



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 第一部

---

沖縄科学技術大学院大学

高橋優樹

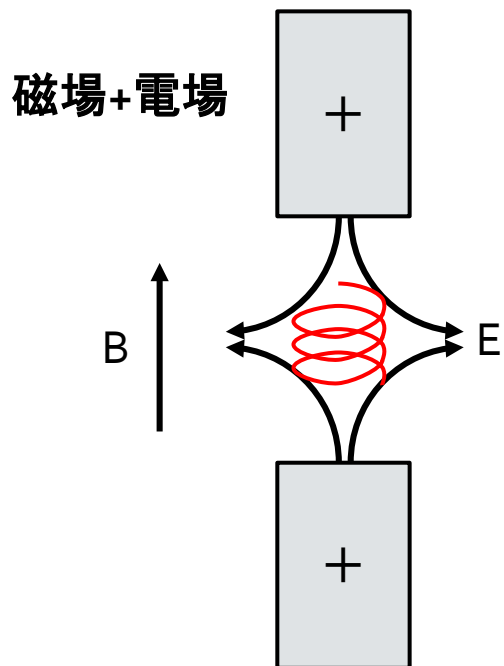
$|0\rangle + |1\rangle$

# 1. 導入

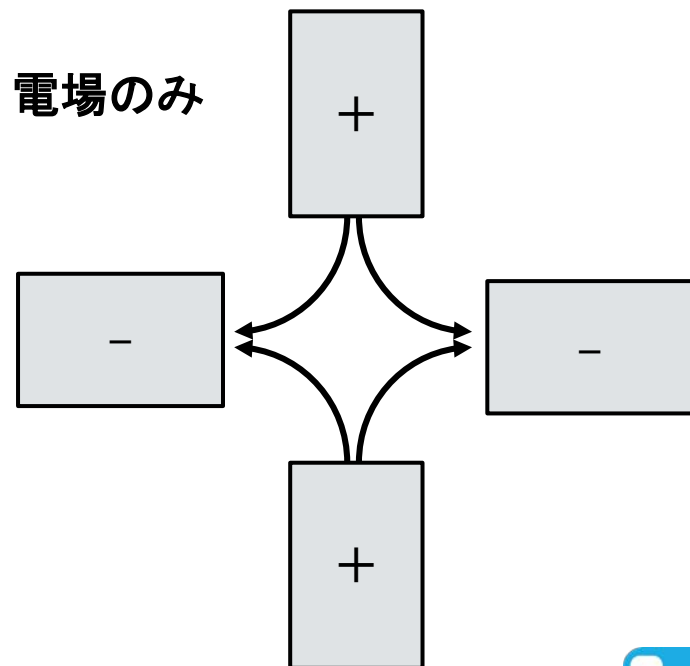
- イオントラップとは？  
荷電粒子を電磁力により空間的に閉じ込める手法

- おもに二種類

- ペニングトラップ



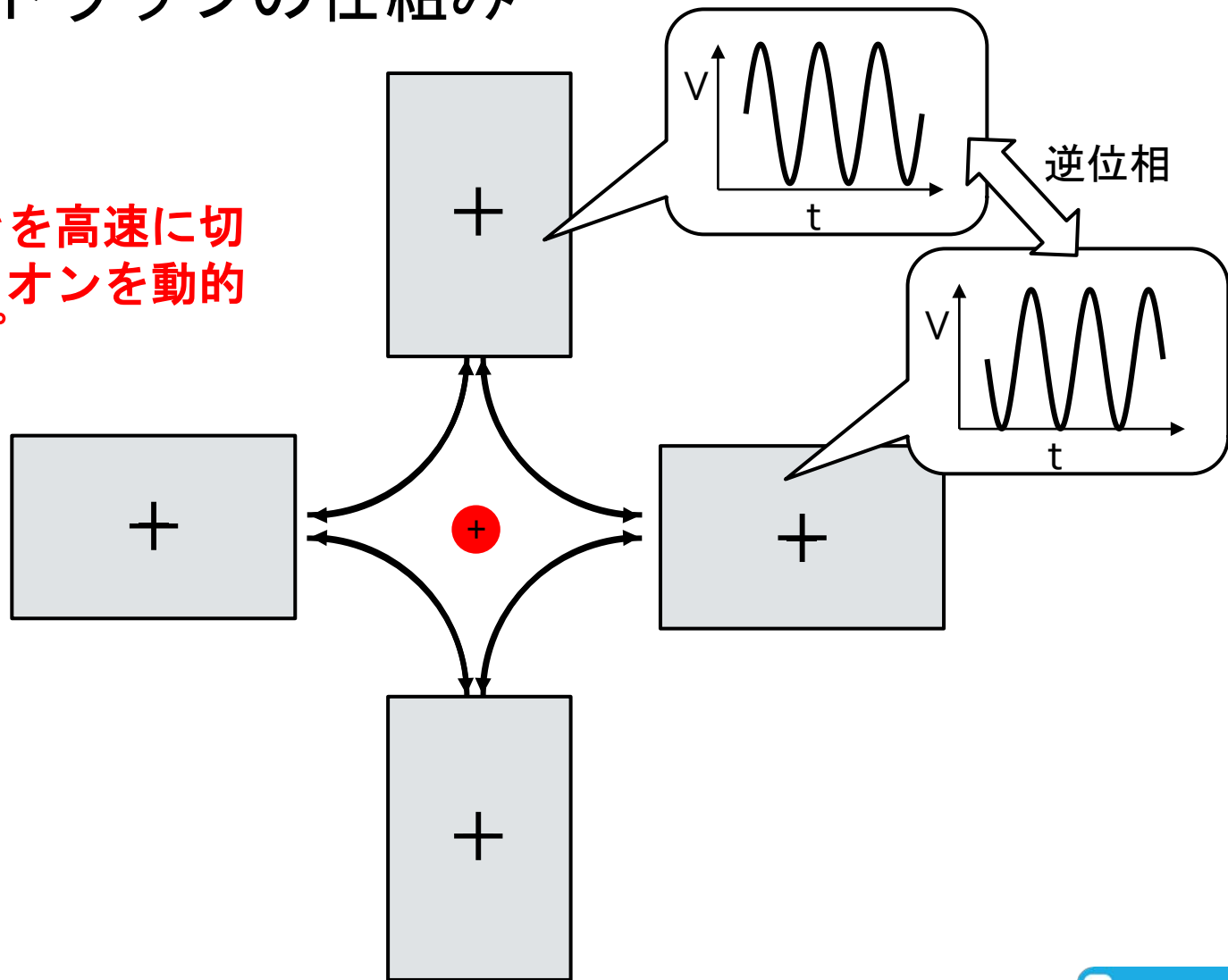
- ポールトラップ



# 1. 導入

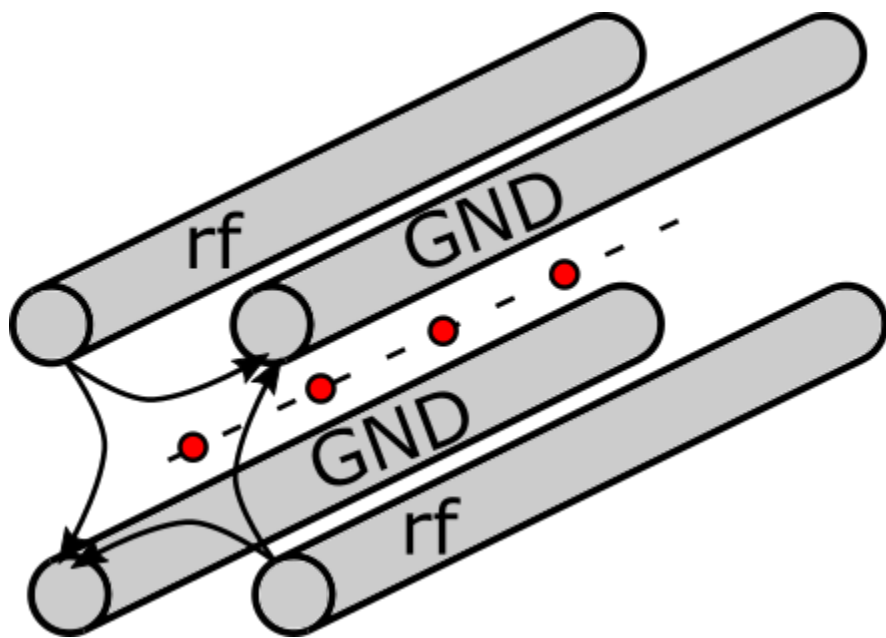
- ポールトラップの仕組み

電場の向きを高速に切り替えてイオンを動的にトラップ



