

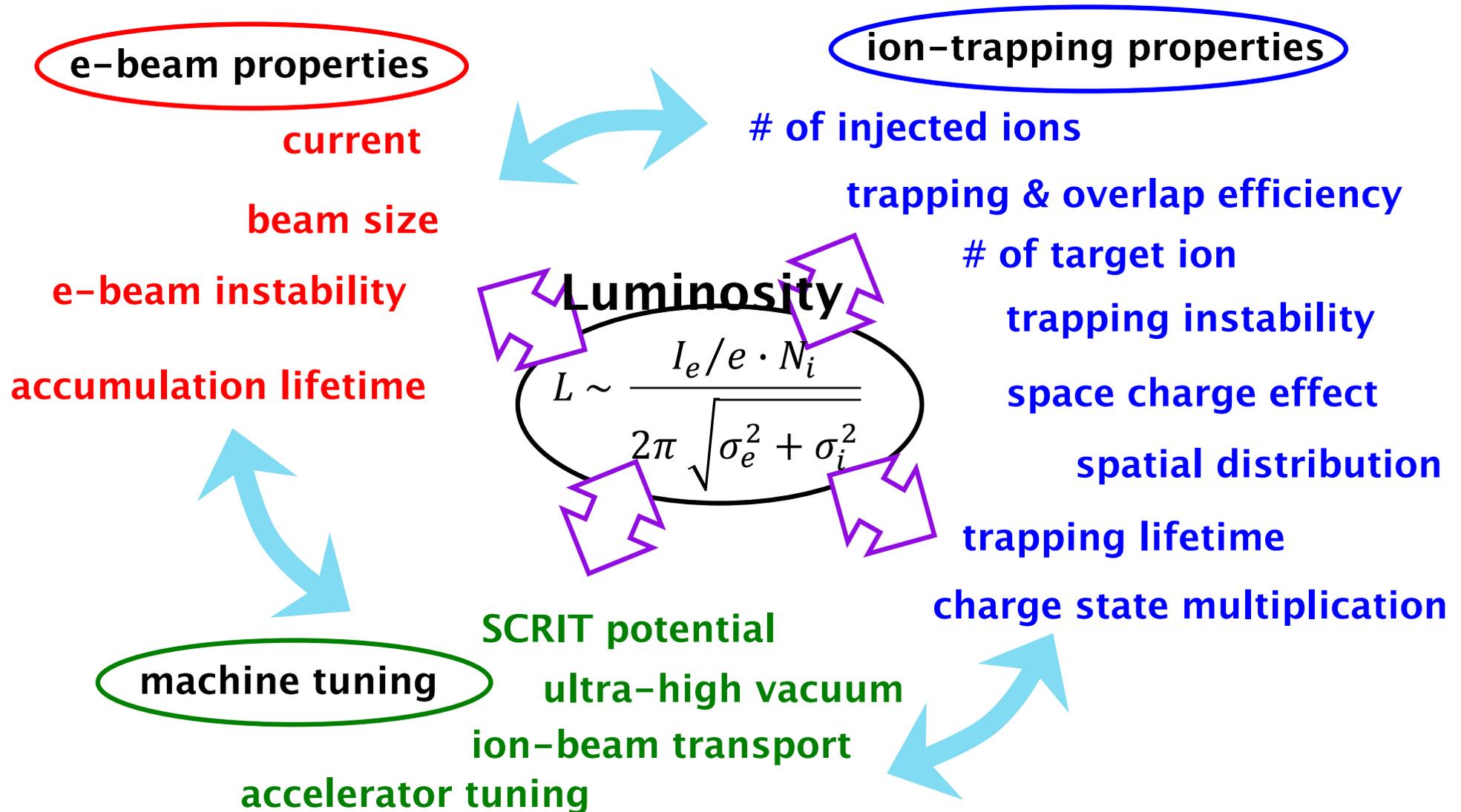
次世代型SCRIT

若杉 昌徳

Saclay-Gとの議論を良い機会として

- SCRITのメカニズムと限界について（再認識）
- SCRITの高ルミノシティ・高安定性化（次世代型）
 - 電子散乱や他の応用展開
 - Saclay、DERICA、・・・将来のゴール
 - Colliderとの勝負

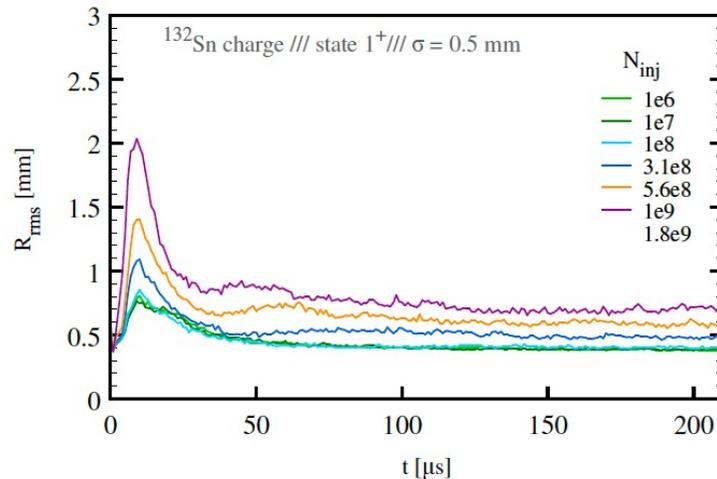
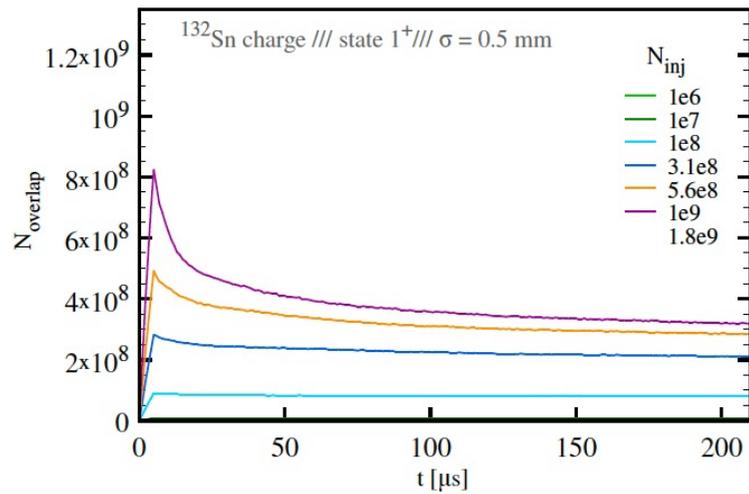
luminosity is strongly related to e-beam & ion-trapping properties



