



# ERLにおけるイオン捕獲の検討(2)

高エネルギー加速器研究機構(KEK)  
物質構造科学研究所 坂中章悟

2006/12/14 第9回ERLビームダイナミクスWGミーティング

## 前回のまとめ

$\sigma_x^i \sim \sigma_y^i \sim \sigma$  (beam size) と近似

イオンが蓄積された場合、チューンシフト(ベータatron振動の位相エラー):

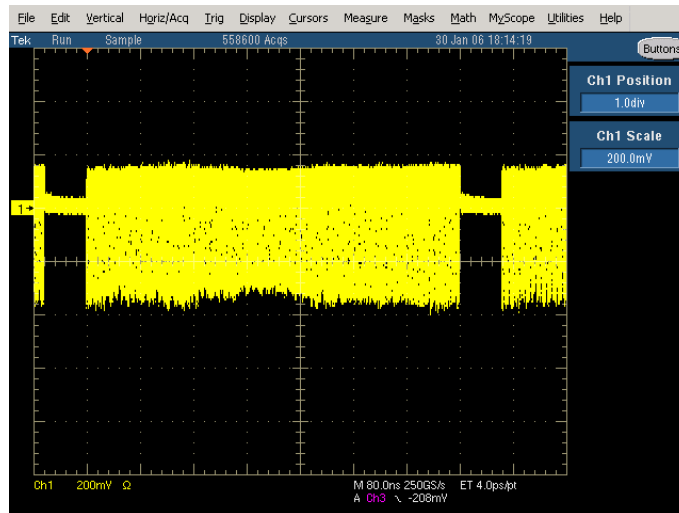
$$\left( \Delta v_{x,y} \right)_{\text{ion}} \approx \frac{r_e I_0}{4\pi\beta^2 c e \epsilon_n} \langle \eta \rangle L$$

仮に  $\Delta v < 0.1$  を要求するならば、

実証機:  $\langle \eta \rangle \sim 2 \times 10^{-3}$  以下, 実用機:  $\langle \eta \rangle \sim 2 \times 10^{-4}$  以下が必要である。

- ベータatron振動の位相エラーを考慮しただけでも、中性化率は1より十分小さくする必要がある(だろう)。
- さらにイオンによるビーム不安定性も考えられる(未検討)

# Bunch gap によるイオン捕獲の抑制



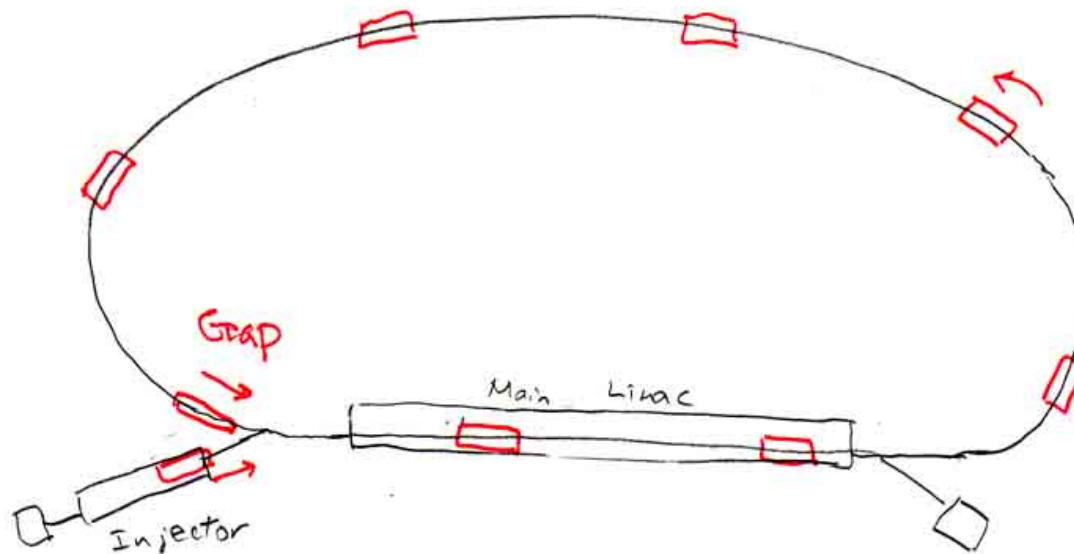
PFリングにおけるバンチギャップの例。  
312バケット中、32バケットを空にする。

- ほとんどの電子蓄積リング (PF, KEKB, APS, Spring-8, ...) で適用されている。
- 欠点: transient beam loading により空洞電圧が変動される
  - KEKB における対策: feed forward と feedback による電圧安定化
  - ERL の場合、主リニアックでは問題ないように出来る
  - 入射用リニアックでは問題である。安定化できるかどうかポイント (要検討)。

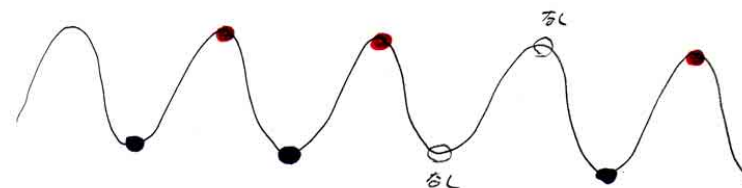
# ERL主リニアックにおける transient beam loadingの回避

(バンチギャップの繰り返し周波数) = (整数) × (ビーム周回周波数)

A. Hutton's idea (ERL2005). See Acknowledgments in G. H. Hoffstaetter and M. Liepe, Nucl. Instrum. Methods A **557** (2006) 205.



