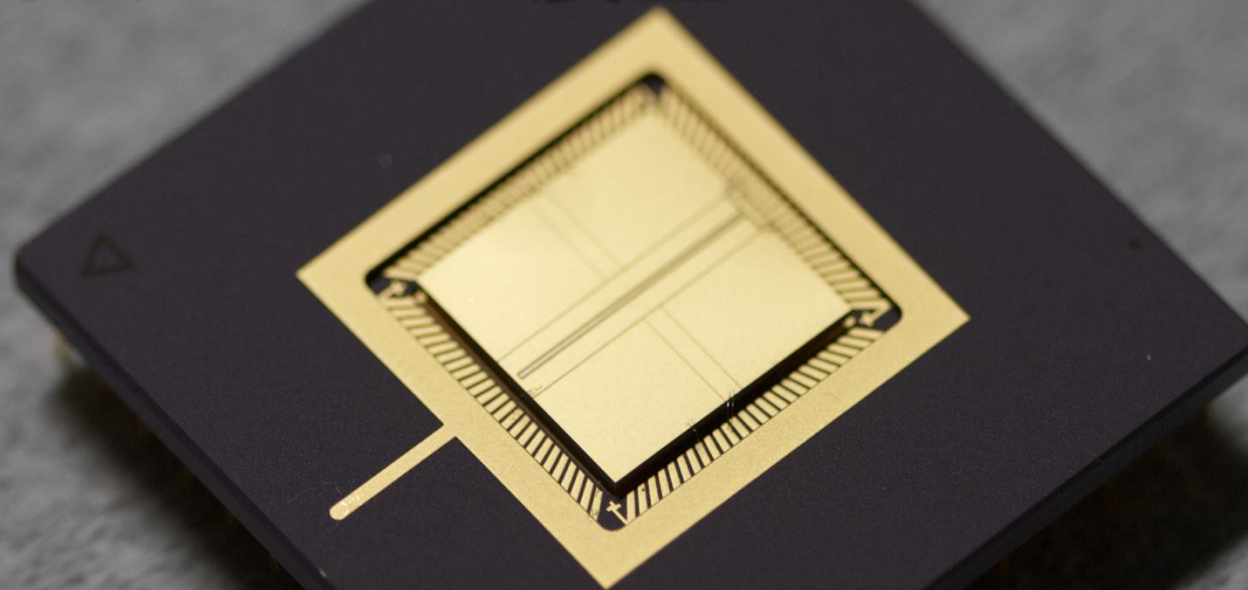


# 量子インターフェイスとしての イオントラップの展望



大阪大学大学院基礎工学研究科  
田中 歌子



## 1. イオントラップの原理

2. 孤立系としてのイオントラップ

原子時計  
量子メモリ

大きな利点だが、反面他の物理系との結合が難しい

3. フレーナートラップ

従来の3次元のトラップと異なり開放的な構造

4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ

イオンの振動  
光との結合  
マイクロ波との結合

5. まとめと今後の展望

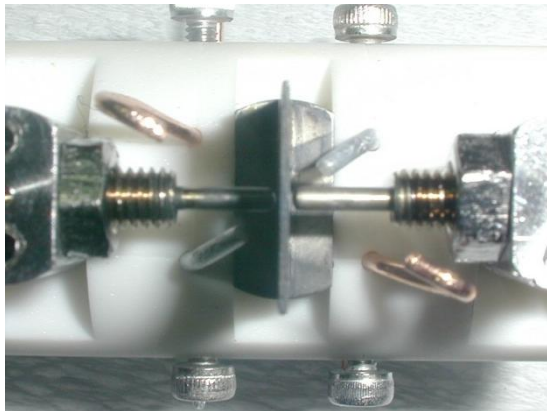
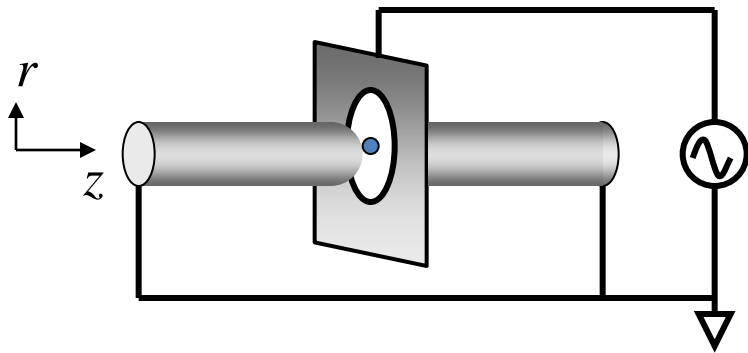
# 1. イオントラップの原理

復元力  $\vec{F} = -k\vec{r}$  を生み出すポテンシャル  $\phi = \alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2$   
静電場の場合  $\Delta\phi = 0$

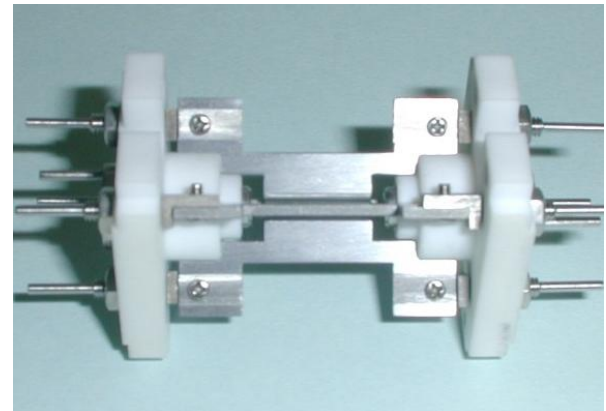
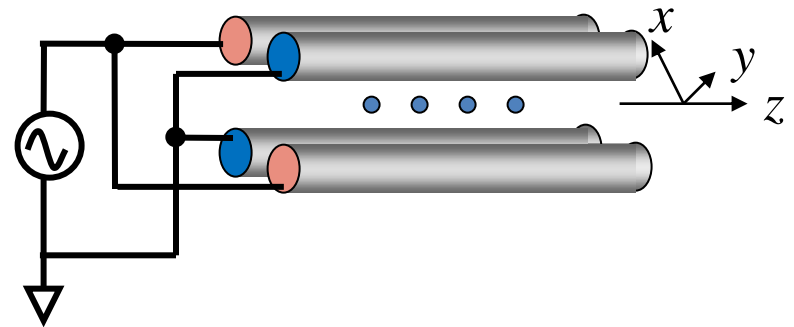
Earnshawの定理 荷電粒子を静電場のみに平衡点に静止させることはできない  
交流電場を用いてトラップを駆動する手法 Paul trap

Quadrupole Paul trap

$$\alpha = \beta, \gamma = -2\alpha$$



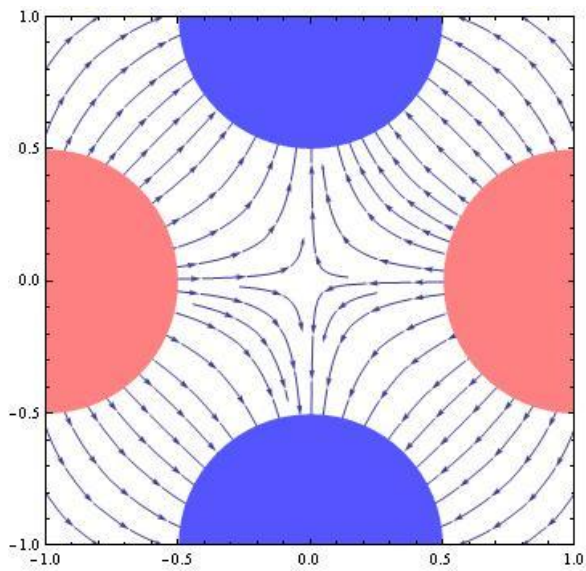
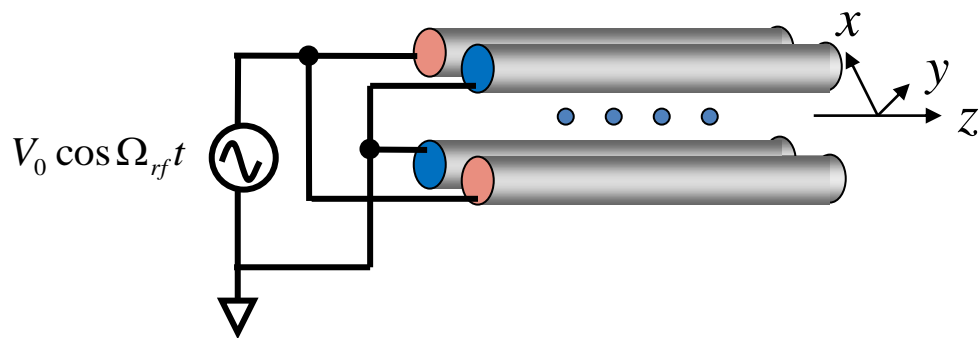
Linear Paul trap  $\alpha = -\beta, \gamma = 0$



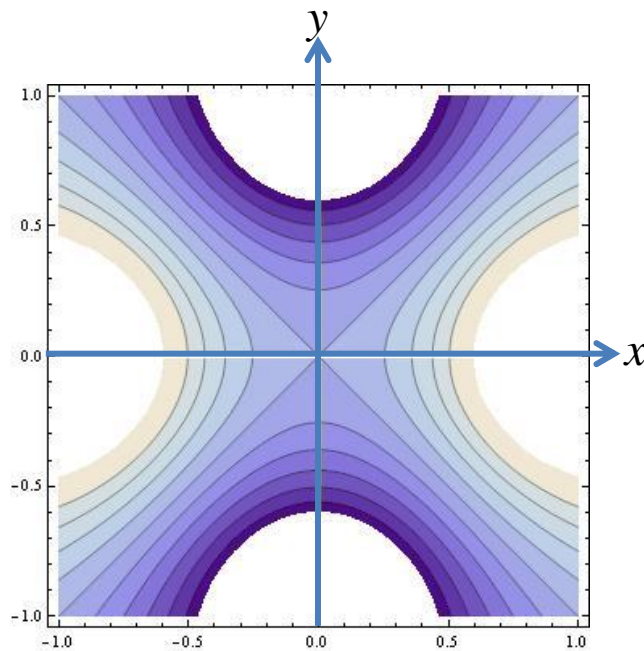
# 1. イオントラップの原理

Linear Paul trap

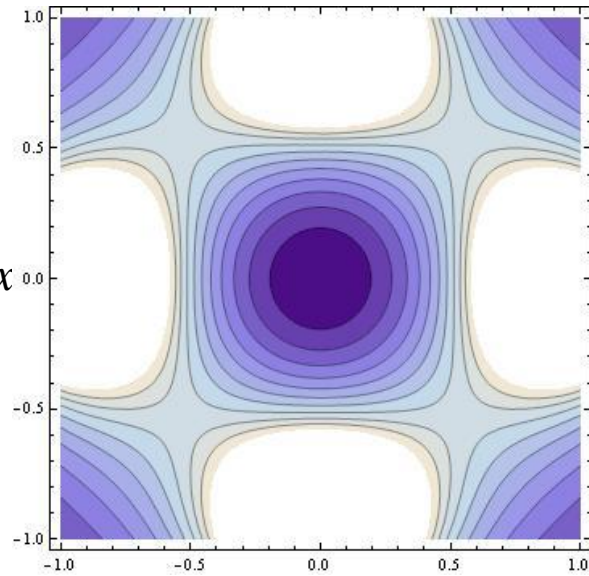
$$\alpha = -\beta, \quad \gamma = 0$$



電場



ポテンシャル



擬ポテンシャル

# 1. イオントラップの原理

## 周期的に時間変化するポテンシャル中の荷電粒子の運動方程式 Mathieu 方程式

イオンの位置ベクトル  $\mathbf{u} = u_x \hat{x} + u_y \hat{y} + u_z \hat{z}$

Linear Paul trap

rf によるポテンシャル 
$$V = \frac{V_0}{2} \left( 1 + \frac{x^2 - y^2}{r_0^2} \right) \cos \Omega_{rf} t$$

