



O-LEAP 人材育成プログラム  
量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム

*Hamiltonian*

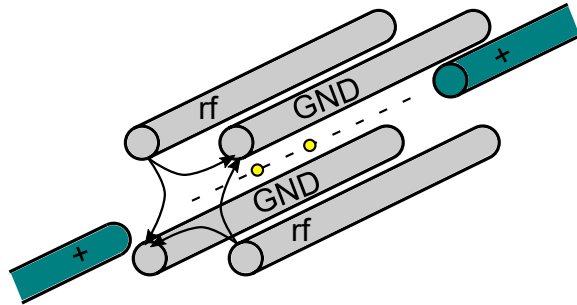
# イオントラップ 第二部

---

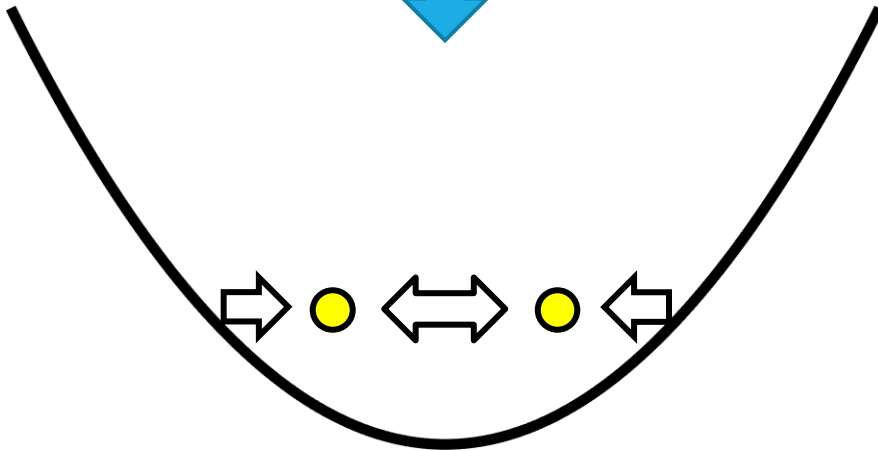
沖縄科学技術大学院大学  
高橋優樹

$|0\rangle + |1\rangle$

# 6. 量子ビット間相互作用

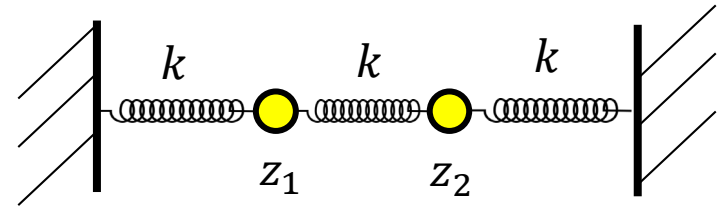


軸方向の運動



トラップによる閉じ込め+クーロン反発

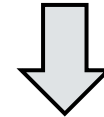
ばねで繋がれた質点の連成振動



$$m \frac{d^2}{dt^2} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2k & k \\ k & -2k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix}$$

座標変換:

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix}$$





$$m \frac{d^2}{dt^2} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k & 0 \\ 0 & -3k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}$$