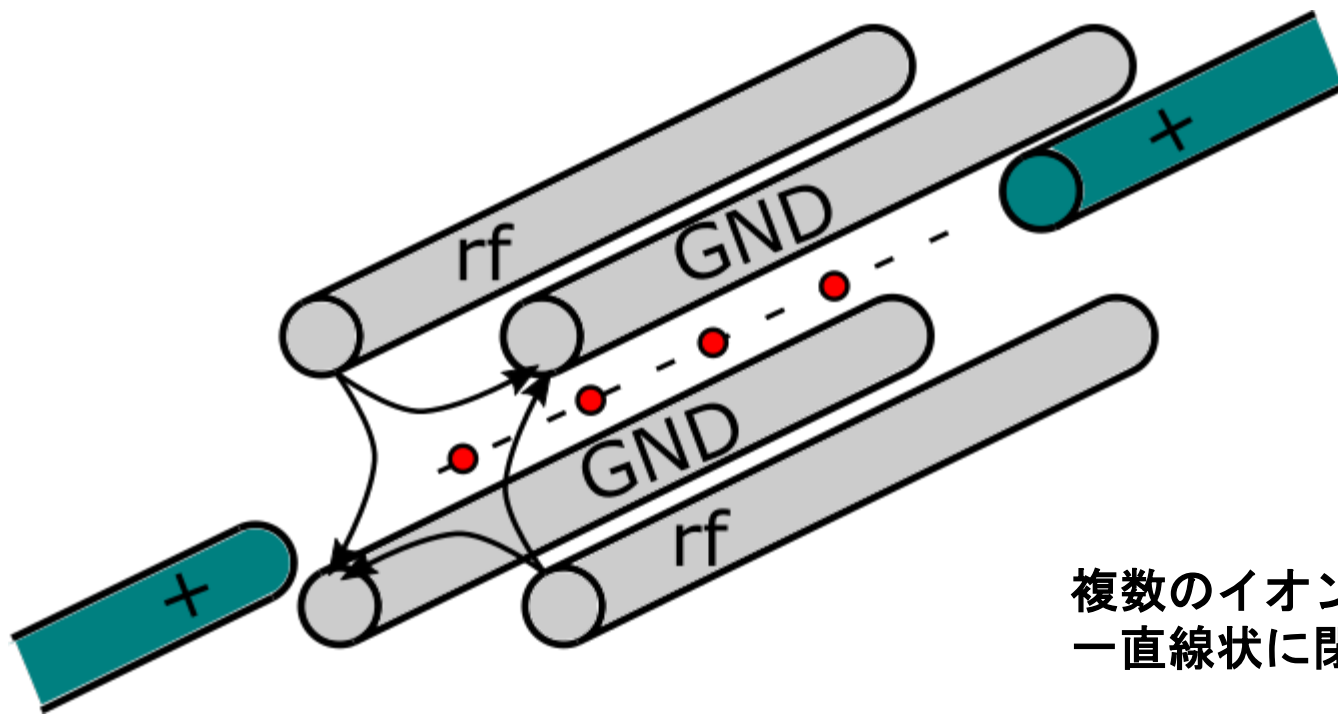
# 1. 導入

- 線形ポールトラップ

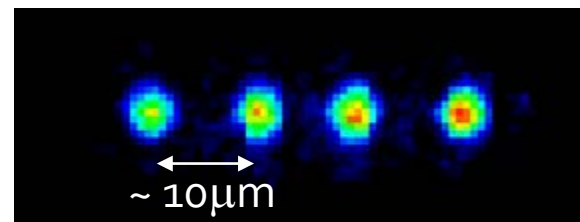


# 1. 導入

- 線形ポールトラップ



複数のイオンを間隔をあけて  
一直線状に閉じ込めることが可能



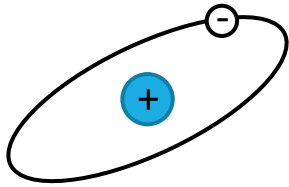
エンドキャップ電極

# 1. 導入

- なぜイオントラップなのか？
  - 真空中に浮遊→環境からの隔絶
  - レーザー冷却により極低温まで冷却可能
  - 量子力学で記述される“裸”の原子が使える
  - レーザー光などにより個別にコヒーレント制御可能
  - イオン同士の強いクーロン斥力→量子ビット間相互作用
  - 閉じ込めが安定（トラップ寿命～数時間～数日）