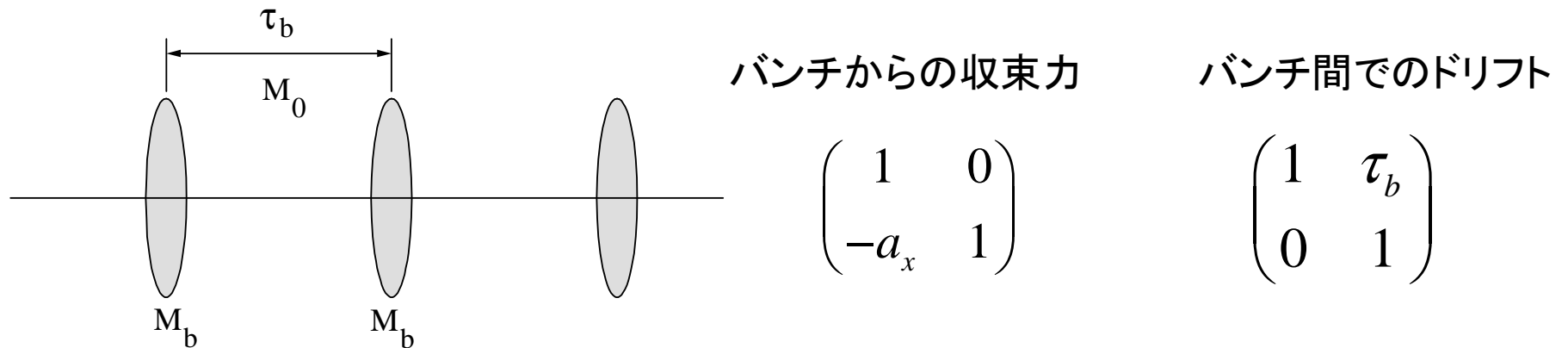
加速ビームと減速ビームのバンチギャップが重なるようにする。



ビーム負荷が相殺される。



# Bunch gap がある場合のイオンの安定性 (線形近似)



バンチからの収束力

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -a_x & 1 \end{pmatrix}$$

バンチ間でのドリフト

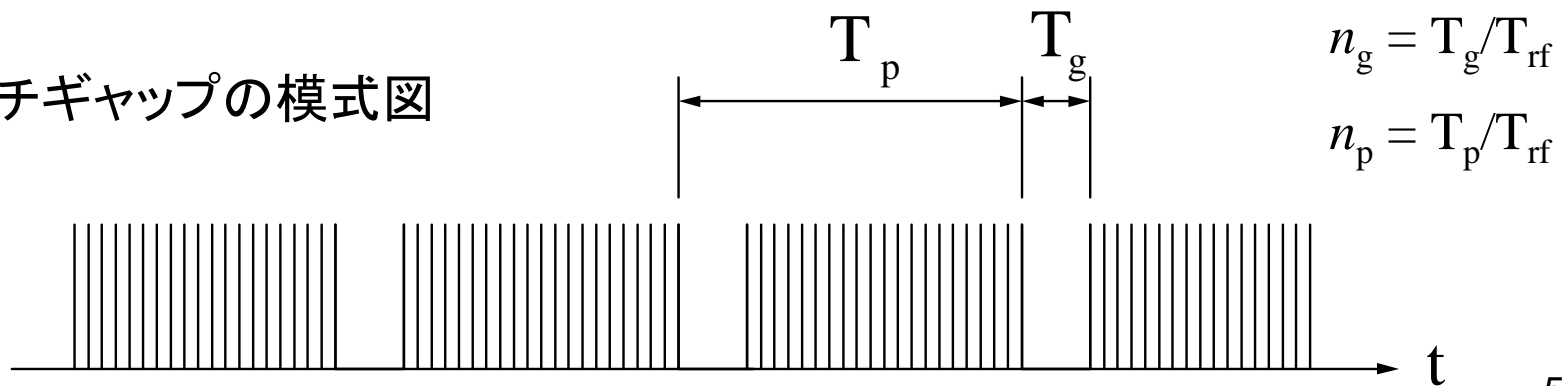
$$\begin{pmatrix} 1 & \tau_b \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

一周期での転送行列:

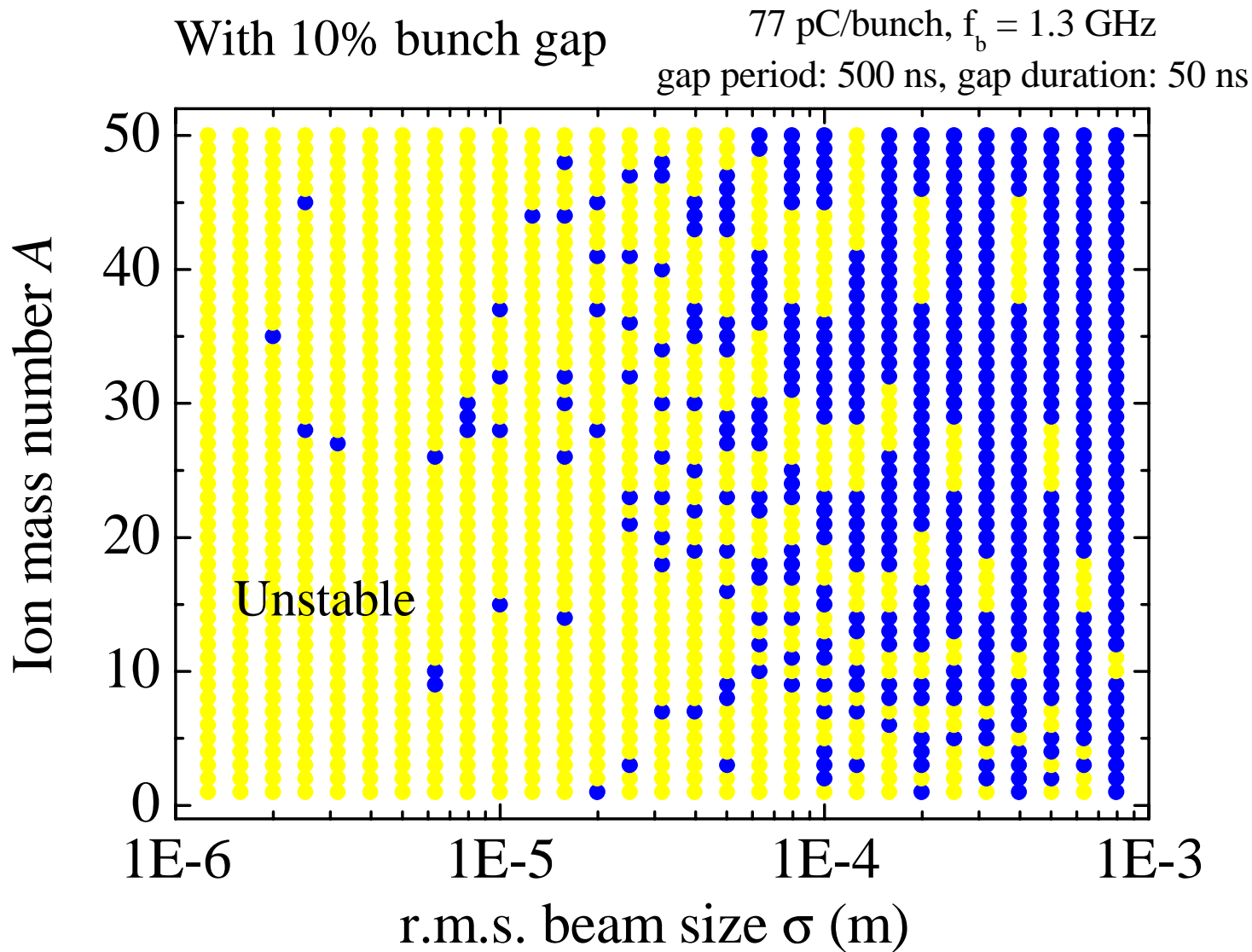
$$M = \begin{pmatrix} 1 & \tau_b \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^{n_g} \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -a_y & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & n_g \tau_b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\}^{n_p - n_g}$$