静電場によるポテンシャル

$$U = \frac{\kappa U_0}{2} \left\{ z^2 - \frac{1}{2} (x^2 + y^2) \right\}$$

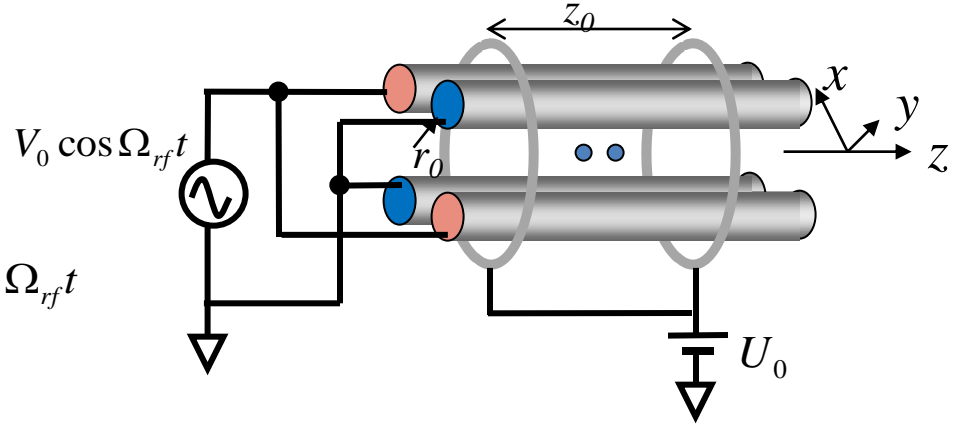
イオンの従う方程式

$$m \ddot{u}_i = e E_i \quad i=x, y, z$$

$$\ddot{u}_i + \left[ a_i + 2q_i \cos(\Omega_{rf} t) \right] \frac{\Omega_{rf}^2}{4} u_i = 0$$

$$a_x = a_y = -\frac{1}{2} a_z = -\frac{4e\kappa U_0}{m\Omega_{rf}^2 z_0^2}$$

$$q_x = -q_y = \frac{2eV_0}{m\Omega_{rf}^2 r_0^2}, q_z = 0$$



$\kappa$ : geometrical factor

$e$ : charge

$m$ : mass

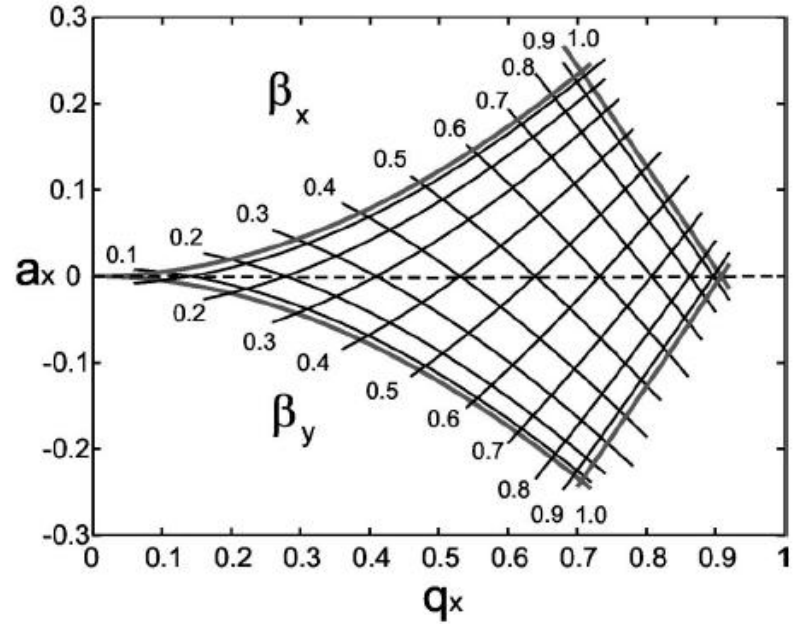
無次元のパラメータ

# 1. イオントラップの原理

トラップとして動作する条件 解が収束

$$|a_i| \ll 1, |q_i| \ll 1$$

安定領域を  
あらわすダイアグラム



$|a_i| \ll 1, |q_i| \ll 1$  のとき

$$u_i(t) \approx u_{li} \cos(\omega_i t + \varphi_{Si}) \left[ 1 + \frac{q_i}{2} \cos(\Omega_{rf} t) \right]$$

$$\omega_i = \frac{1}{2} \Omega_{rf} \sqrt{a_i + \frac{1}{2} q_i^2} \quad (\omega_i \ll \Omega_{rf})$$

$$a_x = a_y = -\frac{1}{2} a_z = -\frac{4ekU_0}{m\Omega_{rf}^2 z_0^2} \quad q_x = -q_y = \frac{2eV_0}{m\Omega_{rf}^2 r_0^2}, q_z = 0$$

永年運動  $\omega_i$   $x, y, z$  方向

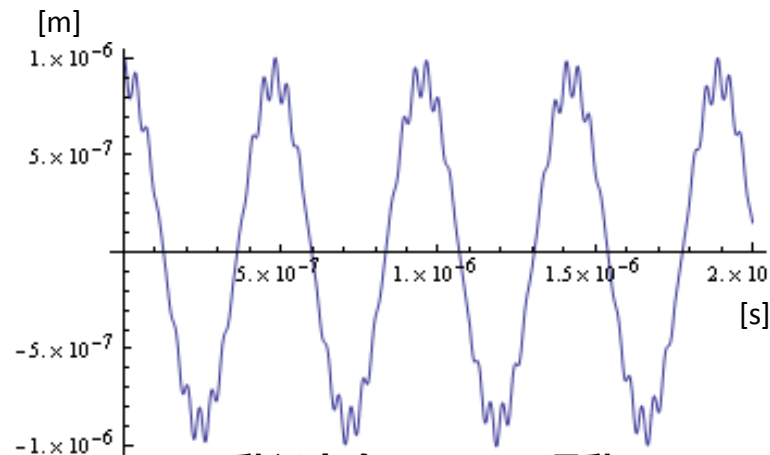
マイクロ運動  $\Omega_{rf}$   $x, y$  方向

擬ポテンシャル

$$\frac{e^2 |\vec{E}|^2}{4m\Omega_{rf}^2}$$

Linear Paul trapの場合

$$\frac{e^2 V_0^2}{4m\Omega_{rf}^2 r_0^4} (x^2 + y^2)$$



動径方向のイオンの運動

$\Omega_{rf}/2\pi = 27$  MHz  
 $u_{li} = 1 \mu\text{m}$   
 $a = 0, q = 0.22$   
 $\omega_i/2\pi = 2.1$  MHz

# 1. イオントラップの原理

$$u_i(t) \approx u_{1i} \cos(\omega_i t + \varphi_{Si}) \left[ 1 + \frac{q_i}{2} \cos(\Omega_{rf} t) \right]$$

↑  
永年運動の振幅  
レーザー冷却によって減少

浮遊電場がある場合

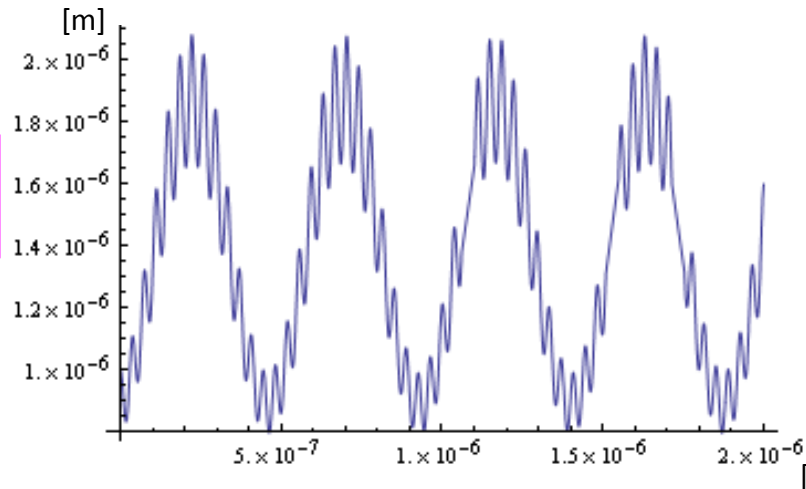
$$\ddot{u}_i + \left[ a_i + 2q_i \cos(\Omega_{rf} t) \right] \frac{\Omega_{rf}^2}{4} u_i = \frac{e\vec{E}_{dc} \cdot \hat{u}_i}{m}$$

$$u_i(t) \approx \left[ u_{0i} + u_{1i} \cos(\omega_i t + \varphi_{Si}) \right] \left[ 1 + \frac{q_i}{2} \cos(\Omega_{rf} t) \right]$$

レーザー冷却できない  
余剰マイクロ運動

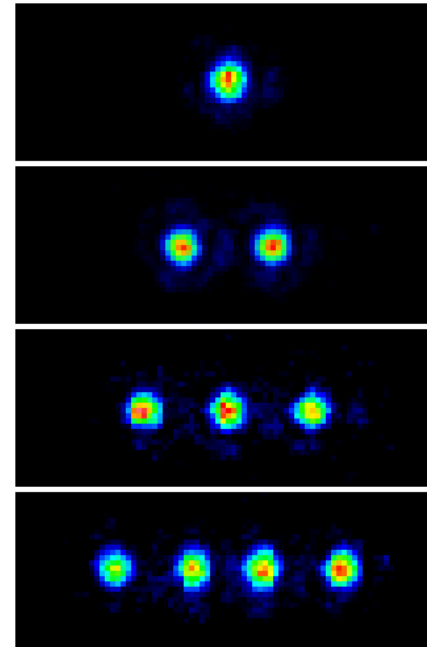
最小になるように  
電場を補正する必要がある

$$u_{0i} \approx \frac{e\vec{E}_{dc} \cdot \hat{u}_i}{m\omega_i^2}$$



動径方向のイオンの運動 浮遊電場がある場合

レーザー冷却されたカルシウムイオン



イオン間隔 約10 μm

$$\Omega_{rf}/2\pi = 27 \text{ MHz}$$

$$u_{1i} = 1 \mu\text{m}$$

$$a = 0, q = 0.22$$

$$\omega_i/2\pi = 2.1 \text{ MHz}$$

$$m = 40 \times 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$|\vec{E}_{dc}| = 100 \text{ V/m}$$

$$u_{0i} = 1.4 \mu\text{m}$$

( $\vec{E}_{dc} // \hat{u}_i$  のとき)

## 1. イオントラップの原理

## 2. 孤立系としてのイオントラップ

原子時計  
量子メモリ

大きな利点だが、反面  
他の物理系との結合が難しい

## 3. フレーナートラップ

従来の3次元のトラップと異なり  
開放的な構造

## 4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ

イオンの振動  
光との結合  
マイクロ波との結合

## 5. まとめと今後の展望



## 2. 孤立系としてのイオントラップ

### 理想的な孤立系

#### 長い捕獲時間

数ヶ月単位で同じイオンを捕獲し続けることができる

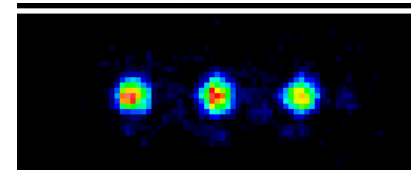
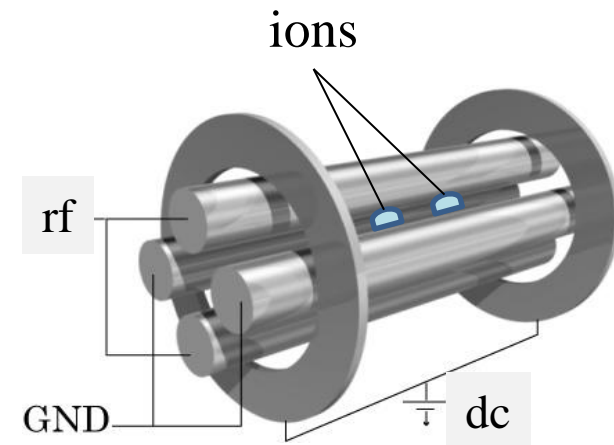
#### 長いコヒーレンス時間

$T_1$  光遷移の量子ビット  $\sim 1\text{s}$   
基底状態超微細構造間の  
マイクロ波遷移の量子ビット 年のオーダー

$T_2 > 10\text{s}$  (\*)

\*C. Langer *et al.*, PRL 95, 060502 (2005)