独立した2つの調和振動子

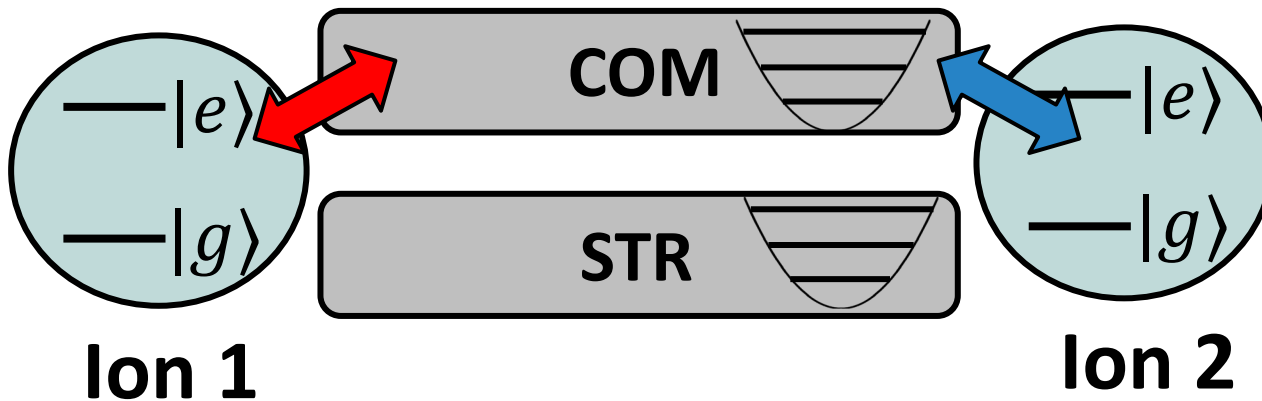
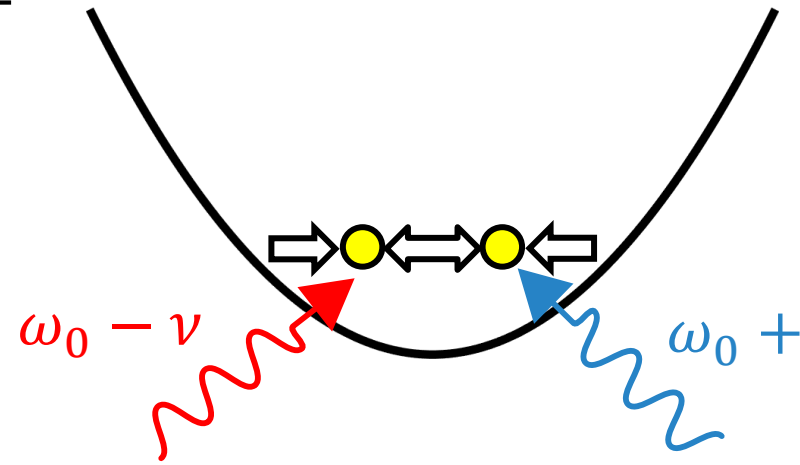
# 6. 量子ビット間相互作用

- 集団振動

COM:   $q_{\text{COM}} = \frac{z_1 + z_2}{\sqrt{2}}$

Stretch:   $q_{\text{STR}} = \frac{z_1 - z_2}{\sqrt{2}}$

$$\nu_{\text{COM}} = \nu$$
$$\nu_{\text{STR}} = \sqrt{3}\nu$$



集団振動モードを量子ビットをつなげる補助系（量子バス）として利用.

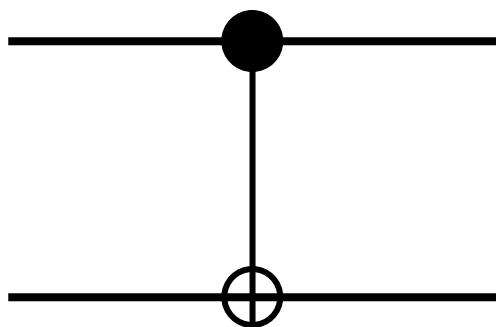
# 6. 量子ビット間相互作用

- 量子論理ゲートの実装
  - Cirac-Zoller ゲート
    - 制御Zゲート
    - サイドバンド遷移パルスのシーケンスで実現
    - 振動基底状態までの冷却が必要
    - $|g\rangle$ と $|e\rangle$ 以外の補助準位が必要
  - Mølmer-Sørensen ゲート
    - 振動の初期状態に依存しない
    - 状態依存力による幾何学的位相を利用
    - 単一パルスの照射で実現可
    - 複数振動モードを同時に利用する方法に拡張可
    - 現在の量子情報実験で広く使われる