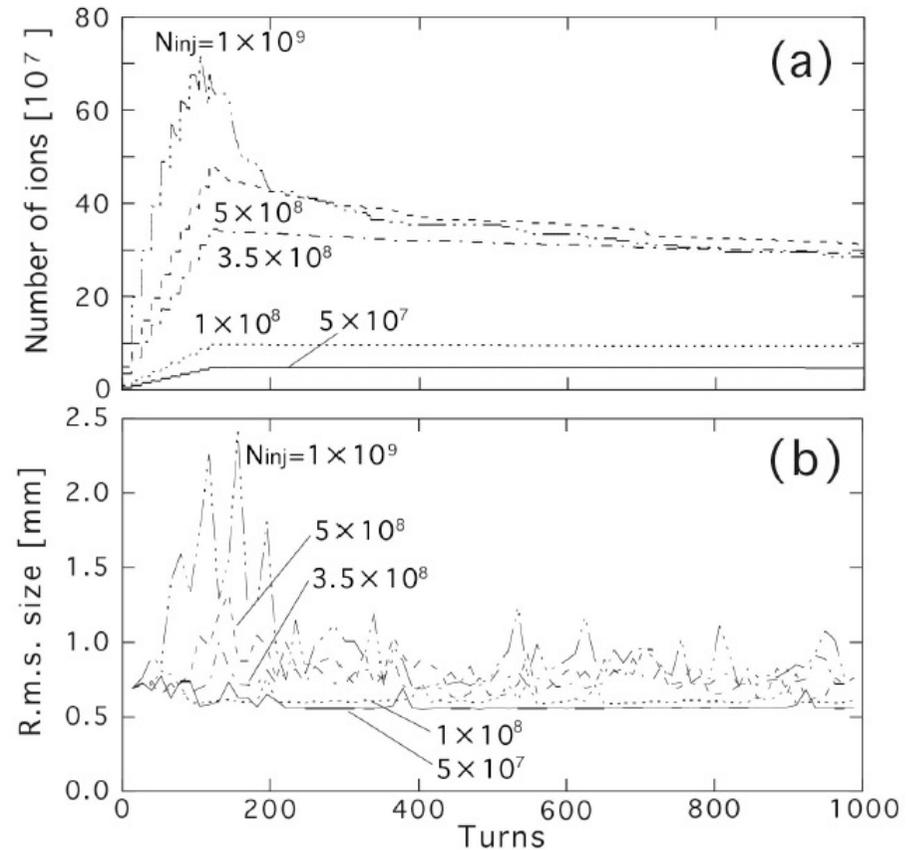
イオントラッピングについて整理

どこまで標的イオンは蓄積できる？ → **トラップ力による数と空間分布**

Pierre Delahayeの計算

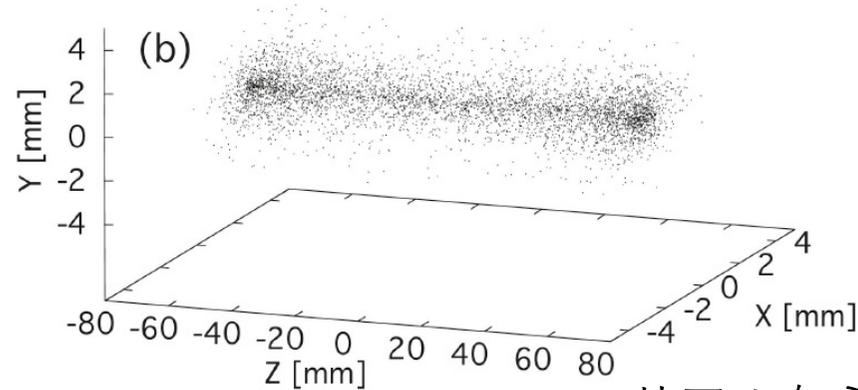
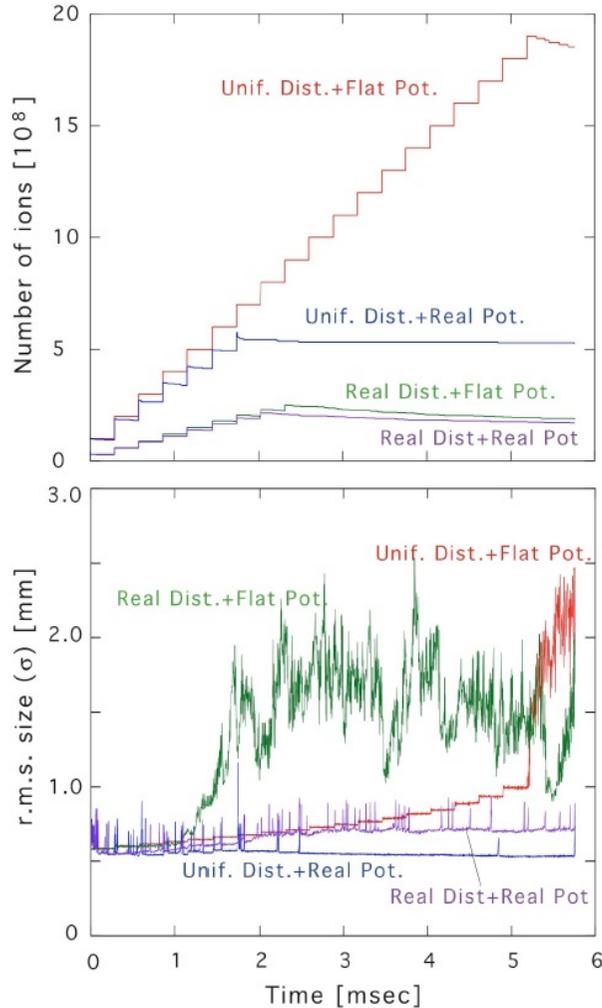


2001年ころの計算



イオントラッピングについて整理

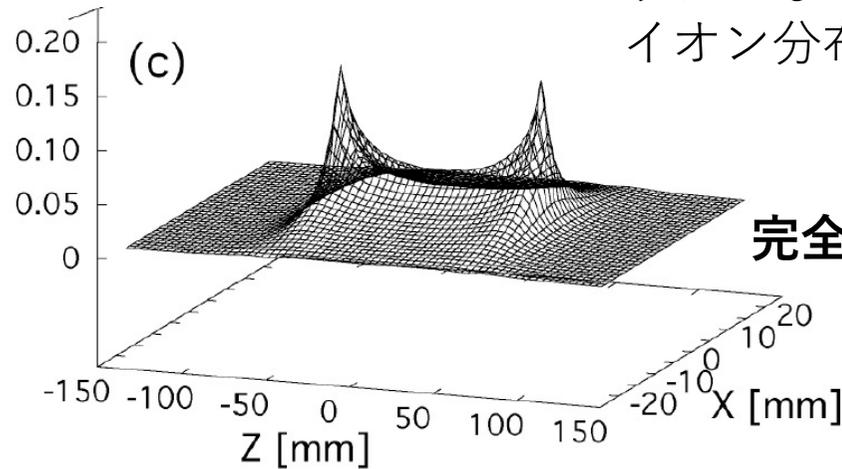
どこまで標的イオンは蓄積できる？ → ミラーテンシタルと空間電荷効果の影響



リアルなミラーポテンシタル
イオン分布空間電荷効果



完全中性化の10%

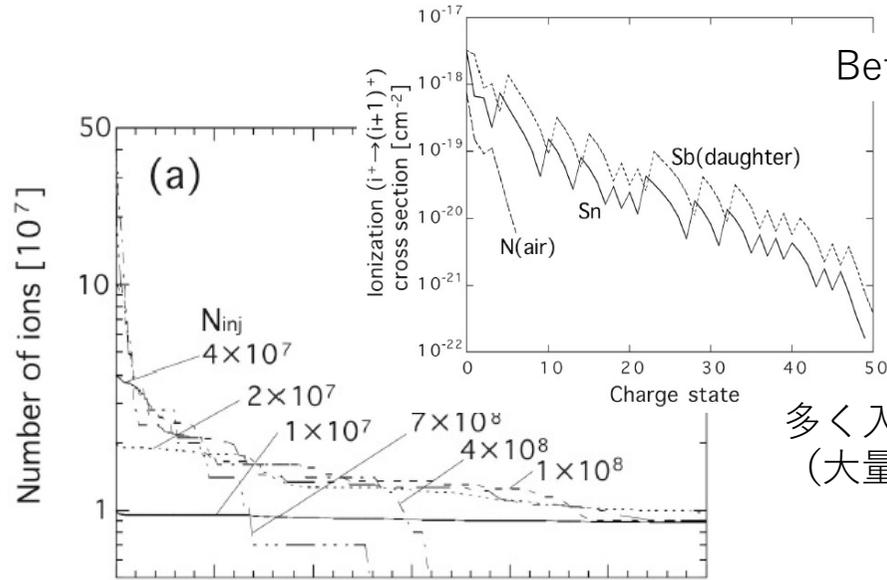


$I_e = 200\text{mA}$ の場合 → $\rho_e = 4 \times 10^9 / \text{m}$ → $\rho_{ci} = 4 \times 10^8 / \text{m}$

