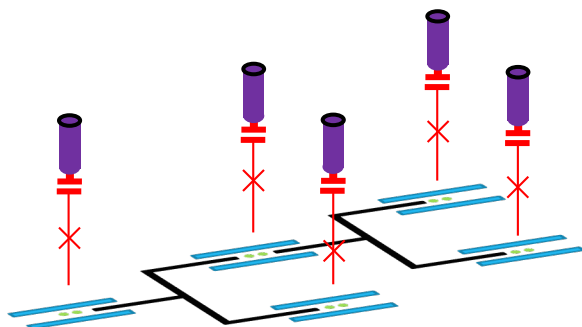
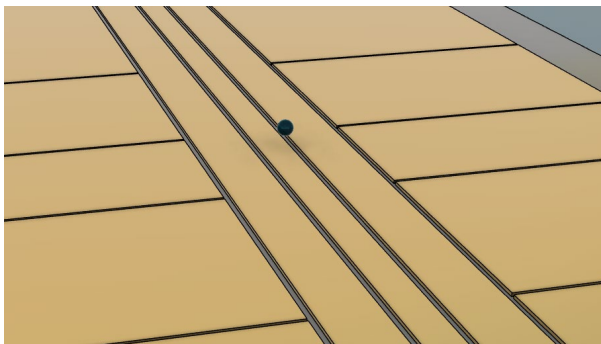




Q-LEAP 人材育成プログラム
量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム



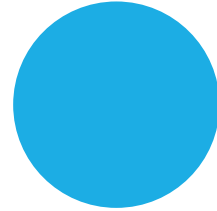
Hamiltonian

浮揚電子 I SINGLE ELEMENTARY PARTICLE AT REST IN SPACE

東京大学・理化学研究所
野口 篤史

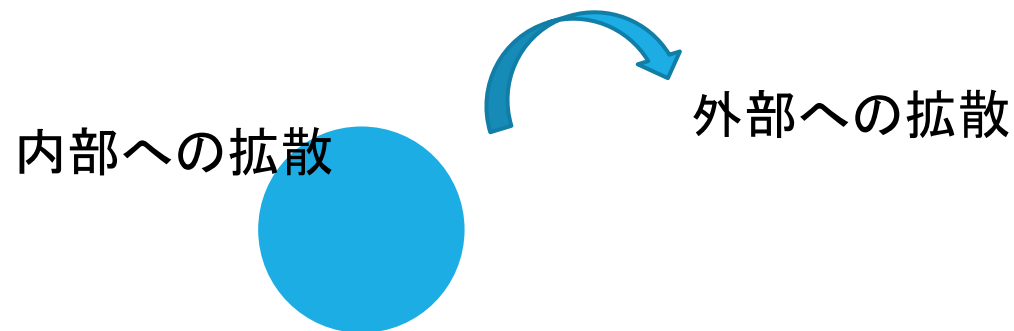
$|0\rangle + |1\rangle$

浮揚・孤立量子系



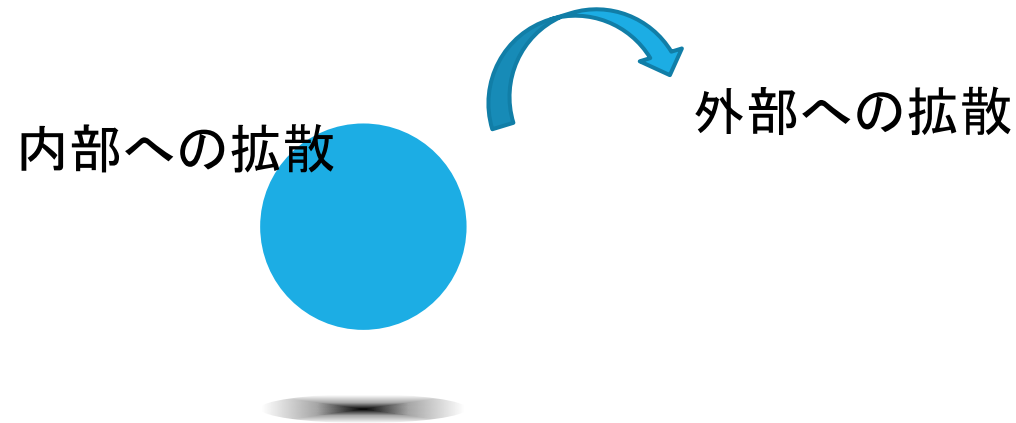
浮揚・孤立量子系

デコヒーレンス：情報の拡散

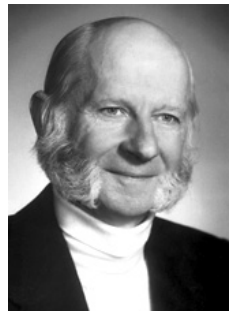


浮揚・孤立量子系

デコヒーレンス：情報の拡散



Single Elementary Particle at Rest in Space
空間で静止している単一の素粒子



Hans Georg Dehmelt (1922–2017)

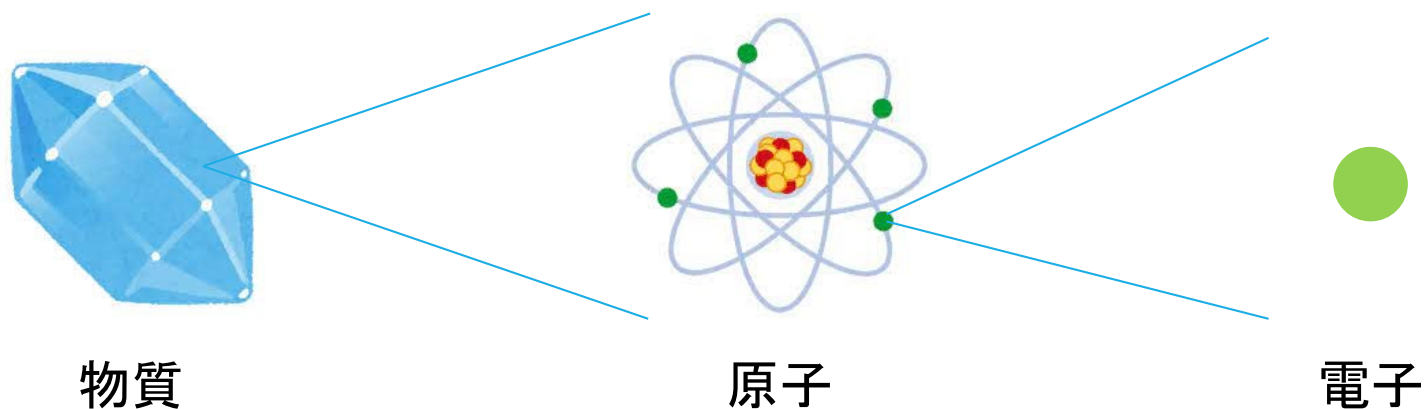
H. Dehmelt *et al.*, Bull. Am. Phys. Soc. 24, 757 (1979)

Hans G. Dehmelt – Biographical. NobelPrize.org.

Nobel Media AB 2021. Mon. 24 May 2021.

