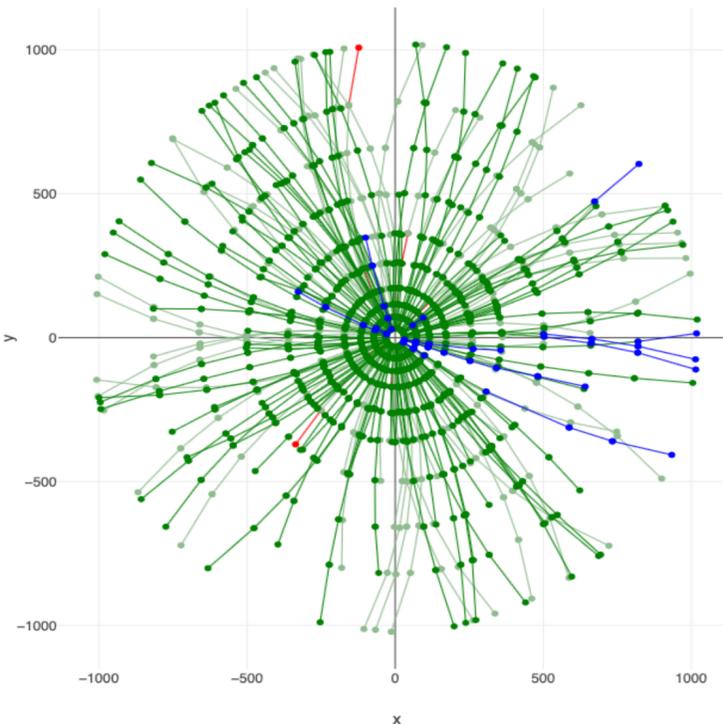
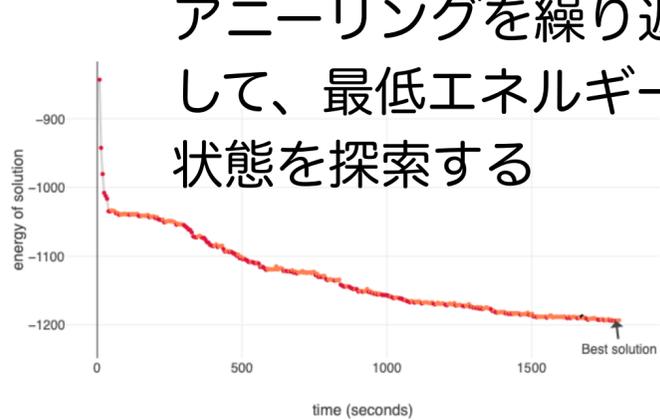
M. Saito et al.,
CHEP 2019



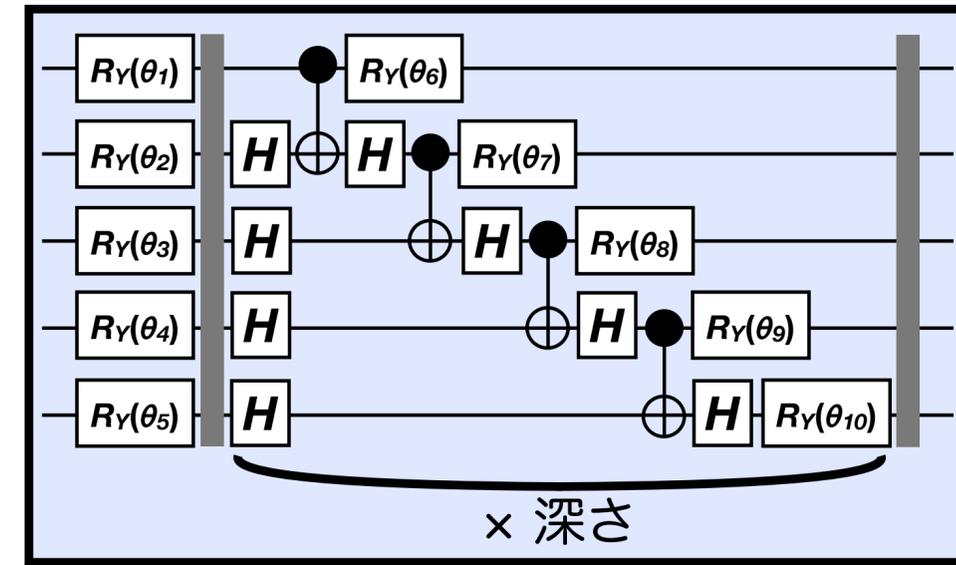
D-Wave量子アニーラ

- ▶ 2048超伝導量子ビット
- ▶ アニーリング時間 $\sim 20 \mu s$

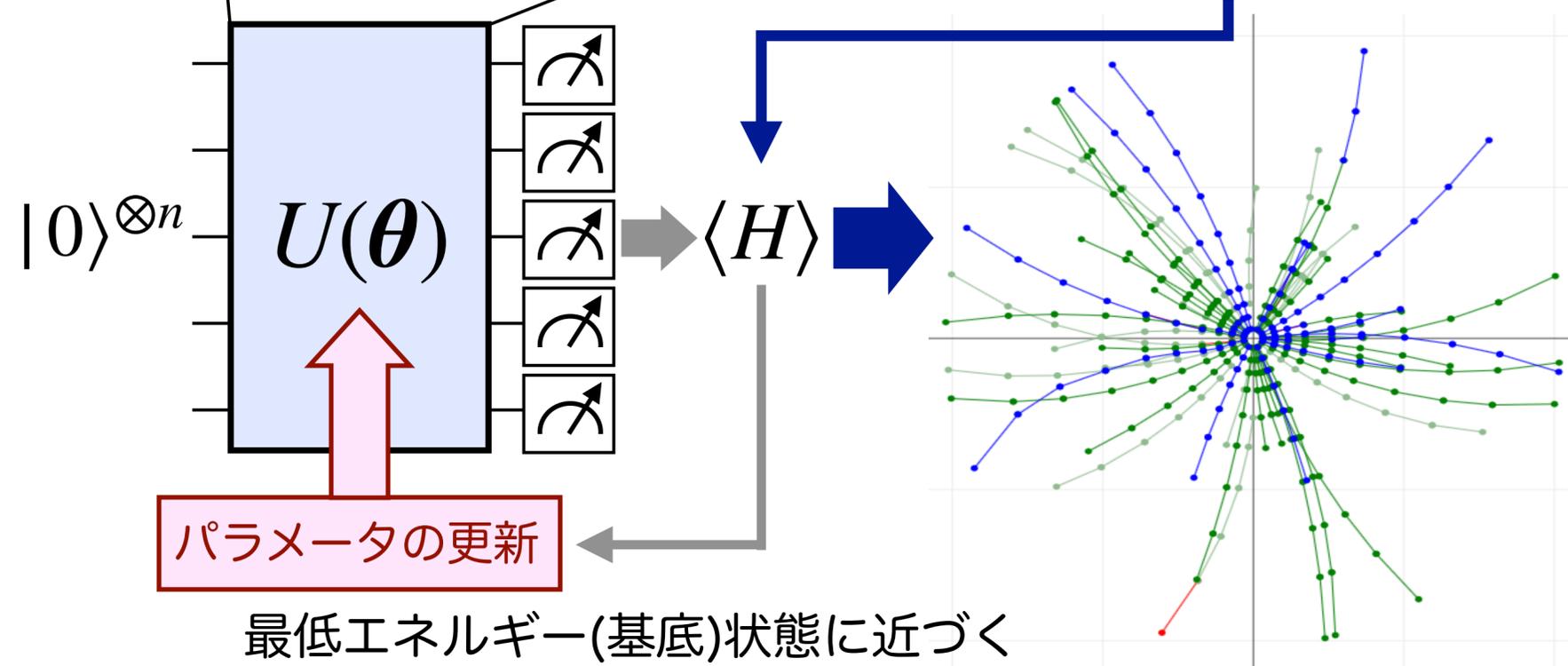
アニーリングを繰り返して、最低エネルギー状態を探索する



>95%以上の効率で
粒子の再構成が可能



$$H = \sum_i h_i s_i + \sum_i \sum_{j>i} J_{ij} s_i s_j$$



最低エネルギー(基底)状態に近づくように、パラメータを更新する

➡ 将来的に、実験に応用できる可能性を持つ

量子センサー

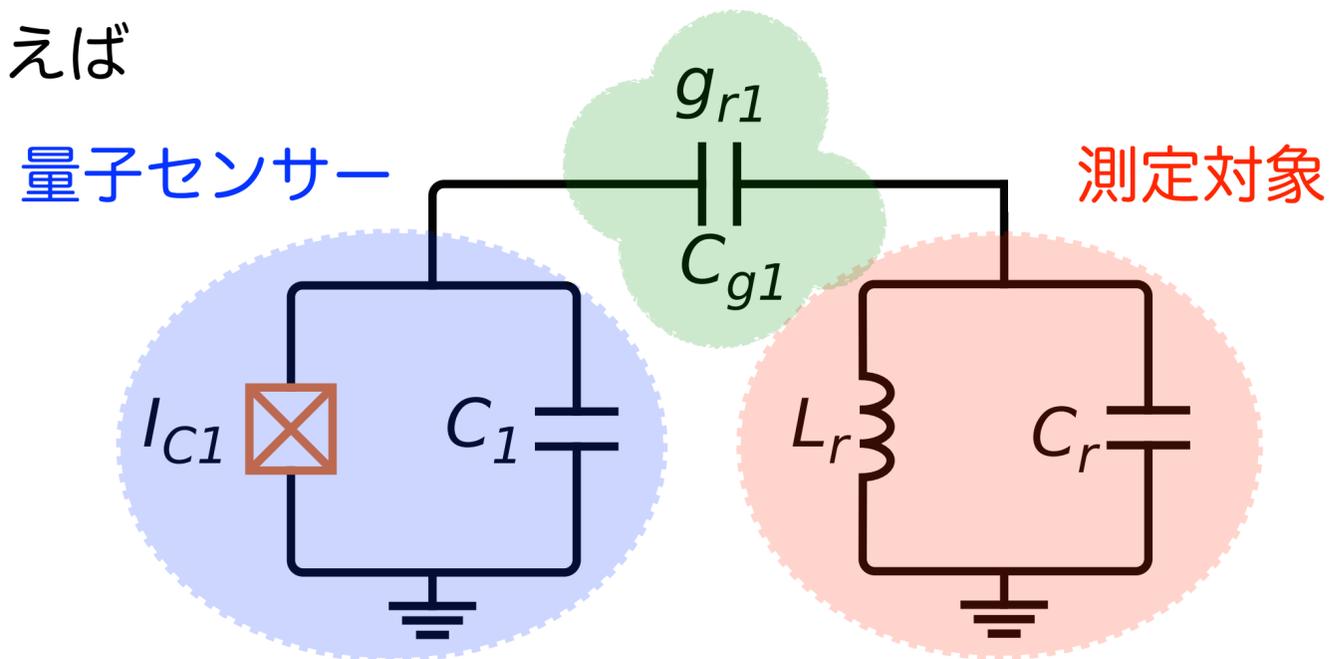
量子センサーの条件

1. 識別可能な離散エネルギー準位（普通は2準位）を持つ
2. 初期化と状態測定ができる
3. コヒーレントに状態制御ができる
4. 測りたい物理量（例えば電場、磁場、重力など）と相互作用できる

- 1-3の条件は量子コンピュータ（量子ビット）とほぼ同じ
- 4の条件は量子センサー特有

➡ 測定したい物理量の変化に対するセンサーの応答を見る

例えば



$$\hat{H} = \hat{H}_{\text{sensor}} + \hat{H}_{\text{signal}} + \hat{H}_{\text{interaction}}$$

超伝導量子ビットとLC共振器が結合している系は、この形のハミルトニアンで記述できる

$$H/\hbar = \underbrace{\frac{1}{2}\omega_q\sigma_z}_{\hat{H}_{\text{sensor}}} + \underbrace{\omega_r a a^\dagger}_{\hat{H}_{\text{signal}}} + \underbrace{g(\sigma_+ a + \sigma_- a^\dagger)}_{\hat{H}_{\text{interaction}}}$$

量子センサー

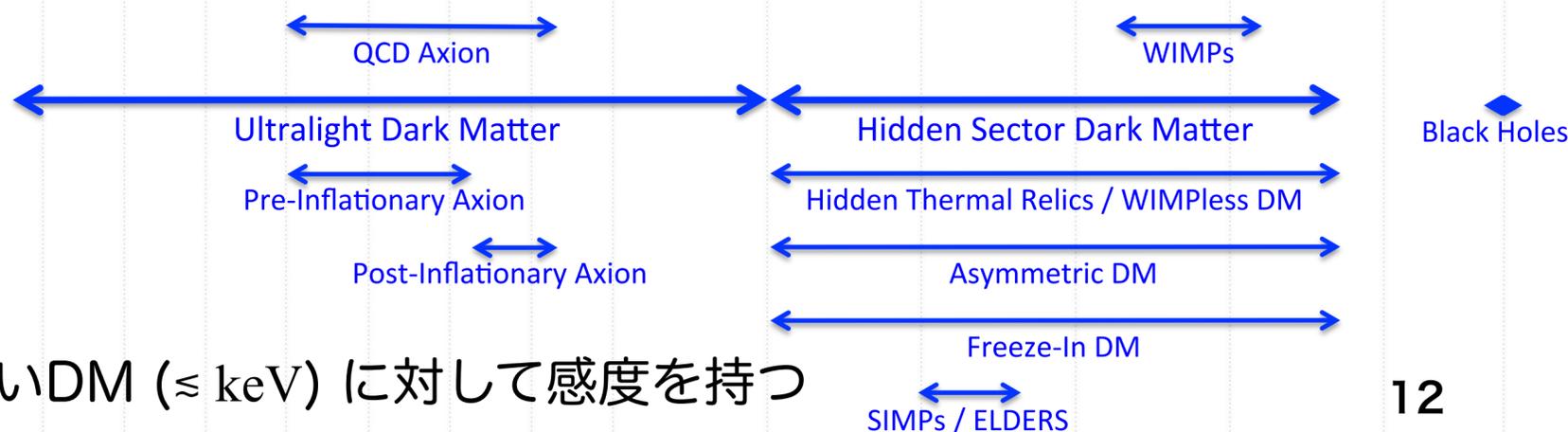
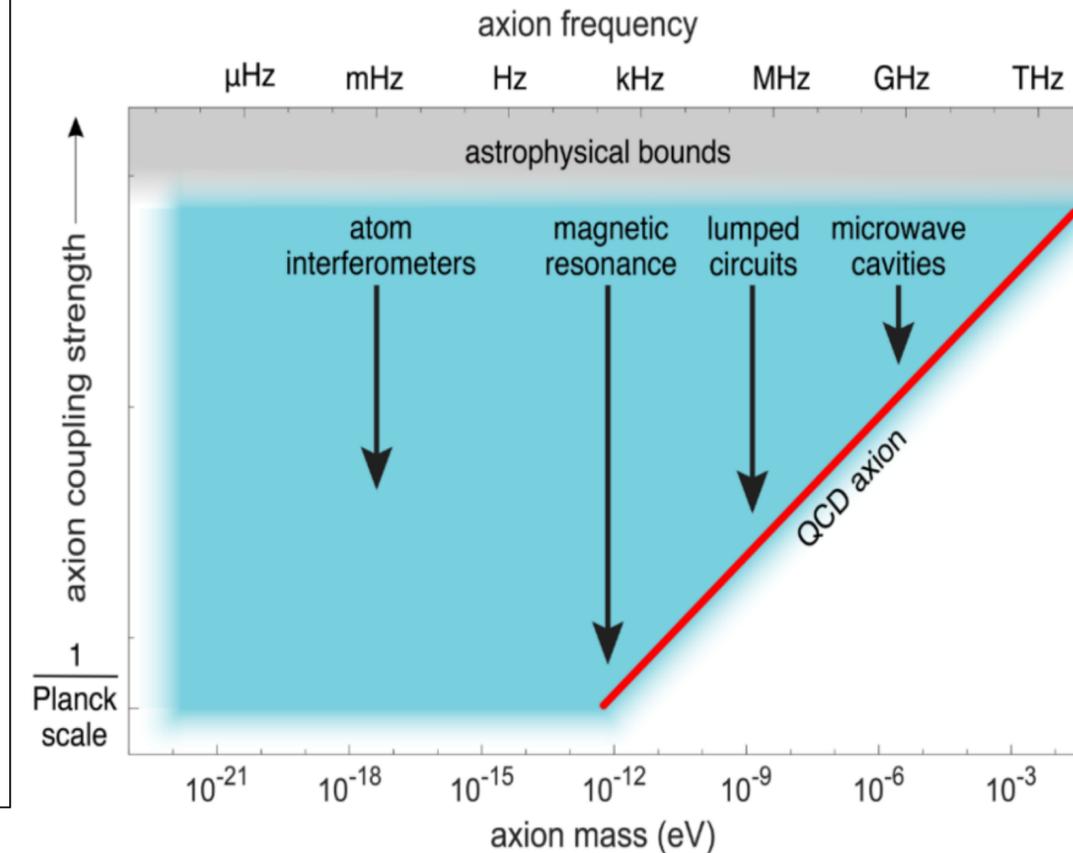
典型的な量子センサーの種類と測定対象