トラップポテンシャルが深い  
イオンは超高真空中で捕獲

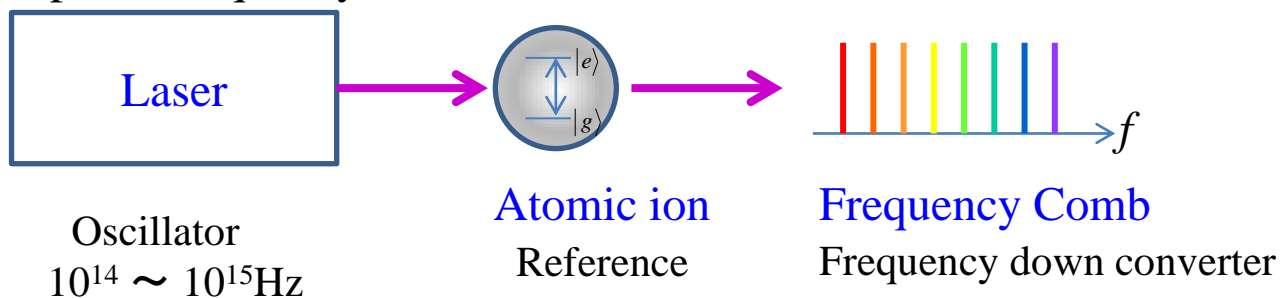


数十eV  
 $10^{-10} \sim 10^{-11}$  Torr

## 2. 孤立系としてのイオントラップ

### 原子時計 イオントラップの応用として代表的であり歴史も長い

Optical frequency standard



	Wavelength (nm)	Transition	Uncertainty	Instability	Ref.
Al <sup>+</sup>	267	$1S_0 - 3P_0$	$8.6 \times 10^{-18}$	$2.8 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$	PRL 104, 070802 (2010)
Hg <sup>+</sup>	282	$2S_{1/2} - 2D_{5/2}$	$1.9 \times 10^{-17}$	$3.9 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$	Science 319, 1808(2008)
Yb <sup>+</sup>	436	$2S_{1/2} - 2D_{3/2}$	$3.8 \times 10^{-16}$		PRL 94, 230801(2005)
Yb <sup>+</sup>	467	$2S_{1/2} - 2F_{7/2}$	$7.1 \times 10^{-17}$		PRL 108, 090801(2012)
			$1.0 \times 10^{-15}$		NJP 14, 013045(2012)
Sr <sup>+</sup>	674	$2S_{1/2} - 2D_{5/2}$	$3.4 \times 10^{-15}$		Science 306, 1055(2004)
Ca <sup>+</sup>	729	$2S_{1/2} - 2D_{5/2}$	$2.4 \times 10^{-15}$	$2.9 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$	PRL 102, 023002(2009)
In <sup>+</sup>	237	$1S_0 - 3P_0$	$1.4 \times 10^{-14}$		Opt. Comm. 273, 526(2007)

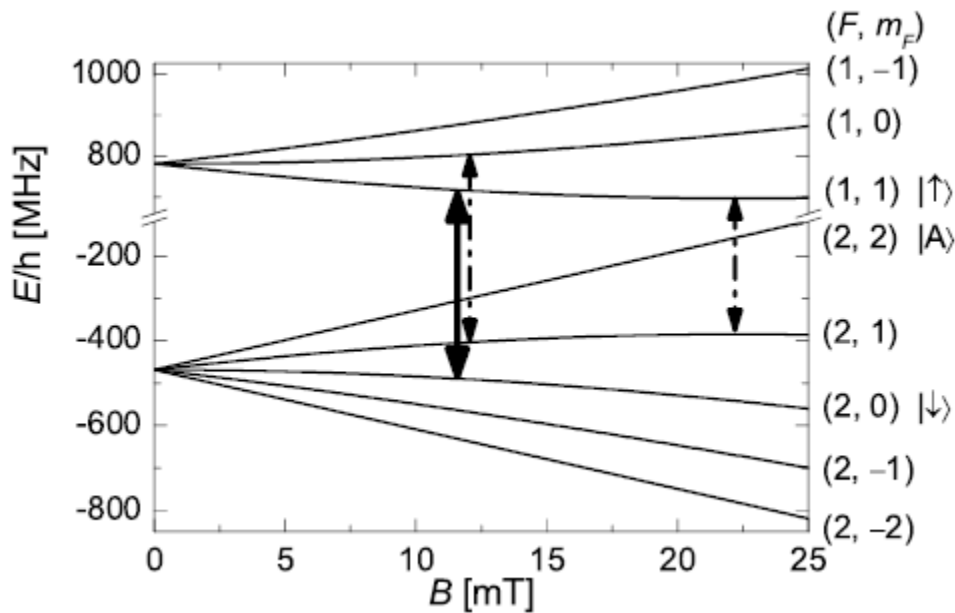
## 2. 孤立系としてのイオントラップ

### 量子メモリ 長いコヒーレンス時間を活かす

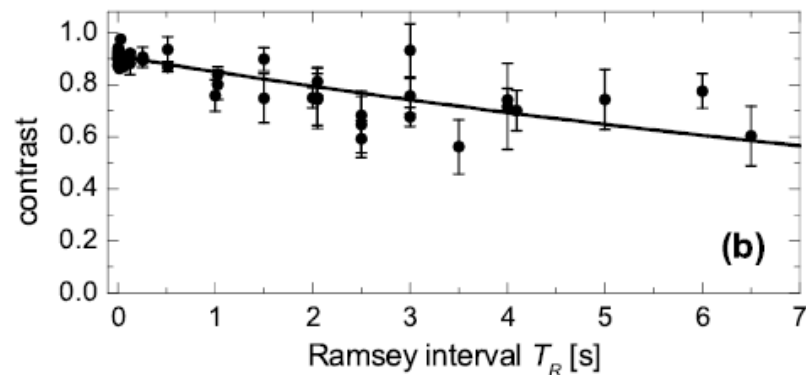
C. Langer *et al.*, PRL 95, 060502 (2005)

デコヒーレンスの要因のひとつ 磁気的なノイズ  
感度が低い遷移を選ぶ

${}^9\text{Be}^+$  基底状態の超微細構造間  
磁場に1次に依存しない遷移



Ramsey共鳴



Ramsey interval  $T_R$

contrast  $b(T_R) = b_0 e^{-T_R/\tau}$

$\tau = 14.7 \pm 1.6$  s

## 1. イオントラップの原理

2. 孤立系としてのイオントラップ

原子時計  
量子メモリ

大きな利点だが、反面他の物理系との結合が難しい

3. フレーナートラップ

従来の3次元のトラップと異なり開放的な構造

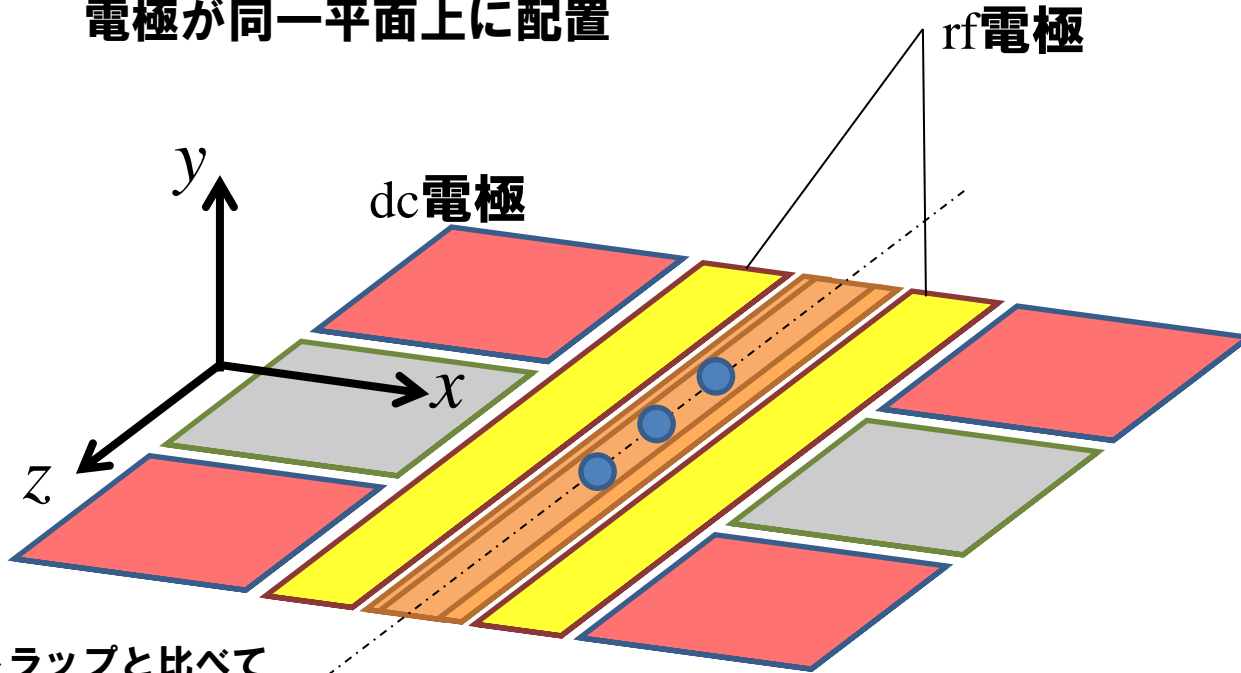
4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ

イオンの振動  
光との結合  
マイクロ波との結合

5. まとめと今後の展望

### 3. フレーナートラップ

電極が同一平面上に配置

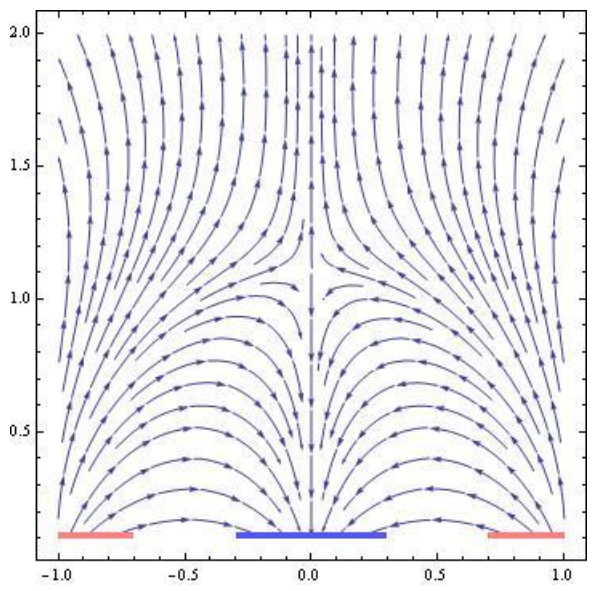
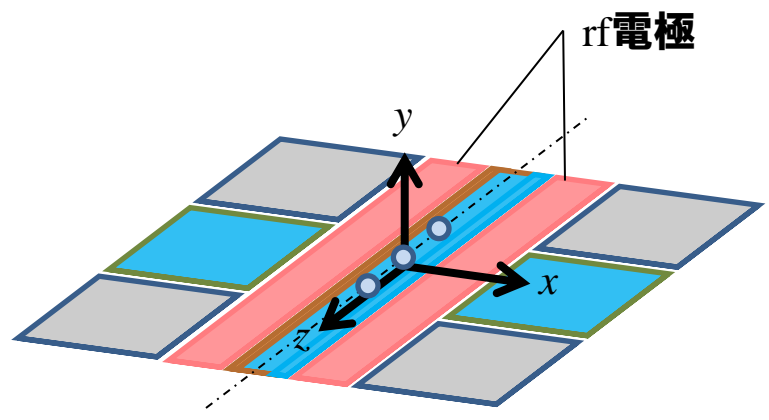