$(\bar{q} = 10 \rightarrow 4 \times 10^7 \text{ ions})$

イオントラッピングについて整理

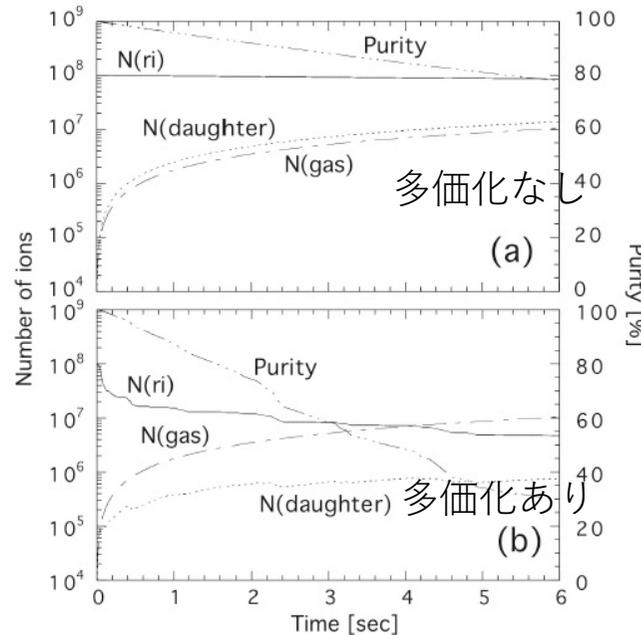
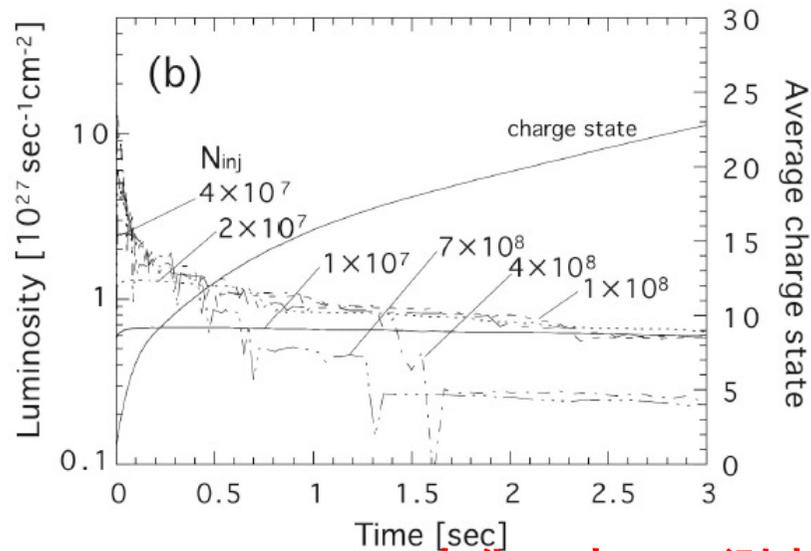
どこまで標的イオンは蓄積できる？ → 多価化とスペースチャージと残留ガス



Bethe-Lotzの式で計算したイオン化断面積

(現実はずっと早いPierreが指摘していた→同感)

多く入射すると減衰が早い (入射量がトラップ寿命のパラメータ)
(大量入射 + 高繰返し) or (少量入射 + 低繰返し)



残留ガスイオンの影響

これも現実はずっと早かった

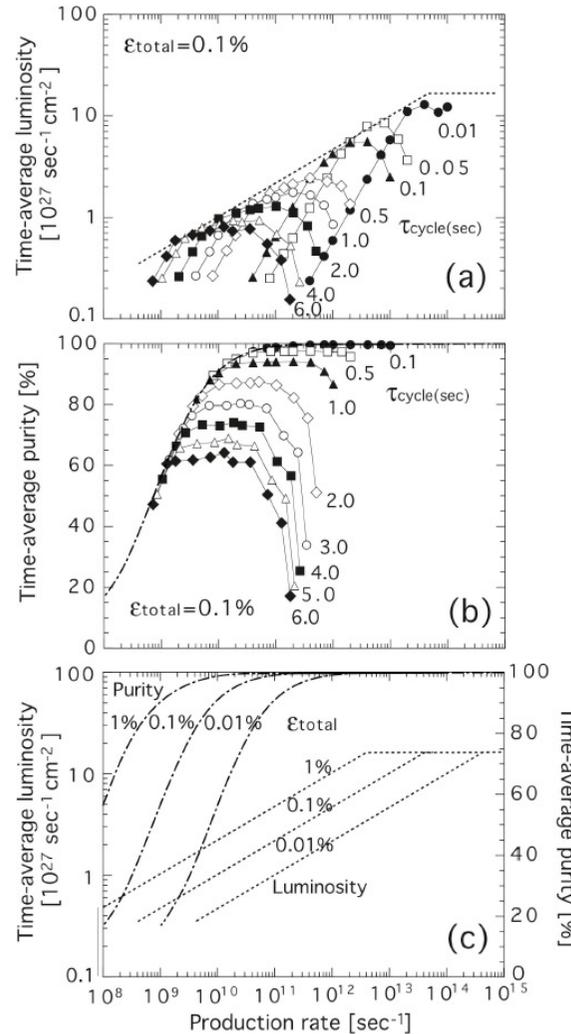
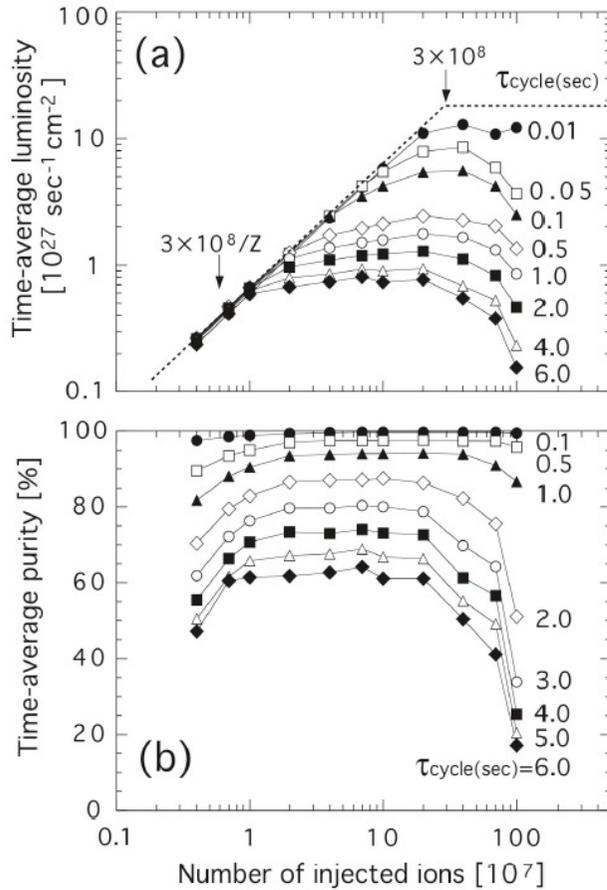
変化の中での測定では入射と蓄積のサイクルでルミノシティが決まる