$|Tr(M)| < 2$  ならば運動は安定

バンチギャップの模式図

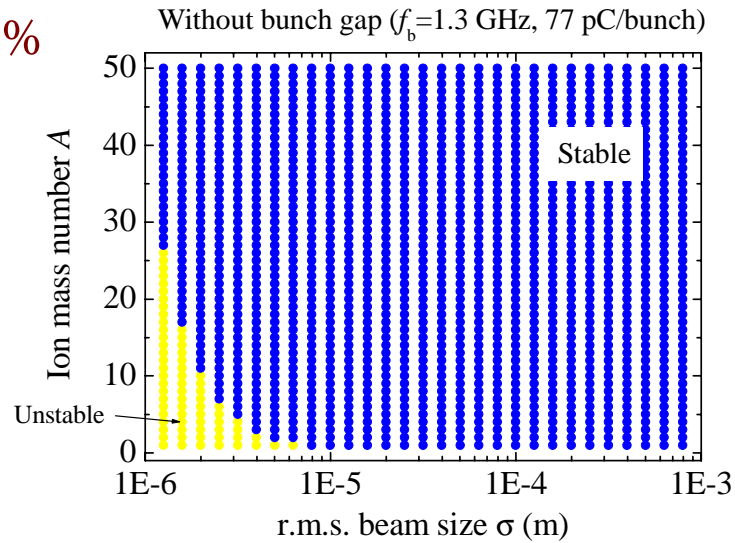


# Bunch gap がある場合のイオンの安定性 (計算例1)

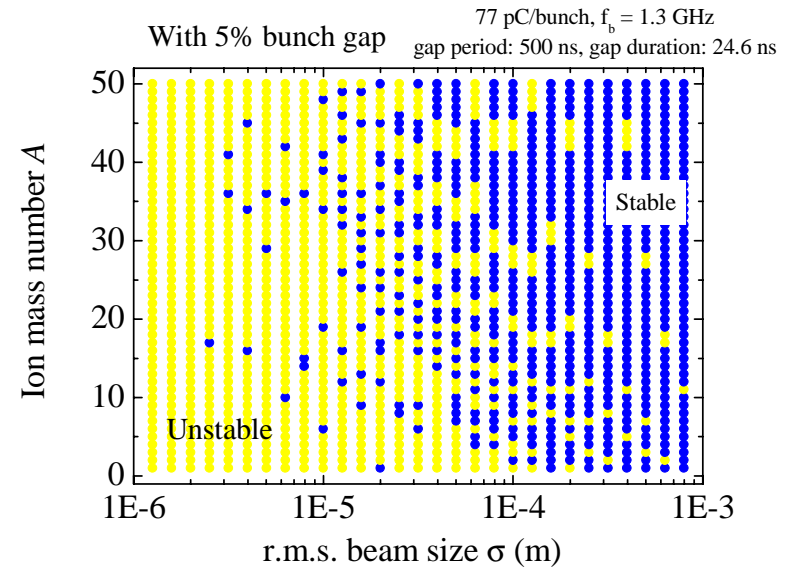


# ギャップの比率依存性 (ギャップ周期: 500 ns)

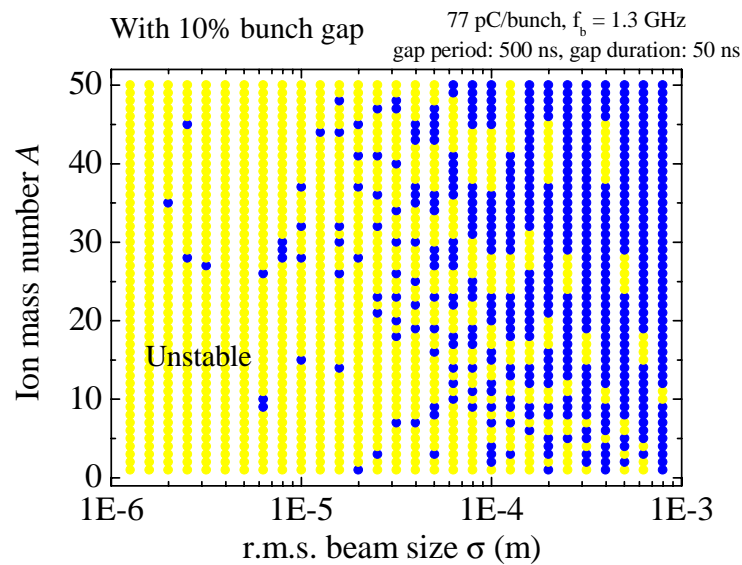
Gap 0%



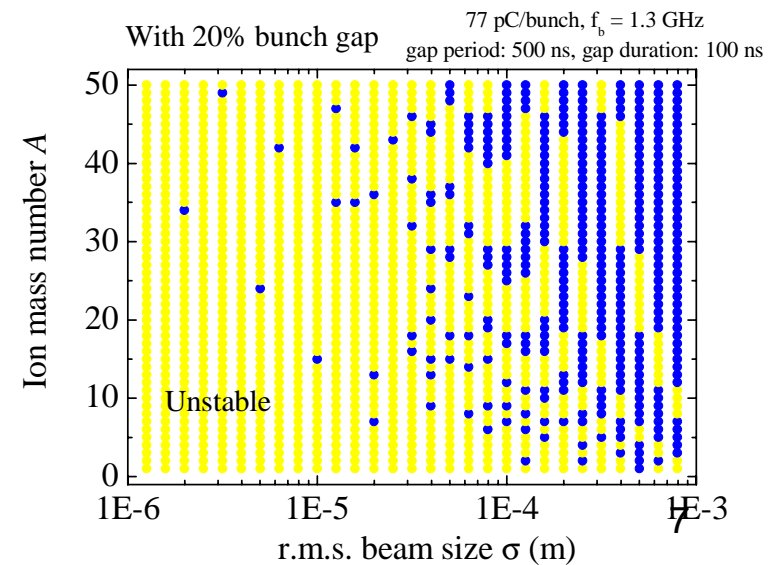
5%



10%

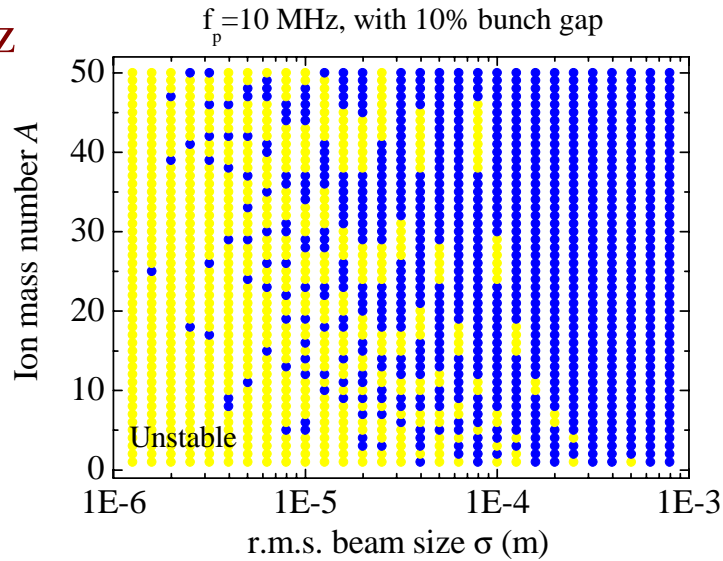


20%

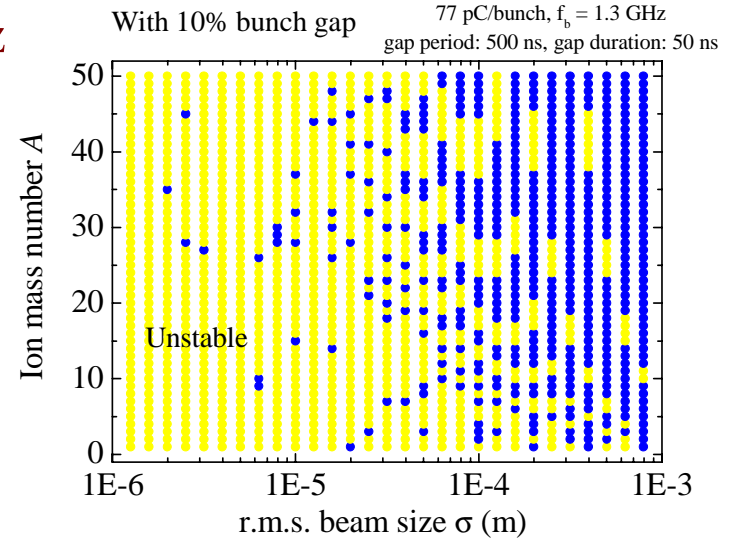


# ギャップの周波数依存性 (ギャップ割合10%)

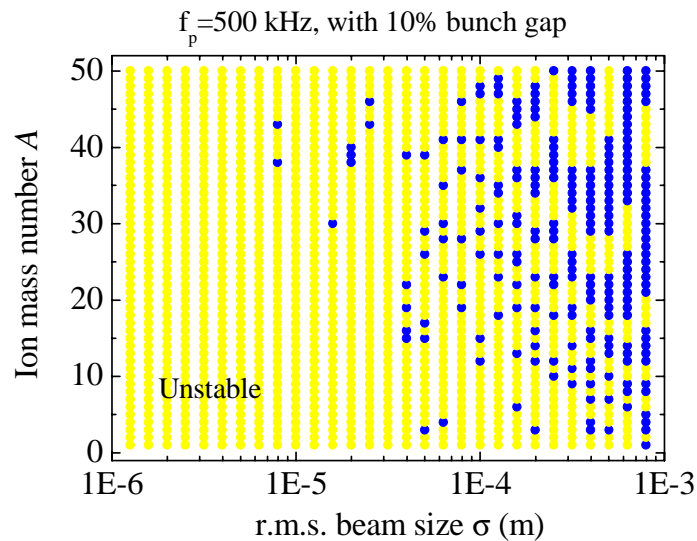
10 MHz



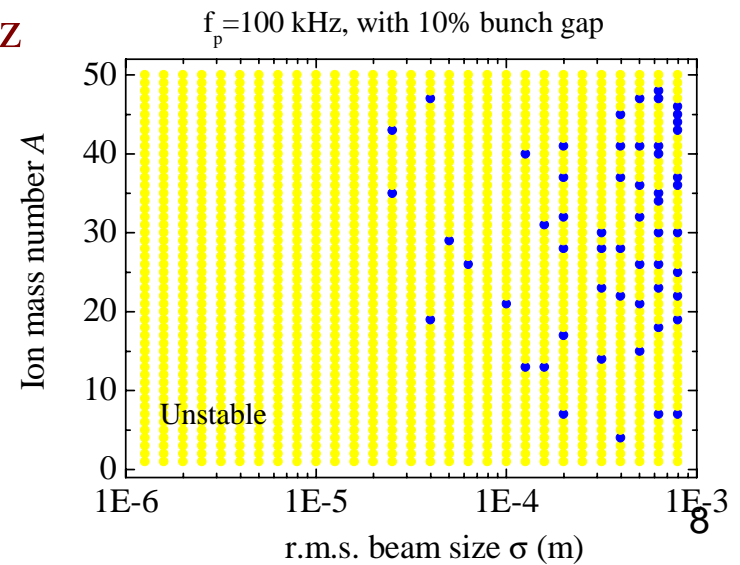
2 MHz



500 kHz



100 kHz





# 最適なギャップ周期に関する考察

$a \cdot \tau_b \ll 1$  の場合 イオンの運動をsmooth近似できる