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1989/dehmelt/biographical/>

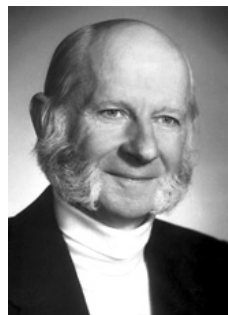
浮揚・孤立量子系



Single Elementary Particle at Rest in Space

空間で静止している単一の素粒子

浮揚電子系



Hans Georg Dehmelt (1922–2017)

H. Dehmelt *et al.*, Bull. Am. Phys. Soc. 24, 757 (1979)

Hans G. Dehmelt – Biographical. NobelPrize.org.

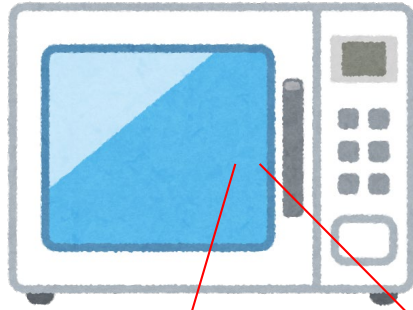
Nobel Media AB 2021. Mon. 24 May 2021.

<<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1989/dehmelt/biographical/>>

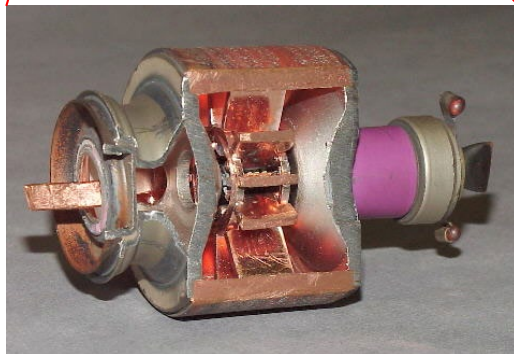
Geonium Atom

身近な電子・イオントラップ？

電子レンジ



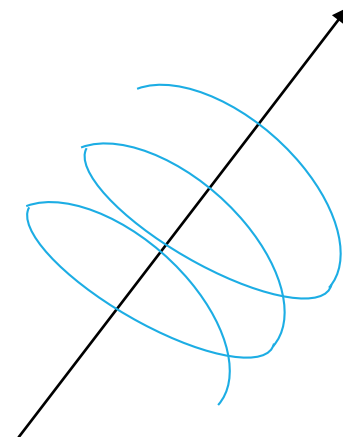
マグネトロン



オーロラ

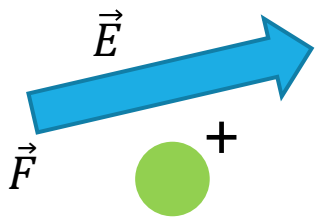


磁場



いろいろな荷電粒子トラップ

荷電粒子は電場によって力を受ける



$$\vec{E} = -\nabla\phi$$

$$\text{div}\vec{E} = \Delta\phi = 0$$

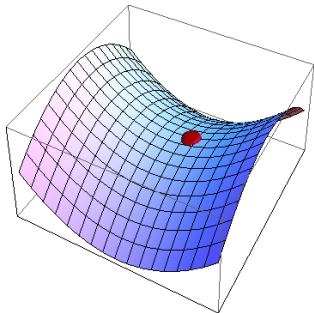
$$= \partial_x^2\phi + \partial_y^2\phi + \partial_z^2\phi$$

Earnshawの定理：荷電粒子は静電場だけでは捕獲できない。

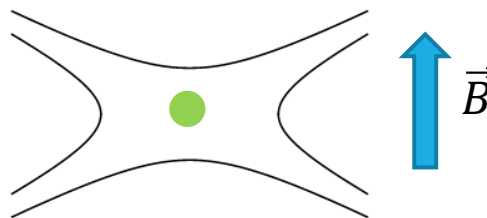
$$\partial_x^2\phi, \partial_y^2\phi, \partial_z^2\phi > 0$$

電子トラップ

Paulトラップ



Penningトラップ



液体ヘリウム上電子
次の動画で



トラップの歴史

Paul トラップ

電子トラップ

2021 H. Häffner

Phys. Rev. X **11**, 011019 (2021)