電極の自由なレイアウトが可能で大規模集積化に適している  
開放的な構造  
電気回路との整合性がよい

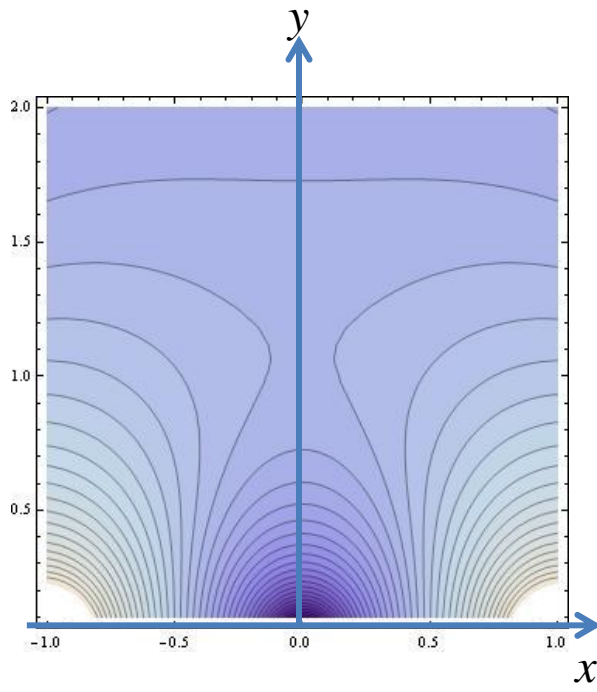
- ▲レーザーの垂直方向のアクセスが制限される
- ▲トラップポテンシャルが浅い

J. Chiaverini *et al.*, *Quantum Inf.Comput.* **5**, 419-439 (2005) proposal  
C. E. Pearson *et al.*, *Phys. Rev. A* **73**, 032307 (2006)  
S. Seidelin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 253003 (2006)  
K. R. Brown *et al.*, *Phys. Rev. A* **75**, 015401 (2007)  
U. Tanaka *et al.*, *J. Phys. B* **42**, 154006 (2009)

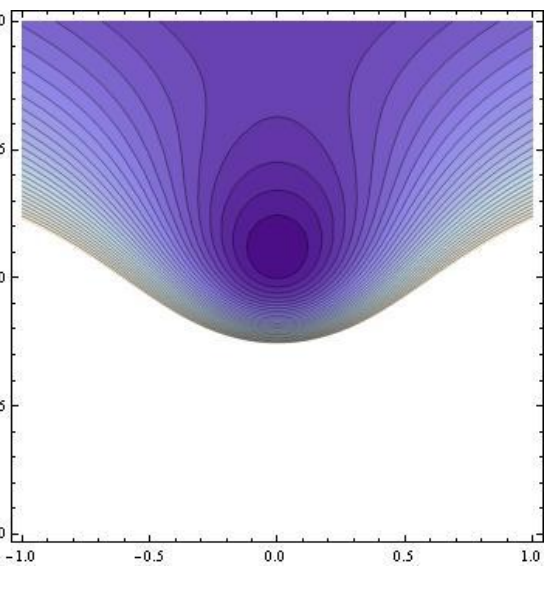
# 3. フレーナーラップ



電場



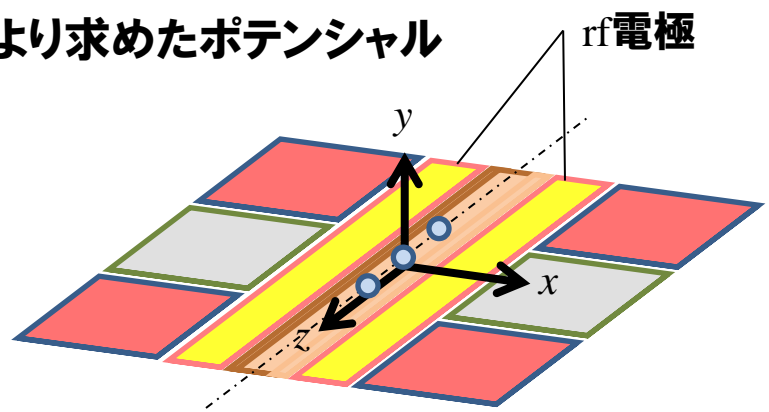
ポテンシャル



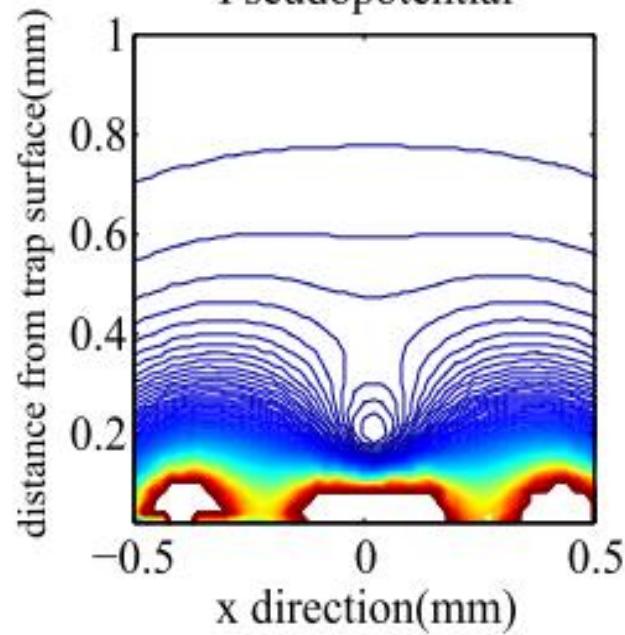
擬ポテンシャル

# 3. フレーナートラップ

数値計算により求めたポテンシャル



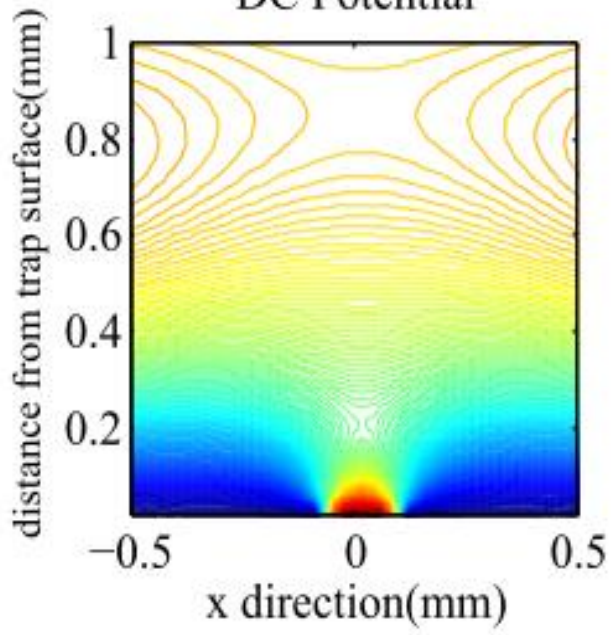
Pseudopotential



rf電極による擬ポテンシャル

$$\frac{e^2 |\nabla \phi_{rf}|^2}{4m\Omega_{rf}^2}$$

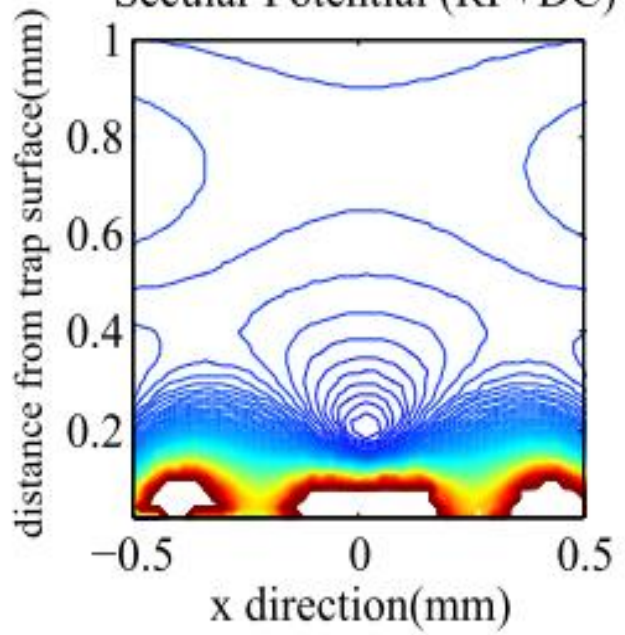
DC Potential



dc電極によるポテンシャル

$$e\phi_{dc}$$

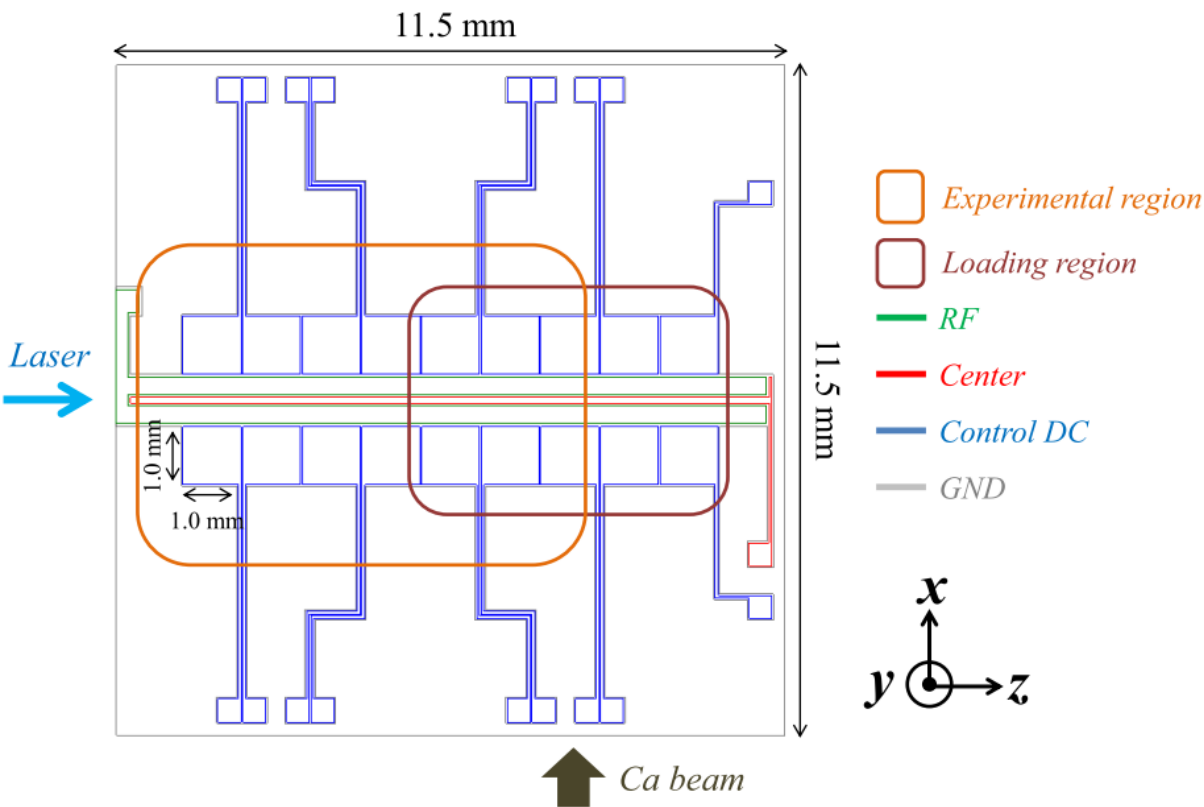
Secular Potential (RF+DC)