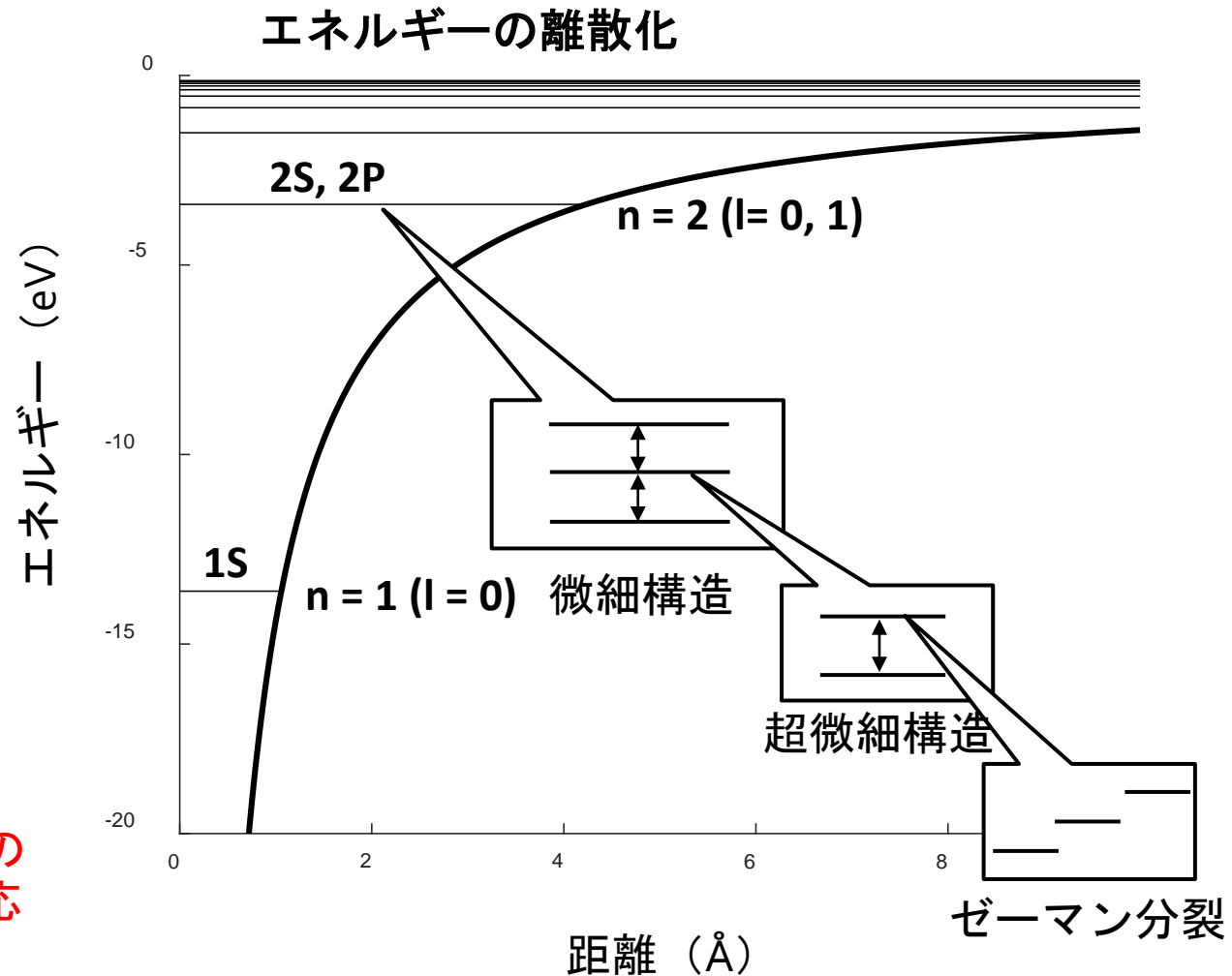
# 2.量子ビット

## • 復習：水素原子



主量子数： $n$   
軌道角運動量： $l, m$   
電子スピン： $s$

各エネルギー準位は  
主量子数、角運動量とその  
射影成分の固有状態に対応



# 2.量子ビット

## • 水素様イオン

最外殻電子が一つ

電子を一つ取り去ると最外殻電子が一つ

H																		He
Li	Be																	Ne
Na	Mg																	Ar
K	Ca																	Kr
Rb	Sr																	Xe
Cs	Ba																	Rn
																		Yb

- 量子ビットに向いているイオンの条件
  - イオン化したら最外殻電子が一つ
  - 必要なレーザー波長の実現が容易 (300-1000 nm)
  - 安定な励起状態を持つ