イオントラッピングについて整理

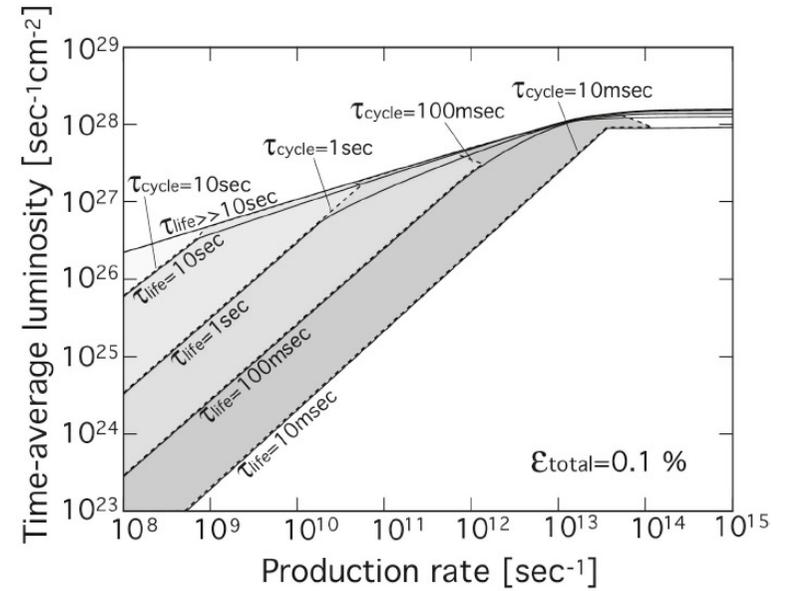
どこまでミノシティーを増やせる？ → 入射量とサイクル、崩壊による一般化

入射量は生成率と
サイクル周期で決まる

生成率と効率で一般化



崩壊寿命も考慮して一般化した
到達可能ミノシティー



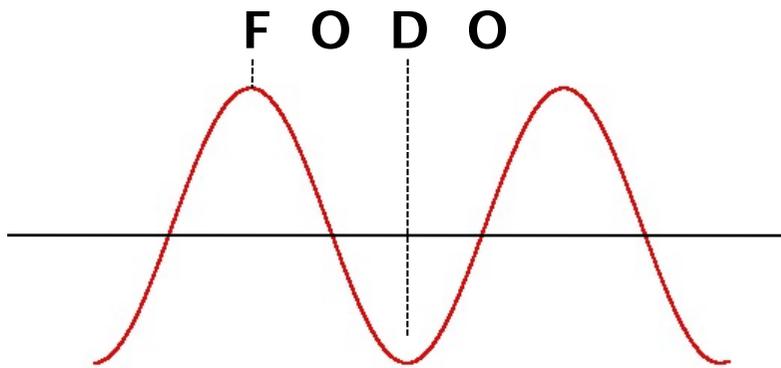
ただし、
これは電子ビームが
安定していればの話

イオントラッピングについて整理 2

電子ビームの影響はどのように効く？

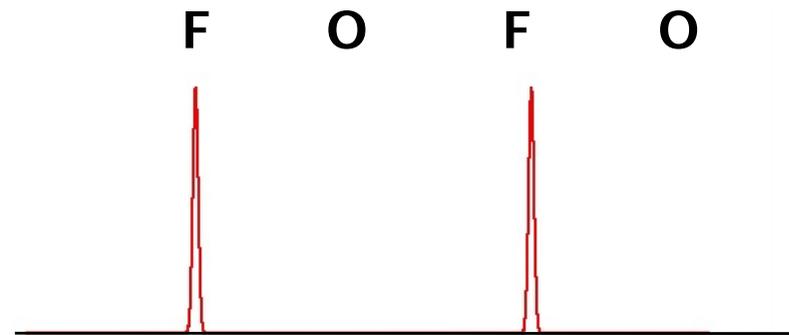
トラッピングのメカニズムはRFQのanalogyで理解するのが正しい

RFQ



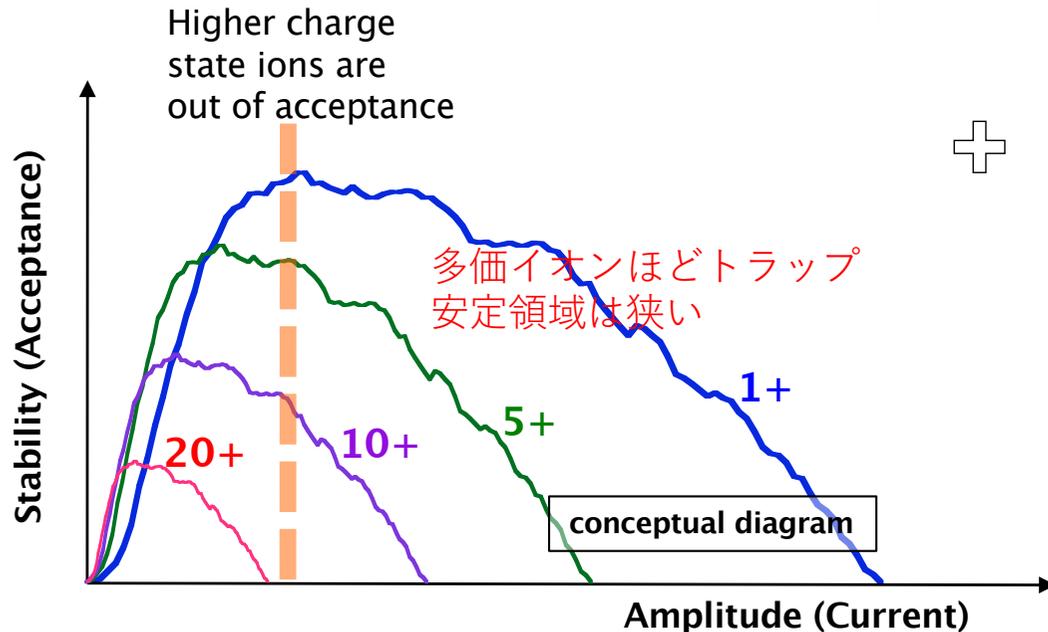
$$A \cos(2\pi f_0 t)$$

e-beam



$$\sum_n A_n \cos(2\pi n f_0 t)$$

(物理的には同じ力)



+

Non-periodic term :

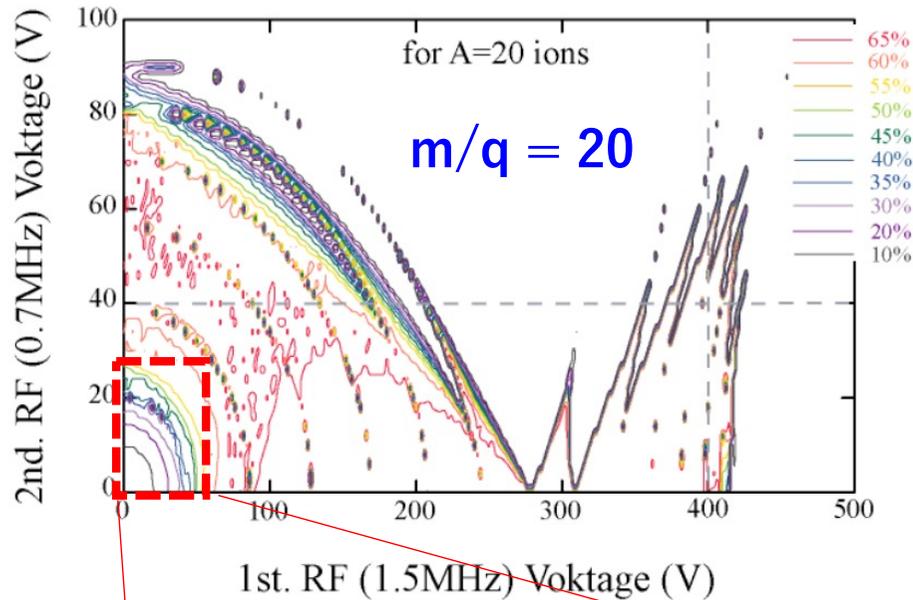
$$\sum_n \underline{A_n(x,t)} \cos(2\pi n f_0 t) + \underline{C(x,t)}$$

due to

- e-beam instability
- space charge effect
- etc.