基底状態冷却

2021 未達成

レーザー冷却

C. Cohen-Tannoudji

Nobel prize 1997

イオントラップ

1953 W. Paul Nobel prize 1989

基底状態冷却

1989 D. Wineland Nobel prize 2012

Penning トラップ

電子トラップ

1959 H. Dehmelt

Nobel prize 1989

基底状態冷却

2021 未達成

イオントラップ

1966 H. Dehmelt

基底状態冷却

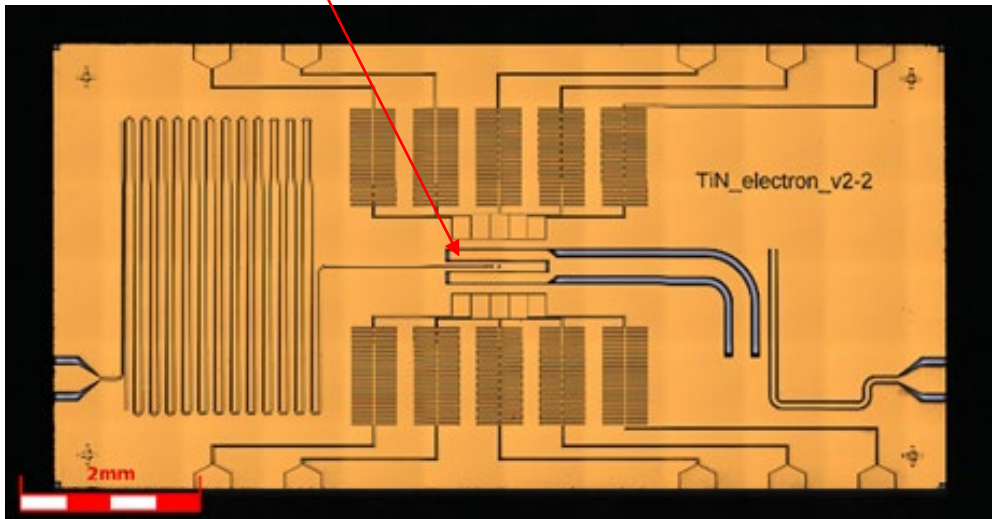
2016 D. M. Segal

電子トラップはレーザー冷却ができないために、
これまで量子技術としてはイオントラップの後塵を拝している。

Paul電子トラップ

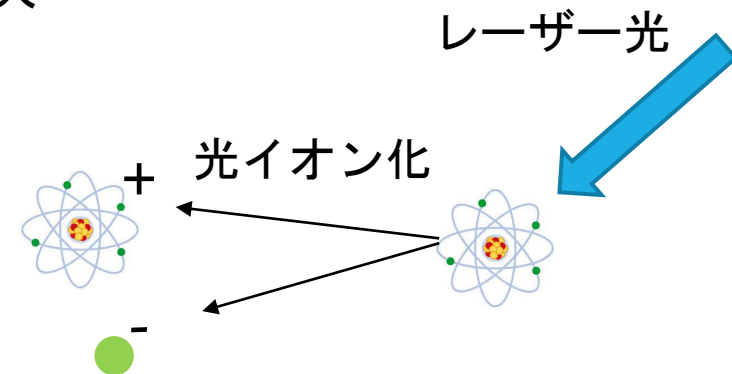
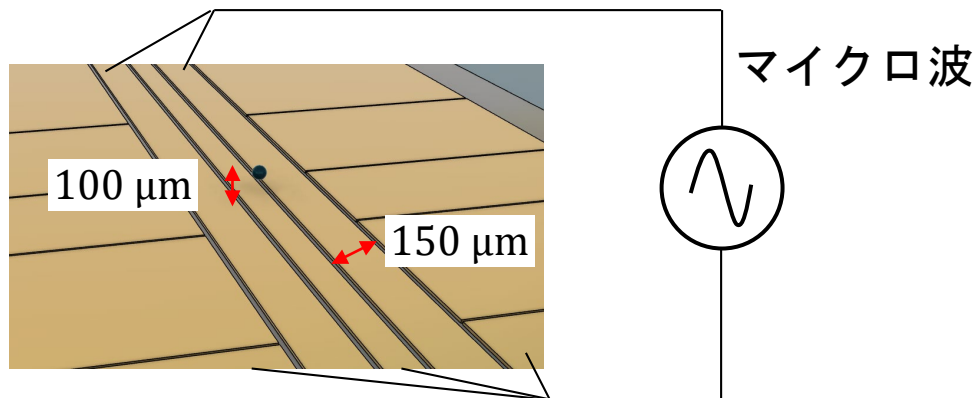
超伝導電極にマイクロ波を印加

※まだ電子を捕まえていません。@2021
今日は我々のチームの構想をお話します。

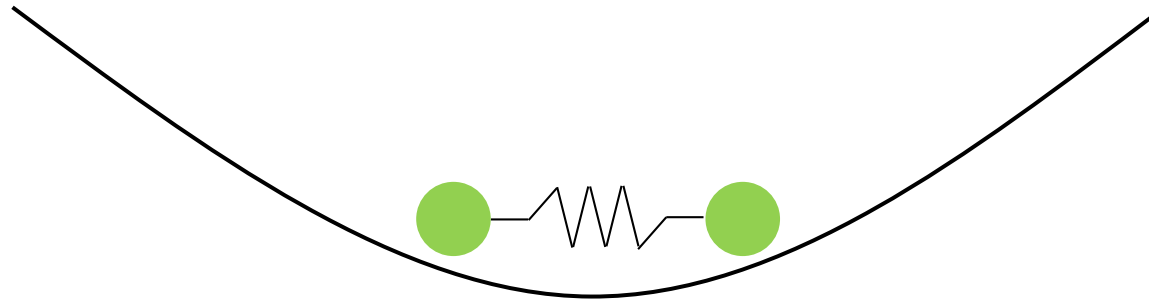


電子の冷却・超伝導共振器のために
超高真空・極低温下で実験
(0.3 K, 10^{-10} Pa)

表面超伝導Paulトラップ写真、東大



量子ビット・量子系



トラップ中の低温電子集団：ウィグナー結晶

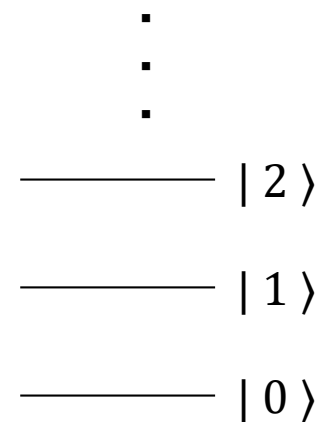
電子スピン



$$E = g\mu_B\sigma_z B$$

Zeemanエネルギー

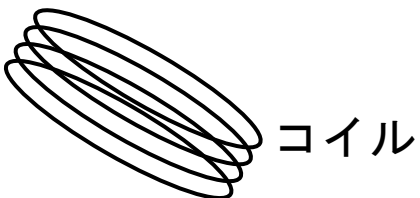
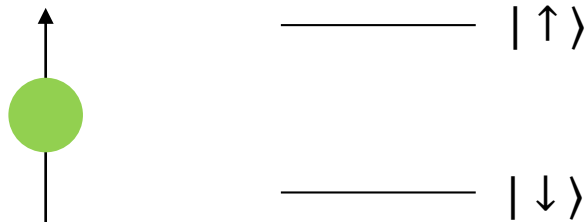
軌道