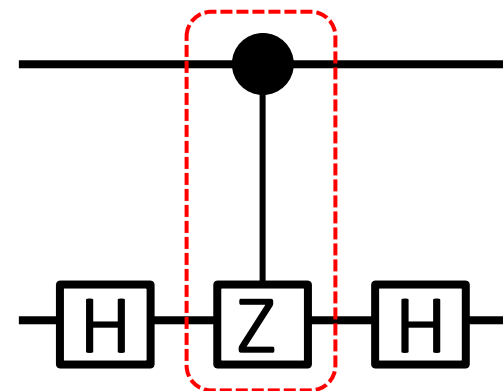
# 6. 量子ビット間相互作用

- Cirac-Zoller ゲートの実装：その1

制御ノットゲート



=



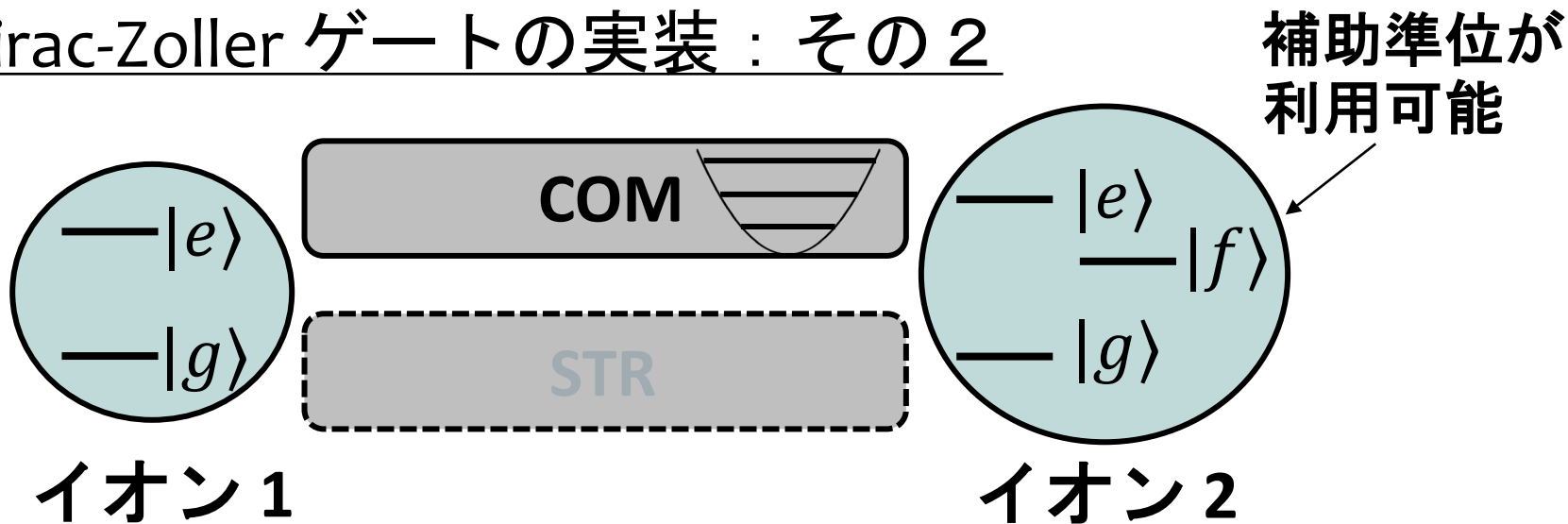
制御Zゲート :  $C_Z =$

$$\begin{matrix} & |gg\rangle & |ge\rangle & |eg\rangle & |ee\rangle \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} & |gg\rangle \\ & |ge\rangle \\ & |eg\rangle \\ & |ee\rangle \end{matrix}$$