非周期項の存在がトラップを乱す

イオントラッピングについて整理 2

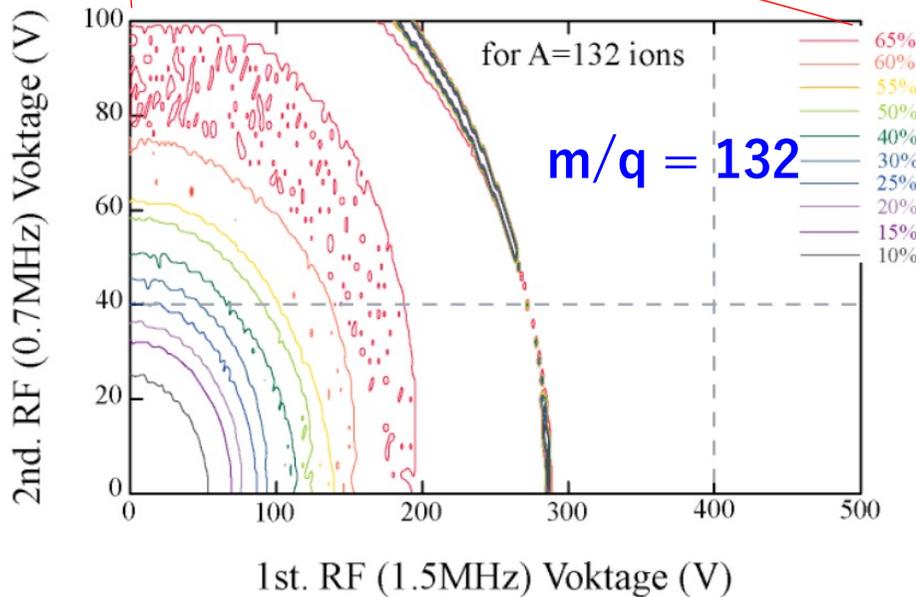


例)

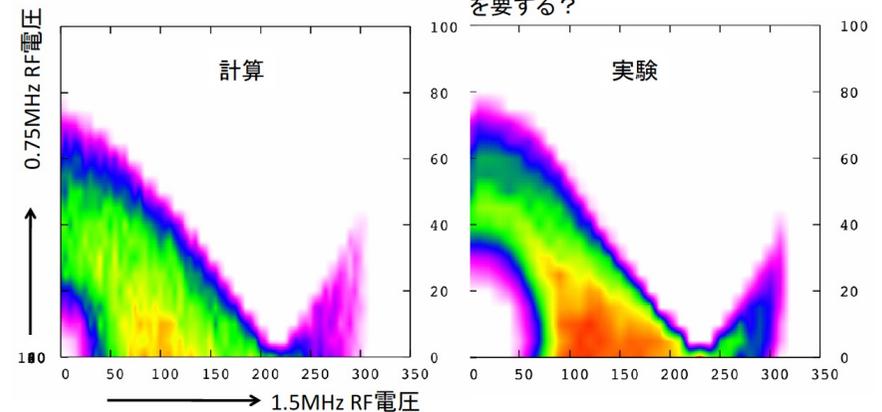
$f+2f$ の環境での安定領域の m/q による違い

m/q が小さい場合
パラメータ空間における安定領域は狭くなる

→ 蓄積し辛くなる
少しのperturbationで外れる

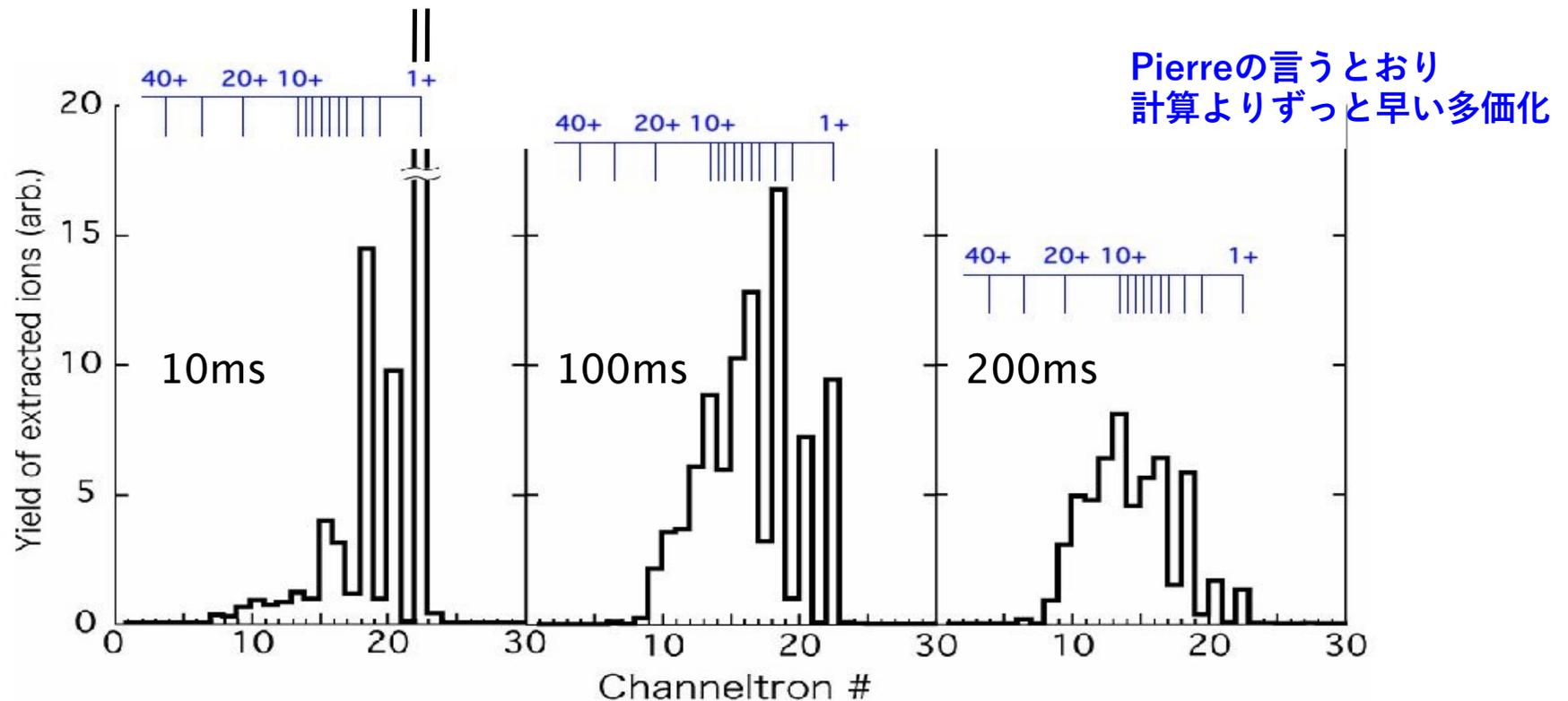


RFQの不完全さによる不安定化
それを押え込むために高い電圧
を要する？



イオントラッピングについて整理 3 (実験的観測)