$$\frac{e^2 |\nabla \phi_{rf}|^2}{4m\Omega_{rf}^2} + e\phi_{dc}$$

# 3. フレーナートラップ

## 多領域から成るトラップ



トラップされる高さ 200  $\mu\text{m}$

複数のトラップ領域

制御電極の数:  $2 \times 9$  個

制御電極の大きさ:  $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$

rf 電圧

$$\Omega_{\text{rf}}/2\pi = 25 \text{ MHz}$$

$$V_0 = 130 \sim 250 \text{ V}_{\text{amp}}$$

dc 電圧

$$5 \sim 30 \text{ V}$$

ポテンシャル深さ

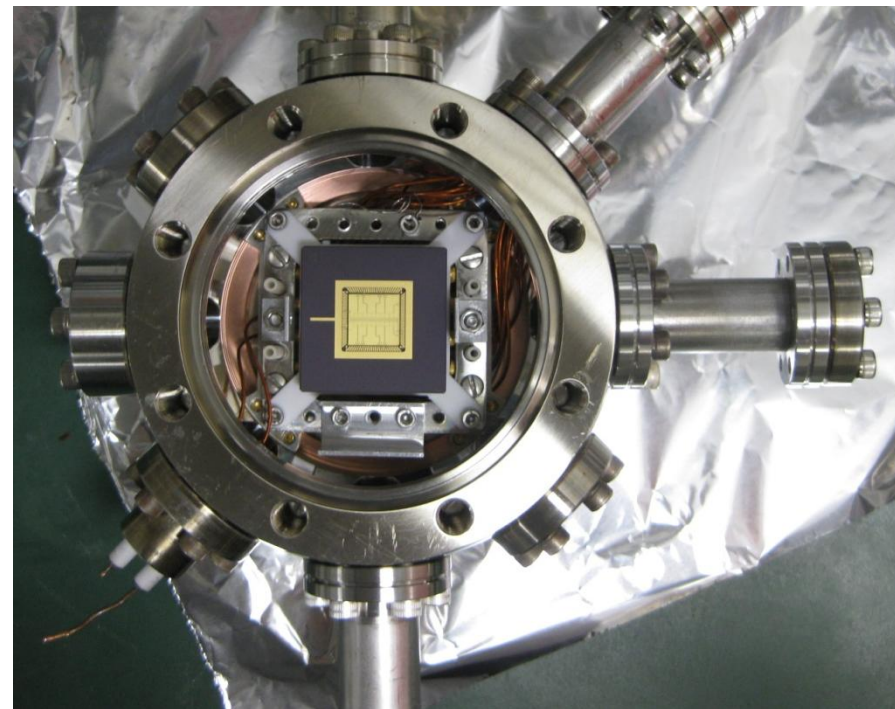
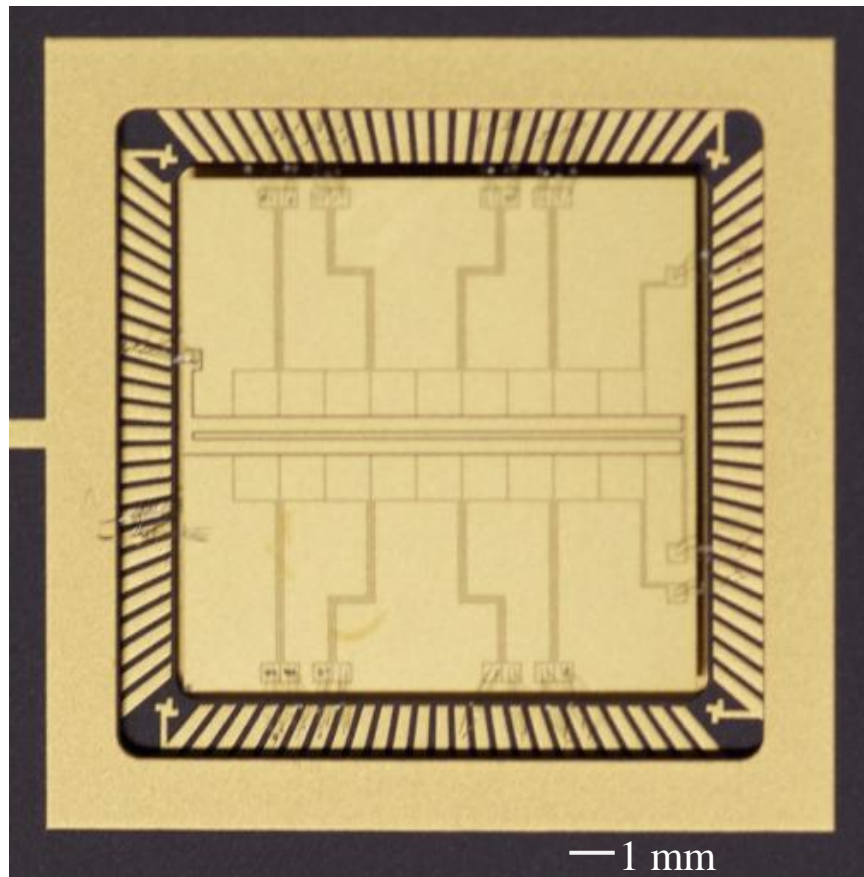
$$\sim 1.2 \text{ eV}$$

Designed by K. Koda



### 3. フレーナーチップ

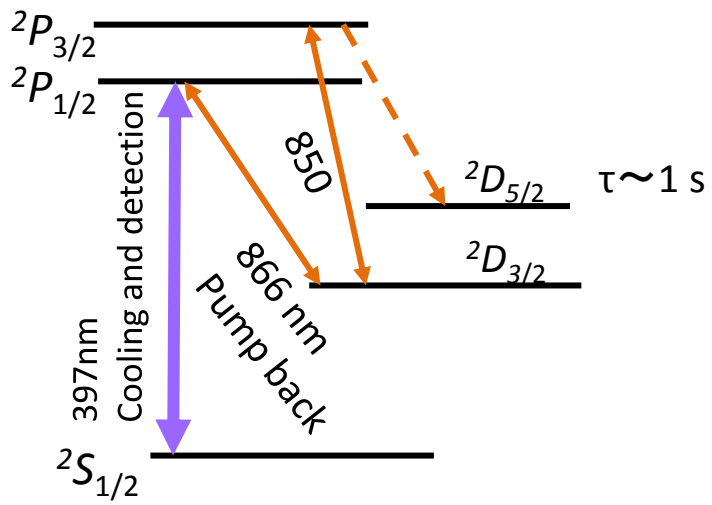
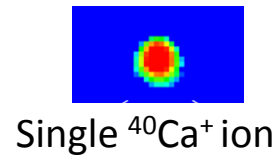
#### 多領域から成るトラップ



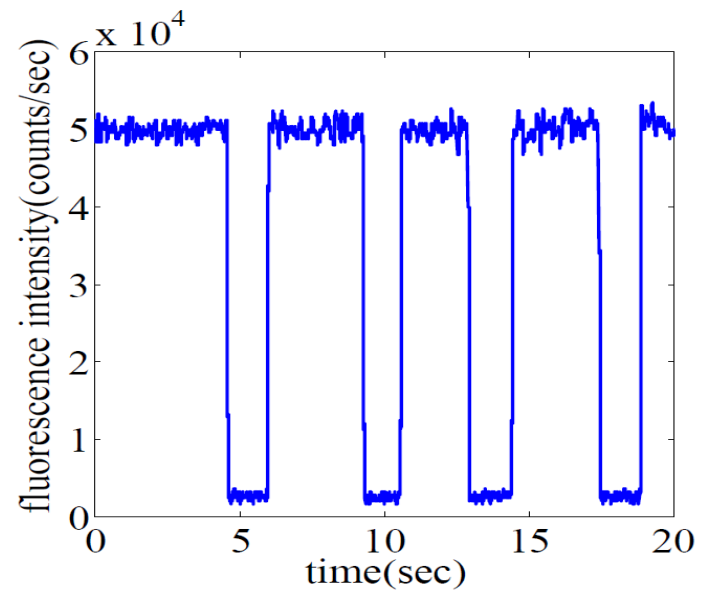
電極 金  
基板 アルミナ

# 3. フレーナートラップ

## カルシウムイオンの捕獲

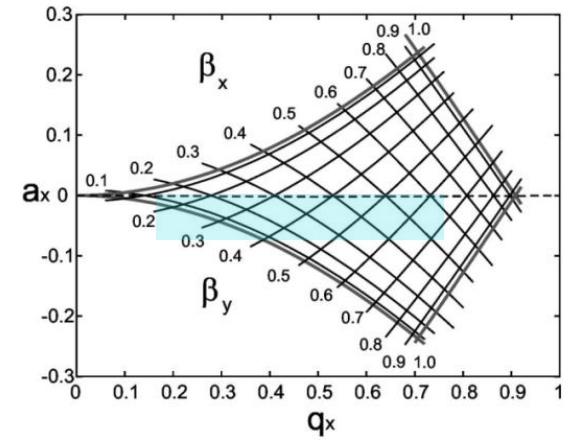


$^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$ 間の  
量子跳躍の観測

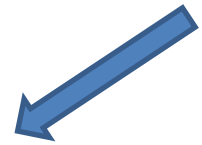
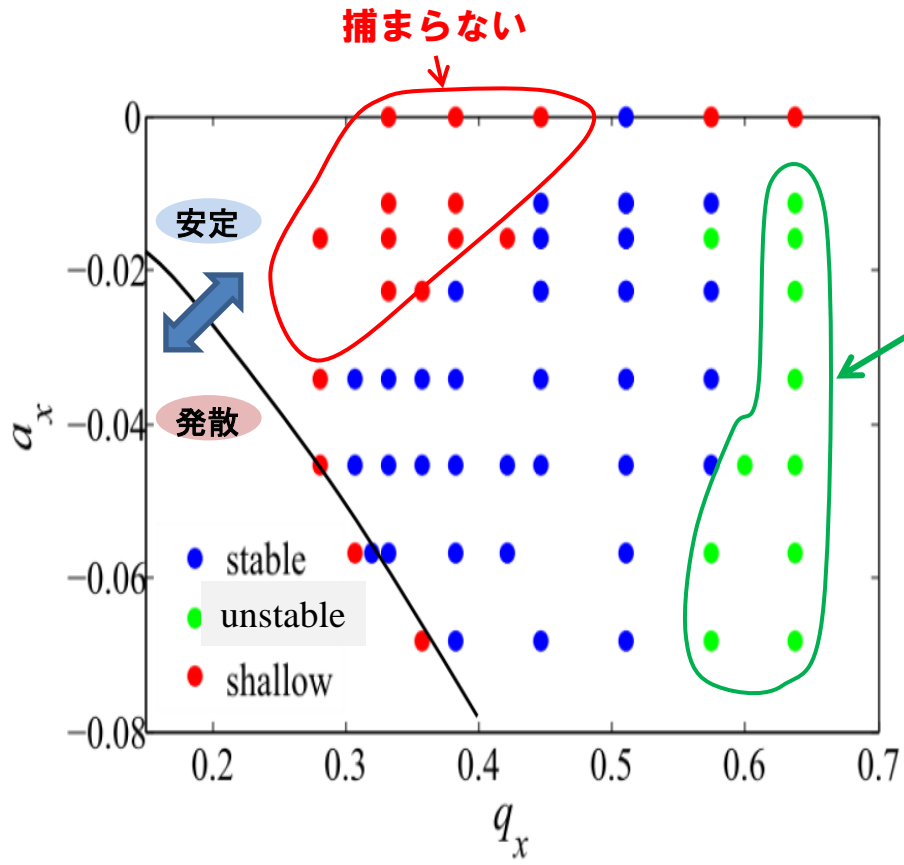