センサーのタイプ	量子ビット	磁場	電場	回転・加速度	時間・周波数	位置(重力)
中性原子	原子スピン					
量子欠陥 (NV中心)	電子スピン					
核磁気共鳴	原子核スピン					
SQUID	超伝導電流					
捕獲イオン	内部スピン, 振動モード					
超伝導トランズモン	電荷固有値					
スクイーズド光子	光					
オプトメカニクス	フォノン					
干渉計	光・原子					

基礎科学への応用：

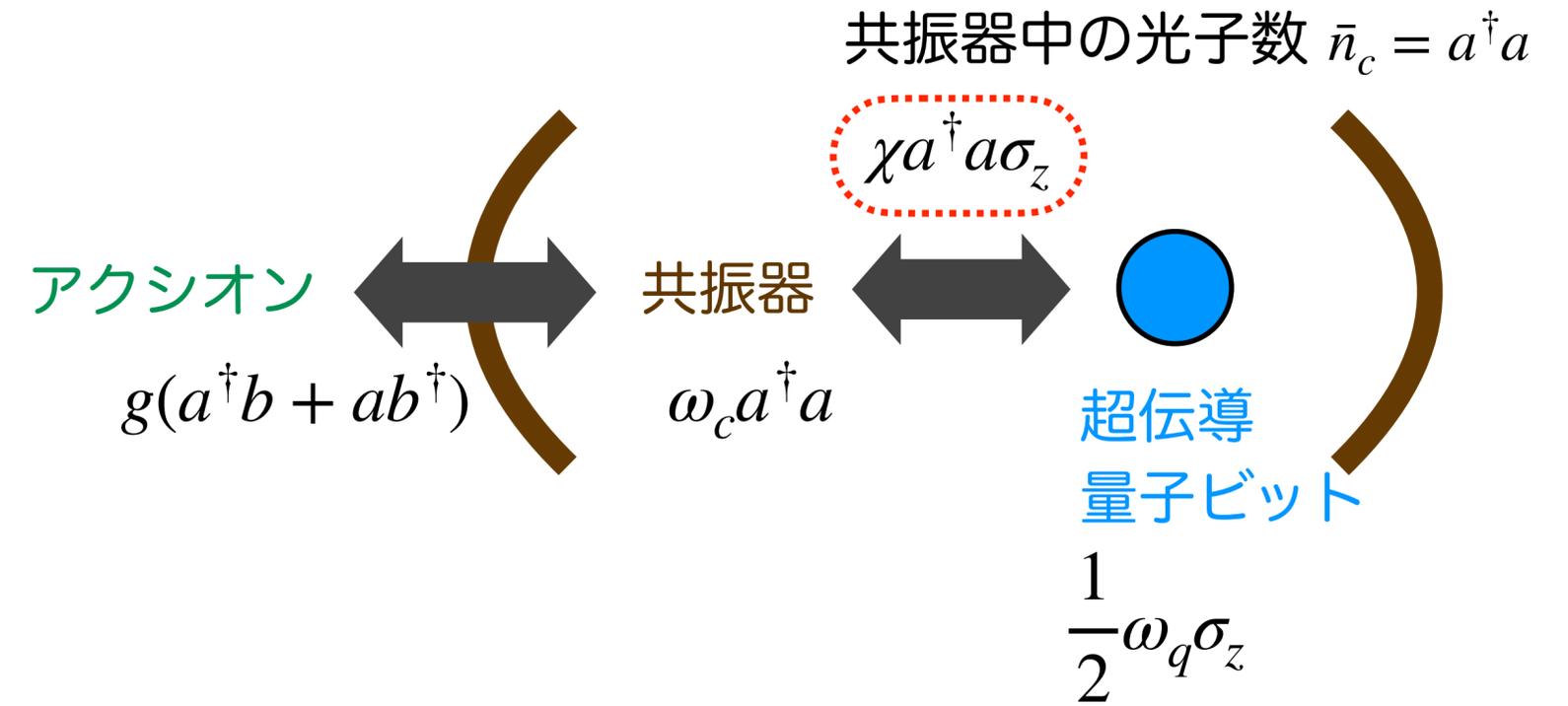
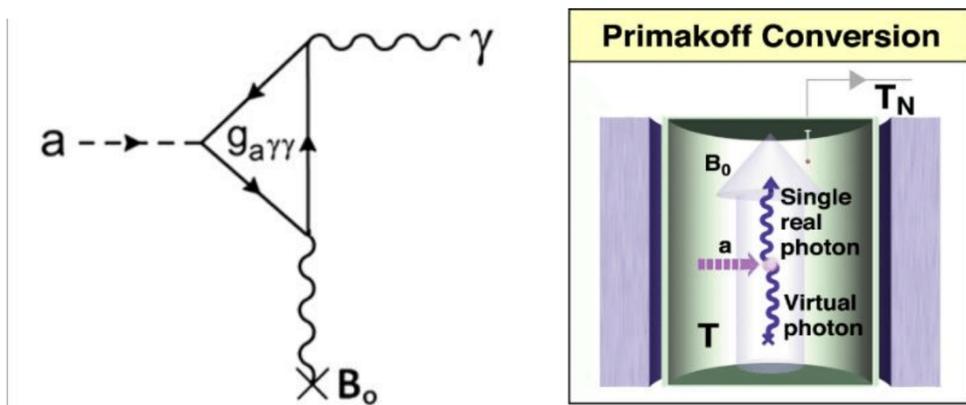
- ▶ 軽い暗黒物質の探索
- ▶ 重力波の検出

など

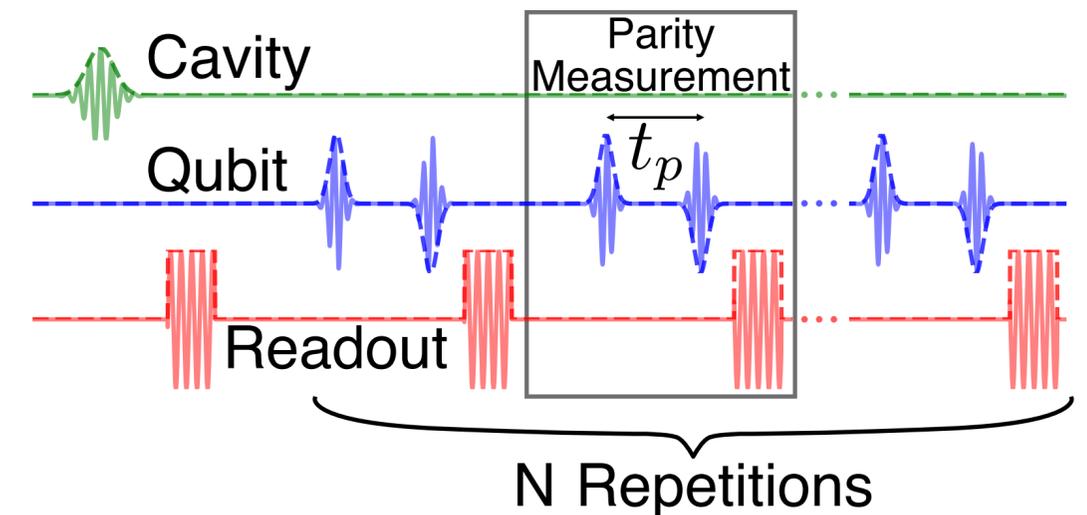
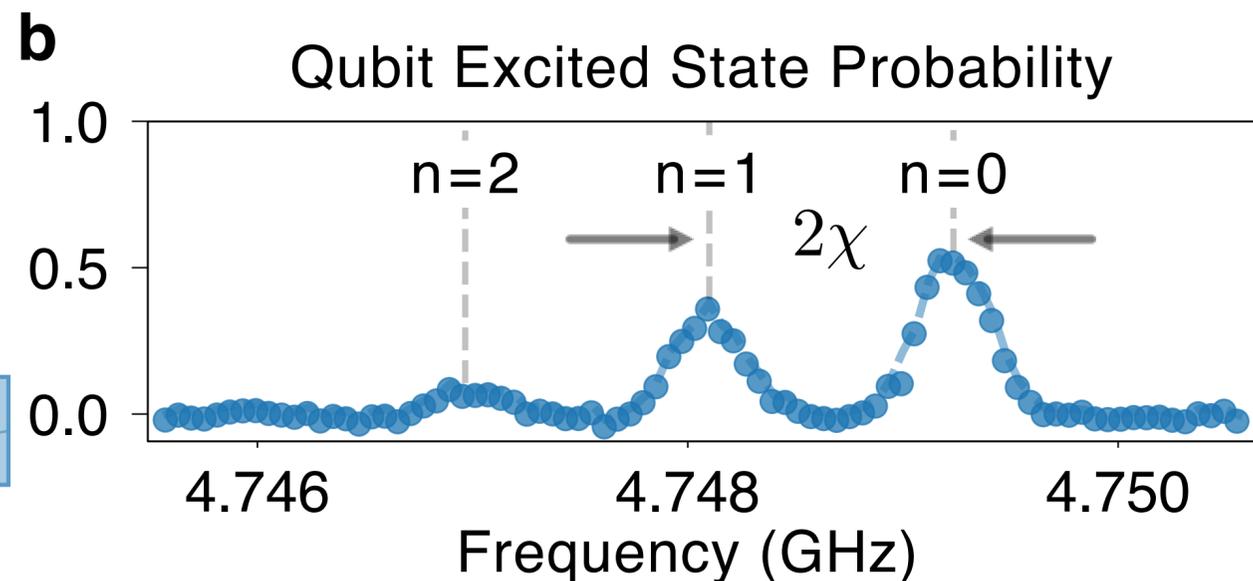
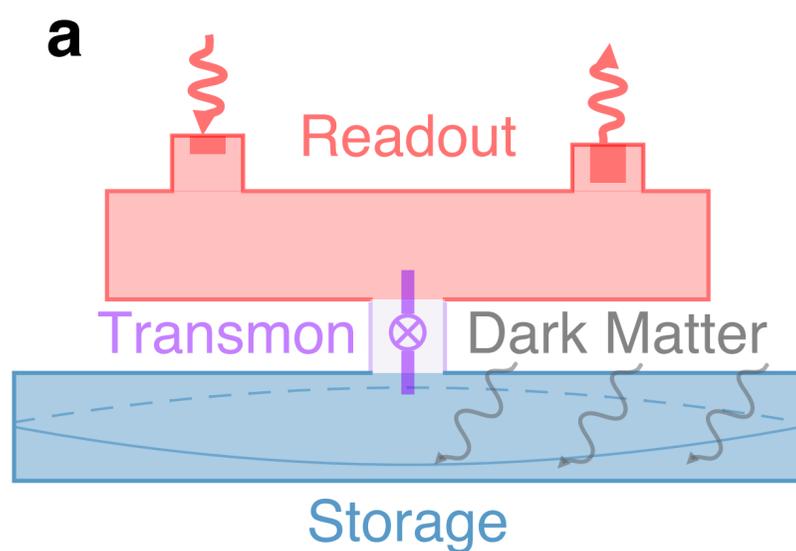


軽いDM (\approx keV) に対して感度を持つ

質量(周波数)に応じて、様々な量子センサーが暗黒物質に感度を持ちうる

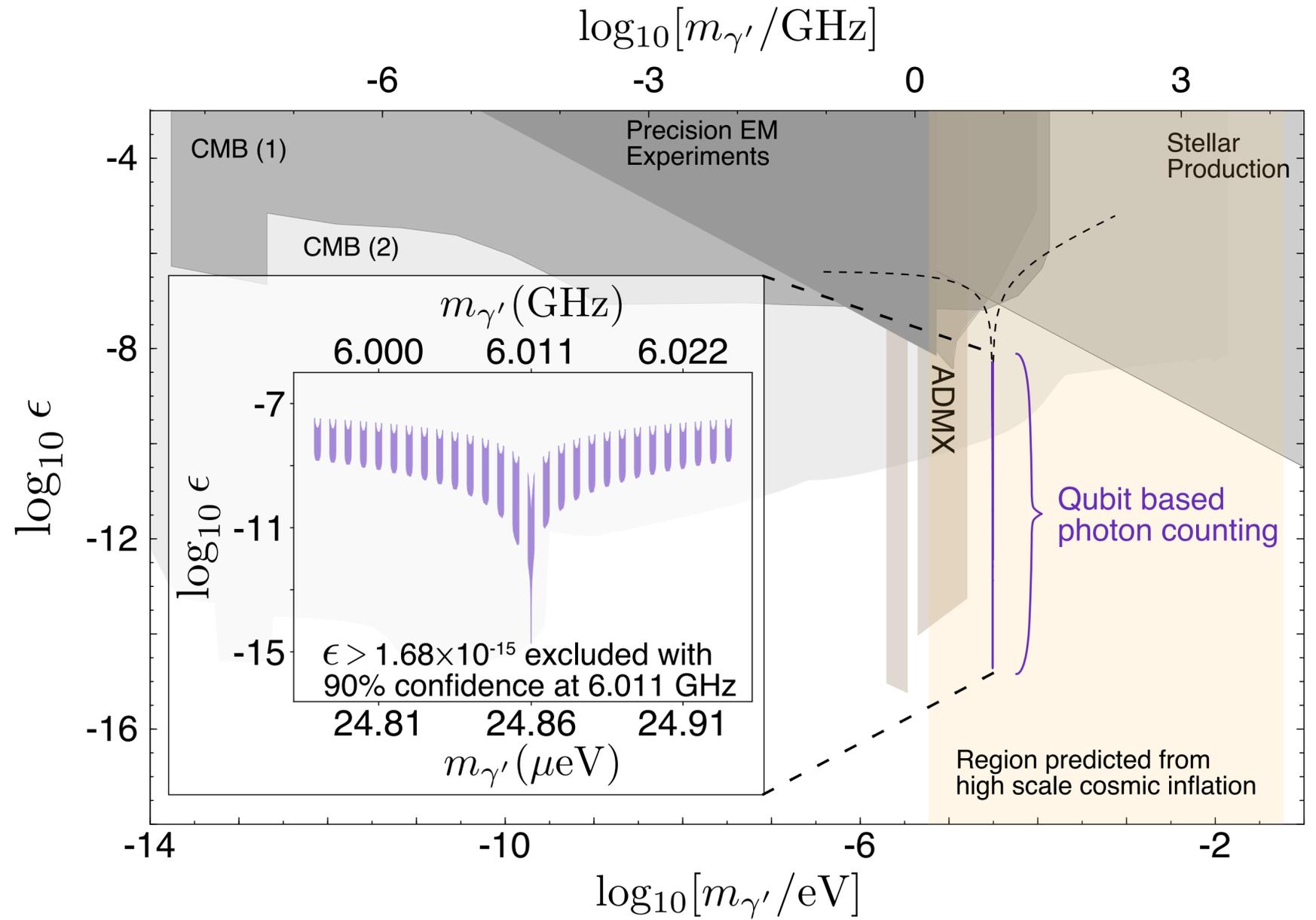
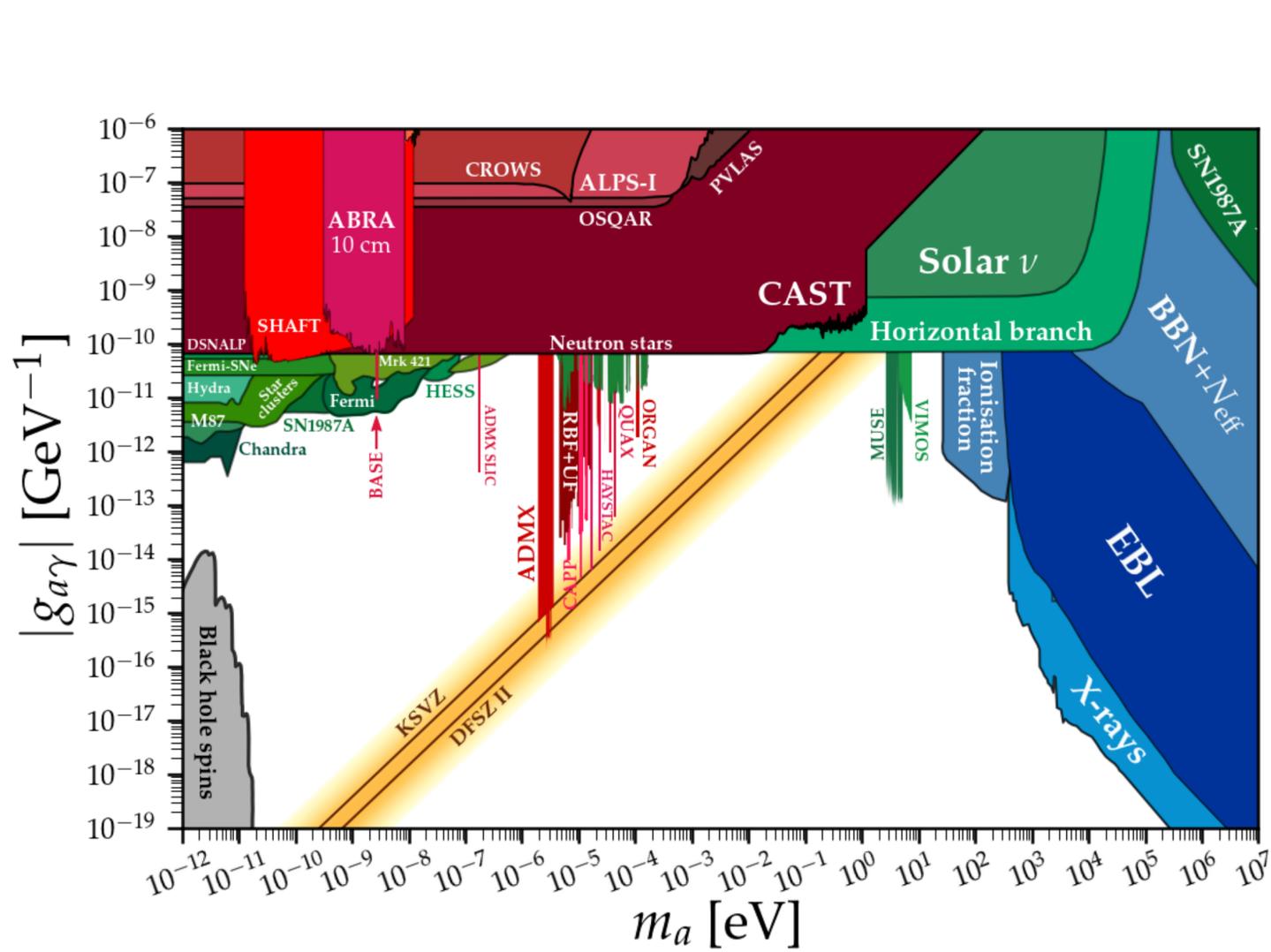