$\sigma_z$

# 6. 量子ビット間相互作用

- Cirac-Zoller ゲートの実装：その2



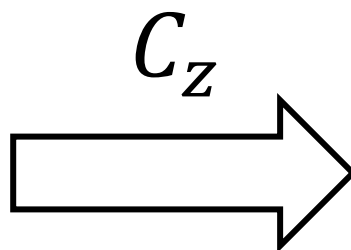
ion1 ion2 COM

$$|gg0\rangle$$

$$|ge0\rangle$$

$$|eg0\rangle$$

$$|ee0\rangle$$



$$|gg0\rangle$$

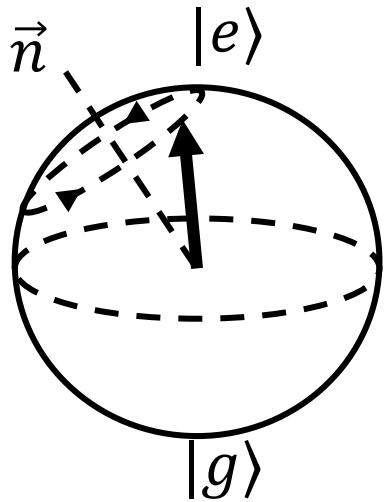
$$|ge0\rangle$$

$$|eg0\rangle$$

$$-|ee0\rangle$$

# 6. 量子ビット間相互作用

- Cirac-Zoller ゲートの実装：その3



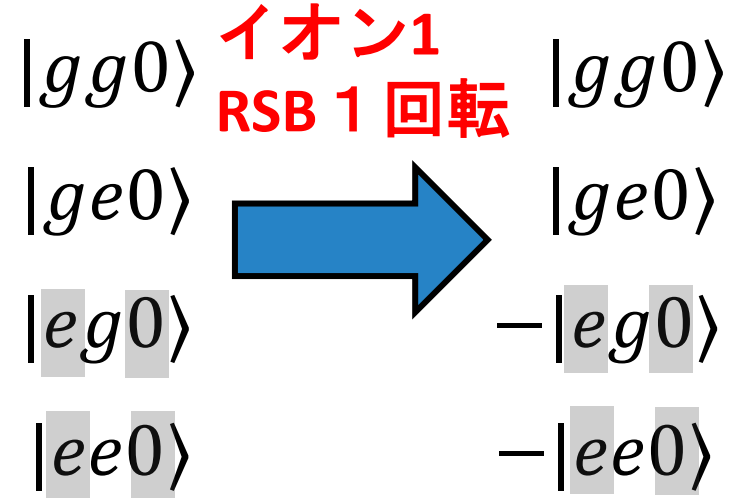
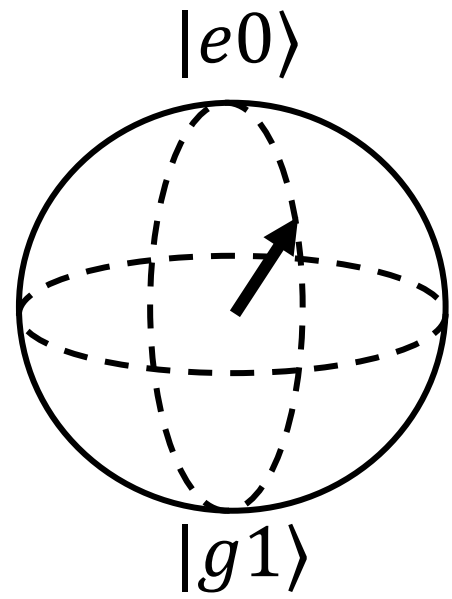
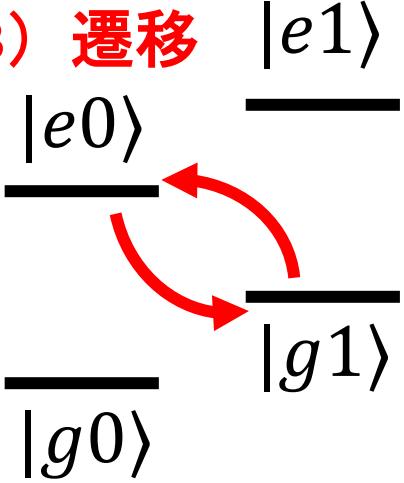
スピン 1/2 粒子の回転