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_i^2 f(t)x = 0 \quad \omega_i^2 = \frac{a_x}{\tau_b} = \frac{2r_p c}{\beta \sigma_x (\sigma_x + \sigma_y)} \frac{N_b}{(A/Z)}$$

$f(t)$  をフーリエ展開:  $f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_p t)$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \tilde{\omega}_i^2 \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2a_n}{a_0} \cos(n\omega_p t) \right] x = 0$$

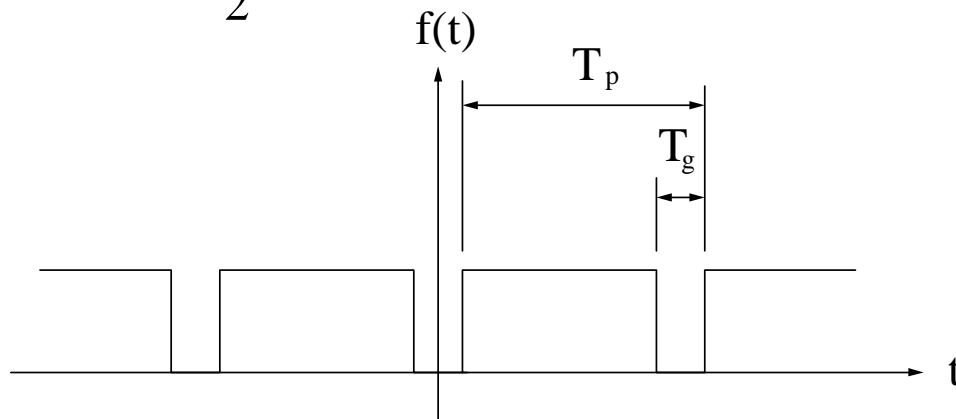
パラメータ共鳴で振幅が増大する条件:

$$\tilde{\omega}_i^2 = \frac{a_0}{2} \omega_i^2$$

$$n\omega_p \approx \frac{2\tilde{\omega}_i}{m}$$

$n, m$  は整数

(特に  $m=1$  が強い共鳴)