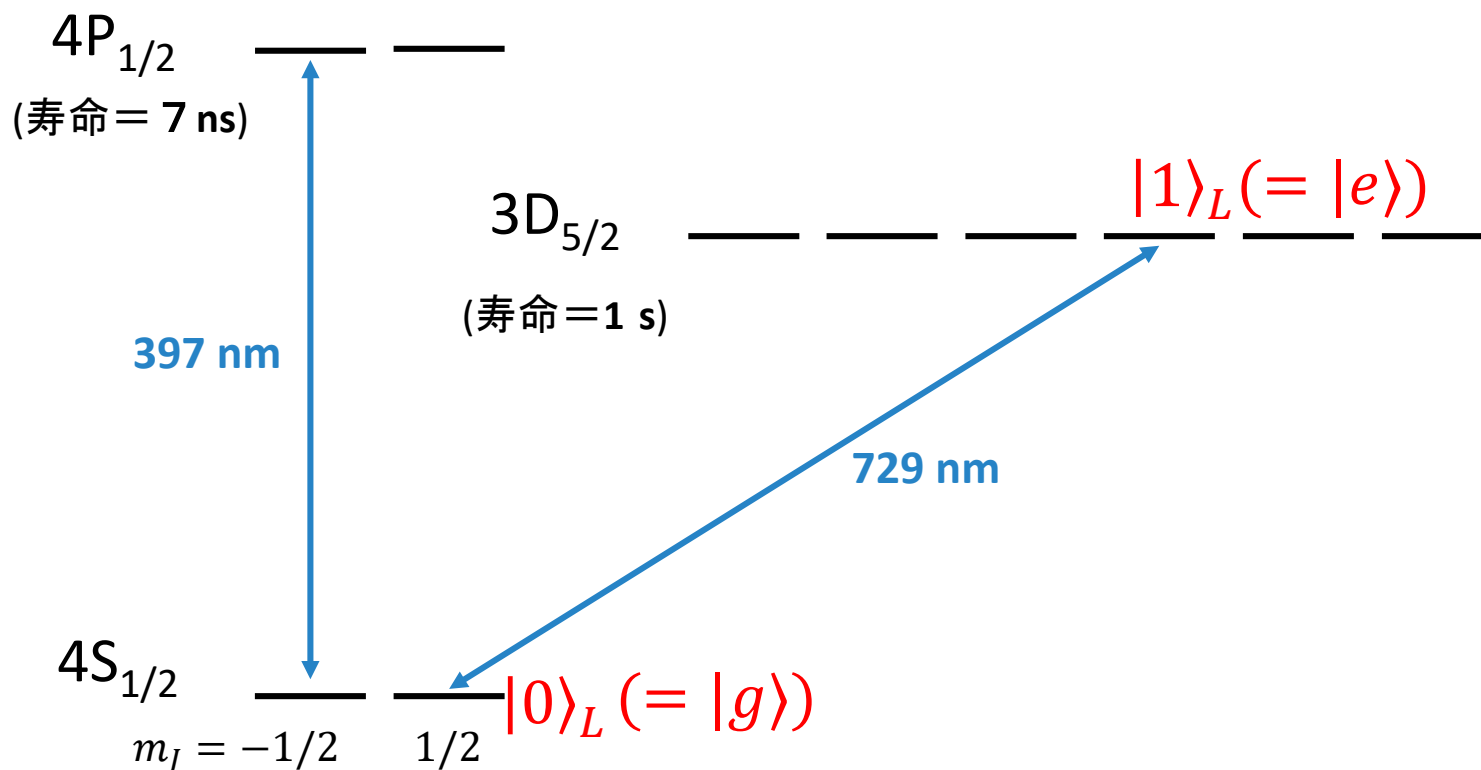


# 2.量子ビット

どのエネルギー準位を $|0\rangle_L$ と $|1\rangle_L$ に割り当てるか？

例： $^{40}\text{Ca}^+$

電子配置： $[\text{Ar}]4s^1$