$$e^{i2\pi\vec{S}\cdot\vec{n}}|\Psi\rangle = -|\Psi\rangle$$

$$\vec{S} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)/2$$

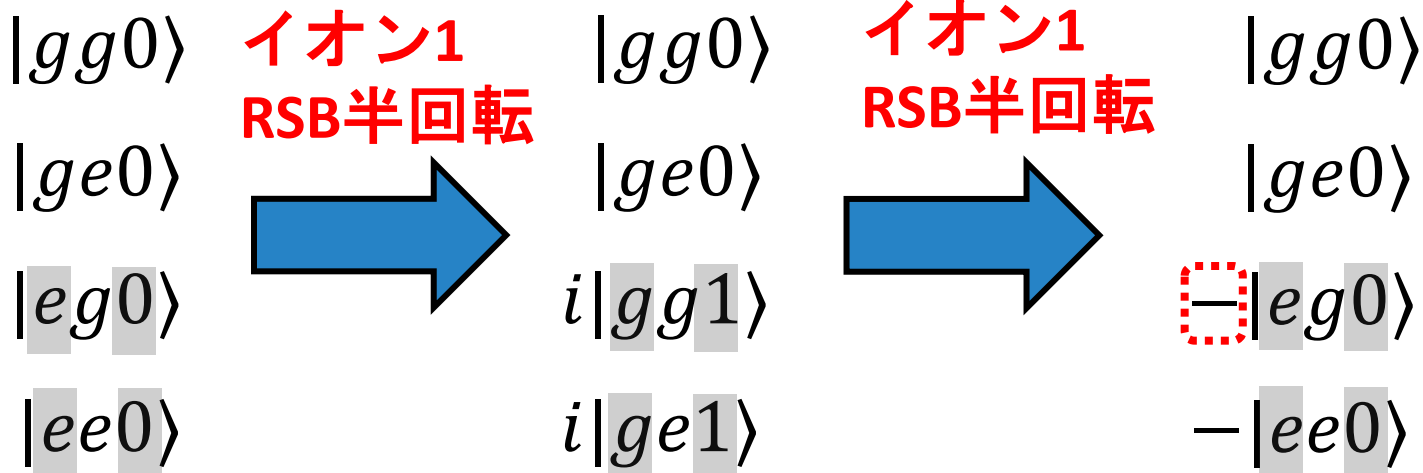
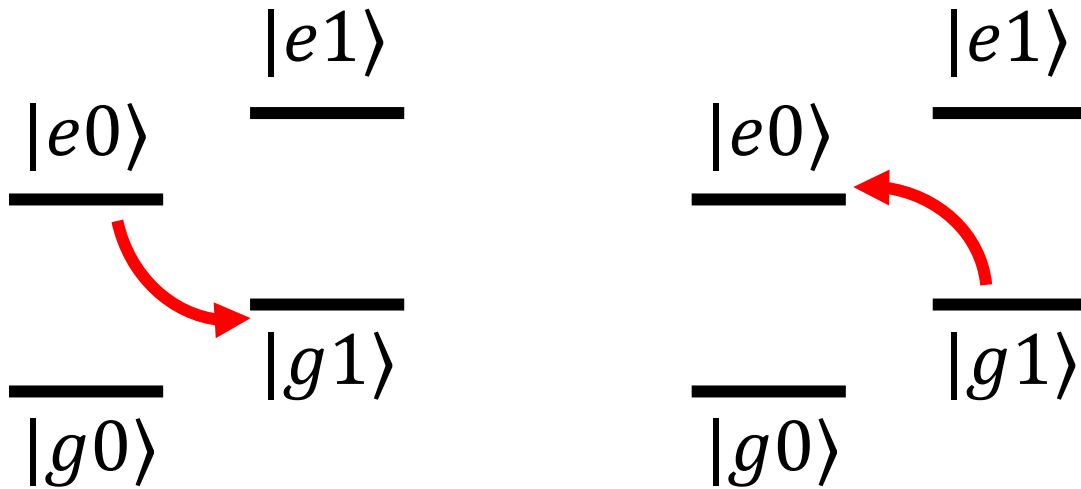
1 回転すると  
マイナス符号  
がつく！