$$E = \hbar\omega n$$

制御方法 1

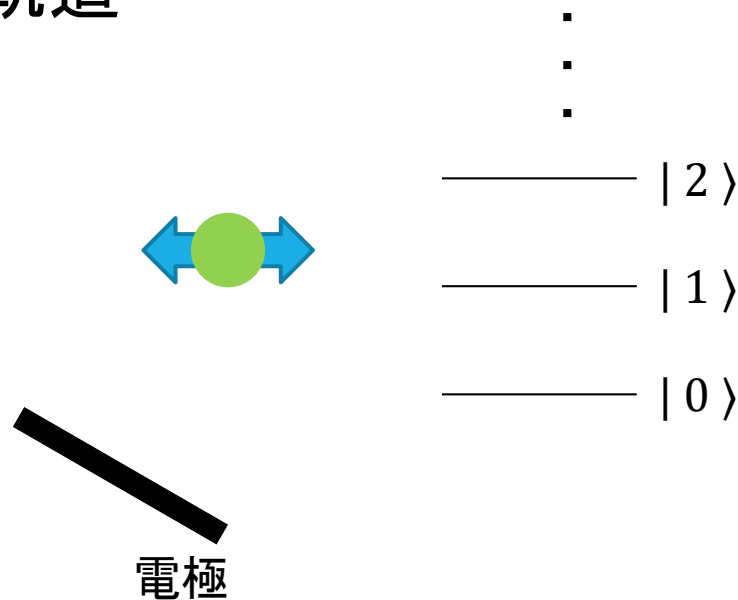
電子スピン



スピン共鳴

共鳴振動横磁場
によるスピン制御

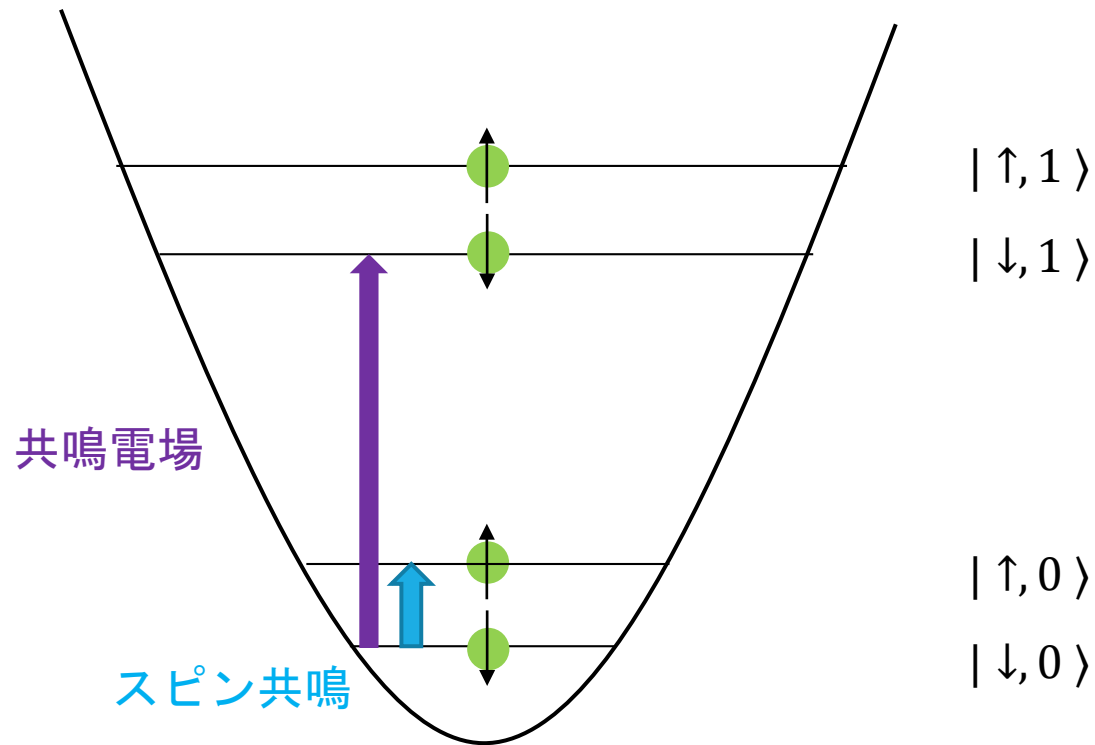
軌道



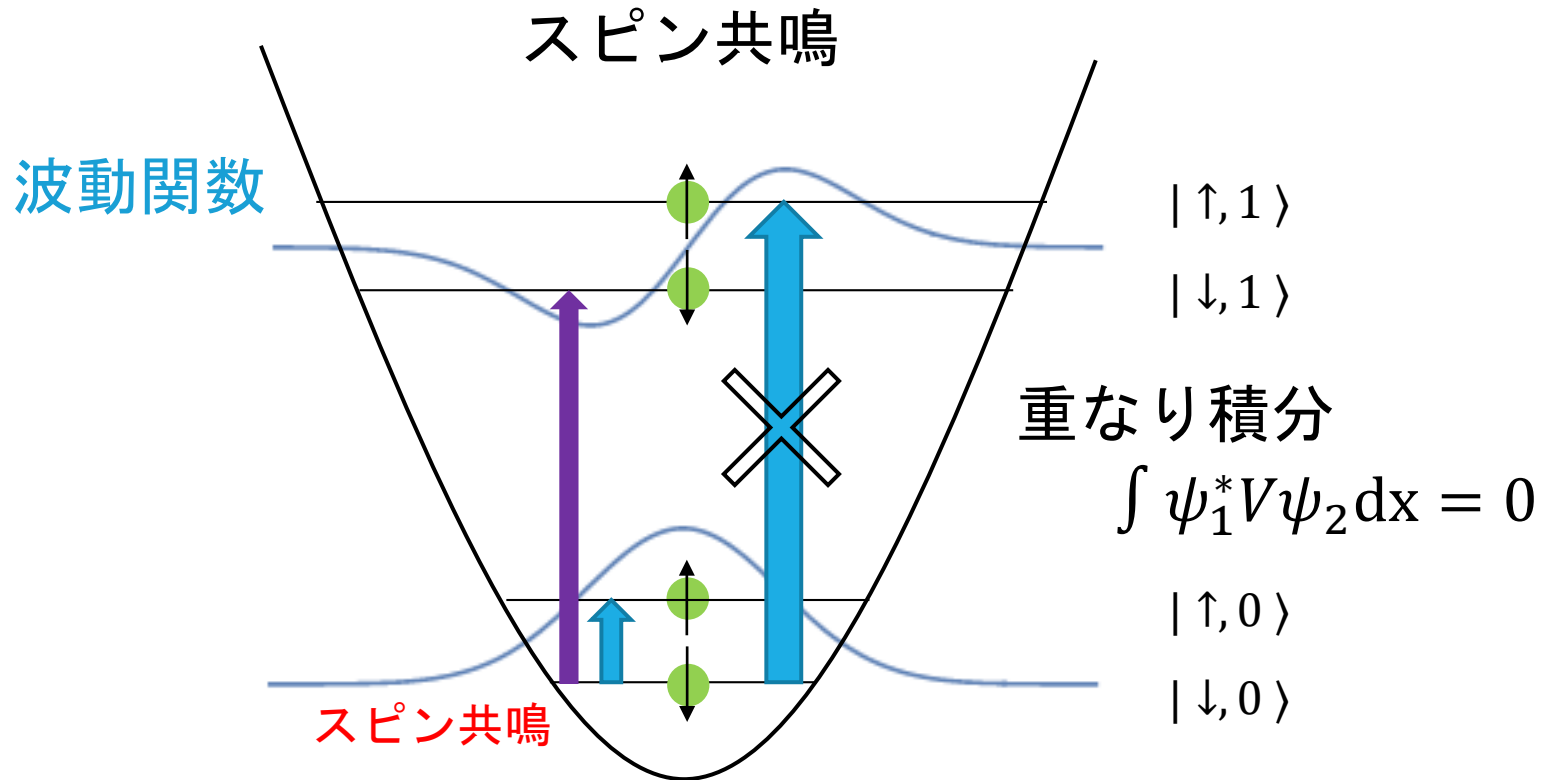
電気双極子相互作用

共鳴振動電場
による制御

制御方法 2 : スピン軌道相互作用



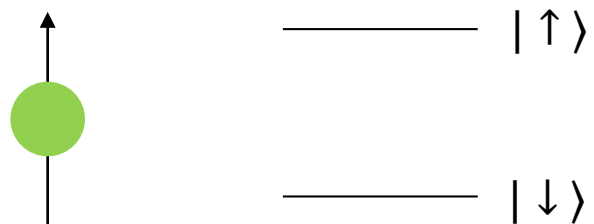
制御方法 2 : スピン軌道相互作用



スピンと軌道との間に相互作用が作れない。

制御方法 2 : 連続Stern-Gerlach効果

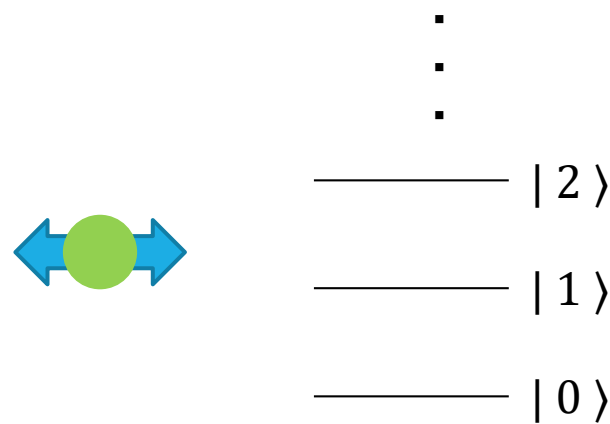
電子スピン



$$E = g\mu_B \sigma_z B$$

Zeemanエネルギー

軌道



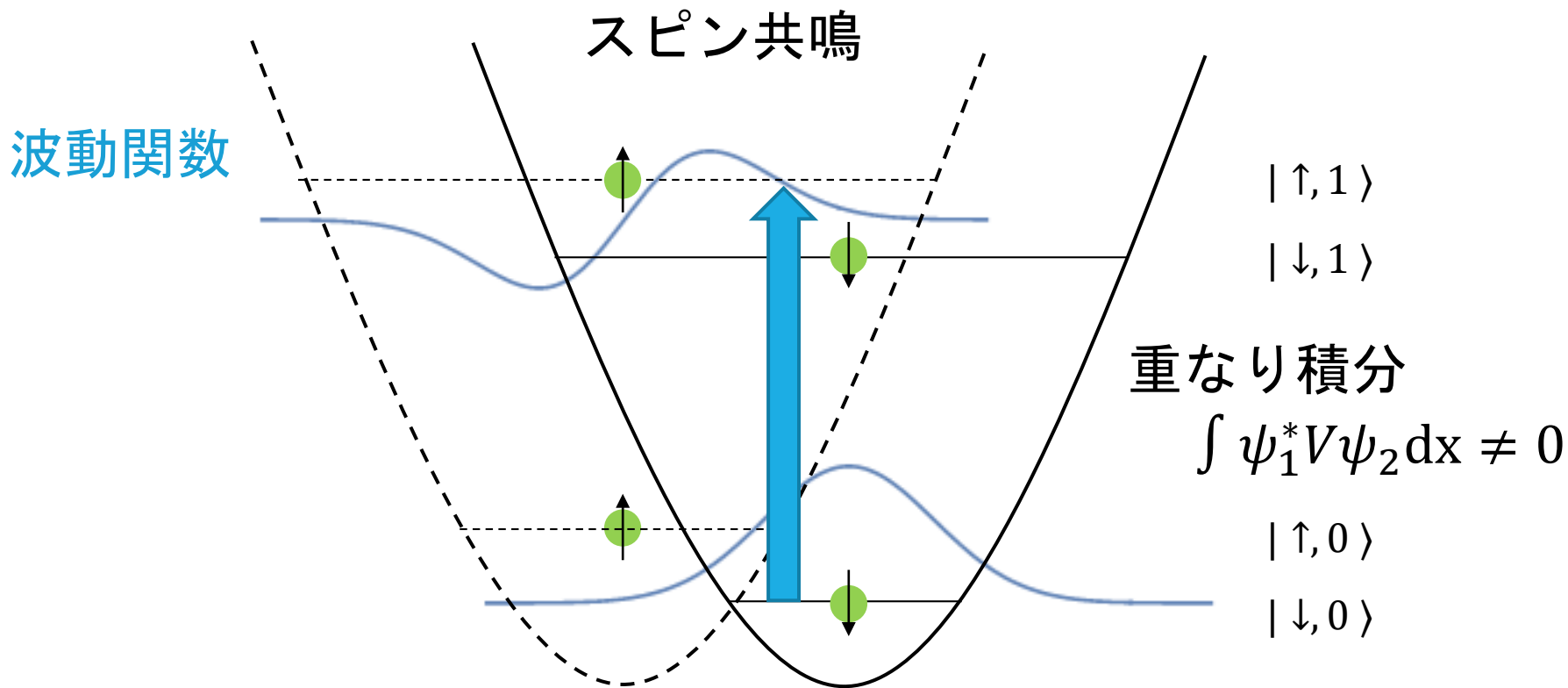
$$E = \hbar\omega n$$