- 共振器中でアクシオン由来の光子が生成
- 共振器中の光子数に依存して、超伝導量子ビットの遷移周波数が 2χ だけ変わる (→ Starkシフト)
- 超伝導量子ビットをReadout共振器を使って分散読み出しを行う



→ 量子非破壊の繰り返し測定で、感度を上げる

暗黒物質の探索：超伝導量子ビット＋光共振器

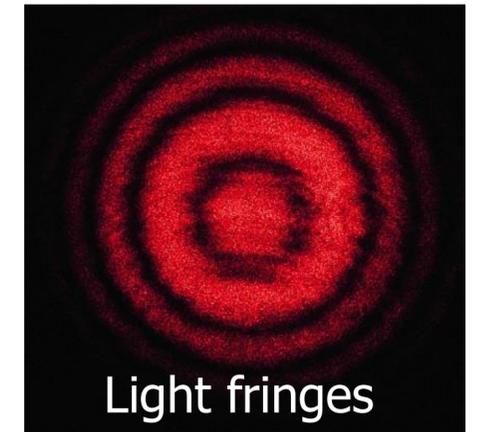
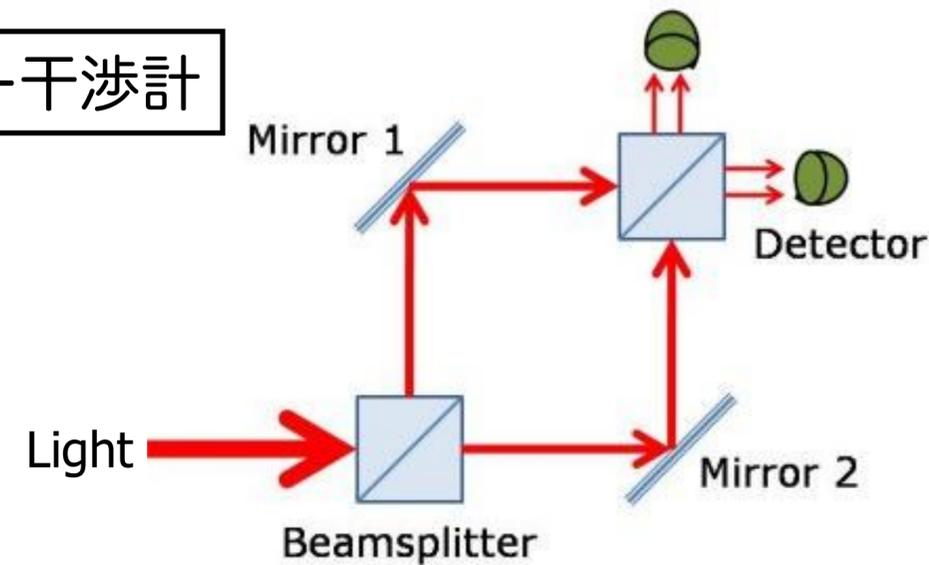


$\epsilon < 1.68 \times 10^{-15}$ at 6.011 GHz (24.86 μeV)

原子干渉計 - 物質波の干渉効果を使って、加速度や回転運動を測定する

- 重力加速度 g の測定： $\Delta g/g \sim 10^{-15}$ まで可能
- 重力波の検出
- 非常に軽い暗黒物質 ($\sim 10^{-15}$ eV) の探索

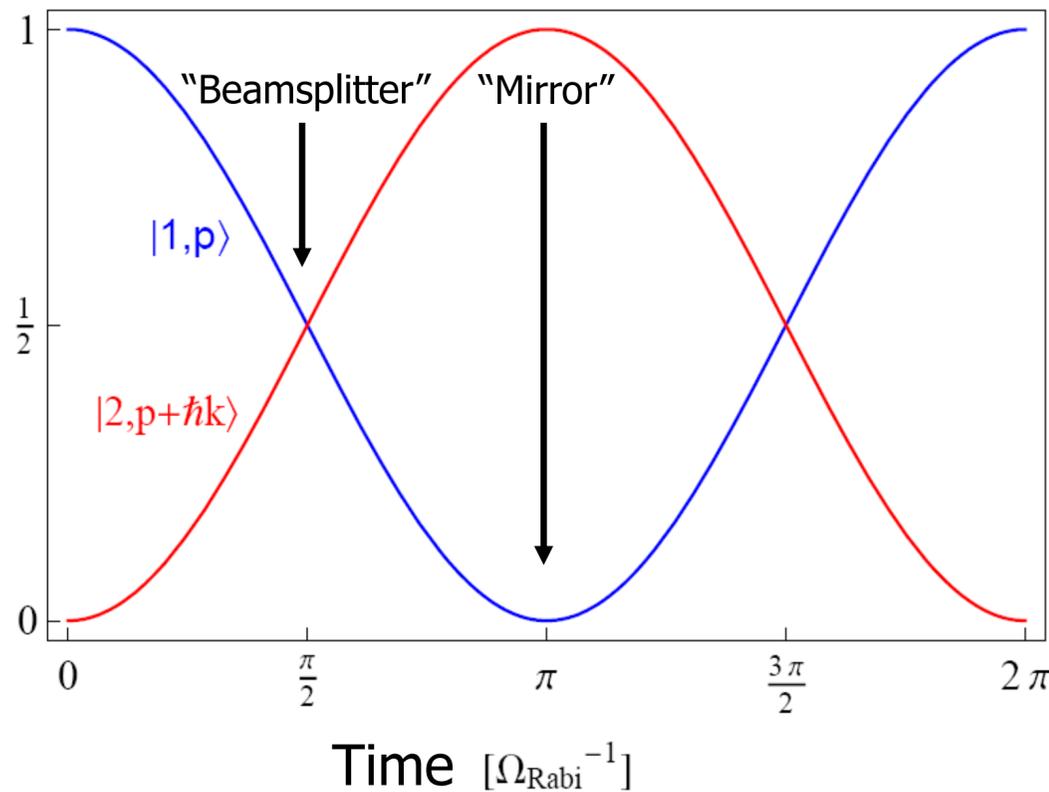
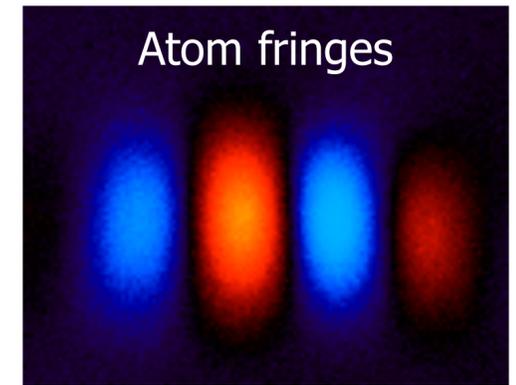
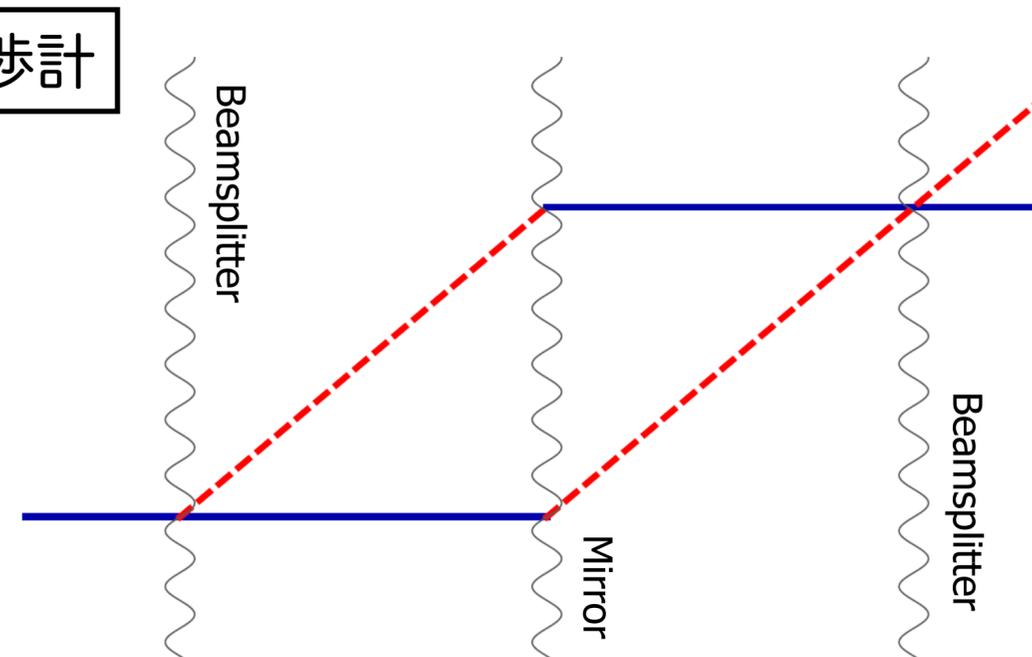
レーザー干渉計