レッドサイドバンド  
(RSB) 遷移



# 6. 量子ビット間相互作用

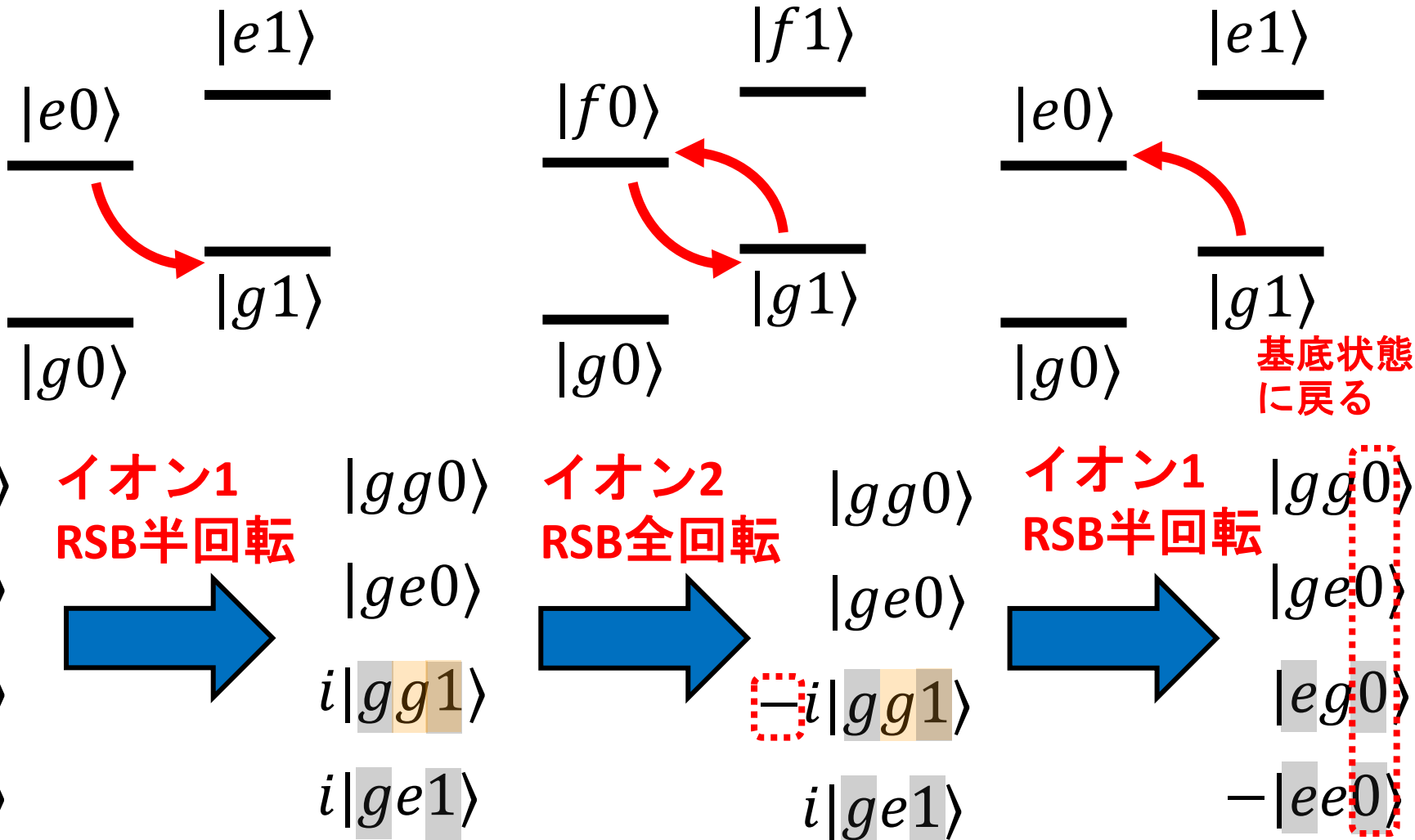
- Cirac-Zoller ゲートの実装：その4





# 6. 量子ビット間相互作用

- Cirac-Zoller ゲートの実装：その5



# 7. 制御時間

- 所要時間

※原子種、使用する遷移、使用するイオン数、実験手法、実験装置により大きく異なる

- 1量子ビットゲート  $\leq 10\mu\text{s}$

- 2量子ビットゲート  $\sim 100 - 200\mu\text{s}$

キャリアより弱いサイドバンド遷移を使っているため遅い。  
ただし、レーザーパルスを工夫して $1.6\mu\text{s}$ を達成した例等あり。

[Nature 555, 75 (2018)]

- 初期化:内部状態  $\sim 10\mu\text{s}$ 、  
外部状態（基底状態への冷却）  $\sim$  数ms

イオン数の増加により冷却すべき振動モード数も増える。

EIT 冷却等により多数モードを同時に冷却することも可能 [PRL 125, 053001 (2020)]。短時間の計算の場合、冷却は最初にだけ行えばよい。

- 測定  $\sim 1\text{ms}$     改善例：超伝導光検出器  $\rightarrow 11\mu\text{s}$  [Comm. Phys. 2, 97 (2019)]

# 8. コヒーレンス時間

## • $T_1$ (縦緩和時間)

- $|e\rangle \rightarrow |g\rangle$ の緩和が起きる時間
- $T_1$ が非常に長い遷移 (禁制遷移) を量子ビットに使える
- 例 1、 $^{40}\text{Ca}^+$ 光量子ビット ( $3^2D_{5/2} \rightarrow 4^2S_{1/2}$ ) :  $T_1 = 1.2 \text{ s}$
- 例 2、 $^{171}\text{Yb}^+ S_{1/2}$ 超微細構造量子ビット :  $T_1 \sim 200 \text{ min}$   
※詳細は説明欄参照

## • $T_2$ (横緩和時間)

- $|e\rangle$ と $|g\rangle$ の重ね合わせの位相がランダムになる時間
- 磁場によるエネルギーの乱れ
- 磁場不敏感な遷移を使うことで回避
- $T_2 \sim 50 \text{ s}$  [PRL 113, 220501(2014)]