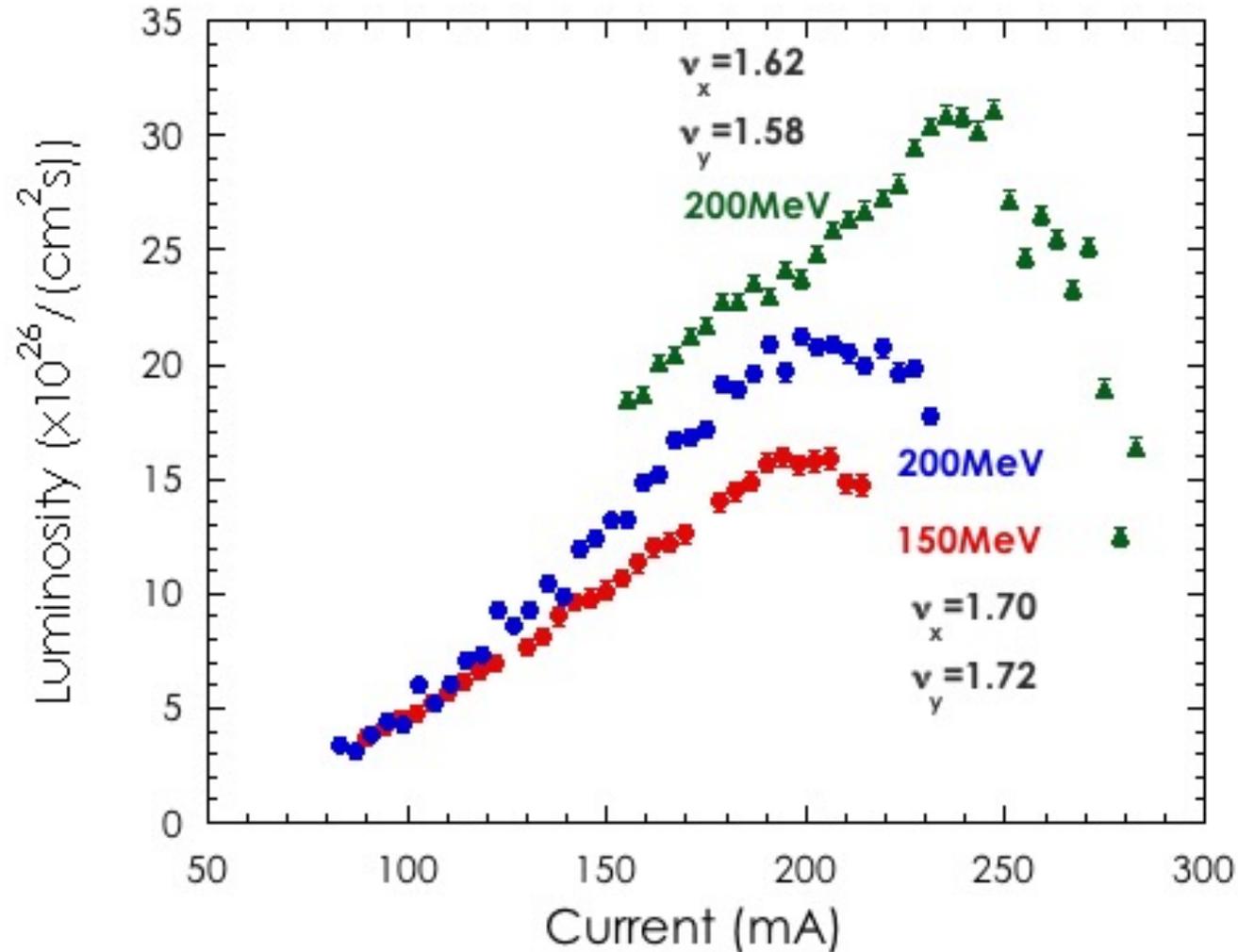
(Higher luminosity induces faster charge-state multiplication)



- Maximum charge state is ~20+, and higher charge states (>20+) do not exist in the SCRIT.
 - Dropout of higher charge state ions
- Rapid increase of total charge (target ions + residual gas ions)
 - Space charge effect (Neutralization limit : $f \times 2 \times 10^9$ (f : 0.2~0.5) at 200mA)

イオントラッピングについて整理 3 (ルミノシティはどこまで)

Achieved luminosity as a function of current

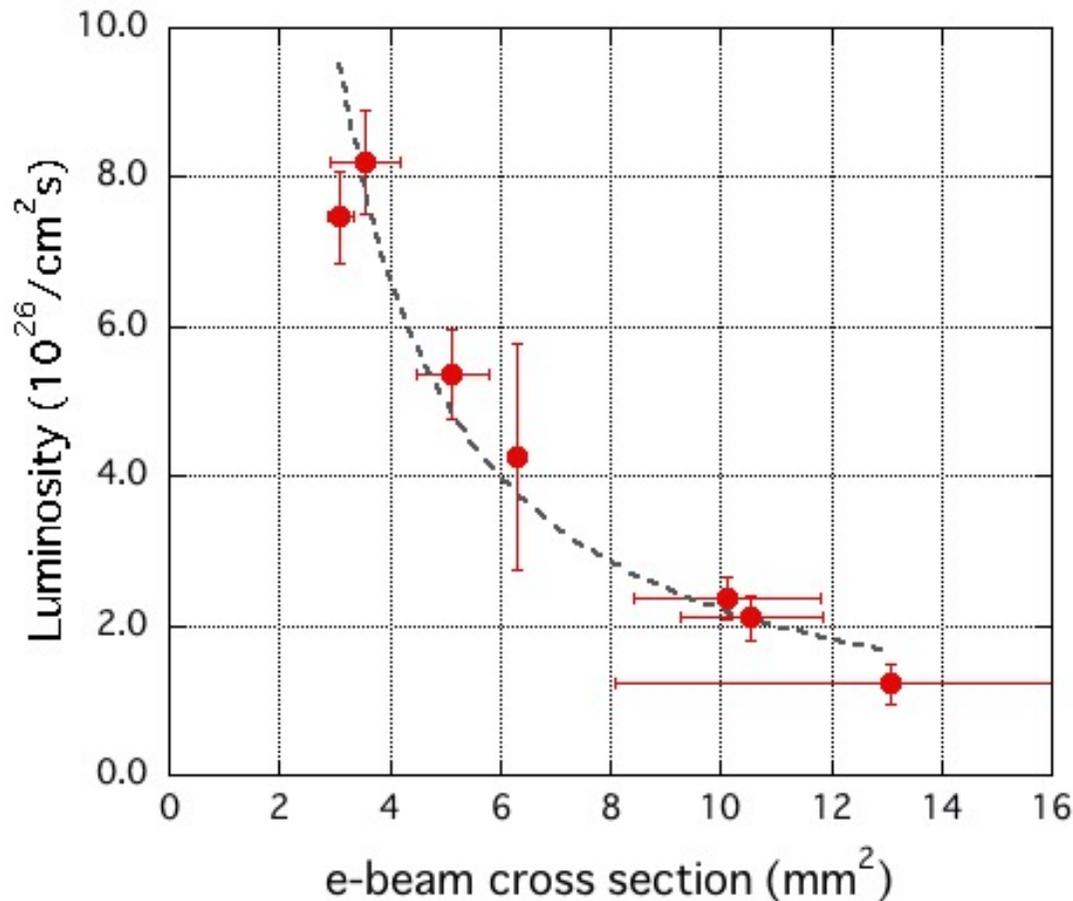


- Maximum luminosity was $3 \times 10^{27} / (\text{cm}^2 \text{s})$
- Number of injected ions was 3×10^8 .
- Trapping time was 240ms.
- Instability was happen in large current region.
- Luminosity for 200MeV is larger than that for 150MeV, because of smaller beam size.

イオントラッピングについて整理 3 (ルミノシティーはどこまで)

Luminosity depending on e-beam size

at the beginning of trap (proportional to ρ_0)



Luminosity is expressed by a linear fractional function of the beam cross section.