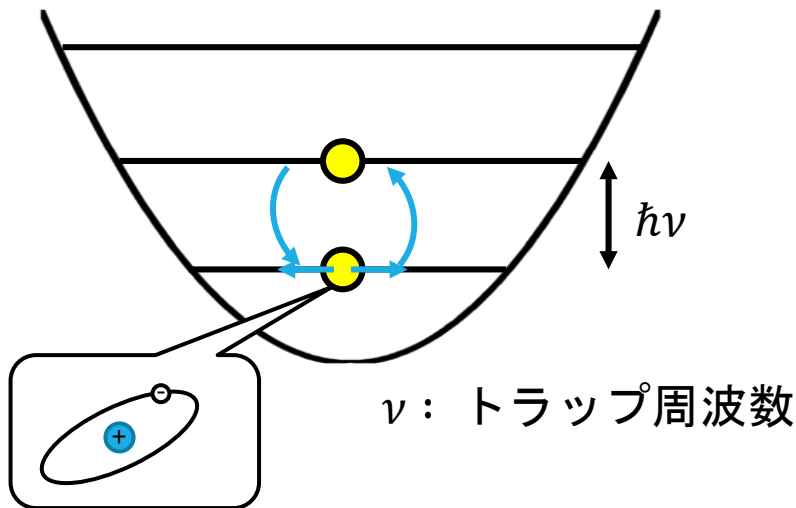


## 2.量子ビット

- 運動状態の量子化

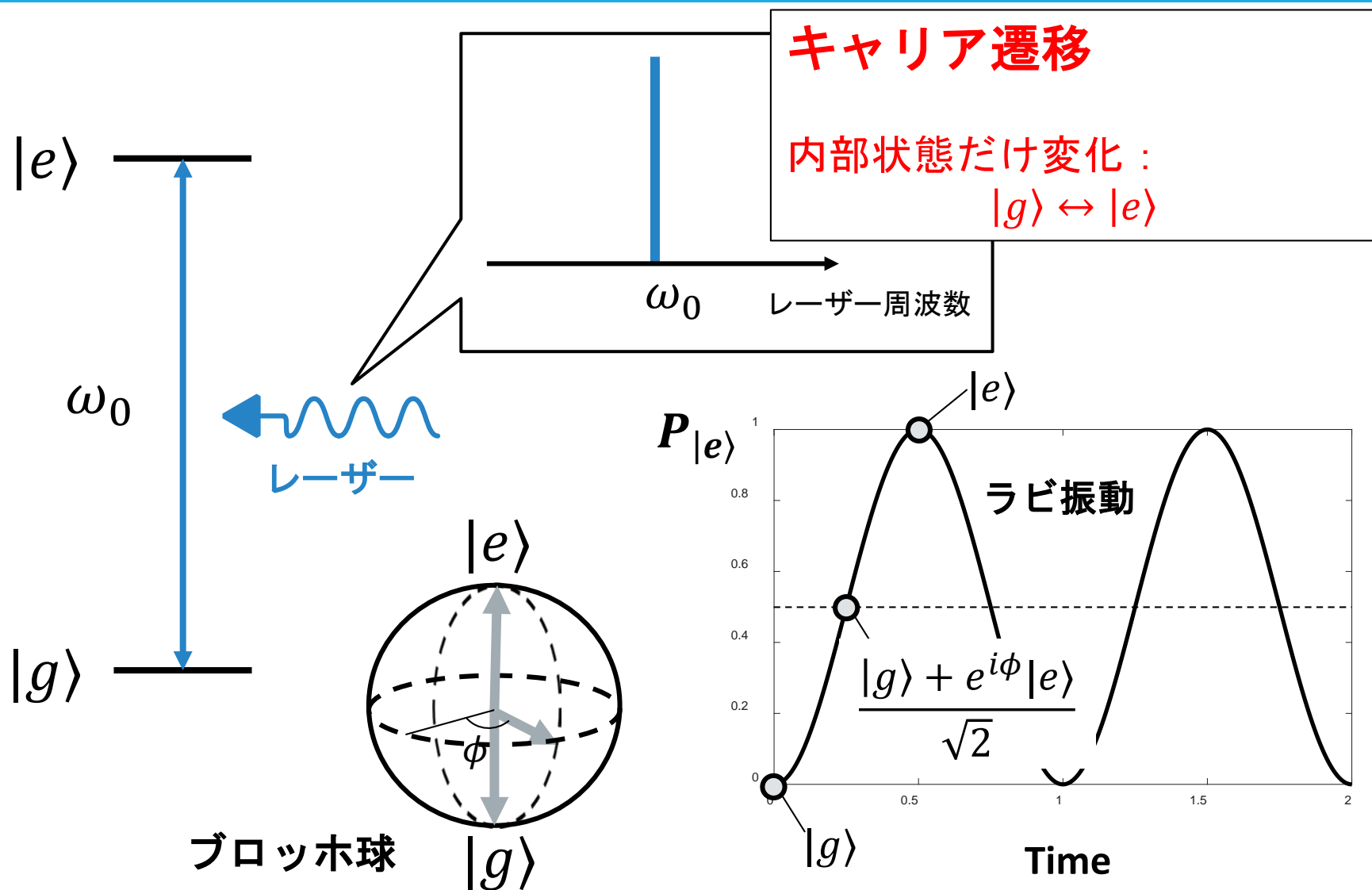
- 今まで：電子の相対運動 (S, P, D...) + スピン (内部状態)