基底(励起)状態 $|g\rangle(|e\rangle)$ の2準位原子に共鳴光を照射

→ エネルギー準位 $|g\rangle \rightarrow |e\rangle$ 、運動量 $p \rightarrow p + \hbar k$

原子干渉計

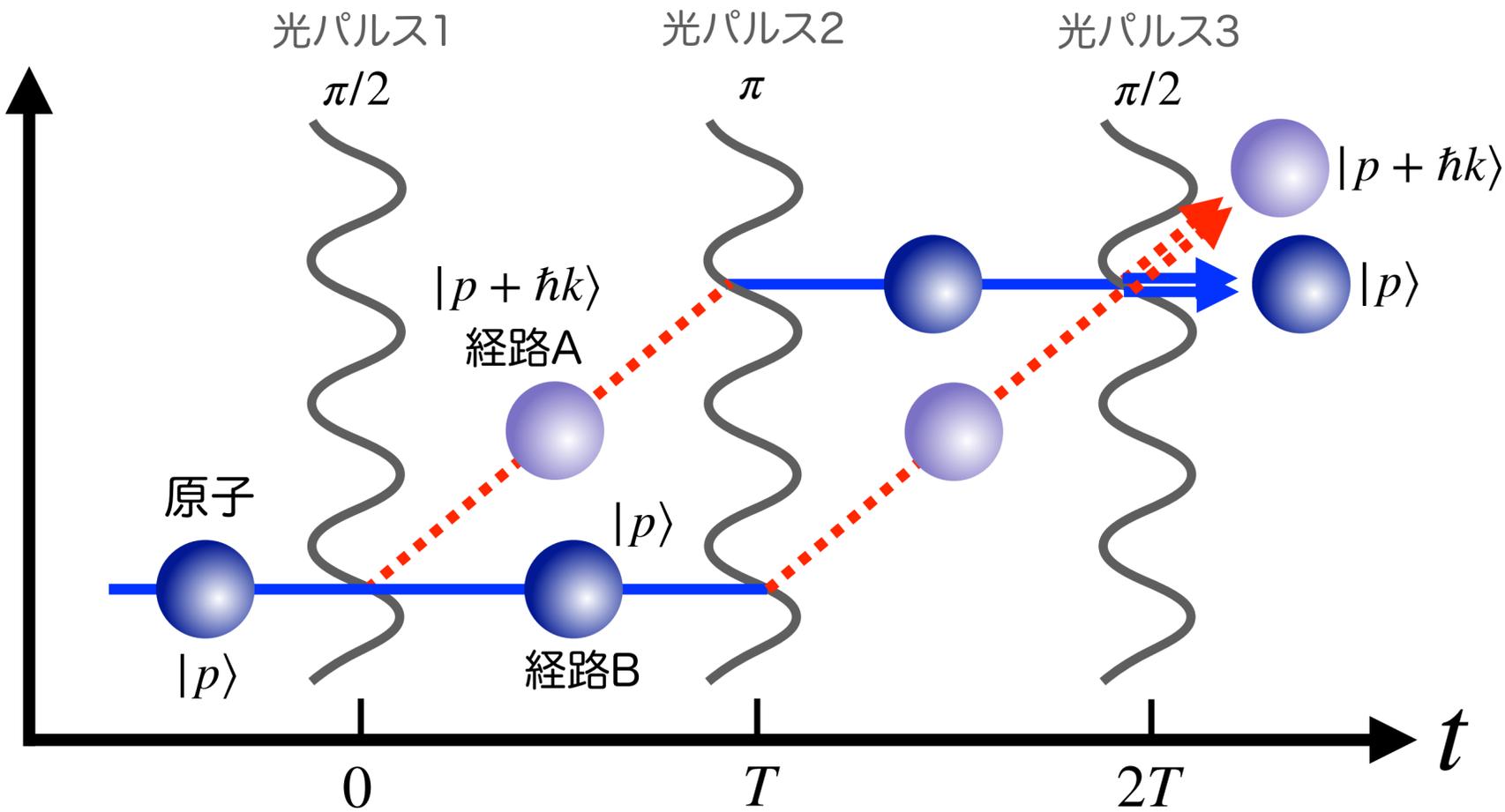


物質と光の役割が逆

時間幅 τ の光パルスを照射し、状態 $|g,p\rangle$ と $|e,p + \hbar k\rangle$ の間にラビ振動を起こす

重力波の検出：光パルス型原子干渉計

状態 $|p\rangle$ にある原子からスタート

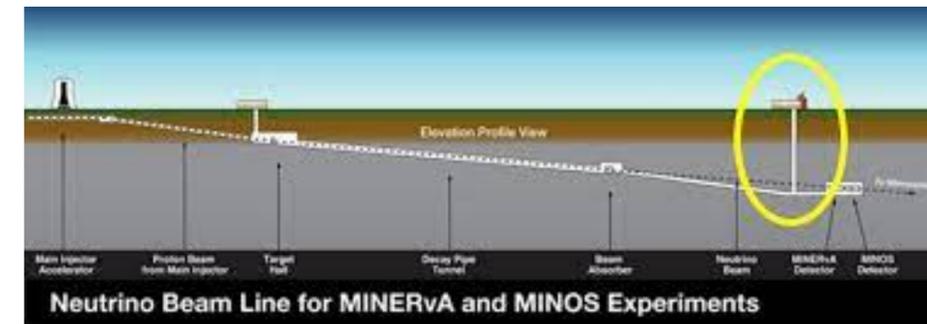
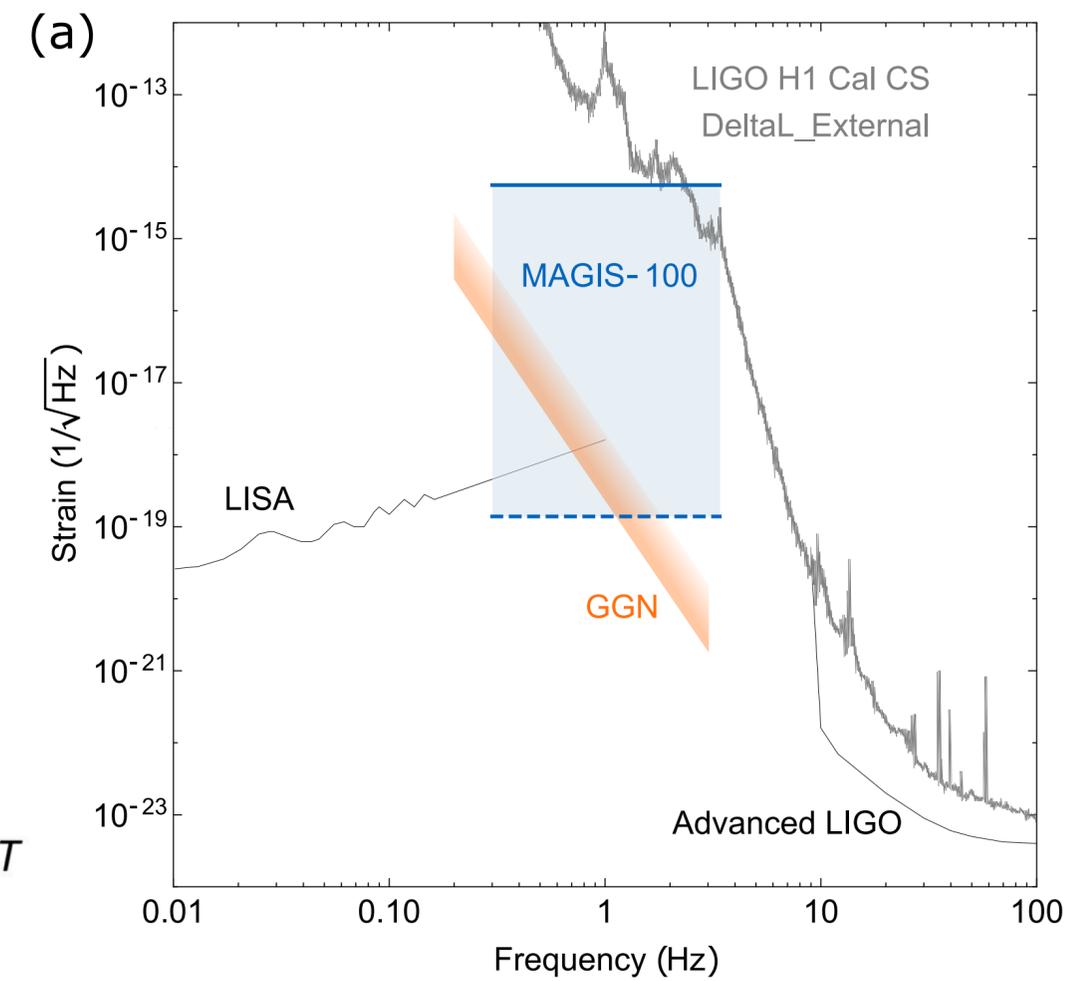
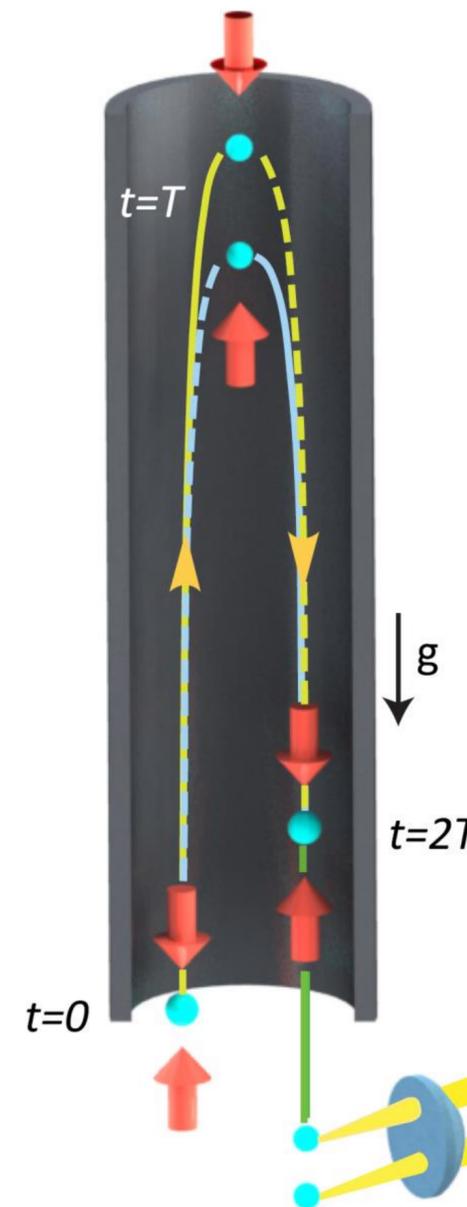


外力が働く環境では、二つの経路に行路差が生じる

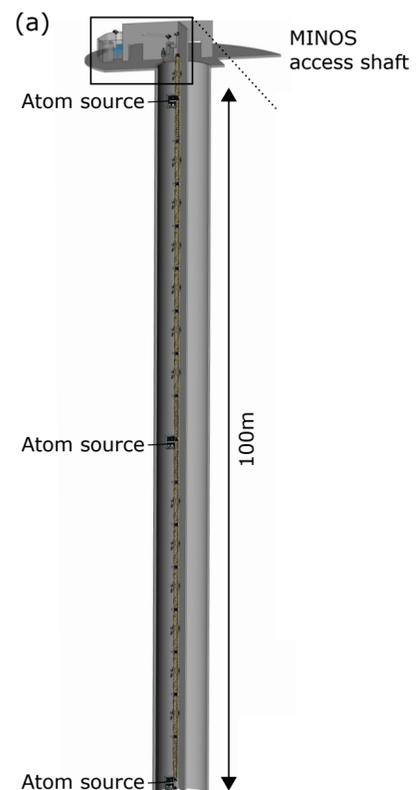
→ 状態 $|p\rangle$ を観測する確率: $P_p = \frac{1}{2}(1 + \cos \Delta\phi)$

$\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{path}} + \Delta\phi_L$: 2つの波束 $|p\rangle$ と $|p + \hbar k\rangle$ の位相差

$\Delta\phi_{\text{path}} = akT^2$ → 重力など外力の加速度 a に対して感度を持つ

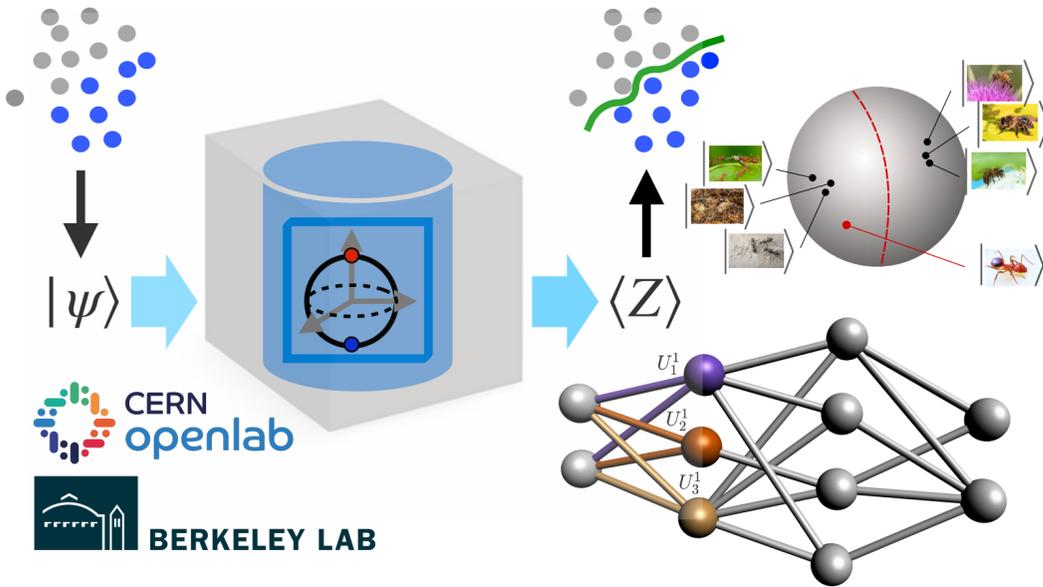


MAGIS-100実験 (Fermilab)



東京大学ICEPPの取り組み

量子アルゴリズム



量子機械学習アルゴリズムの開発

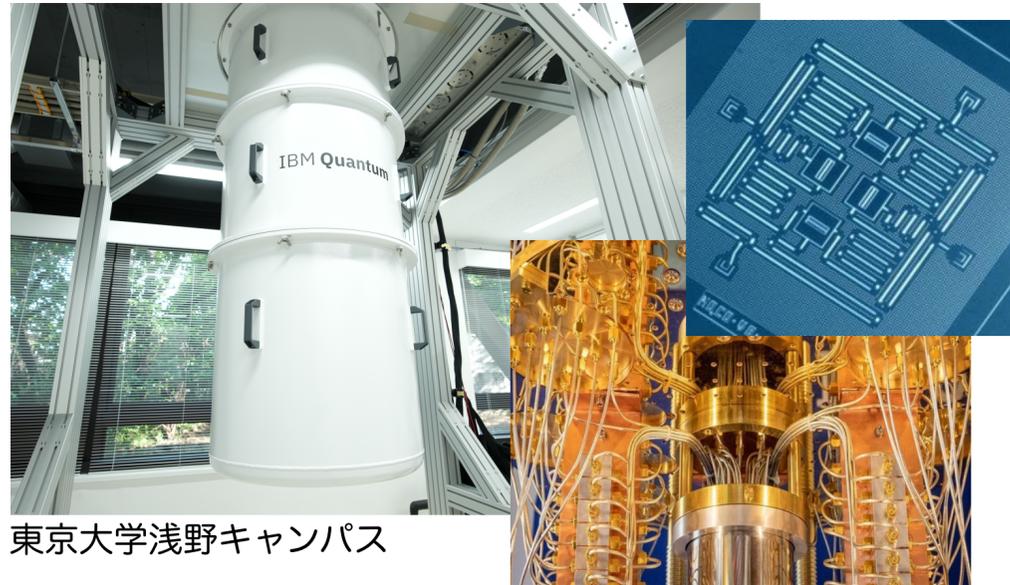
- ▶ 量子-古典ハイブリッド, 全量子
- ▶ 量子データの学習

回路設計・実装の最適化

- ▶ AQCELソフトウェア
- ▶ パルスによるカスタムゲート
- ▶ 擬似量子メモリ → [ICEPPページ](#)

- 量子加速の実現
- ビッグデータ対応の量子ML開発

量子ハードウェア



東京大学浅野キャンパス

IBM量子コンピュータ

- ▶ 高準位を用いる研究
- ▶ 2量子ビットゲートの高度化
→ [ハードウェア・テストセンター](#)

量子センサーへの展開

- ▶ 光量子との状態接続
- ▶ (将来的には)基礎物理への応用

- 量子コンピュータ (制御・インターフェース) の高度化

人材育成・共同研究

理学部1号館10階

量子ネイティブの育成 → [QNEC](#)

- ▶ 量子コンピューティング教材 ([ワークブック](#))
- ▶ 学部生・大学院生の教育

量子コンピュータの共同研究

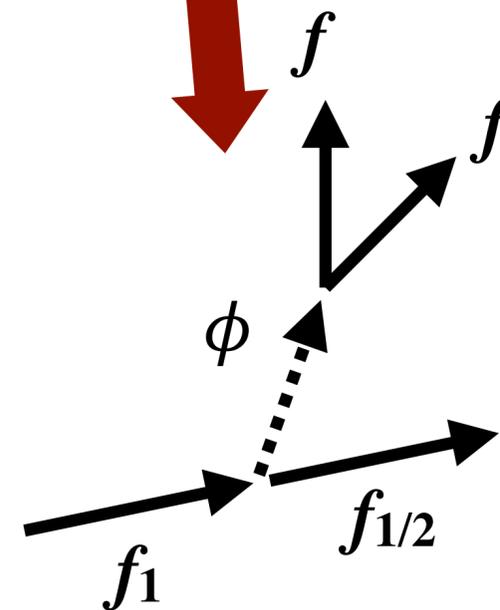
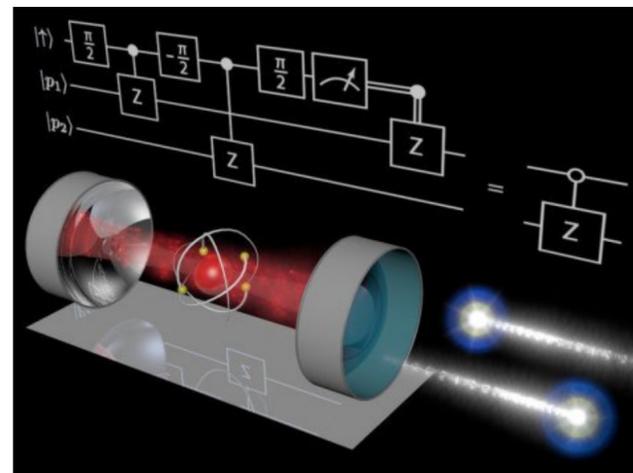
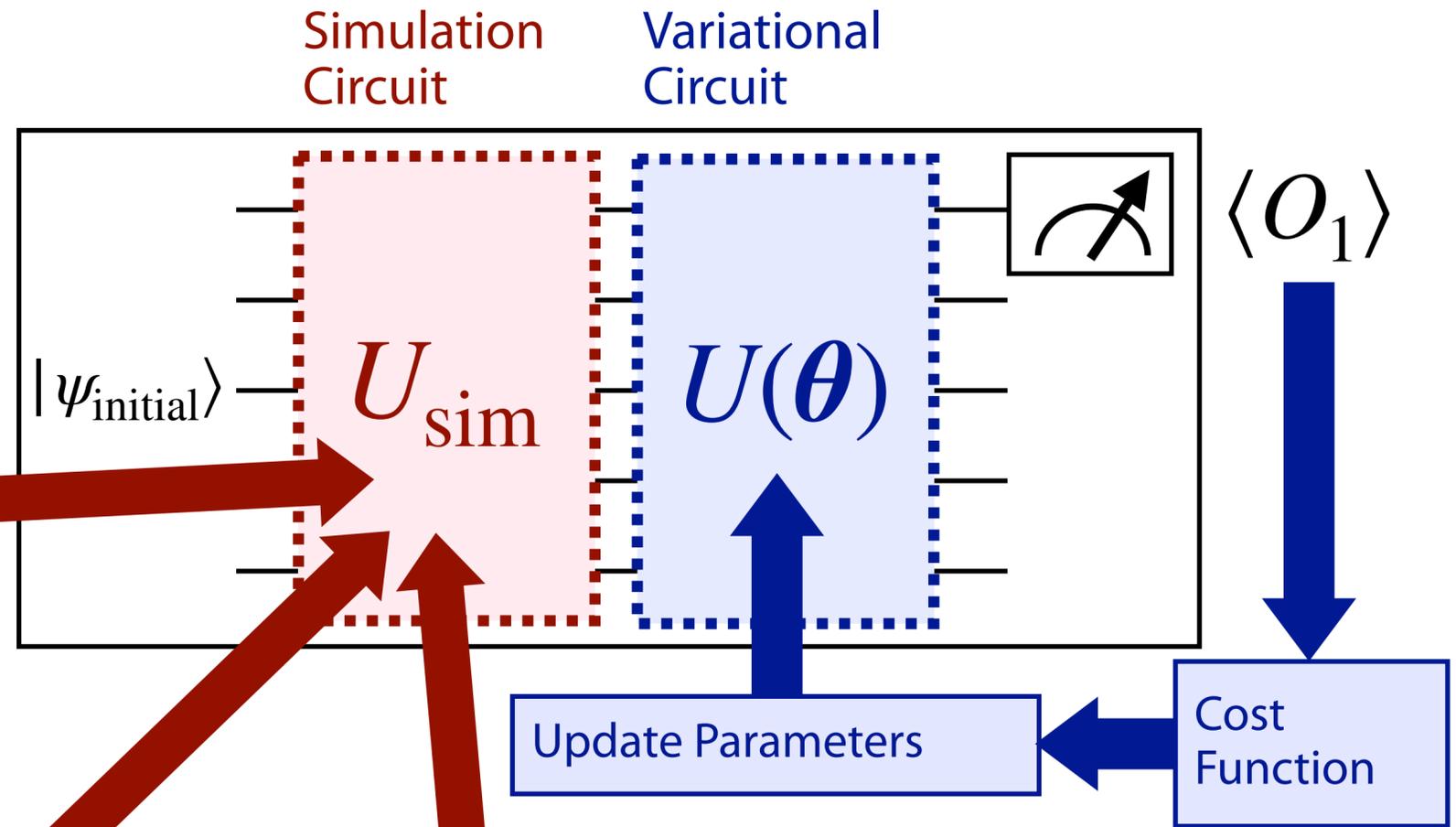
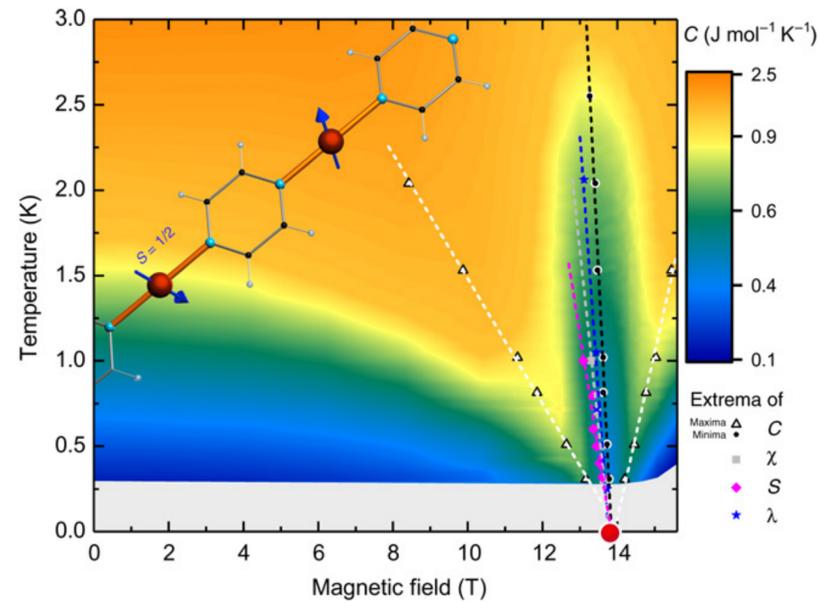
- ▶ 学術機関・IBM・民間企業との共同研究
→ [IBMQ-東京大学コラボレーションセンター](#)