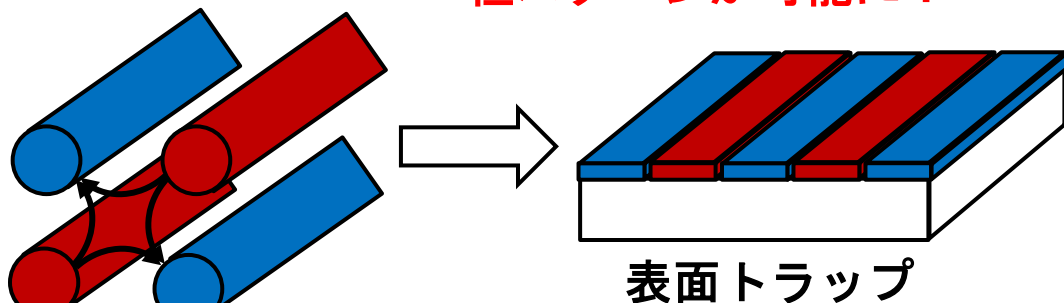
ゲート時間に比べ十分に長い $T_1$ 、 $T_2$ が得られている

# 9. 拡張性

- 大規模化のためにはトラップの多重化が重要

- 量子CCD

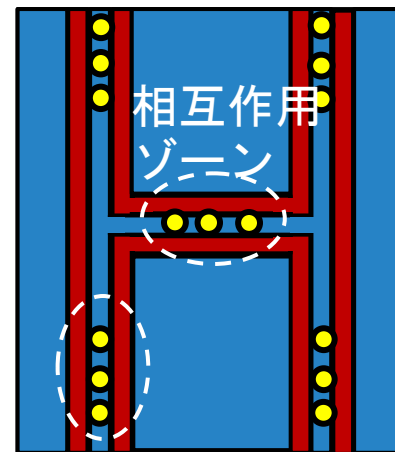
微細加工により複雑な電極パターンが可能に！



従来型

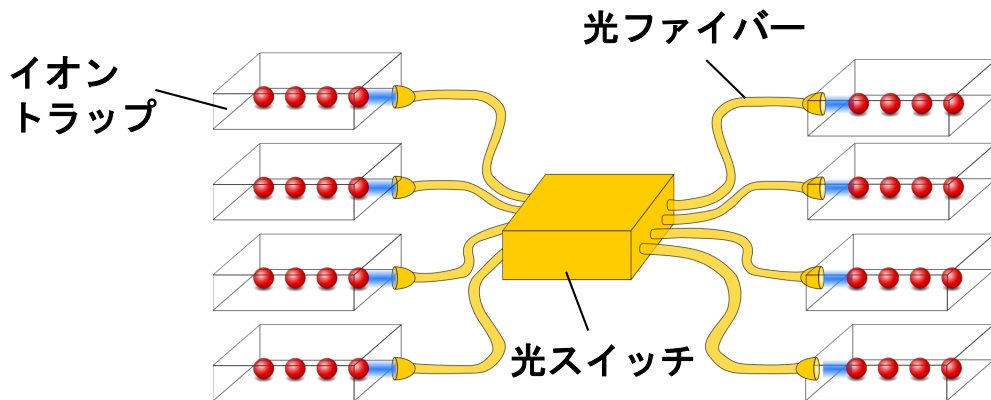
表面トラップ

ゾーン分けとイオンのゾーン間移動



トラップゾーン

- 量子光接続

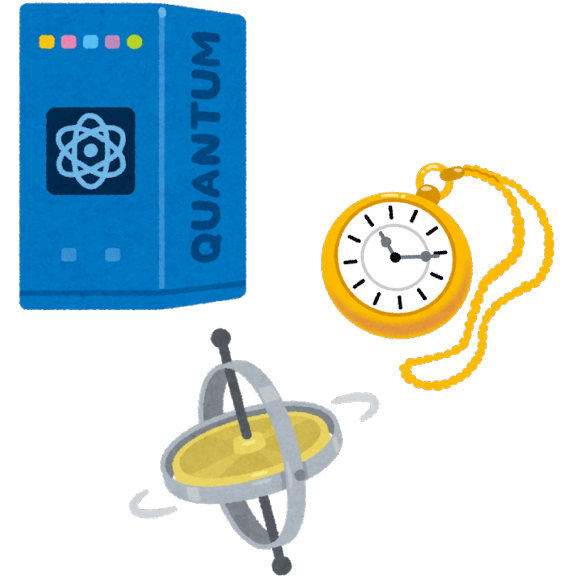


モジュール化されたイオントラップが光子を介して接続される

# 10. 応用およびその課題

## • 応用

- 量子計算・量子シミュレーション
- 原子時計
- 量子センサー（磁場、回転）
- 量子通信（リピーターノード）



## • 課題

- **制御の精度を下げずにイオンの数を増やすこと**  
イオン数増→情報量の指数的大増大（量子計算）  
SN比向上（時計・センサー）
- ゲート忠実度のさらなる向上、速度の改善

# 11. 他の分野とのつながり

- 冷却原子・イオン混合系
- 分子イオントラップ→極低温化学
- 原子時計をつかった相対論的測地、相対論の検証、ダークマター探索
- 荷電ナノ粒子のトラップ
- 反物質のトラップ・精密分光
- 共振器量子電気力学 (cavity QED)  
→ イオンと光子の強い相互作用

## 12. より深く勉強したい方向けの文献

- 占部伸二  
「個別量子系の物理 情報処理」朝倉書店 イオントラップと量子情報
- Leibfried *et al.*  
“Quantum dynamics of single trapped ions”  
Review of Modern Physics **75**, 281 (2003).
- Häffner *et al.*  
“Quantum computing with trapped ions”  
Physics Reports **469**, 155 (2008).