不均一磁場を印加

$$B = B_0 + \Delta B_1 x \quad \Rightarrow \quad E = g\mu_B \sigma_z B = \hbar\omega_0 \sigma_z + \hbar G \sigma_z x$$

スピン軌道相互作用

制御方法 2 : 連続Stern-Gerlach効果



スピン軌道相互作用 $\hbar G \sigma_z x$ \rightarrow スピン依存力 $F = -\frac{\partial U}{\partial x} = -\hbar G \sigma_z$

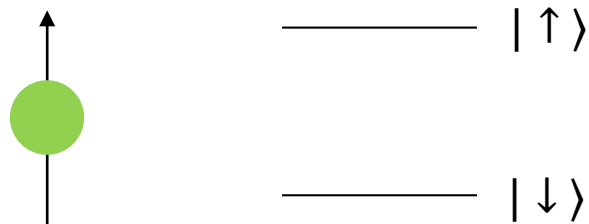
スピンが変化しながら、同時に軌道も変化する。

$$|\downarrow, 0\rangle \leftrightarrow |\uparrow, 1\rangle$$

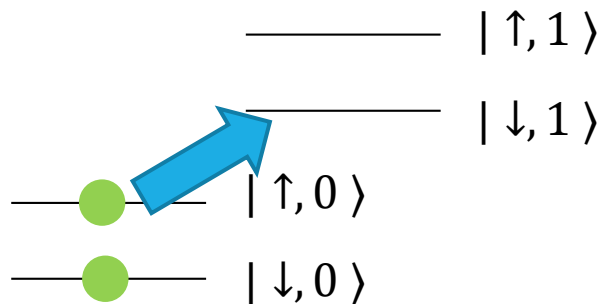
$$|\uparrow, 0\rangle \leftrightarrow |\downarrow, 1\rangle$$