- 次世代の人材育成
- 将来的な量子コンピュータの社会実装

バックアップ

量子コンピュータが優位になる可能性の一つ？

量子データの学習



超伝導量子ビットとは？

古典LC共振回路をベースに考える

$$\text{ハミルトニアン } H = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L} \quad \text{電荷 } Q, \text{ 磁束 } \Phi$$

$$\rightarrow H = 4E_C n^2 + \frac{1}{2} E_L \phi^2 \quad E_C = \frac{e^2}{2C} \quad E_L = \left(\frac{\Phi_0}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{L}$$

↑
運動エネルギー
に相当

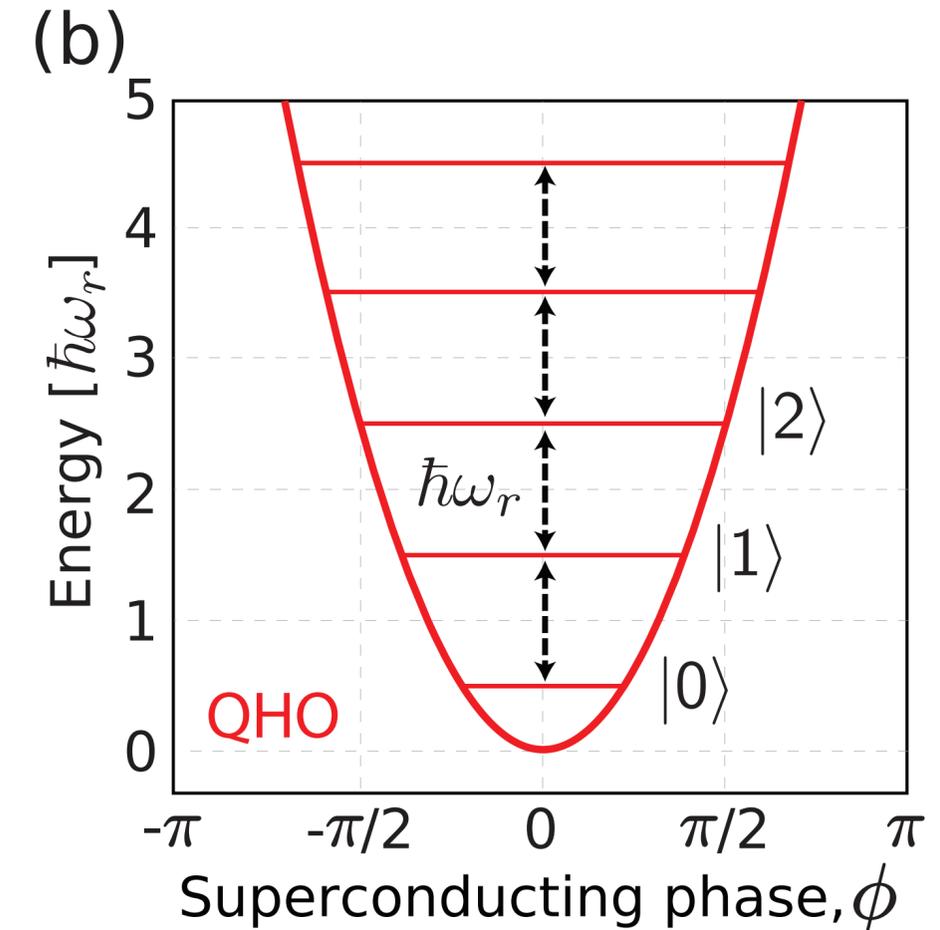
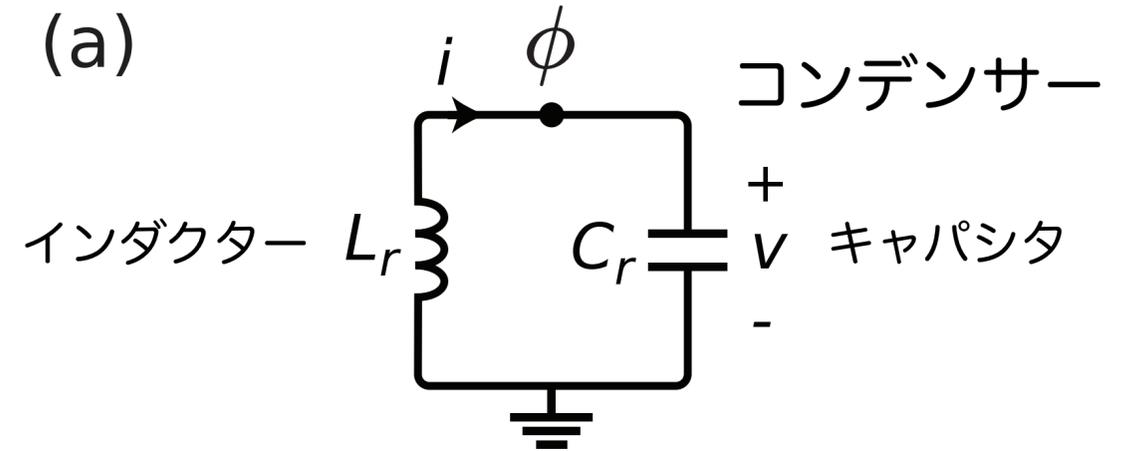
↑
位置エネルギー
に相当

量子化された調和振動子の形になっている

$$H = \hbar\omega_r \left(a^\dagger a + \frac{1}{2} \right) \quad a^\dagger (a) = \text{共振回路の励起モードを生成(消滅)する演算子}$$

→ 等間隔のエネルギー固有値を持つ

$\hbar\omega_r$ のエネルギーを与えると、いろいろな準位間で遷移が起こってしまう

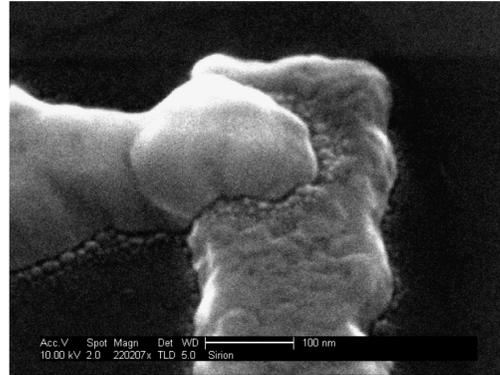
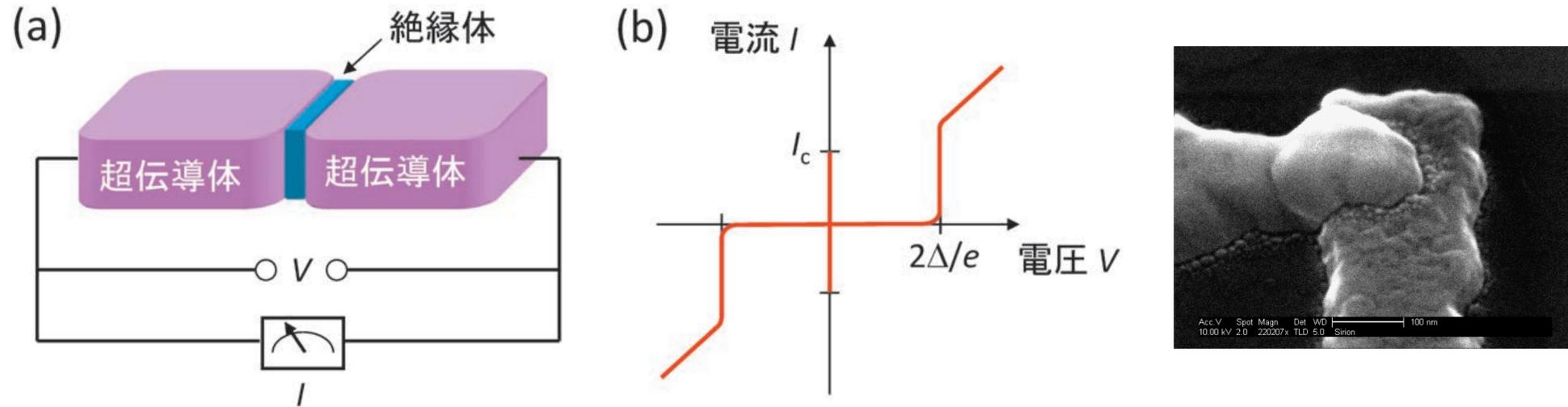


$$\omega_r = \sqrt{8E_L E_C} / \hbar = 1 / \sqrt{LC}$$

超伝導量子ビットとは？

非調和性を持ち込むことで、エネルギー準位の違いを区別する

線形インダクタンスを非線形の超伝導ジョセフソン接合に変える

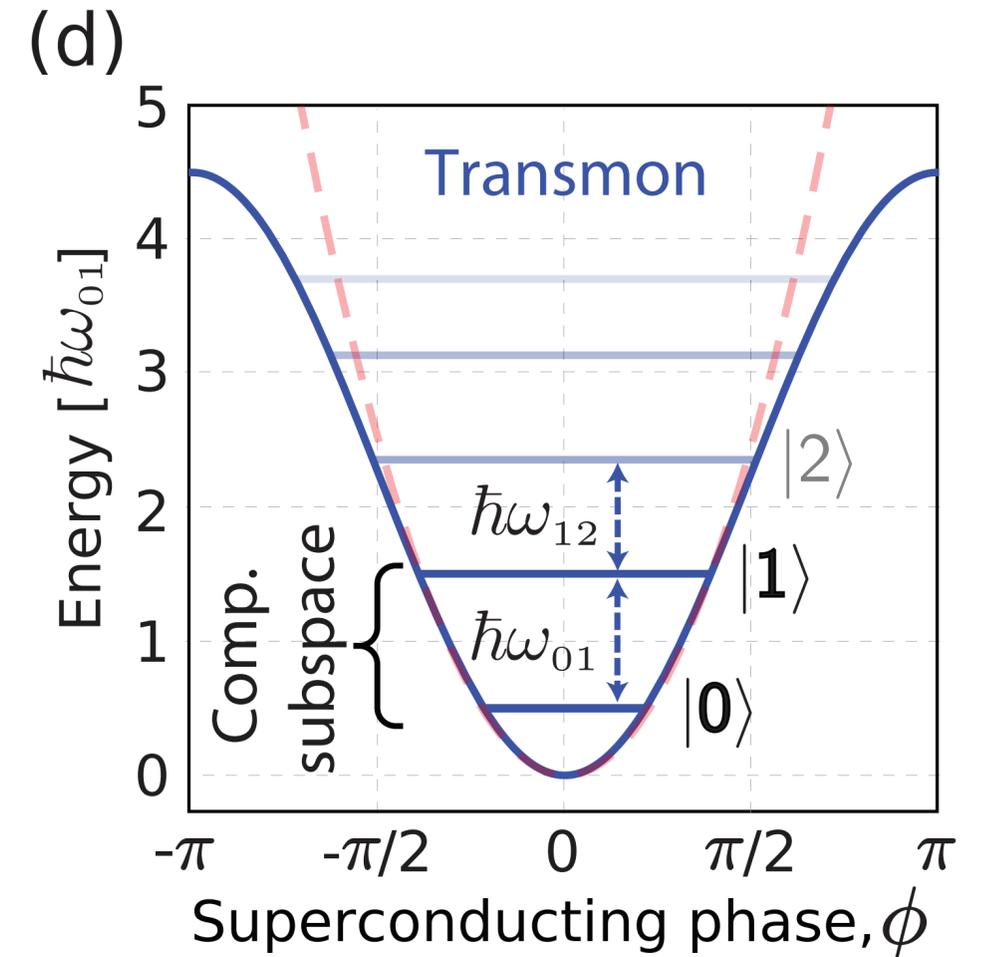
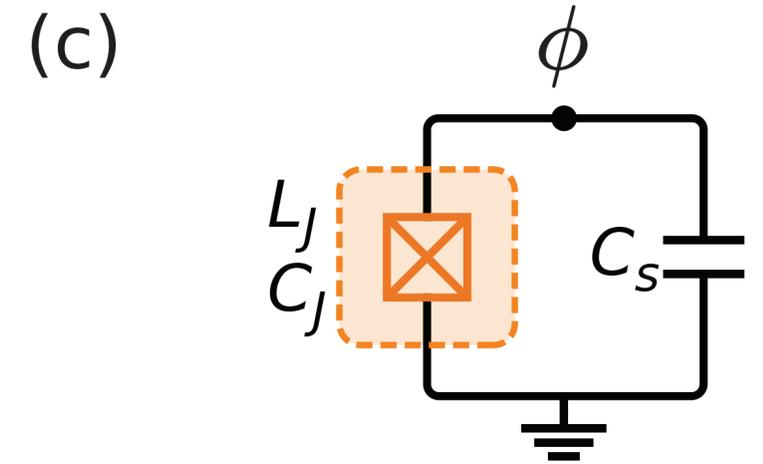


ジョセフソン接合を持つ共振回路系のハミルトニアン

$$H = 4E_C n^2 - E_J \cos \phi \quad E_C = \frac{e^2}{2(C_s + C_J)} \quad E_J = I_c \frac{\Phi_0}{2\pi}$$