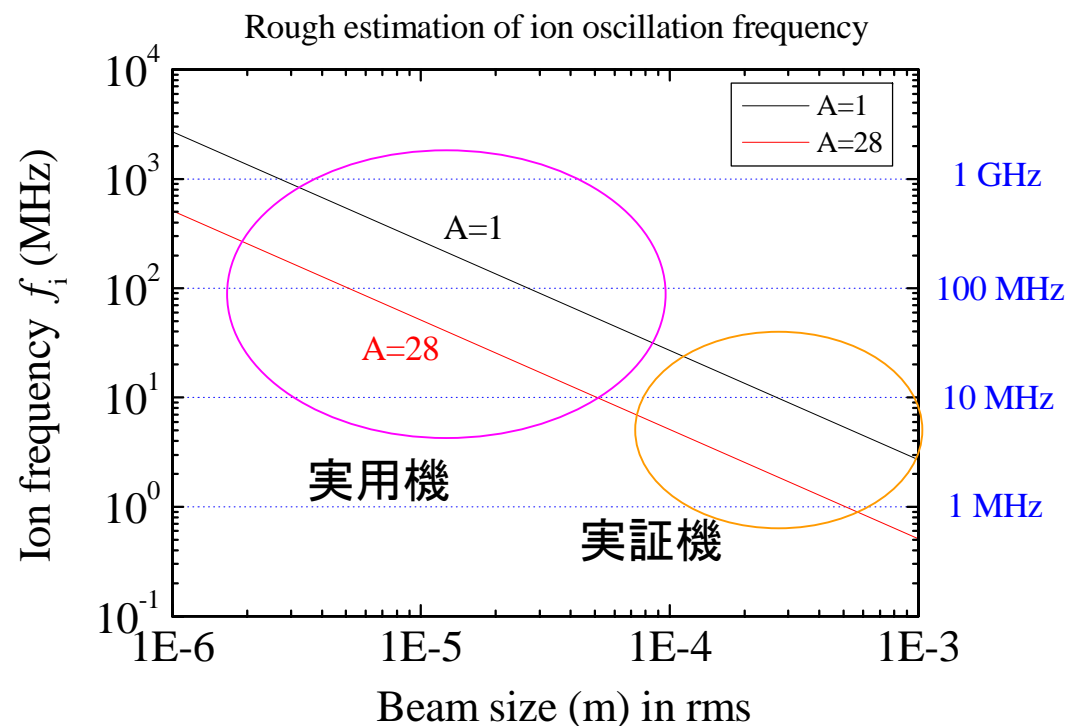
## 最適なギャップ周期に関する考察(2)

ギャップの繰り返し周波数は、イオンの振動数の2倍(の整数倍)が良いはず

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \approx \frac{2.7 \times 10^3}{\sigma[\text{m}]\sqrt{A}}$$

$$\sigma \sim 0.3 \text{ mm} \rightarrow f_i \sim 2\text{-}10 \text{ MHz}$$

$$\sigma \sim 30 \text{ }\mu\text{m} \rightarrow f_i \sim 20\text{-}200 \text{ MHz}$$

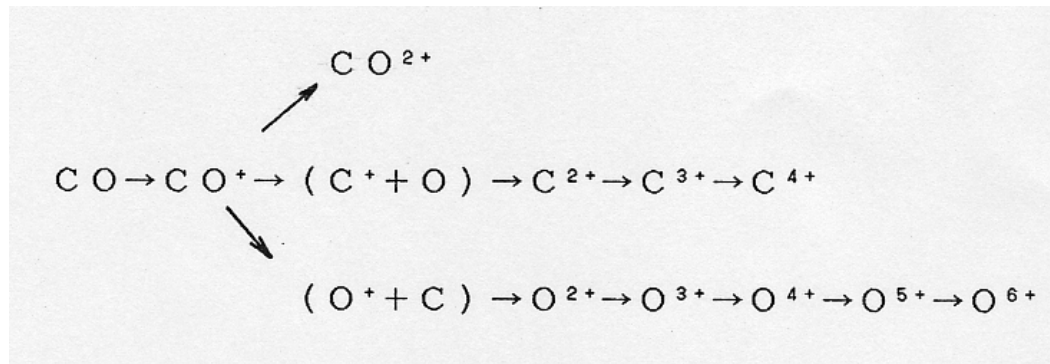


捕獲イオンの(ビームからの収束力による)振動数の見積もり

# 超高真空も重要

バンチギャップを導入しても、全てのイオンを除去できるわけではない。

- 一旦捕獲されたイオンでも、多重電離過程と、進行方向ドリフト(に従ってビームサイズが変化)の過程で、不安定領域に入れば除去されると考えられる
- この場合、イオンの生成と除去の釣り合いでイオン密度が決定されると考えられる → 圧力を下げることも重要



## CO分子の多重イオン化

(P. A. Redhead: Can. J. Phys. **47** (1969) 2449.)