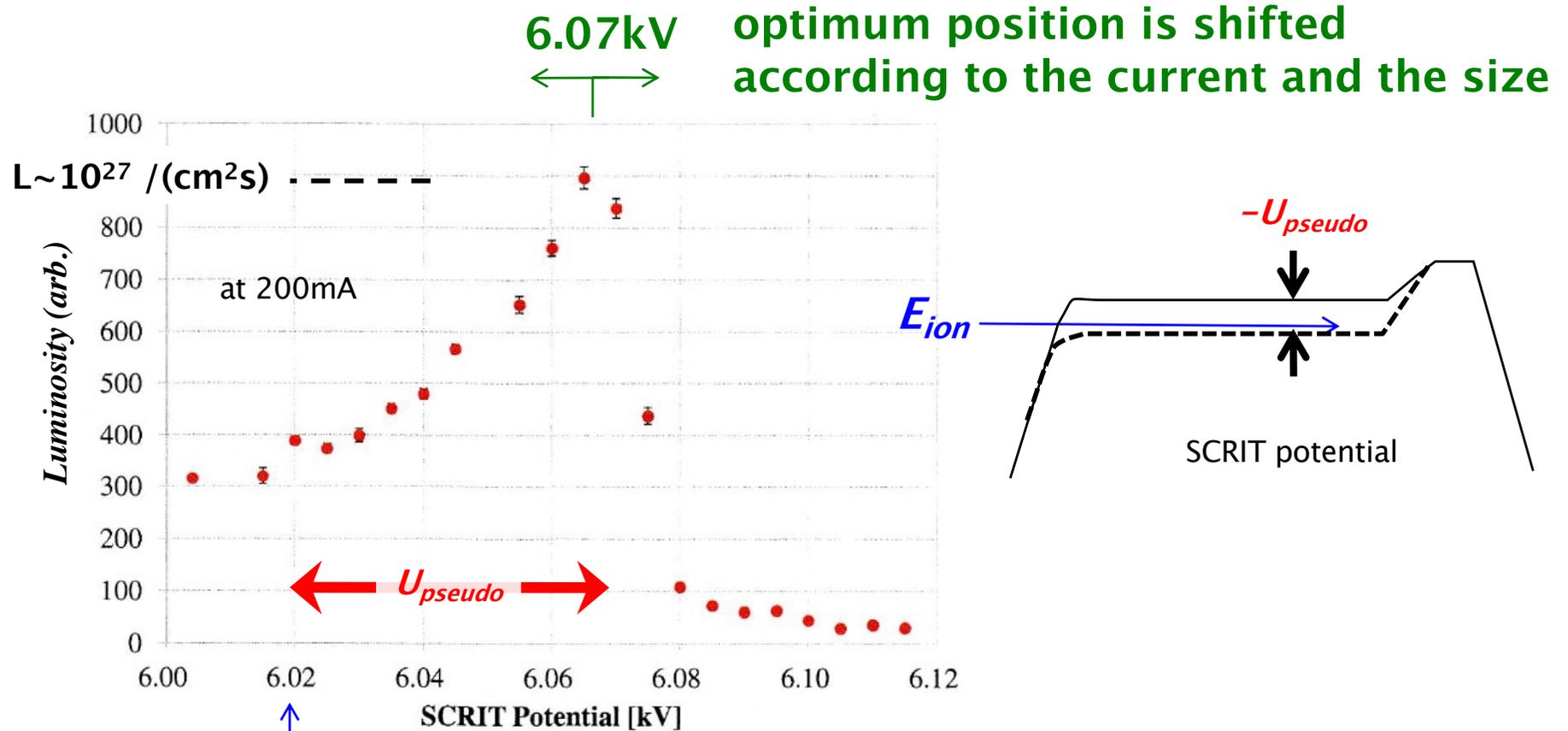
$$L \propto \frac{1}{a}$$

$$N_t \approx \text{constant}$$

$$\rho_0 \propto \frac{1}{a}$$

イオントラッピングについて整理 3 (ルミノシティはどこまで)

Luminosity depending on the SCRIT electrostatic potential



Injected ion beam energy = 6.02keV

Ion energy should be thermalized in the SCRIT

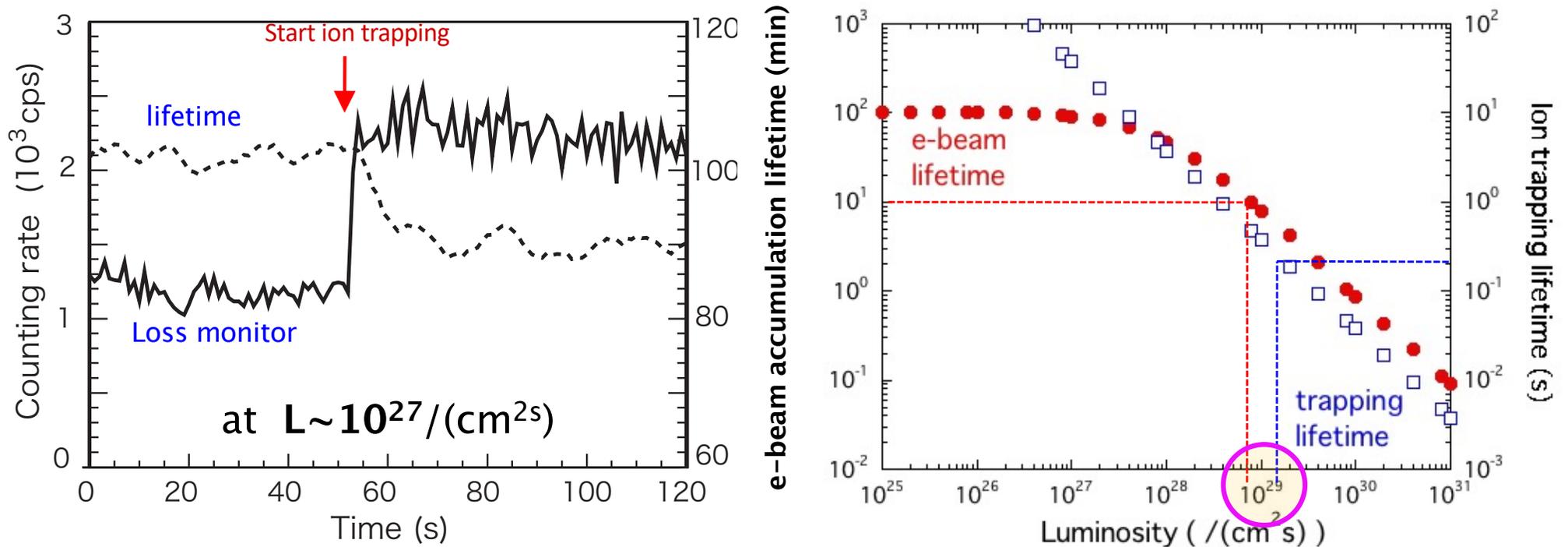
イオントラッピングについて整理3 (ルミノシティーはどこまで)

直感通りの指導原理

- 電子ビーム電流を増やす
- 電子ビームを安定化させる
- ビームサイズを小さくする
- トラップイオンのエネルギーをゼロにする

しかし、ルミノシティーを大きくすると
多価化を促進、トラップ寿命が短くなる

イオントラッピングについて整理 4 (ルミノシティー寿命は)



- **Scattered electrons** with the angle over **3 mrad** are lost.
- **Recoiled ions** with kinetic energy over **10eV** are lost.