→ $\alpha = \omega_{12} - \omega_{01} \sim 300$ MHzの非調和度(anharmonicity) が生まれる

$E_J \gg E_C$ 領域の超伝導量子ビットをトランズモン量子ビットと呼ぶ

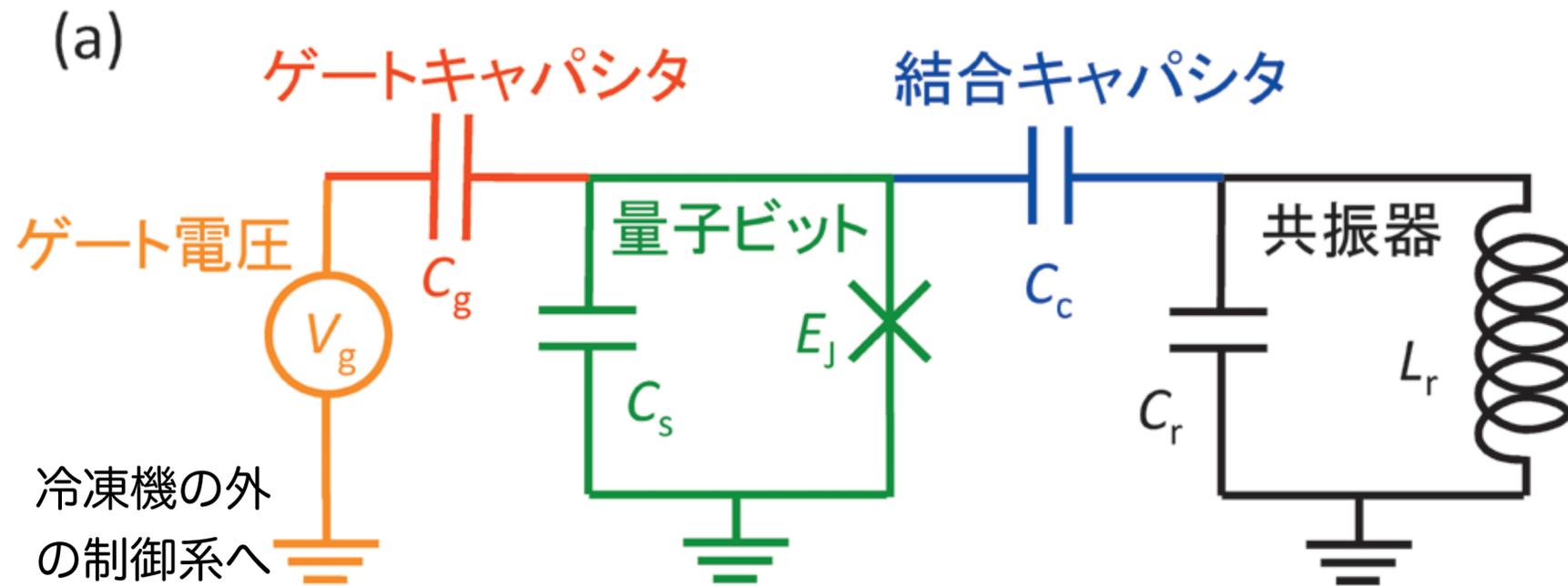


非調和度 $\alpha = \omega_{12} - \omega_{01} = -E_C/\hbar$

超伝導量子ビットの制御

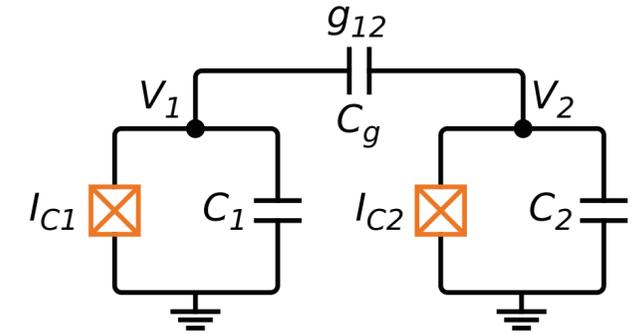
量子ビットをどのように操作して、所望の計算を行わせるか？

➡ 量子ビットをLC共振器に結合させる

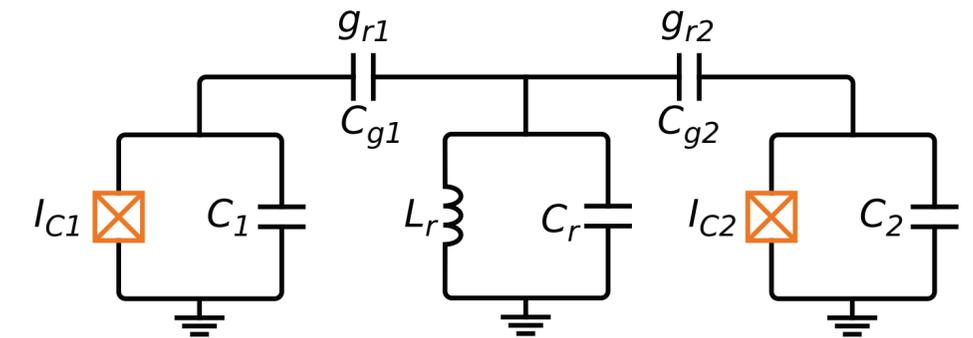


- 量子ビット+LC共振器系のハミルトニアンを解析的に求めて、離散準位や共鳴周波数を計算する
- その周波数で量子ビットを駆動し、基底間の遷移を操作する

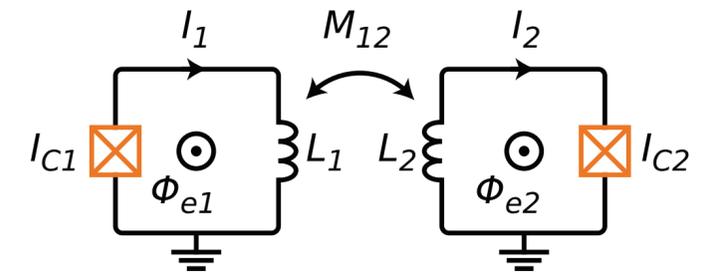
(a) Direct capacitive coupling



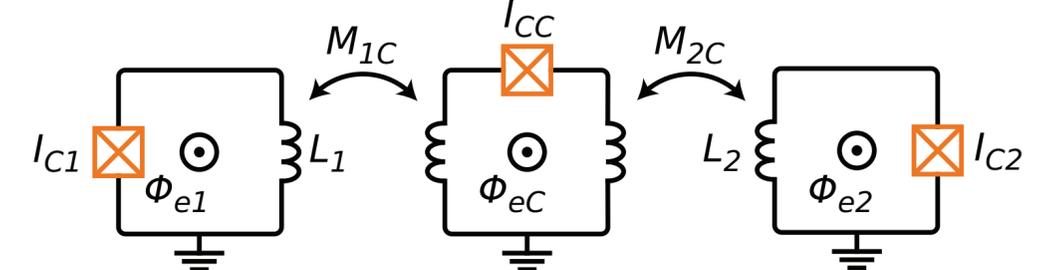
(b) Capacitive coupling via coupler



(c) Direct inductive coupling



(d) Inductive coupling via coupler

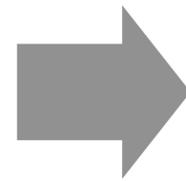
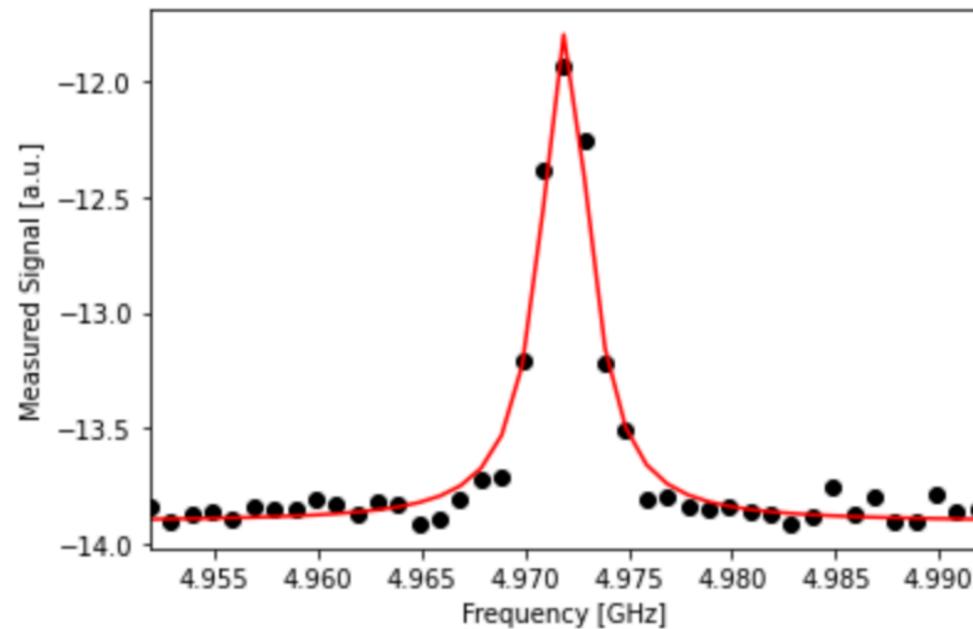


キャパシタやインダクターを介した結合など、異なるタイプの結合方法がある

超伝導量子ビットの制御

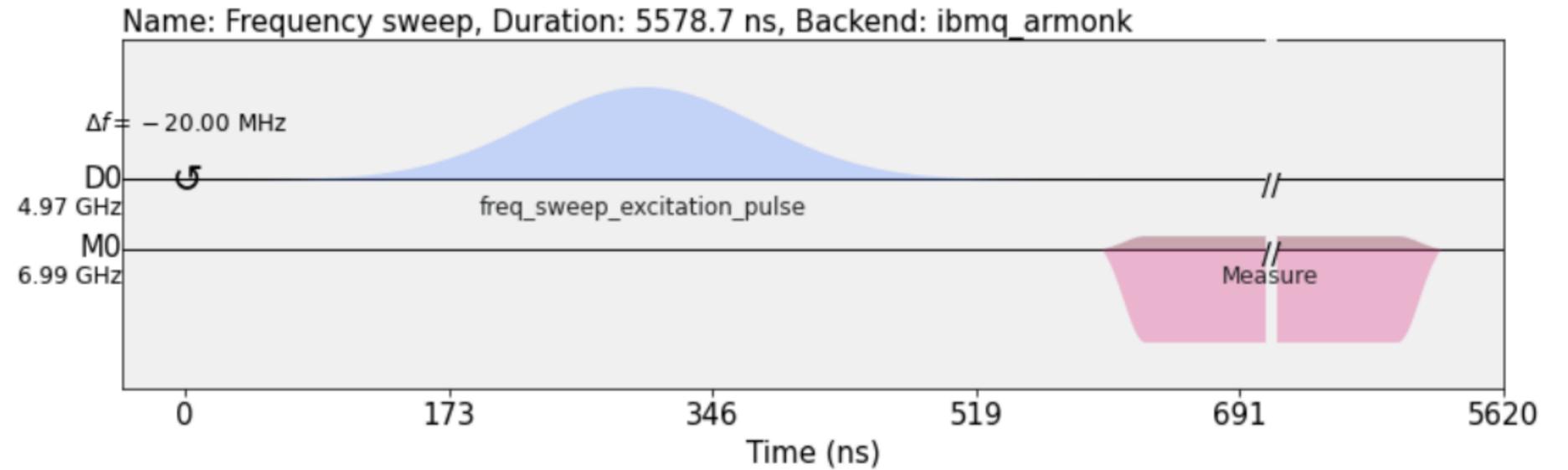
マイクロ波の周波数領域(~GHz)にあるパルス信号で、量子ビットの $|0\rangle$ - $|1\rangle$ 遷移や位相の操作を行う

マイクロ波制御の較正

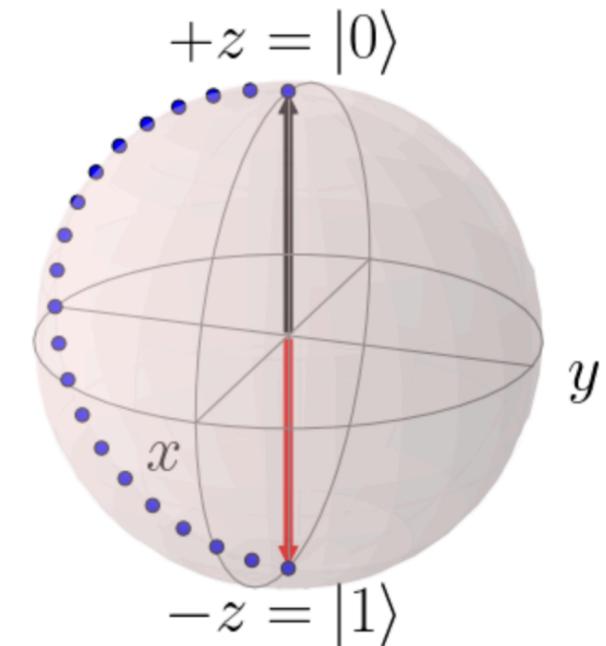
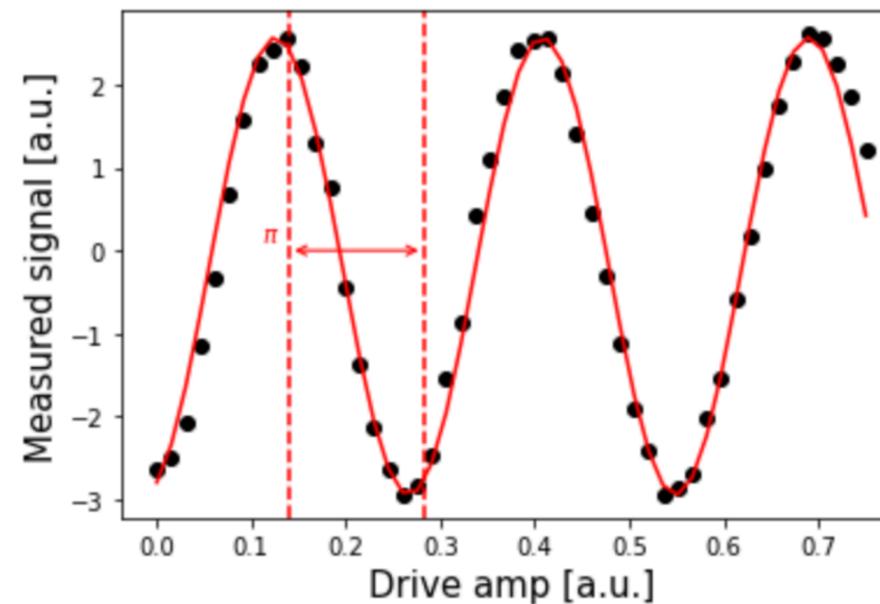


1. パルス波の周波数を掃引して、量子ビットの遷移周波数を求める

典型的なマイクロ波パルスの波形



ラビ振動



2. 遷移周波数を固定してパルス波の振幅を掃引し、 $|0\rangle$ - $|1\rangle$ 遷移に対応する信号強度を求める

超伝導量子ビットの制御

Local Oscillator(LO)信号 ω_{LO} と、(低周波成分 ω_{AWG} を含む)包絡線信号 $s(t)$ の波形を混合させて、量子ビットの駆動信号(周波数 ω_d)を作る

駆動電圧 $V_d(t) = V_0 v(t)$ とハミルトニアン

$$v(t) = s(t) (\underbrace{\cos \phi}_{\text{In-phase}} \sin(\omega_d t) + \underbrace{\sin \phi}_{\text{Out-of-phase}} \cos(\omega_d t))$$

In-phase信号 = I Out-of-phase信号 = Q

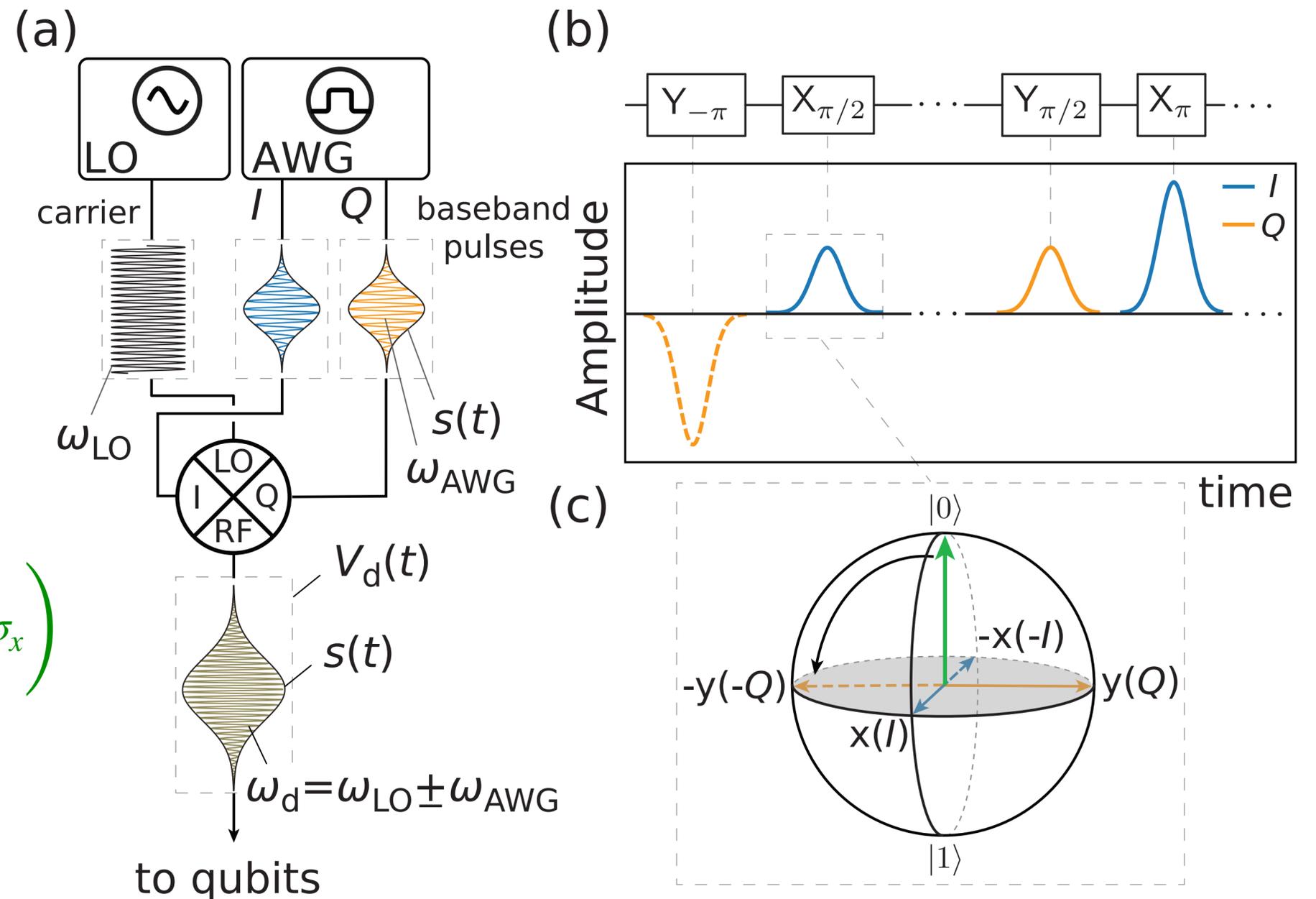
$$\tilde{H}_d(t) = -\frac{\Omega}{2} V_0 s(t) (I \sigma_x + Q \sigma_y)$$