初期化

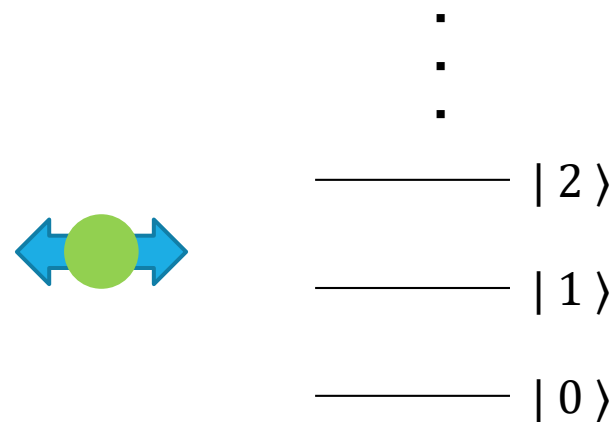
電子スピン



- スピン交換原子散乱
- サイドバンド冷却



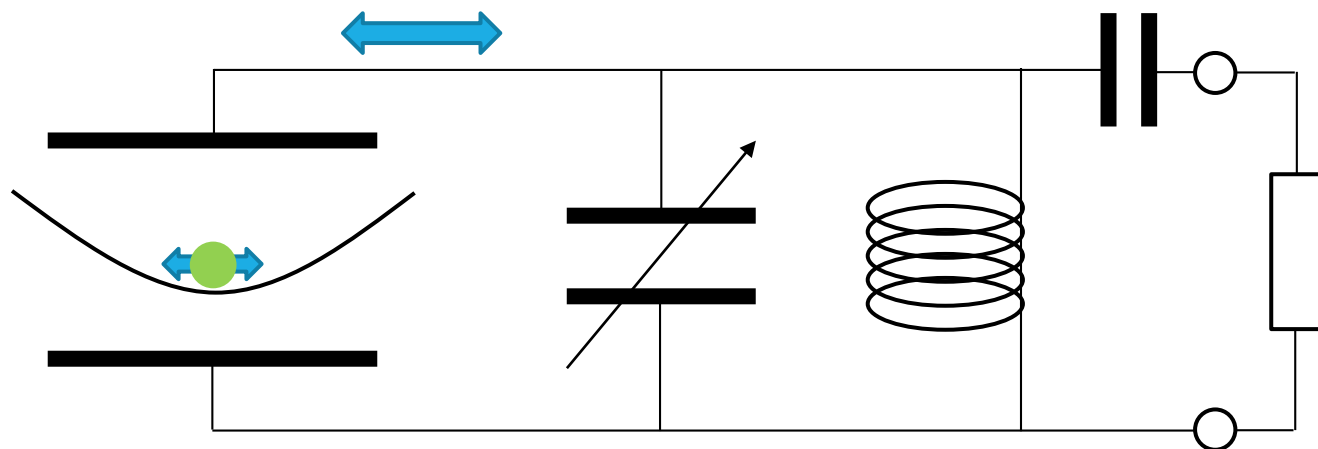
軌道



- 冷却
 - バッファースガス冷却
 - 輻射冷却
 - 抵抗冷却
 - 協働冷却

抵抗冷却：電気回路とトラップ電子

トラップ電子の周囲に電気回路があるとき



共鳴電気回路を通じて、電子は熱浴と接する

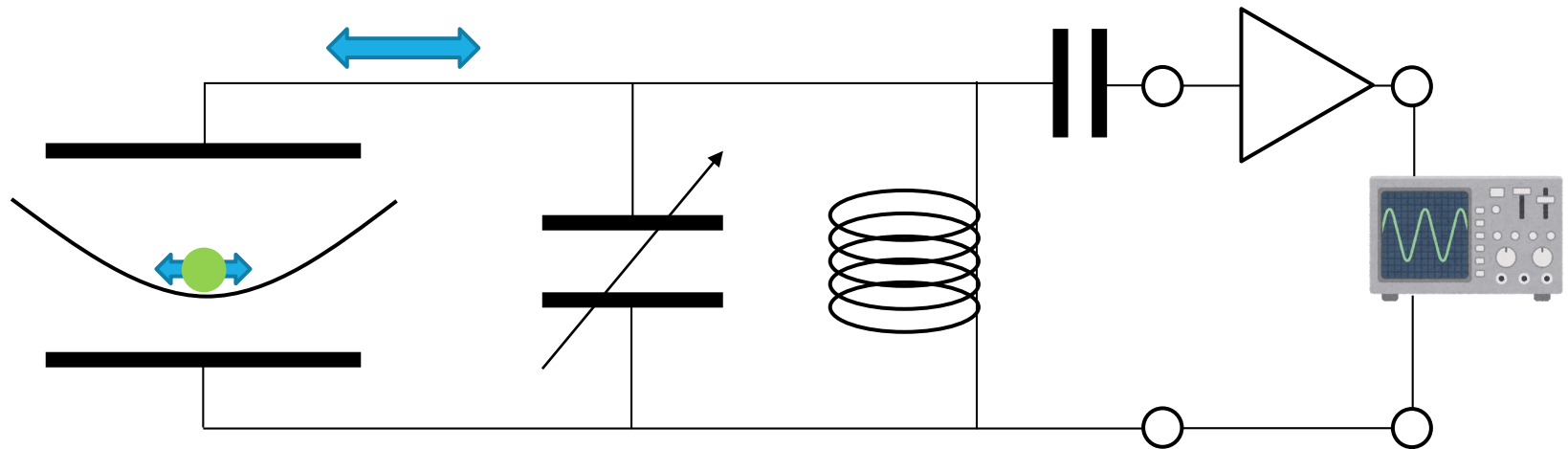
(抵抗冷却)

⇒スイッチ可能な熱浴

冷却（緩和） \longleftrightarrow 環境からの孤立(良い量子系)

測定 1

トラップ電子の周囲に電気回路があるとき



“Bolometric Technique” H. Dehmelt *et al*, 1968

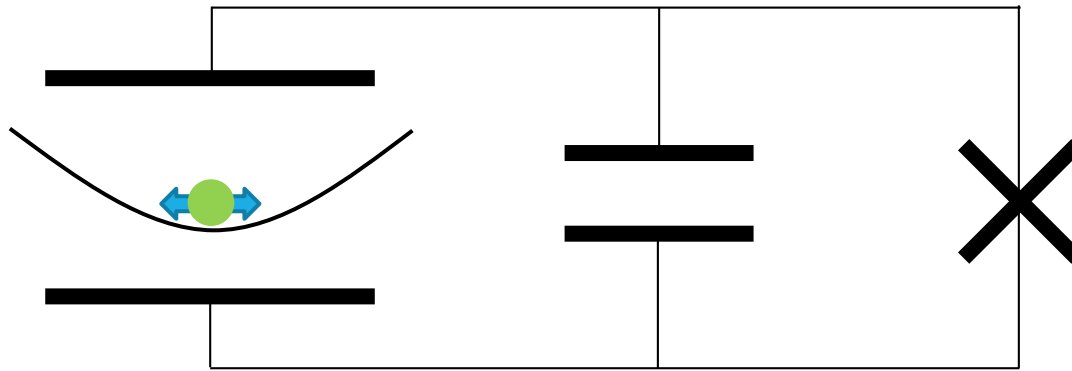
軌道：タンク回路を通じて漏れ出る電気信号を観測

スピン：軌道状態に変換して観測

原子とのスピン依存散乱で観測

測定 2 : 量子非破壊測定

トラップ電子の周囲に超伝導量子ビットがあるとき



Phonon number resolving state

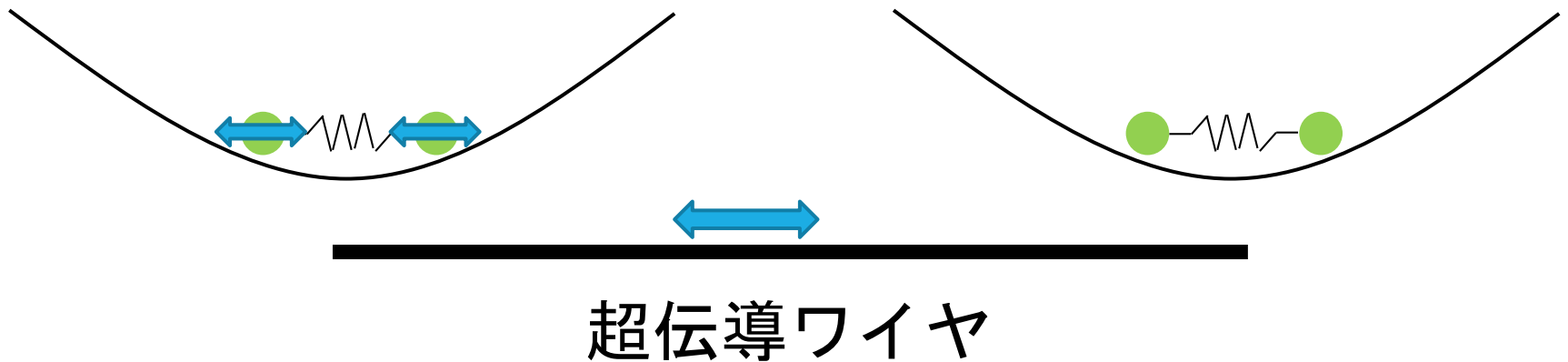
$$E_q = \hbar(\omega_q + \chi n) \sigma_z^{sc}$$