# 3. フレーナートラップ

## トラップの安定性の評価



Linear Paul trapの安定領域



イオンは捕獲できるが、安定してポテンシャル内に留まらない

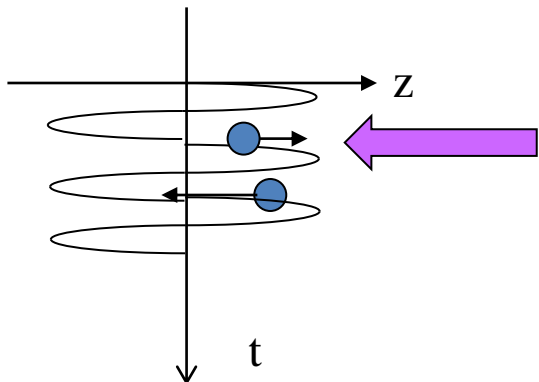
マイクロ運動、トラップの非調和性の影響など

電圧条件と $a, q$ パラメータの値を対応付けて表したダイアグラム

# 3. フレーナートラップ

## 余剰マイクロ運動の補正

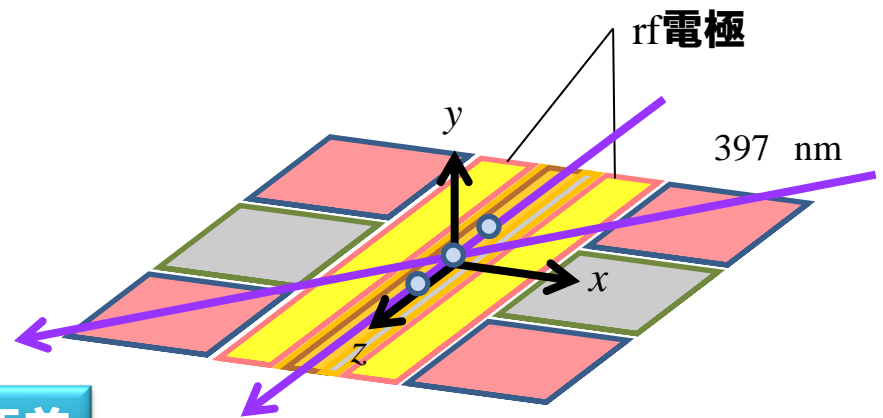
検出方法  $x, z$  方向: rf-光子相関法



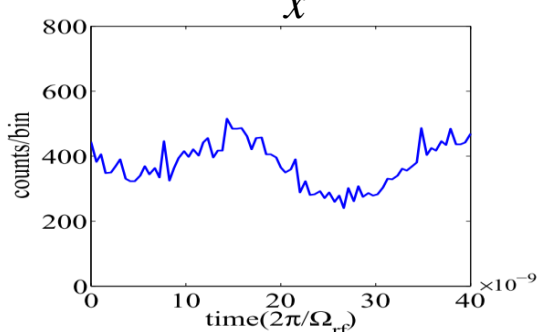
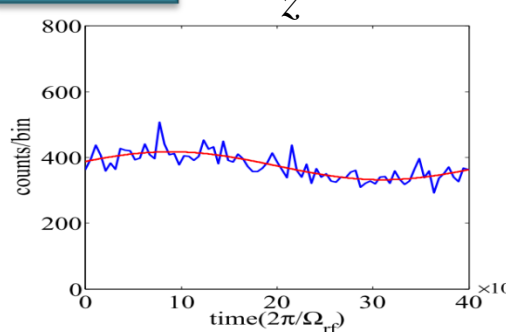
Doppler shiftにより蛍光カウントは  
マイクロ運動の周波数 $\Omega_{rf}$ で変化

rf電圧と蛍光カウントとの  
相関を検出

$y$ 方向にはレーザー光をあてられないので  
同じ方法が使えない

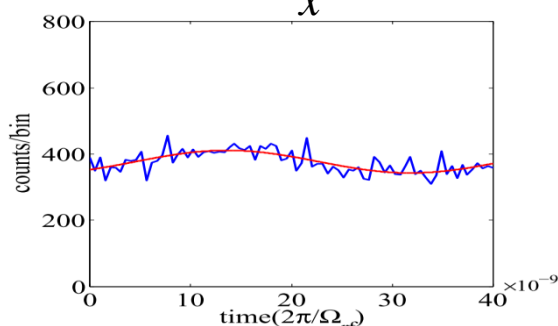
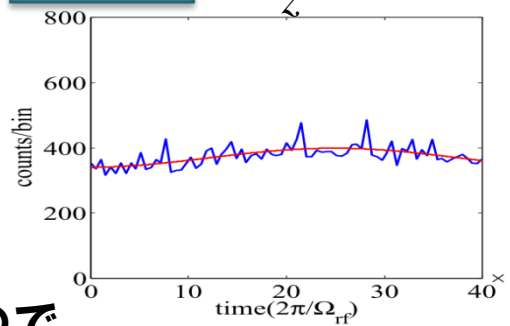


補正前



rf電圧との相関信号

補正後

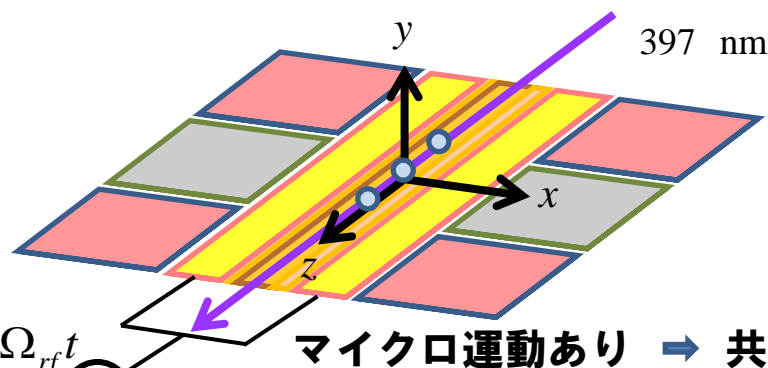


rf電圧との相関信号

# 3. フレーナートラップ

## 余剰マイクロ運動の補正

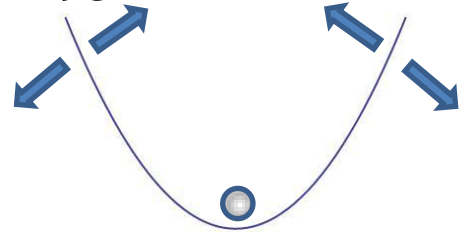
検出方法 y方向：パラメトリック共鳴



rf電圧に強度変調をかけてトラップ  
 ポテンシャルを変調する  $V_0 (1+h \cos \omega_m t) \cos \Omega_{rf} t$   
 ( $h \ll 1$ )

$\bar{u}$  イオンの平均の位置  
 $\ddot{\bar{u}} + \omega^2 (1+2h \cos \omega_m t) \bar{u} = 0$

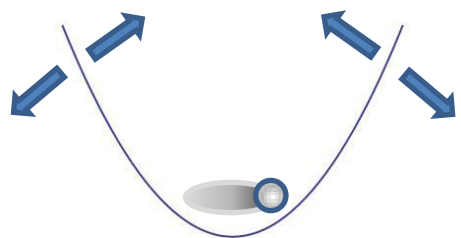
イオンの平均の位置がrfの  
 つくるポテンシャルのノード  
 にある



$\bar{u} = 0$

変化しない

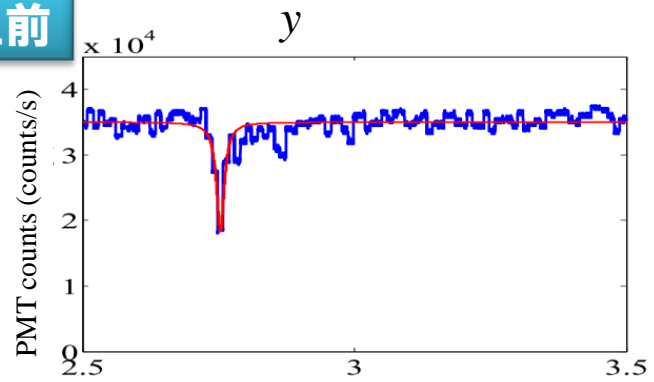
イオンの平均の位置が浮遊電  
 場によってrfのつくるポテン  
 シャルのノードからずれている



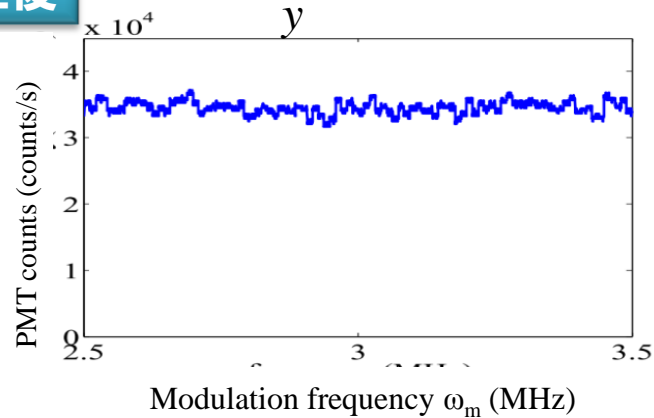
$\bar{u} \neq 0$

パラメトリック共鳴がおこる  
 $\omega_m = 2\omega/n$   $n$ : 自然数

補正前



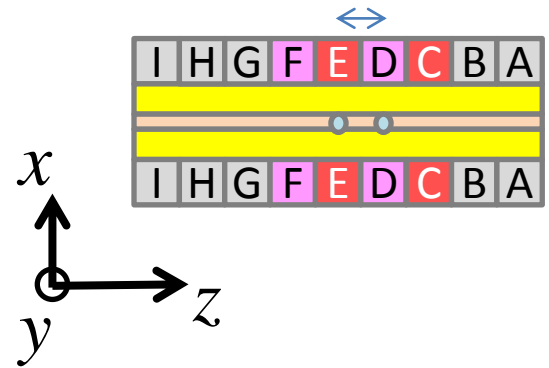
補正後



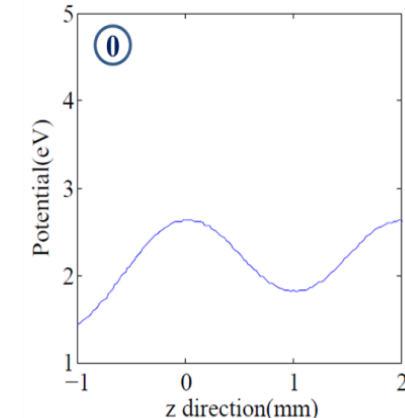
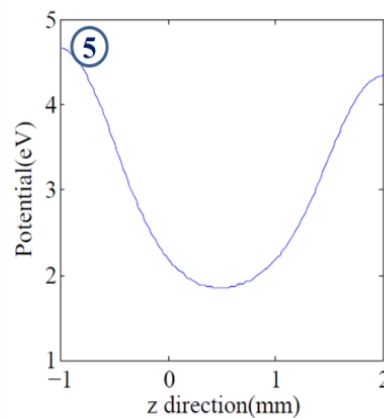
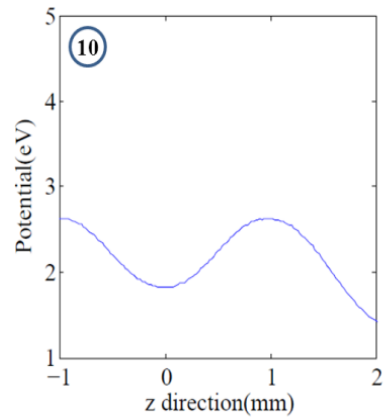
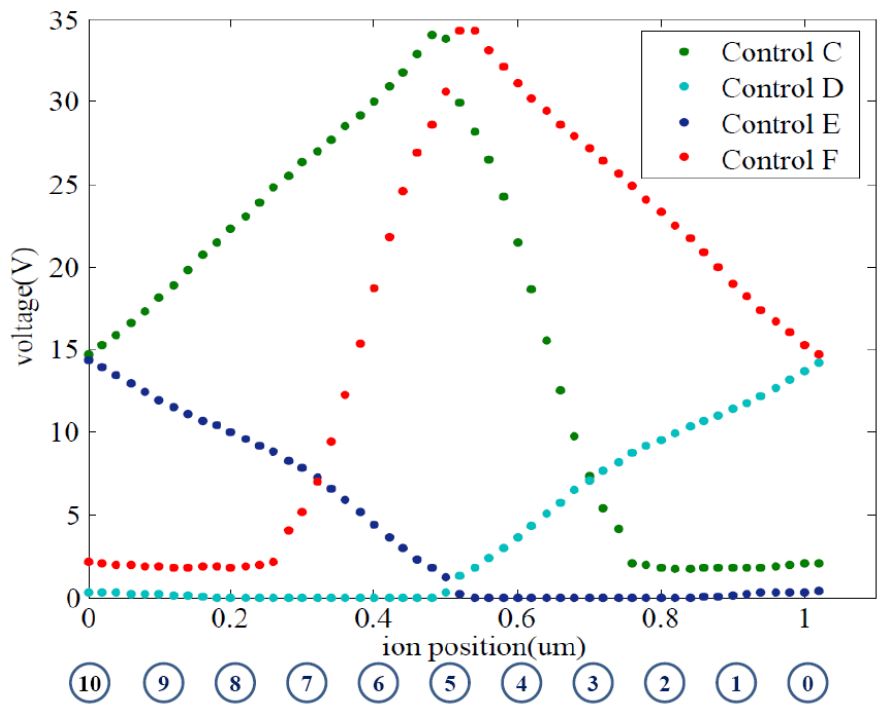
Y. Ibaraki *et al.*, Appl. Phys. B 105, 219 (2011)  
 U. Tanaka *et al.*, Appl. Phys. B 107, 907 (2012)