対応するユニタリ演算 ($\phi = 0$ の場合)

$$U_d^{\phi=0}(t) = \exp(-i\tilde{H}_d(t)) = \exp\left(\left[\frac{i}{2}\Omega V_0 \int_0^t s(t') dt'\right] \sigma_x\right)$$

→ x 軸周りの回転ゲート $R_x(\theta(t))$ に相当

$$\text{回転角 } \theta(t) = -\Omega V_0 \int_0^t s(t') dt'$$



➡ マイクロ波パルスの面積(→ 回転角を決める)と位相(→ 回転軸を決める)を使って、量子ビットを操作する

超伝導量子ビットの読み出し

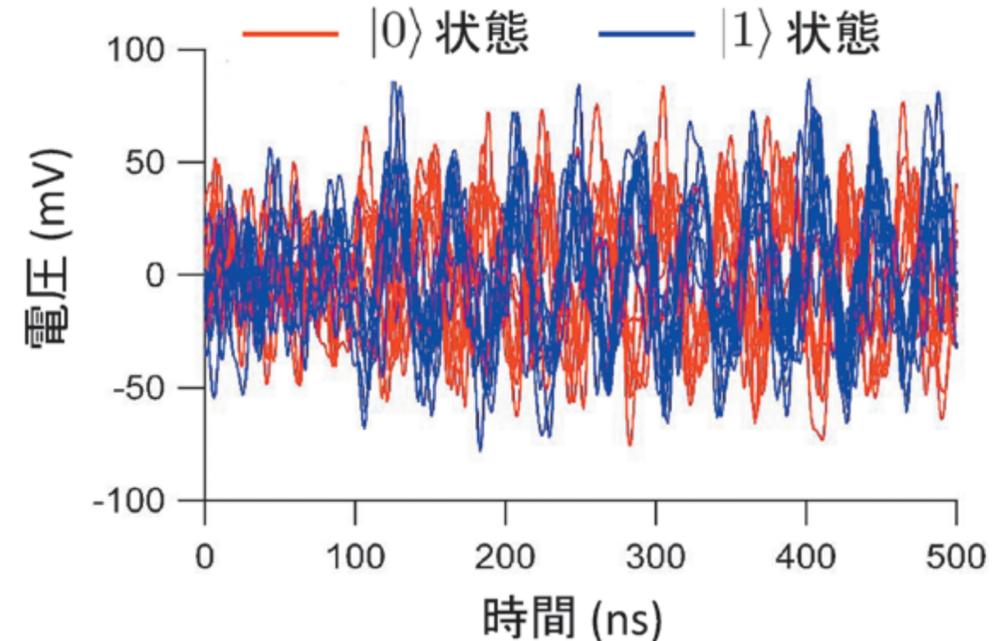
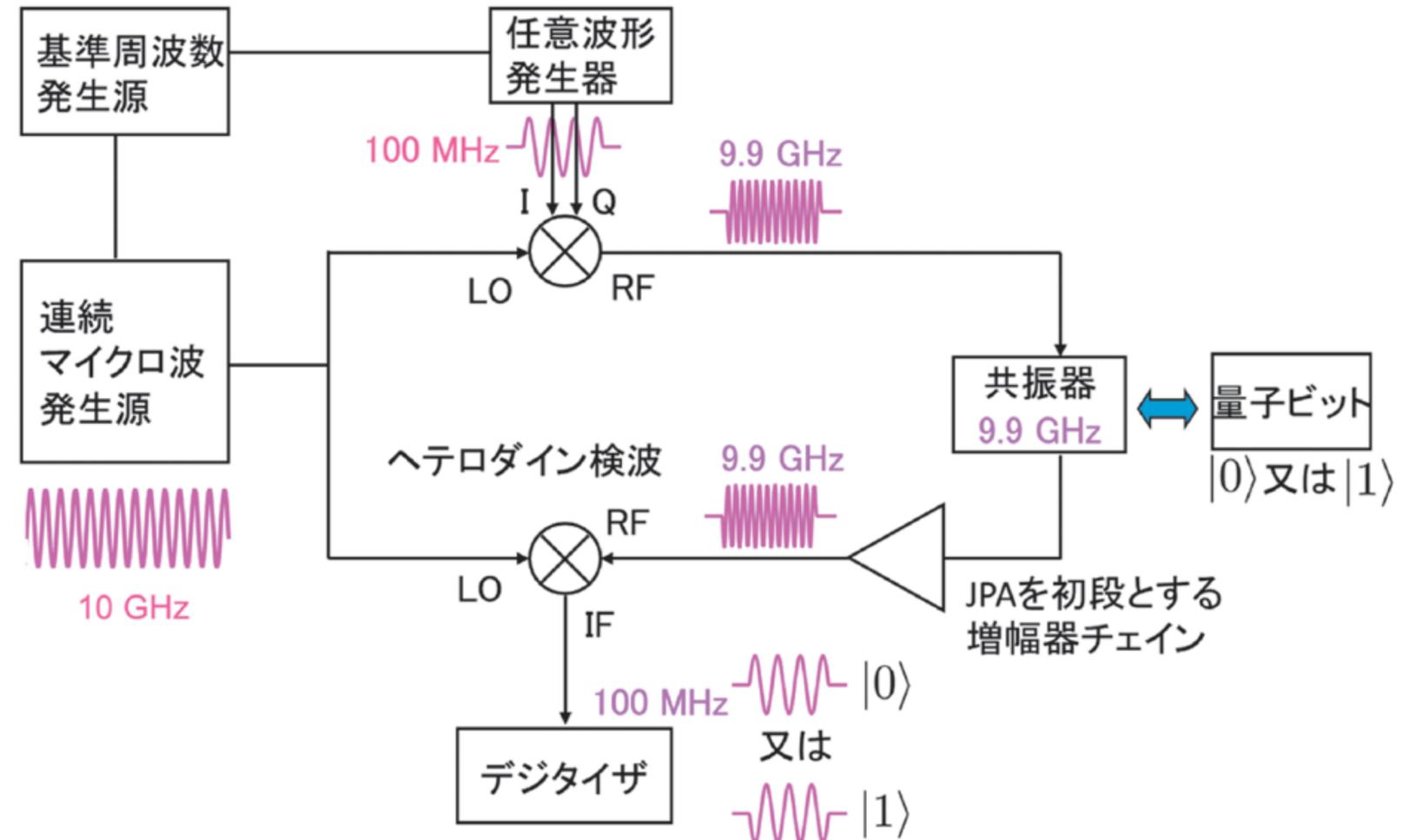
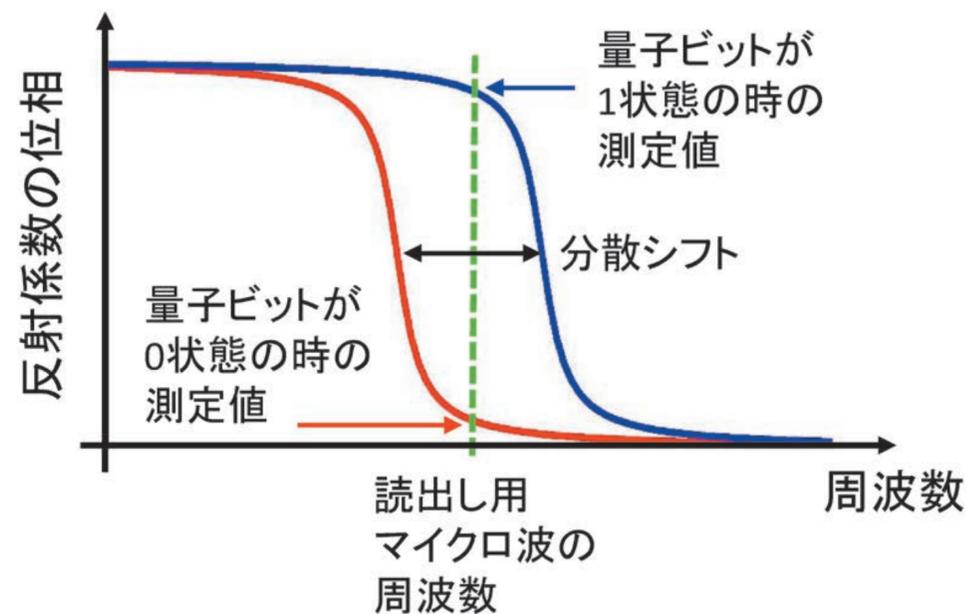
分散読み出しと呼ばれる方法が一般的

量子ビットと共振器の周波数差 $\Delta = |\omega_q - \omega_r|$ が結合の強さ g より十分大きい場合

$$H = (\omega_r + \chi\sigma_z) \left(a^\dagger a + \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \left(\omega_q + \frac{g^2}{\Delta} \right) \sigma_z$$

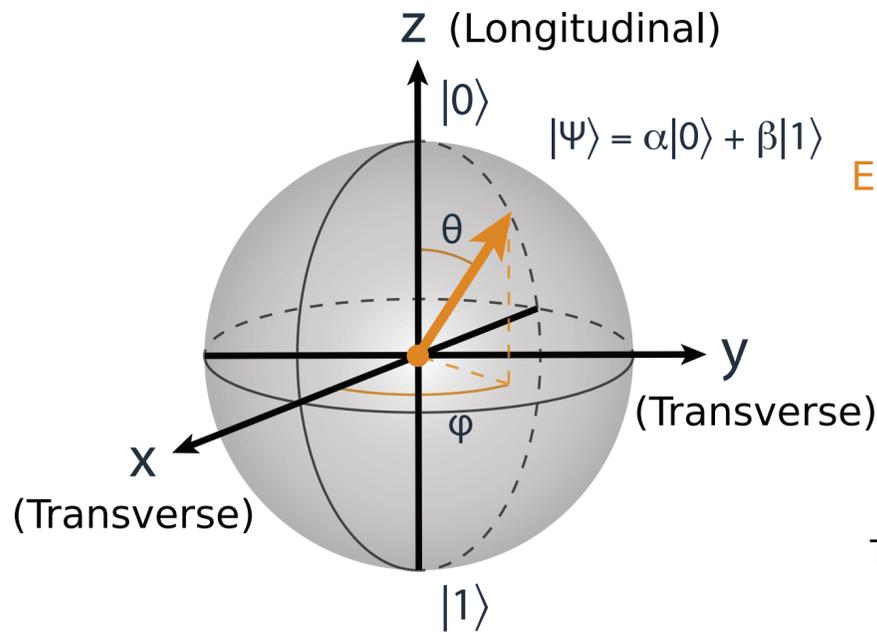
$\chi = \frac{g^2}{\Delta}$: 分散シフト
 $\frac{g^2}{\Delta}$: ラムシフト

量子ビットの状態に応じて、共振器の周波数がシフトする

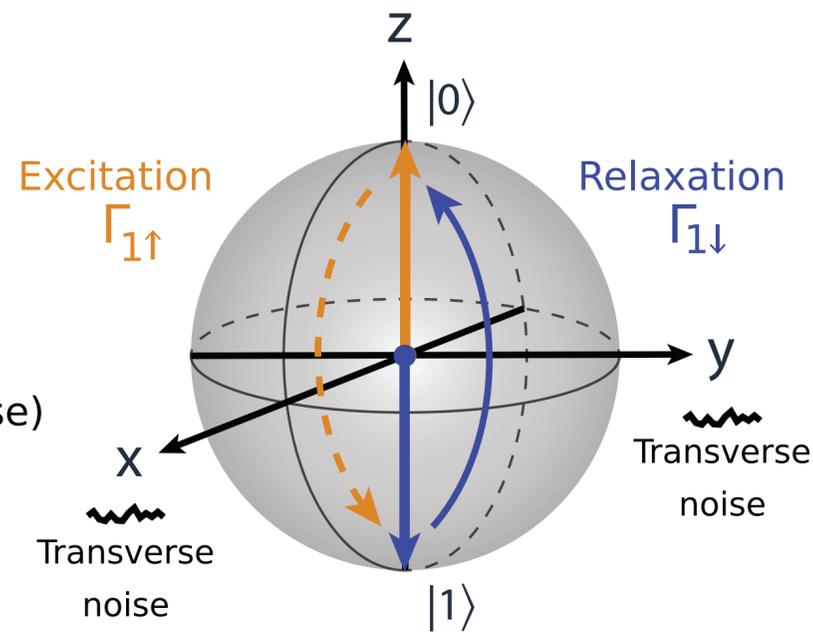


ノイズによるコヒーレンスの緩和

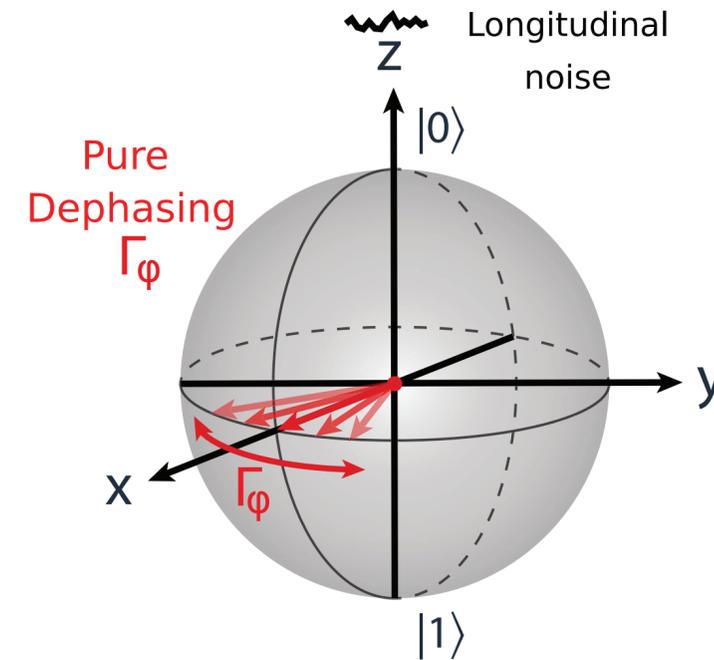
(a) Bloch sphere



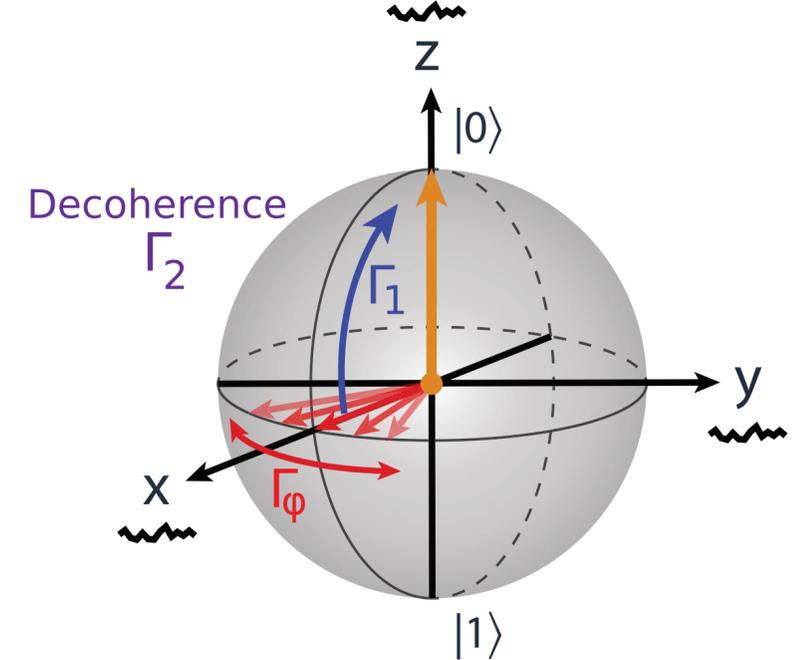
(b) Longitudinal relaxation



(c) Pure dephasing



(d) Transverse relaxation



2つのタイプのノイズがある

- **Systematicノイズ**：パルスのmiscalibrationなど（再現性があれば、原理的には補正可能）
- **Stochasticノイズ**：熱雑音や、電場・磁場の乱雑な揺らぎなど

$$\Gamma_1 \equiv \frac{1}{T_1} : \text{縦緩和レート}$$

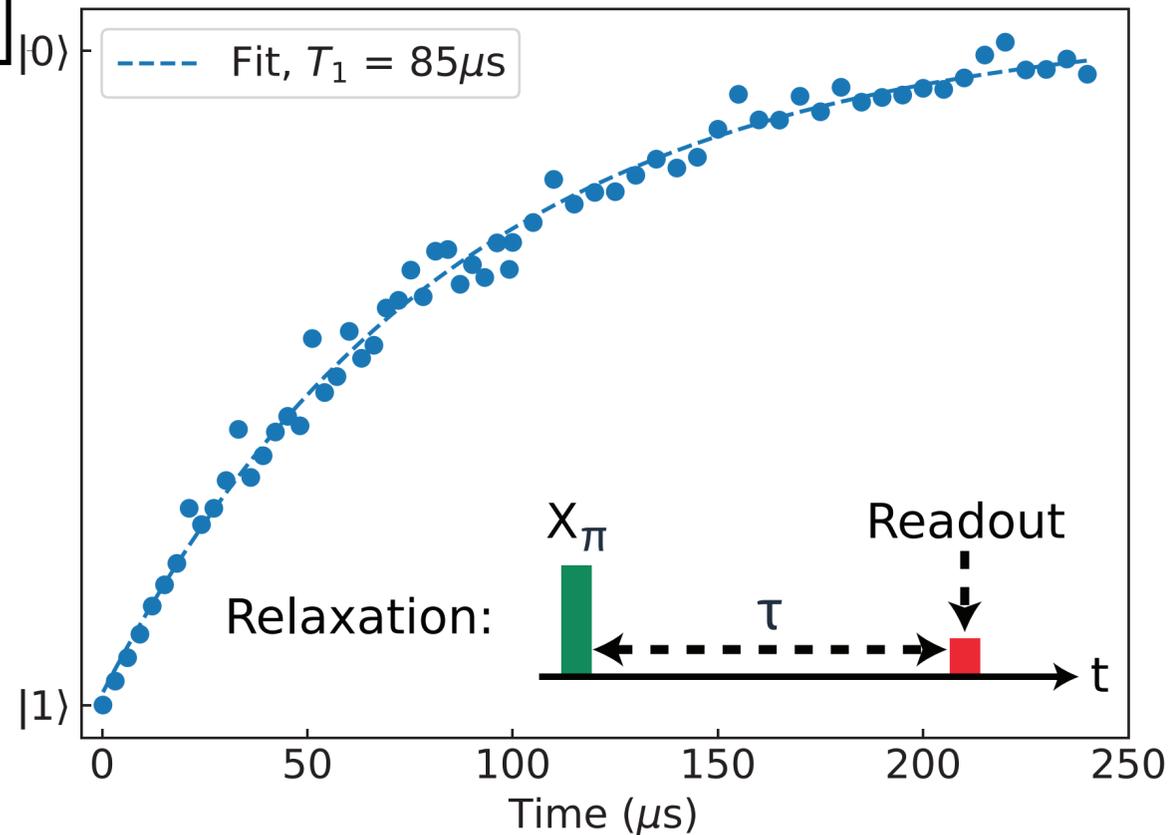
$$\Gamma_2 \equiv \frac{1}{T_2} = \frac{\Gamma_1}{2} + \Gamma_\phi : \text{横緩和レート}$$