超伝導量子ビットのエネルギーが電子の軌道状態に依存する。

超伝導量子ビットの測定によって

電子の状態を量子非破壊的（間接的）に測定できる。

量子ビット間相互作用



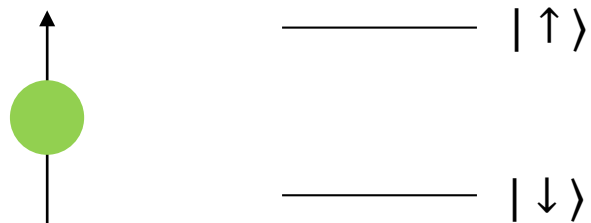
単一トラップ内：クーロン相互作用 参考) イオントラップ
トラップ間：超伝導配線（鏡像電荷）

A. Sørensen and K. Mølmer, Phys. Rev. Lett. 82, 1971 (1999)

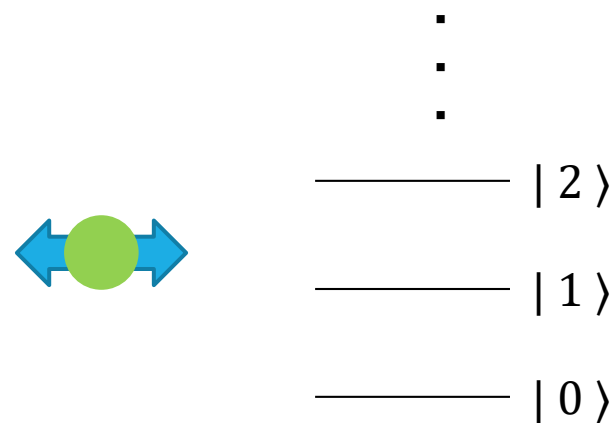
N. Daniilidis, T. Lee, R. Clark, S. Narayanan and H. Häffner,
J. Phys. B **42**, 144012 (2009)