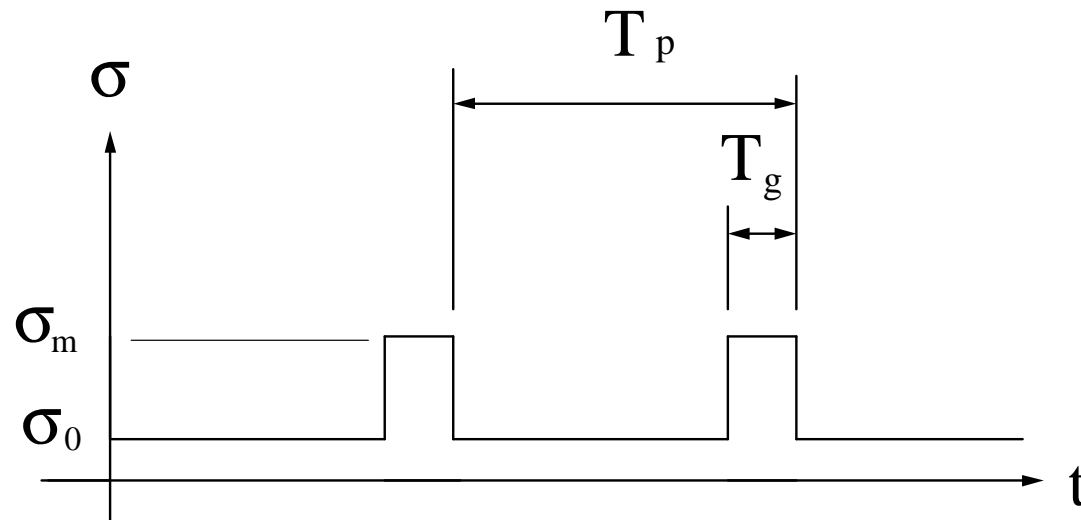
例えば、1価イオンは安定だが、2価イオンは不安定な場合のイオン密度:

$$d_i = \frac{\sigma^+}{\sigma^{++}} d_m$$

\* 定量的な議論

# ビームサイズ変調によるイオン捕獲の抑制

- ビームサイズを時間的に変調できたとする
- ビーム負荷の変動が無い → 入射器での空洞電圧変調がない

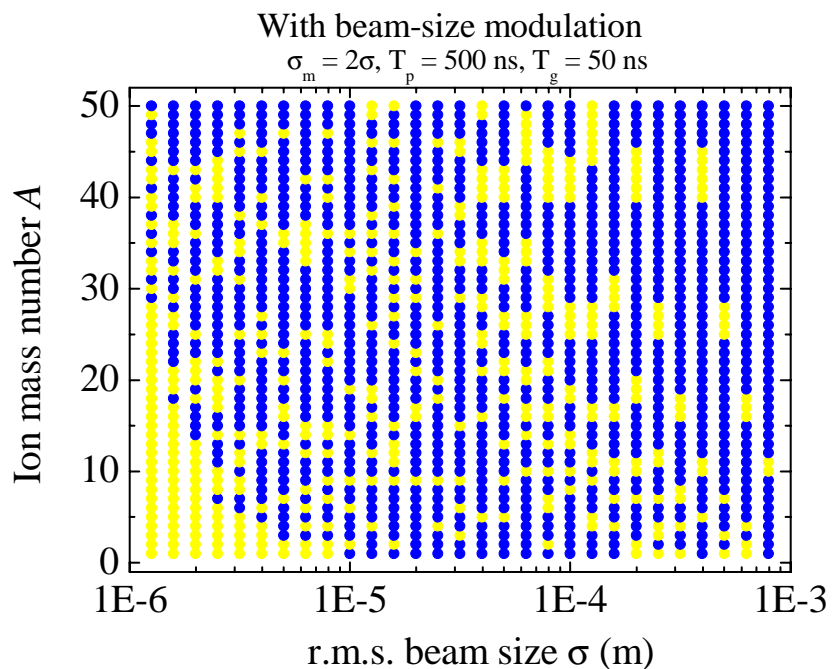


ビームサイズ変調の概念図。

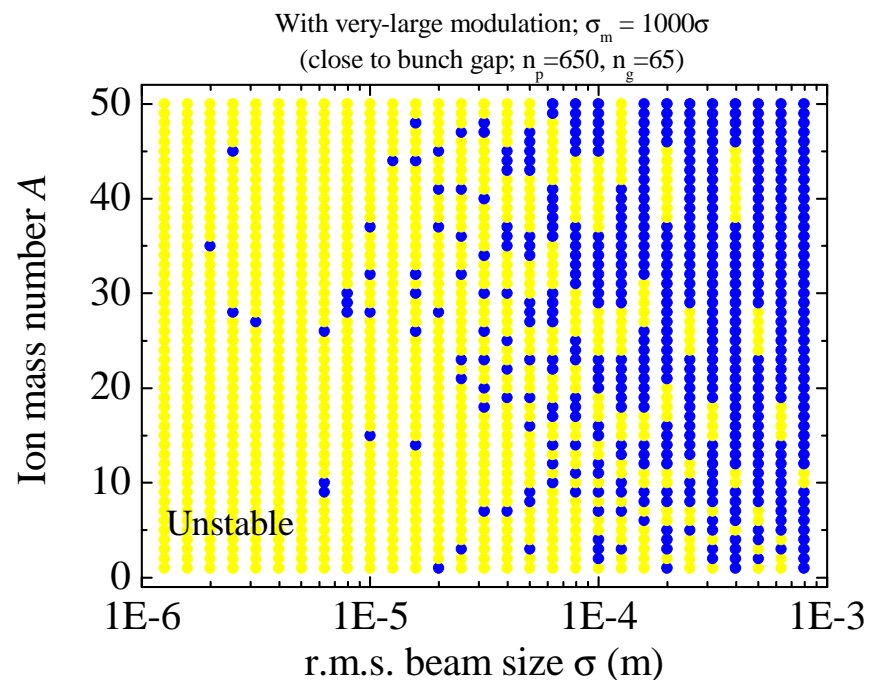
# ビームサイズ変調によるイオン捕獲の抑制

1周期の10%の時間だけビームサイズを増大させた場合

ビームサイズ2倍、 $f_p = 2\text{MHz}$



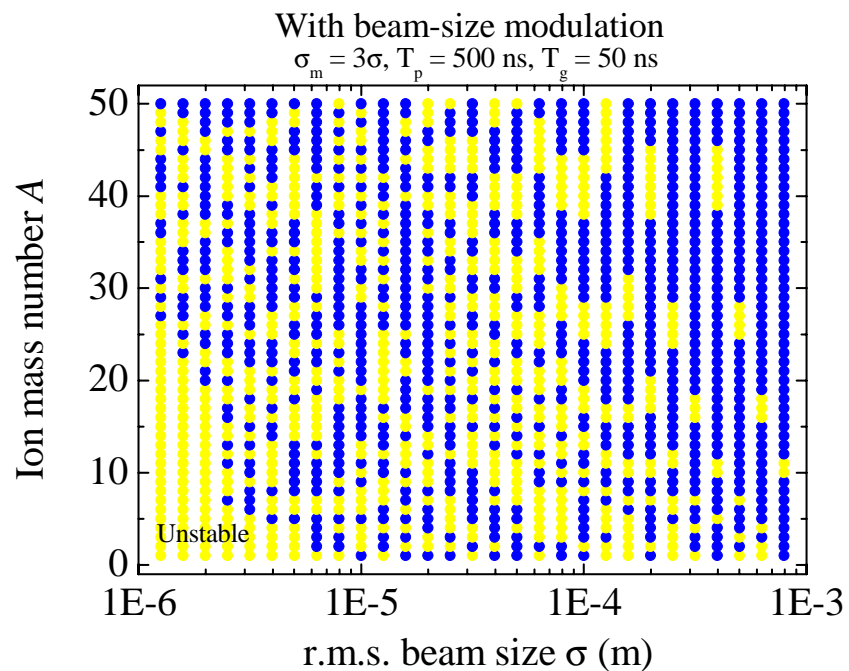
(計算チェック) サイズ1000倍、 $f_p = 2\text{MHz}$



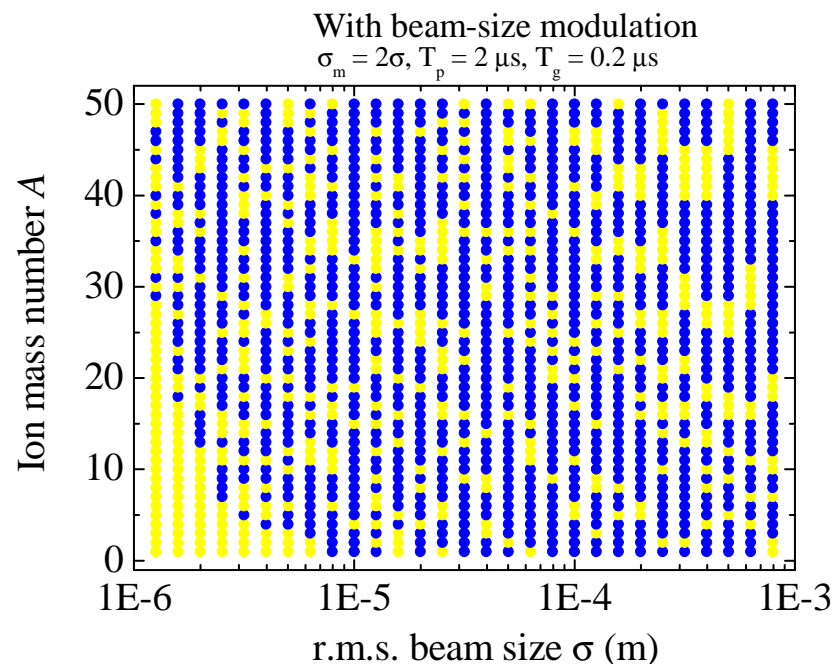
# ビームサイズ変調によるイオン捕獲の抑制(2)

1周期の10%の時間だけビームサイズを増大させた場合

ビームサイズ3倍、 $f_p = 2\text{MHz}$



ビームサイズ2倍、 $f_p = 500\text{ kHz}$



## 以上のまとめ

- バンチギャップを導入することで、イオン運動が不安定になる条件を作ることができる。
- 入射用リニアックにおける過渡的ビーム負荷による電圧変調を制御できるかが問題 → 検討課題
- ビームサイズの変調を導入できれば、バンチギャップより有効性はやや劣るが、同様の効果が期待できる。
  - 電子銃で実現可能か？
- バンチギャップ等を用いる場合、一般に真空度が良い必要がある。→ 定量的に要検討