典型的なStochasticノイズ源：

- 電荷ノイズ
- 磁束由来のノイズ
- 共振器中の光子数揺らぎ
- 準粒子（超伝導クーパー対からの電子）など

緩和時間の測定

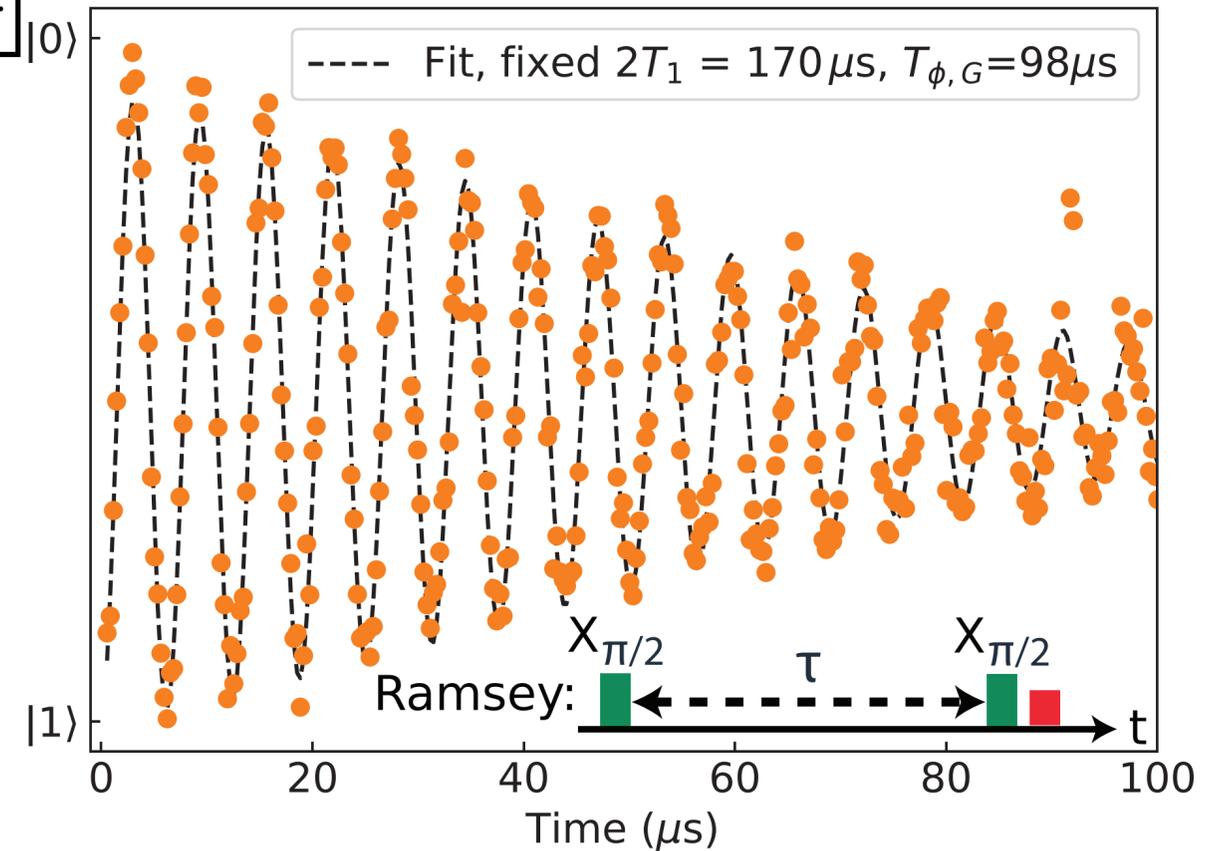
T_1 の測定



$|0\rangle$ に初期化された量子ビットを $\pi (= 180^\circ)$ パルスで
 $|1\rangle$ に遷移させ、時間 τ の後に状態を測定する

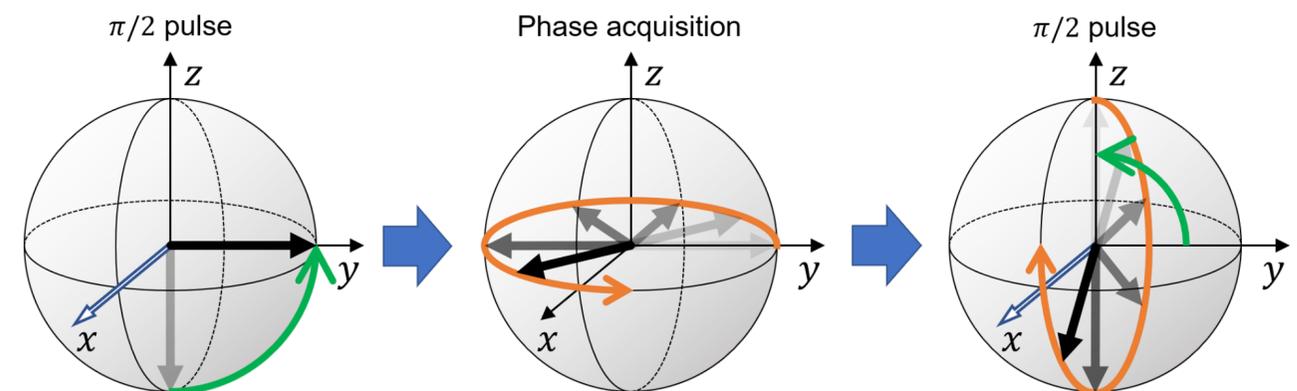
ラムゼー干渉と呼ばれる

T_2 の測定



$\pi/2 (= 90^\circ)$ パルスで $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の重ね合わせ状態を作り、
 時間 τ の後に別の $\pi/2$ パルスで z 軸に戻す

→ 位相シフトを基底(励起)状態の占有確率として測定



その他の量子計算技術

- 光**
- 特殊な環境を必要としない (常温でも長い T_1/T_2 を持つ)
 - 高周波数の光を使うことで高速な演算が可能

- 捕獲イオン**
- 外界から孤立した安定な量子系を作りやすい (真空中に浮遊、レーザーで冷却)
 - 長い T_1/T_2 を持つ

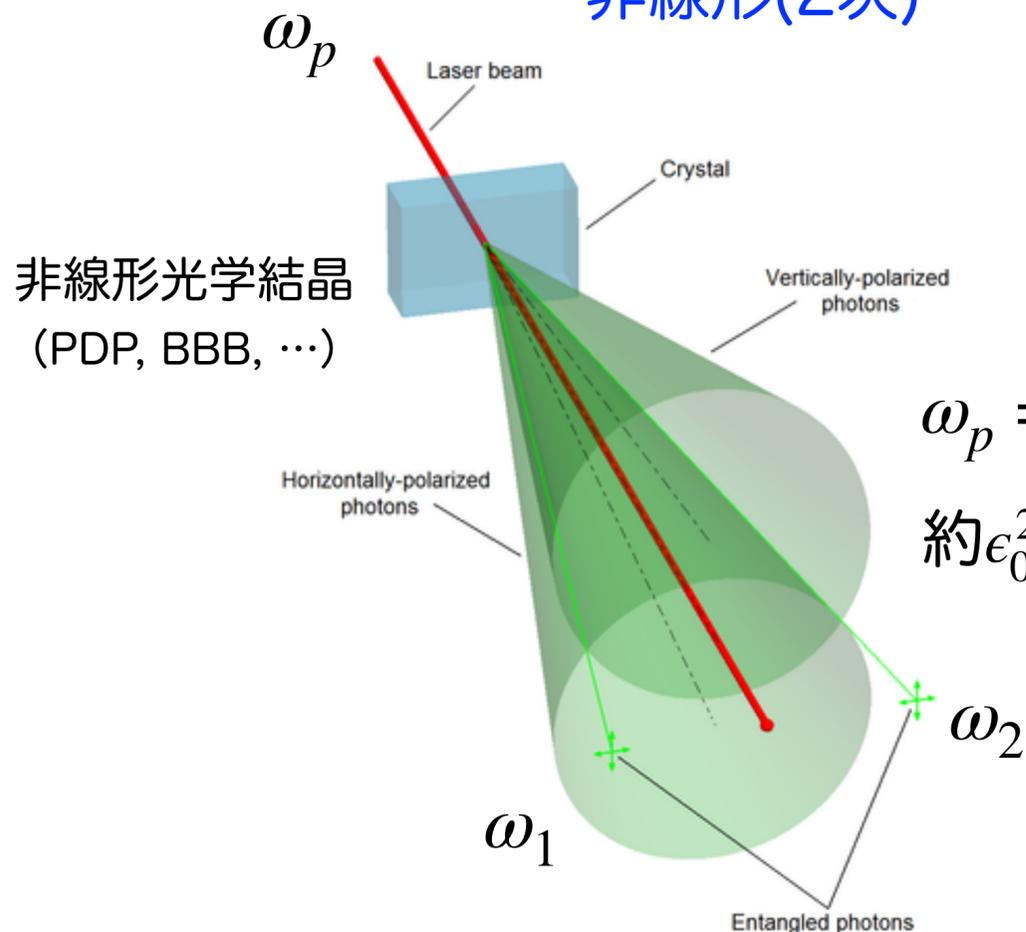
偏光量子ビット、経路量子ビットなど

自発パラメトリック下方変換を使った状態生成

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 + \dots$$

非線形(2次)

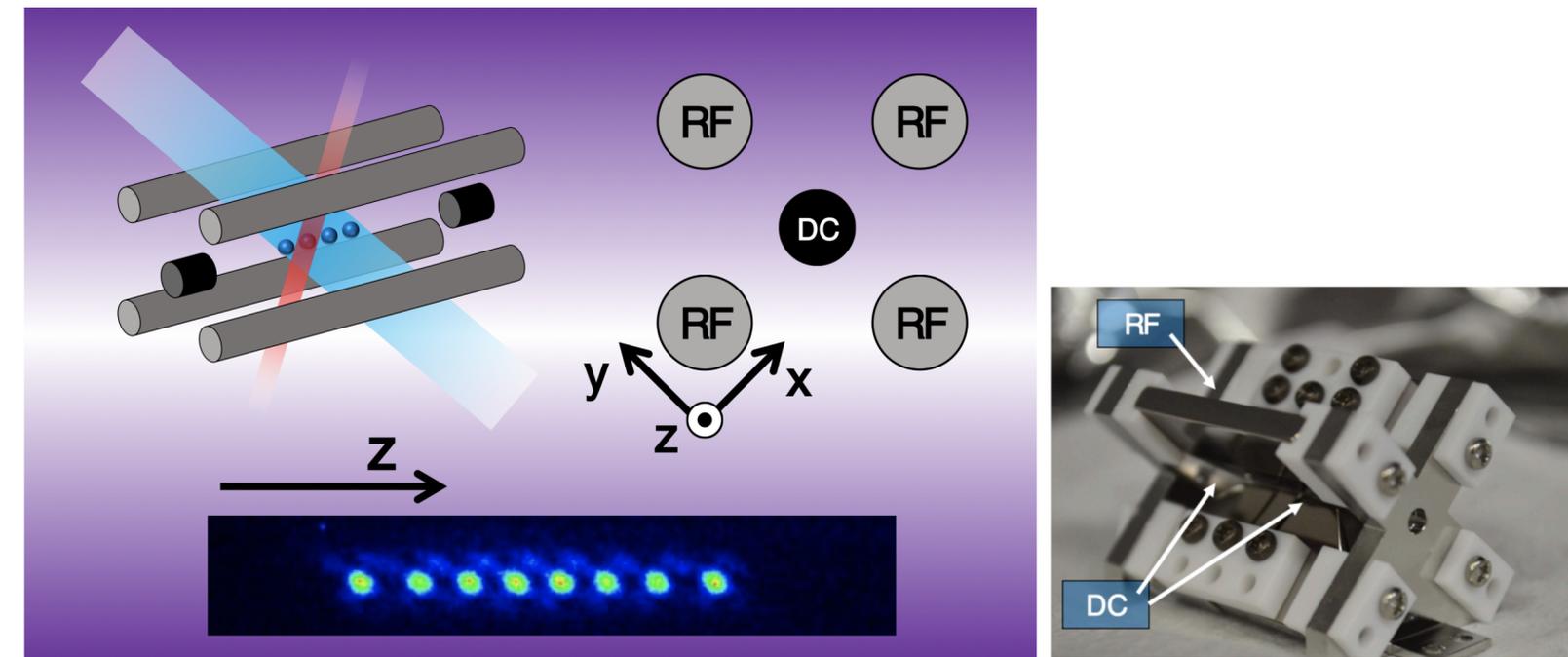
ϵ_0 : 真空の誘電率
 $\chi^{(i)}$: 電気感受率



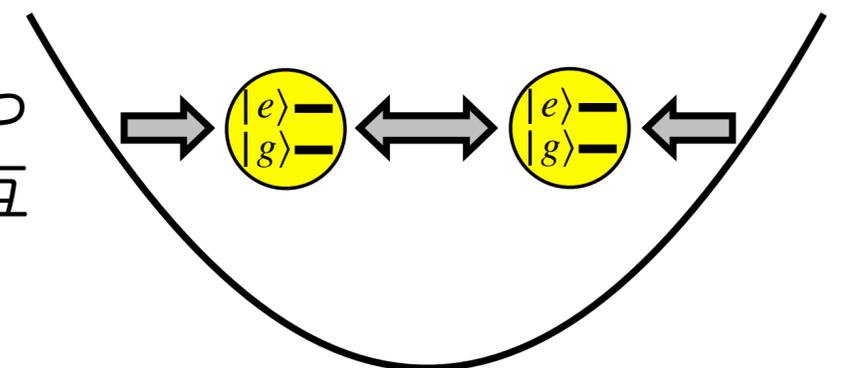
$$\omega_p = \omega_1 + \omega_2$$

約 ϵ_0^2 の確率で光子を生成

量子ビット: イオンのエネルギー準位(内部状態)
イオン自体の振動モード(外部状態)も量子化される



振動量子の自由度を使って、量子ビット間の相互作用を実現する



超伝導量子ビット

- A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits ([arXiv:1904.06560](#))
- Introduction to Quantum Computing and Quantum Hardware ([Qiskit Lecture Course](#))
- Learn Quantum Computation using Qiskit ([Qiskit Textbook](#))
- 超伝導回路を用いた量子計算機の基礎知識 ([日本物理学会誌](#))

光量子、捕獲イオン

- 量子情報の物理 ([Amazon](#))
- 量子技術教育プログラム QEd ([ウェブサイト](#))
- Qmedia ([ウェブサイト](#))

量子センシング

- Quantum sensing ([arXiv:1611.02427](#))
- 量子センシングハンドブック ([Amazon](#))
- Searching for Dark Matter with a Superconducting Qubit ([arXiv:2008.12231](#))
- Atom interferometry for fundamental physics and gravitational wave detection ([CERN Colloquium](#))