コヒーレンス時間とその原因

電子スピン



軌道



エネルギー緩和

$$T_1 \sim \infty$$

$$T_1 \sim 1 - 1000 \text{ s}$$

位相緩和

$$T_2 \sim < 100 \text{ s}$$

$$T_2 \sim 1 - 1000 \text{ s}$$

コヒーレンス時間とその原因

電子スピン

エネルギー緩和

$$T_1 \sim \infty$$

- 環境からの孤立

軌道

$$T_1 \sim 1 - 1000 \text{ s}$$

- 電極からの熱ノイズ
- 異常加熱

位相緩和

$$T_2 \sim 100 \text{ s}$$

- 磁場ノイズ
- 電流ノイズ

$$T_2 \sim 1 - 1000 \text{ s}$$

- トラップ電場のノイズ

コヒーレンス時間とその原因

電子スピン

$$T_1 \sim \infty$$

$$T_2 \sim 100 \text{ s}$$

軌道

$$T_1 \sim 1 - 1000 \text{ s}$$

$$T_2 \sim 1 - 1000 \text{ s}$$

制御速度

$$\tau_s \sim 10 \text{ MHz}$$

$$\tau_o \sim 100 \text{ MHz}$$

$$\tau_{s0} \sim 0.1 \text{ MHz}$$

$$\tau_{ee} \sim 1 \text{ MHz}$$

スピン軌道

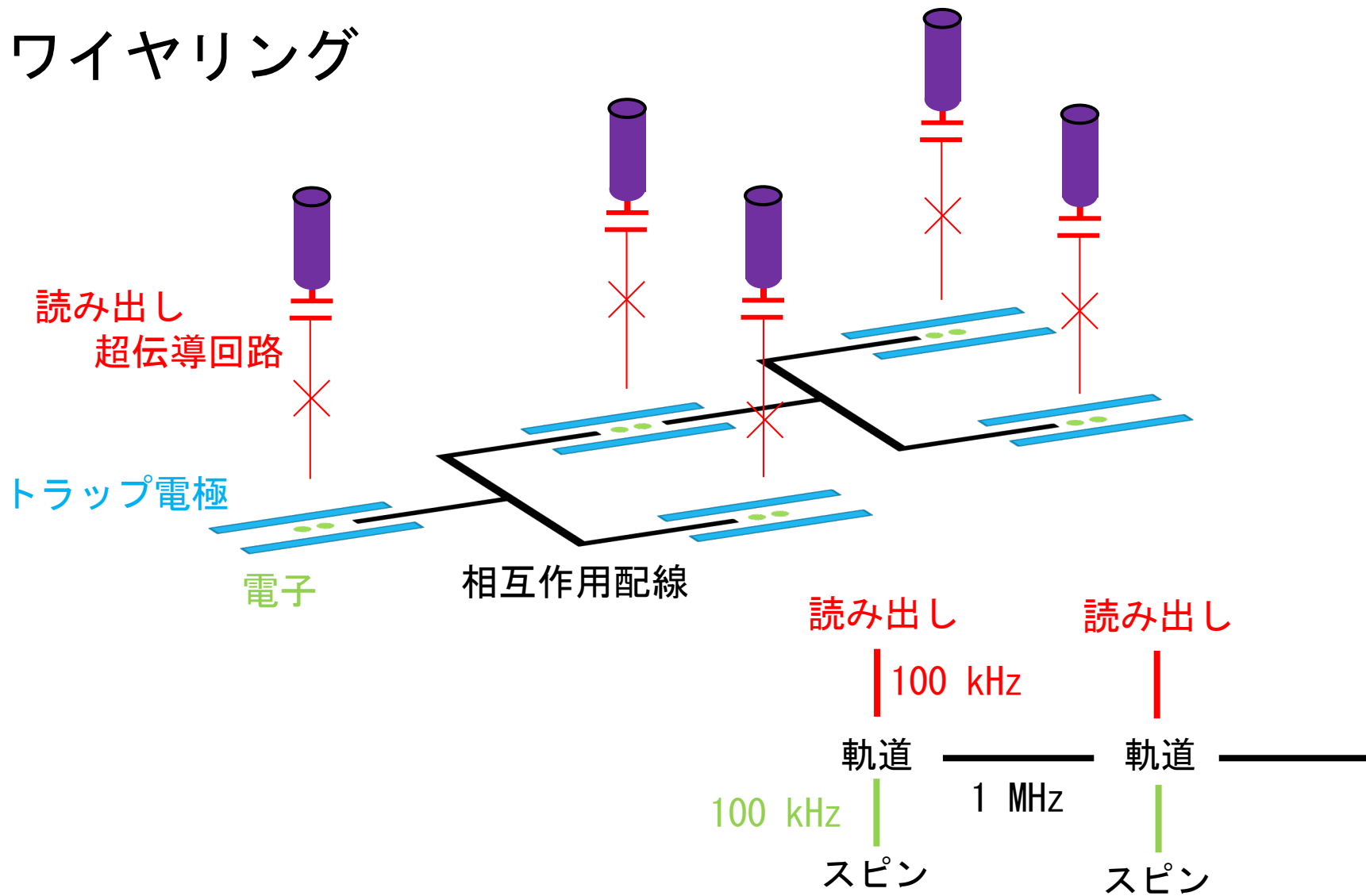
遠隔トラップ間

制御速度寿命比

$$T_2 / \tau > 10^5$$

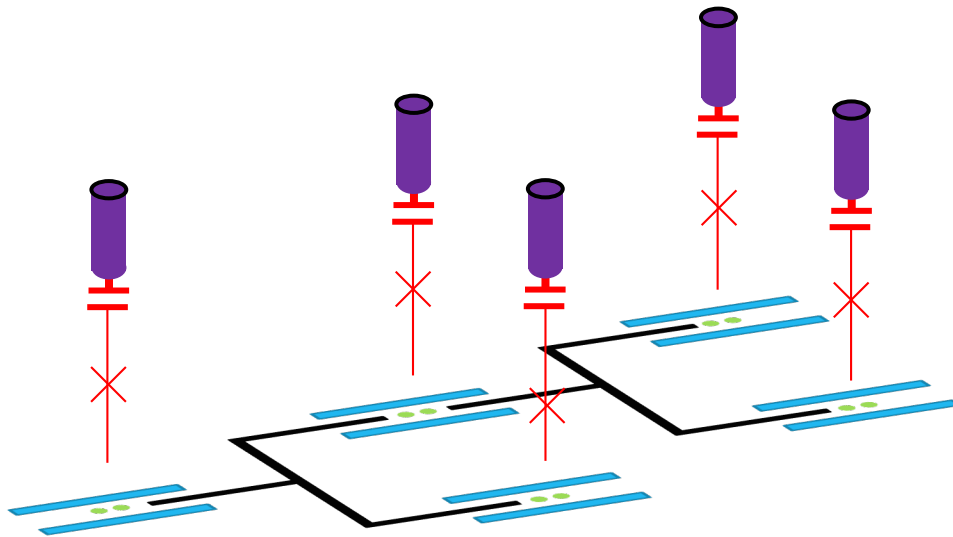
拡張化

ワイヤリング



応用先

- 量子コンピュータ



- 低エネルギー電子源

冷却された電子を開放

超低電圧電子顕微鏡

量子電子顕微鏡

- 非電子トラップ

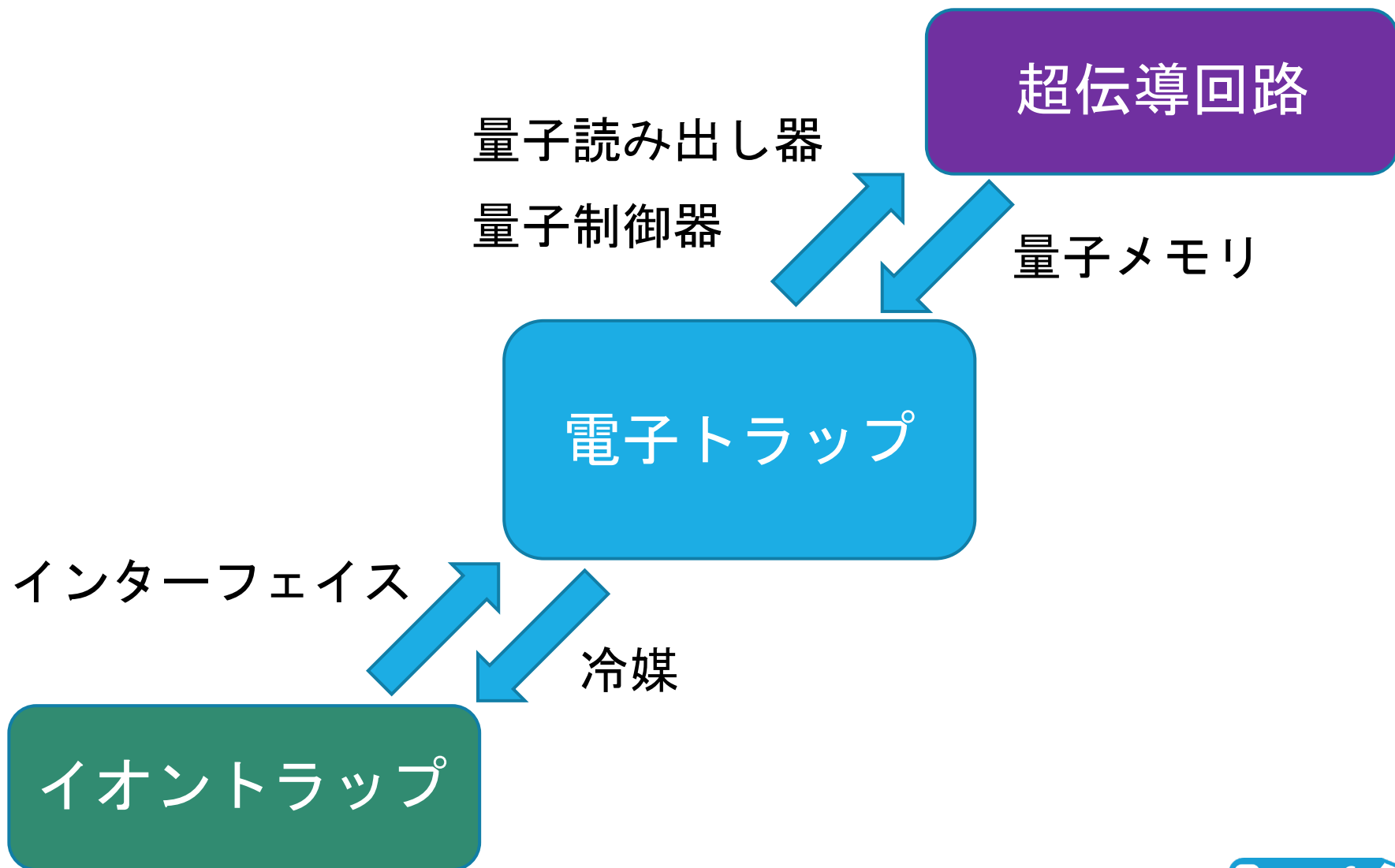
ミューオン

(反)陽子

Etc...

基礎物理実験

その他の系との関係



参考文献

- 個別量子系の物理 —イオントラップと量子情報処理—
占部伸二 著、朝倉書店
- Particle Confinement in Penning Traps
Manuel Vogel 著、Springer
- Hybrid quantum systems with trapped charged particles.
S. Kotler, R. W. Simmonds, D. Leibfried, and D. J. Wineland,
Physics Review A, 95, 022327 (2017)
- Quantum information processing with trapped electrons and
superconducting electronics.
N. Daniilidis, D. J. Gorman, L. Tian, and H. Hartmut
New J. Phys. 15, 073017 (2013).
- Spin readout of trapped electron qubits.
P. Peng, C. Matthiesen, and H. Häffner
Physical Review A 95, 012312 (2017).