- トラップ中のイオンの重心運動 (外部状態)  
→ 調和振動子

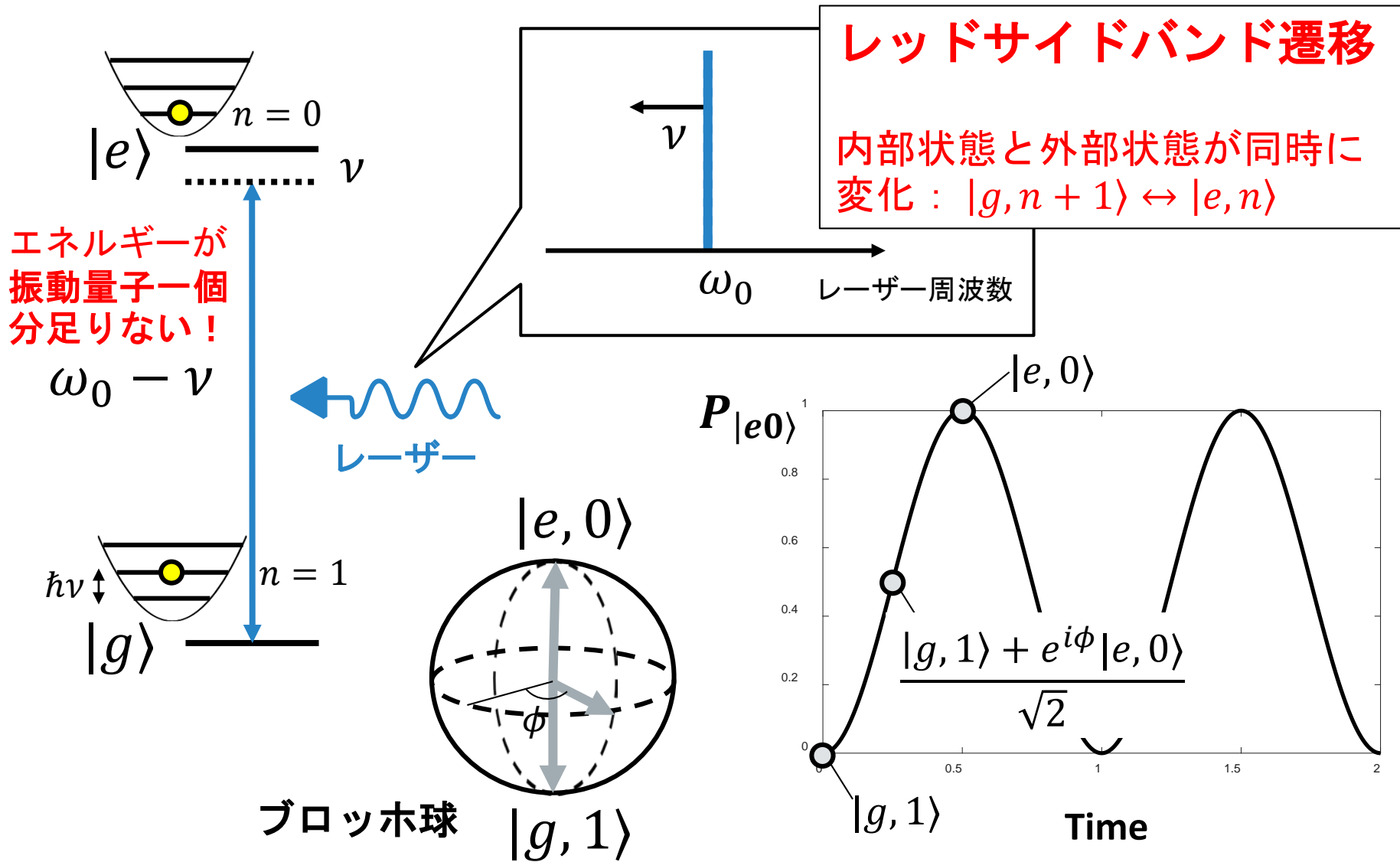


- レーザー冷却 → 極低温における量子化された運動状態
- レーザーにより一量子単位で制御可能 (サイドバンド遷移)
- エネルギーが等間隔なので量子ビットには向かない  
→ “補助的な量子ビット”  
として利用可能