# 3. フレーナートラップ

異なる領域間のイオンの輸送

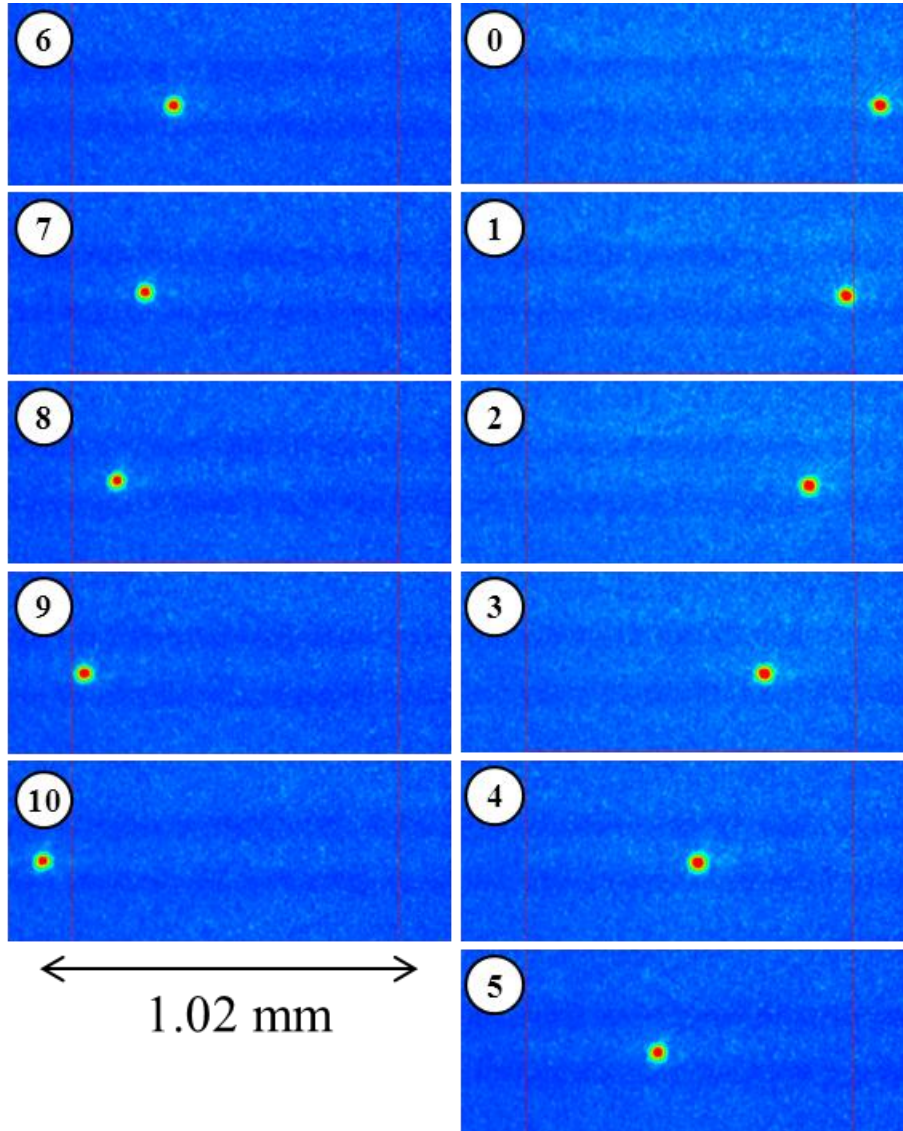


各イオンの位置における制御電極の電圧



# 3. フレーナートラップ

## 異なる領域間のイオンの輸送



クラウド状態 (複数個)  
イオンの個数を減らすことなく輸送に成功  
単一イオンや2, 3個でも成功

イオンの移動の様子 (100  $\mu\text{m}$  間隔)

## 1. イオントラップの原理

2. 孤立系としてのイオントラップ

原子時計  
量子メモリ

大きな利点だが、反面他の物理系との結合が難しい

3. フレーナートラップ

従来の3次元のトラップと異なり開放的な構造

4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ

イオンの振動  
光との結合  
マイクロ波との結合

## 5. まとめと今後の展望



# 4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ。

量子状態の情報のやりとり

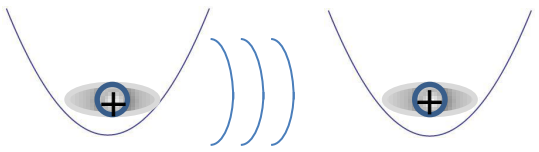
イオン自体を動かす



そのものが媒体として働く

真空装置内  
時間

イオン(=荷電粒子)の振動



Coulomb相互作用

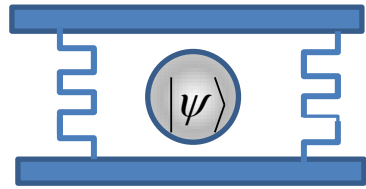
真空装置内  
近距離

光を媒体



長距離の転送可能

マイクロ波を媒体

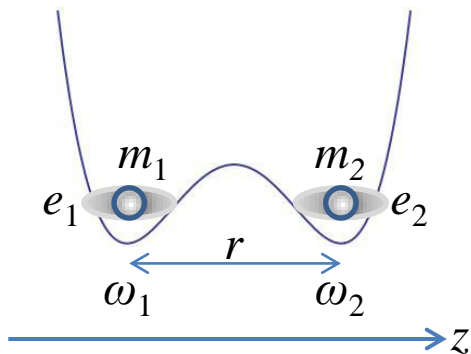


長距離の転送可能

# 4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ

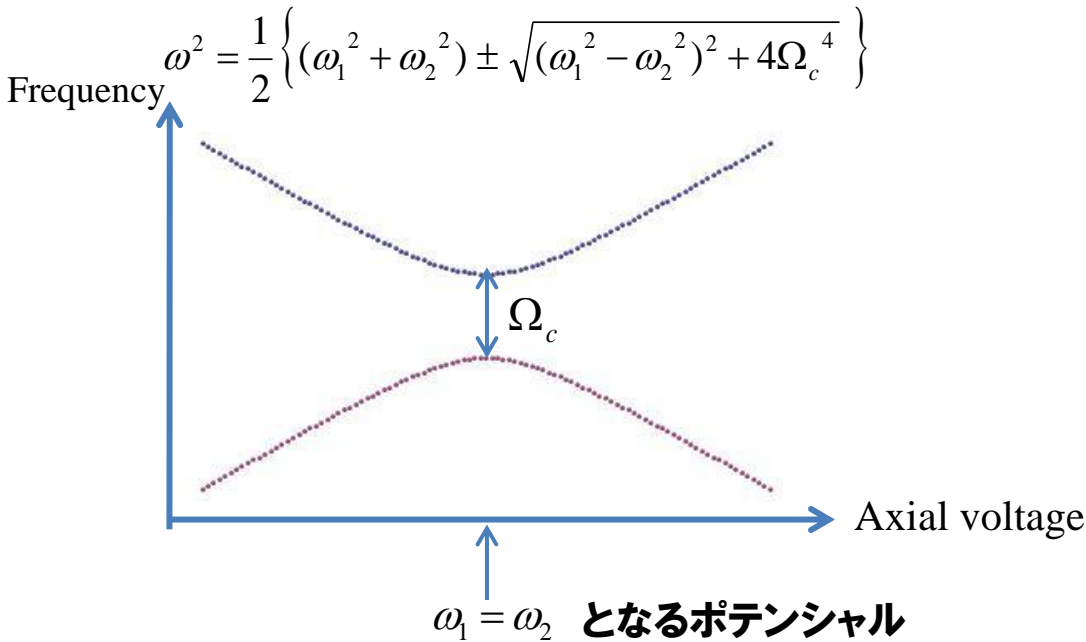
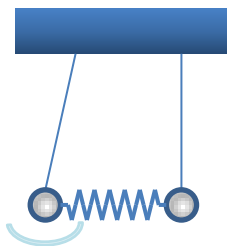
## イオンの振動

K. R. Brown *et al.*, Nature 471, 196 (2011)  
M. Harlander *et al.*, Nature 471, 200 (2011)



**z軸方向に2か所のポテンシャル極小をつくり  
2つの振動子のCoulomb相互作用によるカップリングを観測**

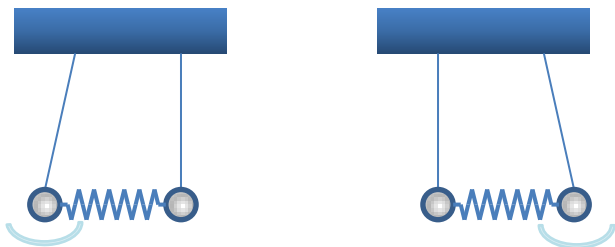
$$\Omega_c = \frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{m_1 m_2} \omega_1 \omega_2} \frac{1}{r^3}$$



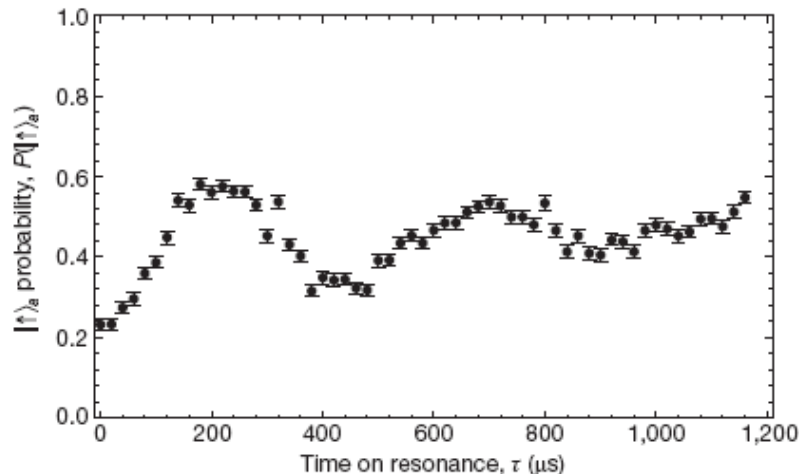
# 4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ

## イオンの振動

2つの振動子間でエネルギーのやりとりがある



平均振動量子数が1に近い状態での観測



K. R. Brown *et al.*, Nature 471, 196 (2011)

プレーナートラップ イオンの高さ  $40\mu\text{m}$  ポテンシャル間のバリア 約  $3\text{ meV}$

2つの振動子のカップリングの大きさ  $\Omega_c$

${}^9\text{Be}^+$   $\omega_1 \approx \omega_2 \approx 2\pi \times 4\text{ MHz}$  ポテンシャル間の距離  $r = 40\mu\text{m}$   $\Omega_c / 2\pi = 3\text{ kHz}$

カップリングの大きさは  $\frac{1}{r^3}$  に依存

近距離(数十 $\mu\text{m}$ )に限られる

加熱レートの影響が大きい

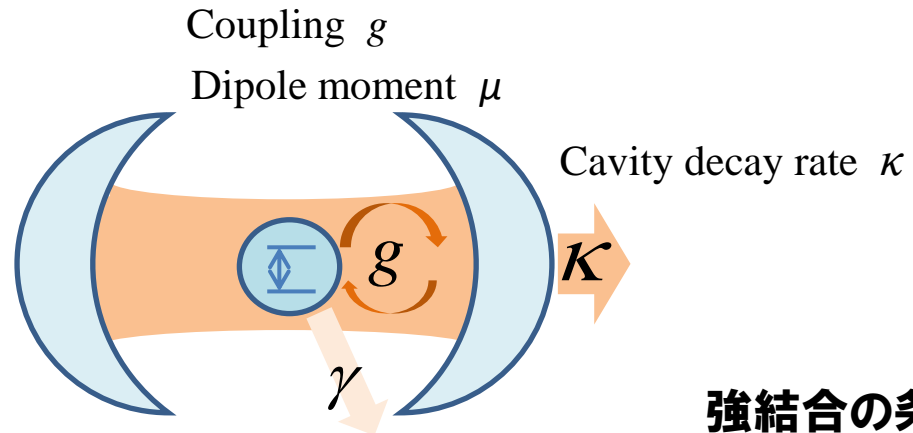
$$\frac{d\langle n \rangle}{dt} \propto \frac{1}{\omega^2} \quad 1800\text{ quanta per sec at } 4.2\text{ K}$$