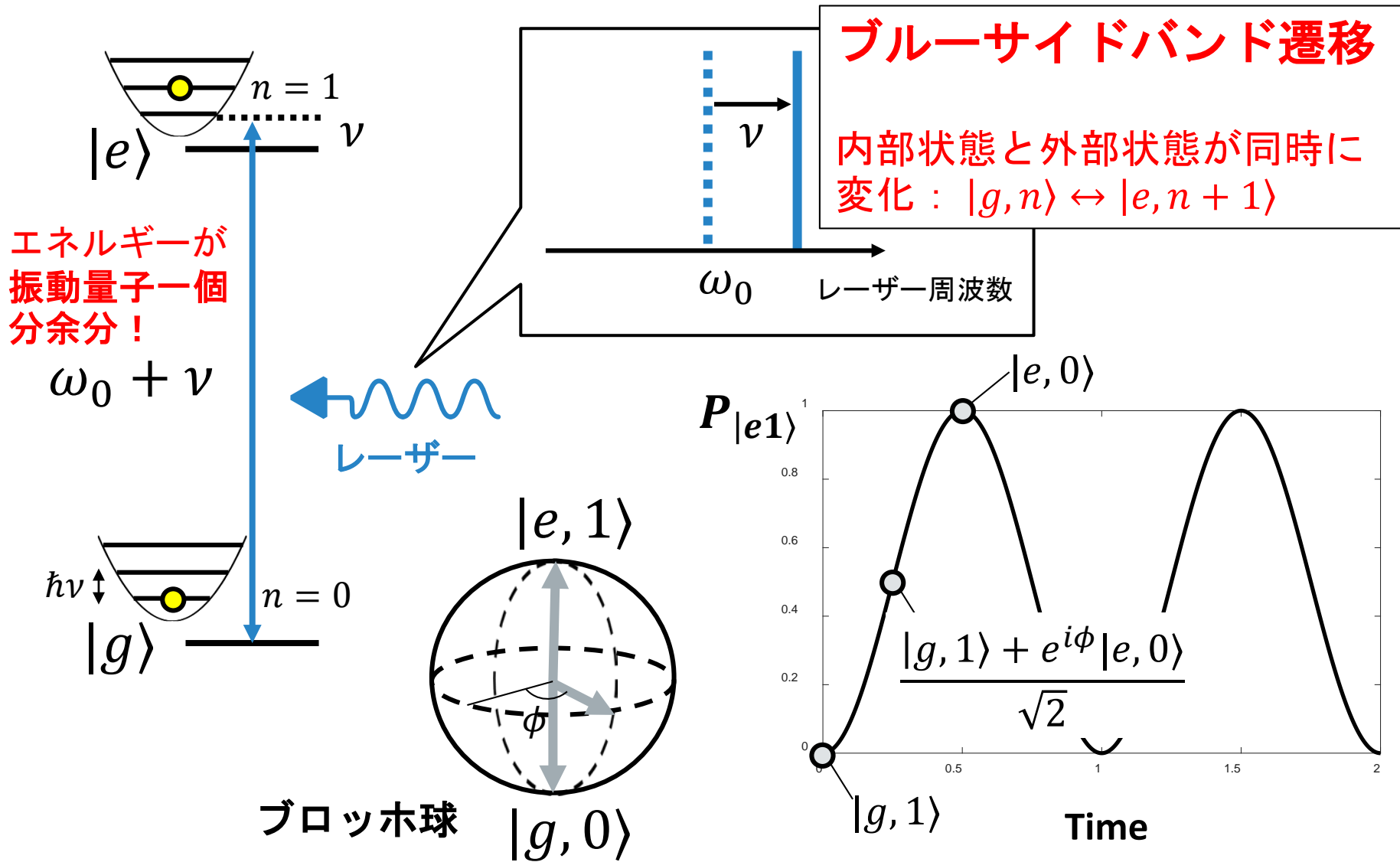
# 3.制御方法



# 3.制御方法

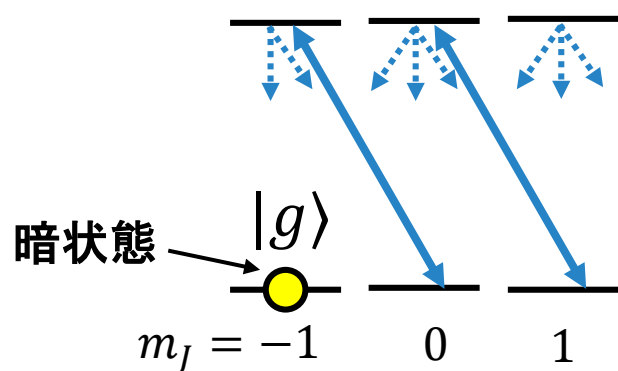


# 3.制御方法



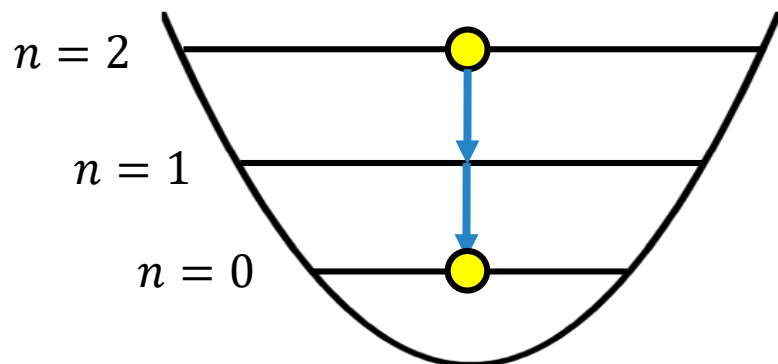
# 4. 初期化

- 内部状態  
光ポンピング

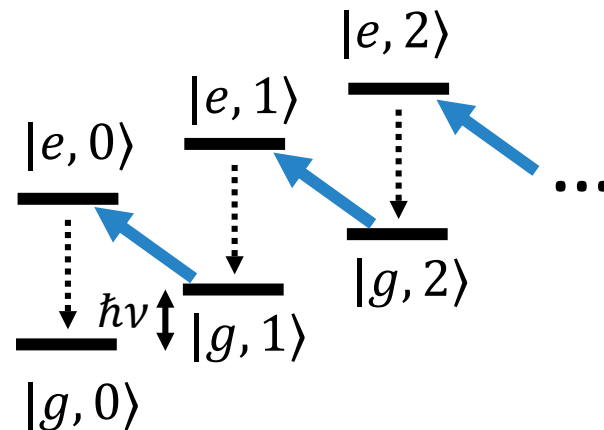


- レーザーの偏光による**選択則**を利用して特定の遷移を励起
- 励起状態からの緩和
- 暗状態**に状態を準備

- 外部状態



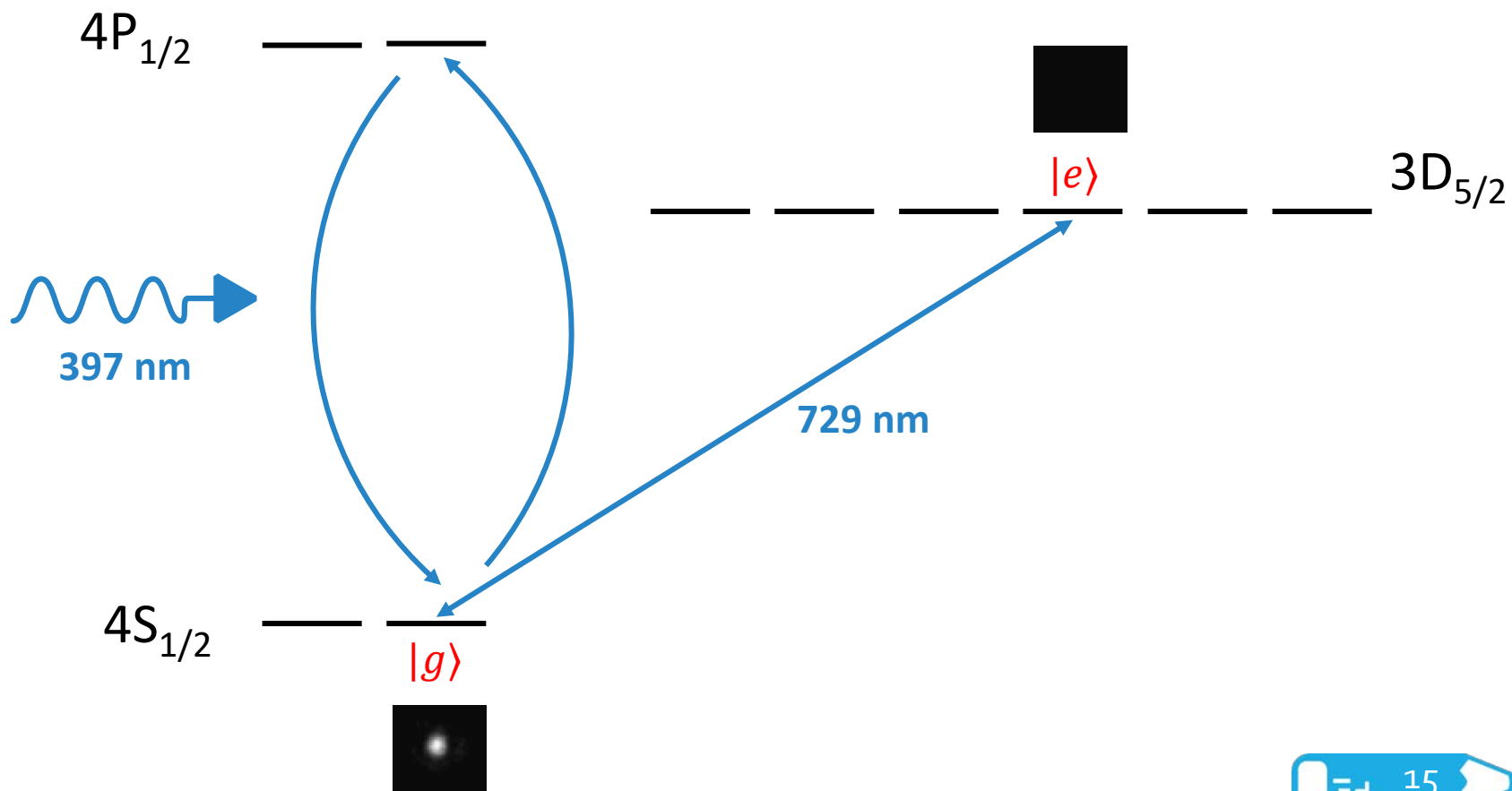
サイドバンド冷却により振動の基底状態 ( $\langle n \rangle \simeq 0$ ) に準備



# 5.測定

“光るか光らないか” で  $|g\rangle$  と  $|e\rangle$  を区別

例： $^{40}\text{Ca}^+$



# 第一部まとめ

- イオントラップ

振動する電場で荷電粒子を長時間捕獲

- 量子ビット

水素様イオンの適切なエネルギー準位を割り当てる

- 制御方法

内部状態・外部状態ともにレーザーの周波数を調節することで量子制御可能

- 初期化

内部状態...光ポンピング

外部状態...サイドバンド冷却

- 測定 光るか光らないか