# 4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ

## 光との結合

情報を遠くに送ることができる

インターフェース Cavity QED

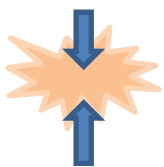


**強結合の条件**  $g \gg (\gamma, \kappa)$

- Spontaneous decay rate  $\gamma$
- Cavity resonant frequency  $\omega_C$
- Cavity volume  $V$

$$g = \sqrt{\frac{|\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{\mu}|^2 \omega_C}{2\hbar \varepsilon_0 V}}$$

**共振器の体積Vが小さいのが望ましい**



**イオントラップの場合**

トラップ領域に誘電体を近づけると  
トラップポテンシャルを乱してしまう

# 4. 量子インターフェースとしてのイオンラップ

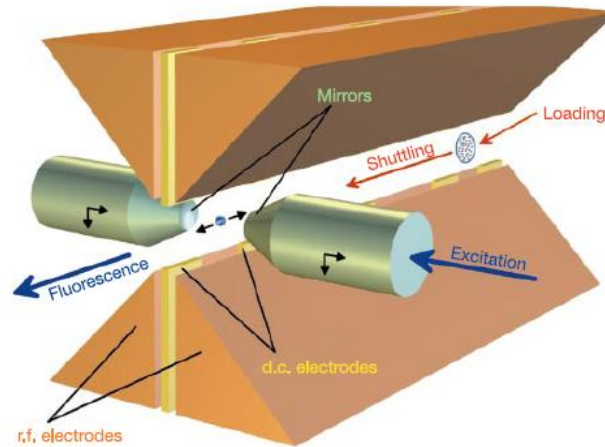
## 光との結合

### イオンラップとFabry-Perot共振器との結合例

G. R. Guthörlein *et al.*, Nature 414, 49 (2001)

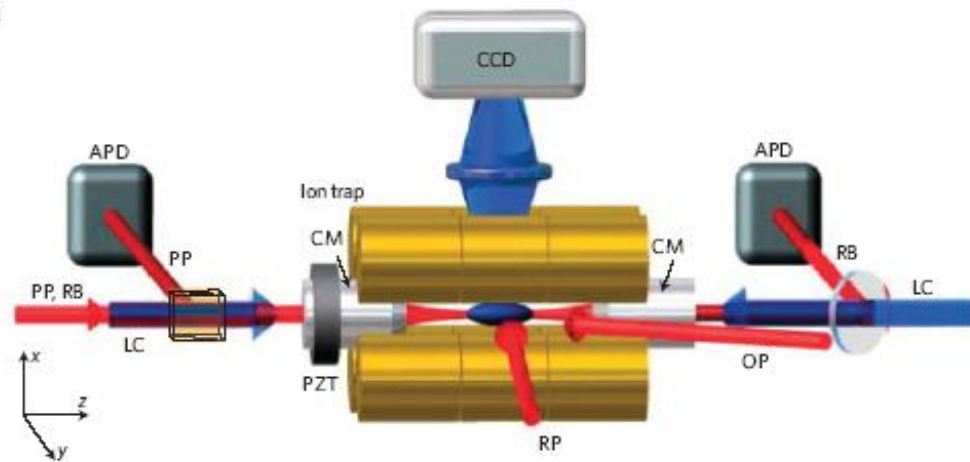
M. Keller *et al.*, Nature 431, 1075 (2004)

$^{40}\text{Ca}^+$   $^2P_{1/2}-^2D_{3/2}$  866 nm Cavity length 8 mm,  
( $g, \kappa, \gamma$ )/ $2\pi = (0.92, 1.2, 1.69)$  MHz



P. F. Herskind *et al.*, Nature Physics 5, 494 (2009)

$^{40}\text{Ca}^+$   $^2P_{1/2}-^2D_{3/2}$  866 nm Cavity length 11.8 mm,  $F=3,000$   
single ion ( $g, \kappa, \gamma$ )/ $2\pi = (0.53, 2.15, 11.15)$  MHz  
>530 ions  $g/2\pi = 12.2$  MHz



# 4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ

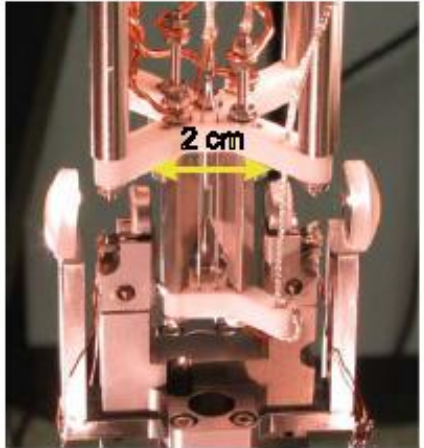
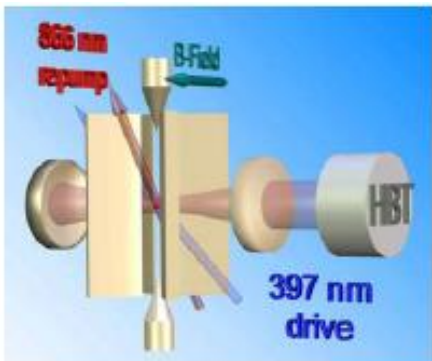
## 光との結合

### イオントラップとFabry-Perot共振器との結合例

C.Russo *et al.*, Appl. Phys. B 95, 205 (2009)

C.Russo *et al.*, Nature 485, 482 (2012)

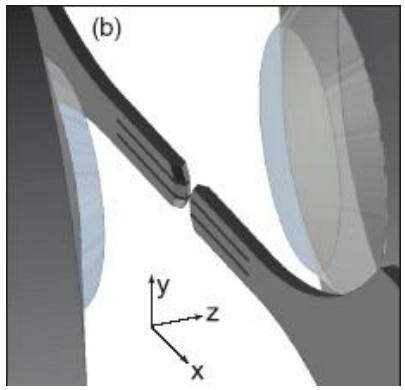
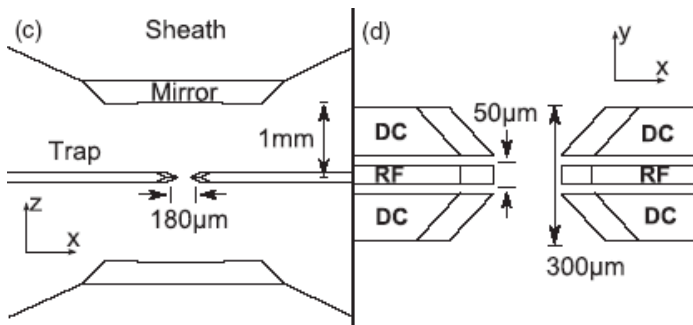
$^{40}\text{Ca}^+$   $^2P_{3/2}$ - $^2D_{5/2}$  854 nm Cavity length 2 cm,  $F=77,000$   
 $(g, \kappa, \gamma)/2\pi = (1.4, 0.05, 11.2)$  MHz



J. D. Sterk *et al.*, PRA85, 062308 (2012)

$^{174}\text{Yb}^+$   $^2S_{1/2}$ - $^2P_{1/2}$  369.5 nm Cavity length 2 mm,  $F=3,790$  (initial)  
 $F=1,490$  (several weeks later)

$(g, \kappa, \gamma)/2\pi = (3.92, 23.7, 19.6)$  MHz



# 4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ

## マイクロ波との結合

$$g = \sqrt{\frac{|\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{\mu}|^2 \omega_c}{2\hbar \varepsilon_0 V}}$$

大きな双極子モーメント

分子イオン

D. I. Schuster *et al.*, Phys. Rev. A **83**, 0123111 (2011)

CaCl<sup>+</sup>分子

マイクロ波周波数  $\omega_c/2\pi \sim 10$  GHz

共振器 Q値  $Q \sim 10^6$

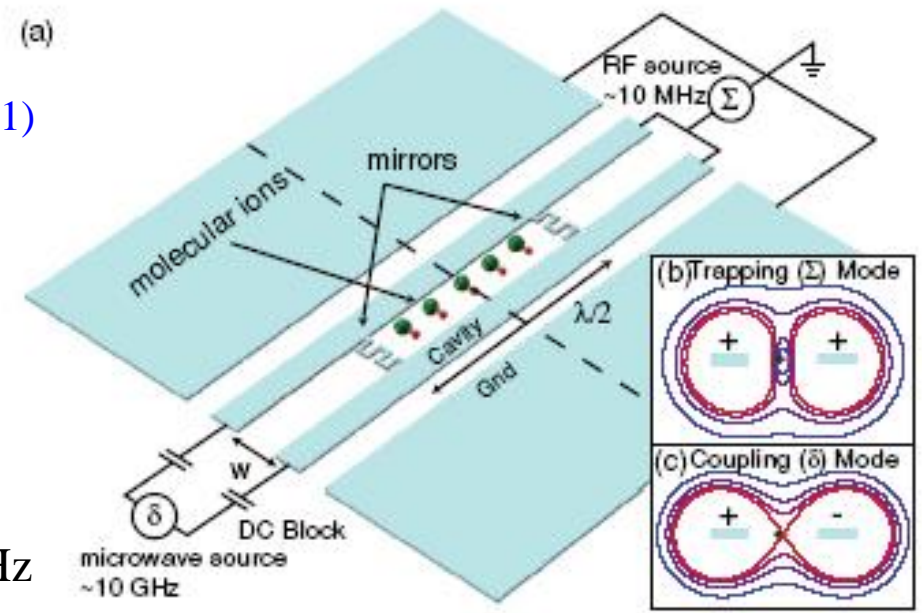
トラップ電極間隔  $w = 10 \mu\text{m}$

single ion

$g/2\pi \sim 5.9$  kHz  $\kappa/2\pi \sim 9$  kHz  $\gamma/2\pi \sim$  数Hz

ensemble  $N = 1700$

$g/2\pi \sim 170$  kHz (effective single ion  $g/2\pi \sim 4.2$  kHz)



# 4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ

## イオン(=荷電粒子)の振動

	結合の強さ	減衰の要因	
Be <sup>+</sup>	3 kHz	イオンの加熱	数十μm,同一真空装置内

## 光

		結合の強さ	共振器の減衰	準位間の緩和	
光共振器	Ca <sup>+</sup> single	0.92 MHz	1.2 MHz	1.69 MHz	experiment
光共振器	Ca <sup>+</sup> single	1.4 MHz	0.05 MHz	11.2 MHz	experiment
光共振器	Ca <sup>+</sup> 530 ions	12.2 MHz	2.15 MHz	11.15 MHz	experiment
光ファイバ共振器*	Ca <sup>+</sup> single	34.3 MHz	14.2 MHz	1.7 MHz	estimation

\* Courtesy of Dr. Matthias Keller (University of Sussex)

## マイクロ波

		結合の強さ	共振器の減衰	準位間の緩和	
超伝導共振器	CaCl <sup>+</sup> single	5.9 kHz	9.0 kHz	10 Hz	estimation

## 他の物理系 光と中性原子 [B. Weber et al., PRL 102, 030501 \(2009\)](#)

		結合の強さ	共振器の減衰	原子系の寿命による減衰	
光共振器	Rb single	5 MHz	6 MHz	3 MHz	Experiment Finesse 30,000



## 1. イオントラップの原理

2. 孤立系としてのイオントラップ

原子時計  
量子メモリ

大きな利点だが、反面他の物理系との結合が難しい

3. フレーナートラップ

従来の3次元のトラップと異なり開放的な構造

4. 量子インターフェースとしてのイオントラップ

イオンの振動  
光との結合  
マイクロ波との結合

5. まとめと今後の展望

## 5. まとめと今後の展望

1. イオントラップは理想的な孤立系が実現できるため、イオンの長時間の捕獲と長いコヒーレンス時間が特徴である。原子時計はその応用の代表例である。同じ特徴を活かして量子メモリとしての機能も優れているといえる。
2. この「理想的な孤立系」という利点は、量子インターフェースとしてイオンと他の物理系とを結合させるのを困難にしている。
3. 光との結合ではトラップポテンシャルを乱さずにいかに光共振器の体積を小さくして強結合条件を満たすかの試みがなされている。中でも光ファイバ共振器を用いる方法は有望である。
4. 近年開発されたプレーナートラップは、イオントラップの利点を保ちつつ他の物理系と結合しやすい構造をもつ。ナノ光ファイバーや超伝導マイクロ波共振器との結合などの新しい系の実現が期待できる。