Assuming:

e-beam lifetime limit = **10 min.**

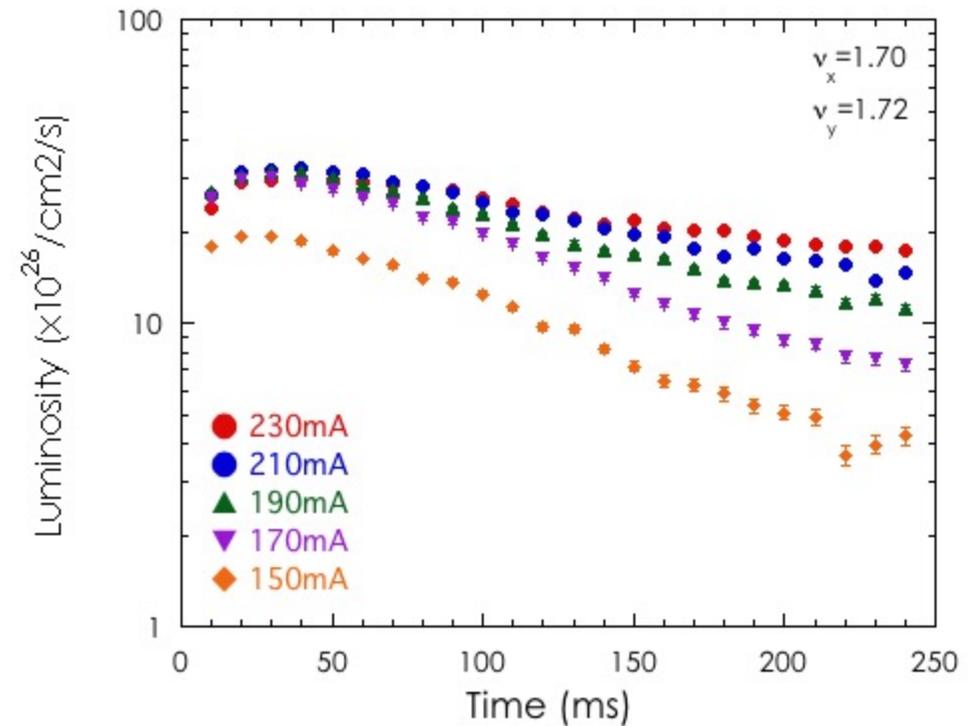
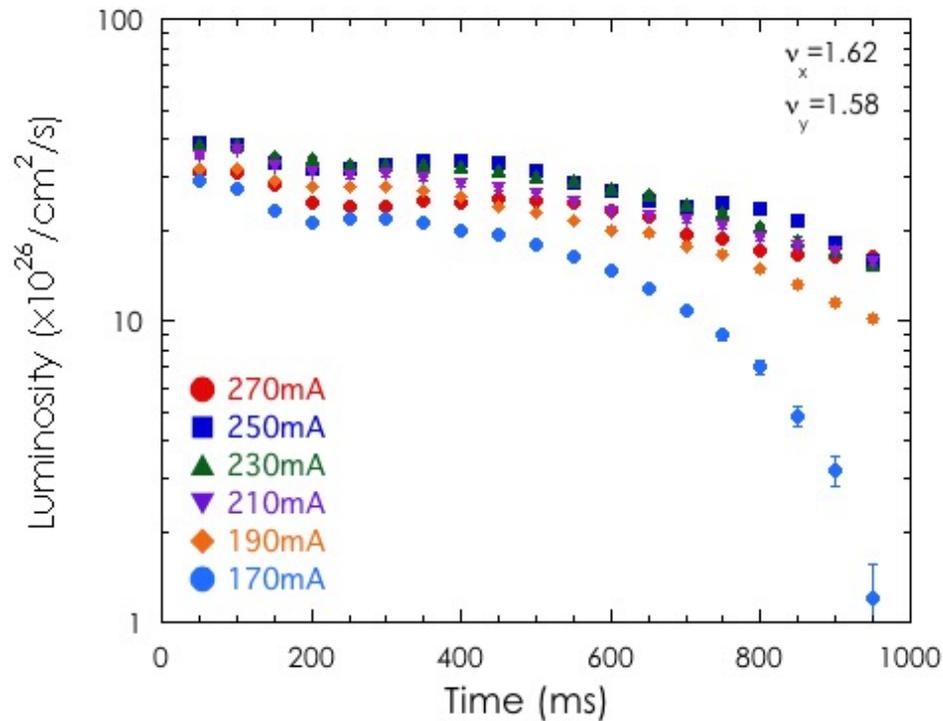
ion trapping lifetime limit = **200 ms**

Upper limit of luminosity:

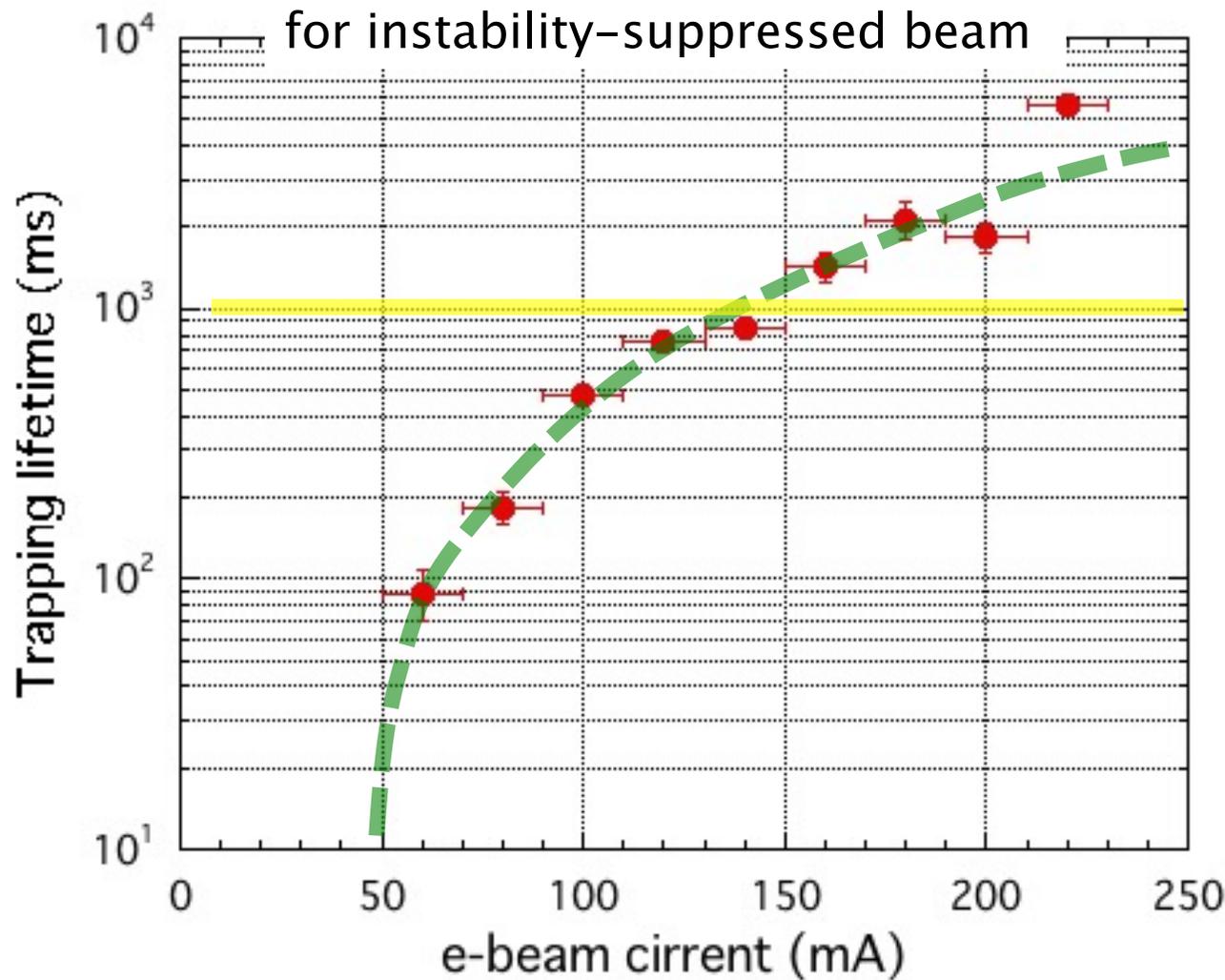
⇒ **~10²⁹ / (cm² s)**

イオントラッピングについて整理4 (ルミノシティー寿命は)

Current dependence of Luminosity decay



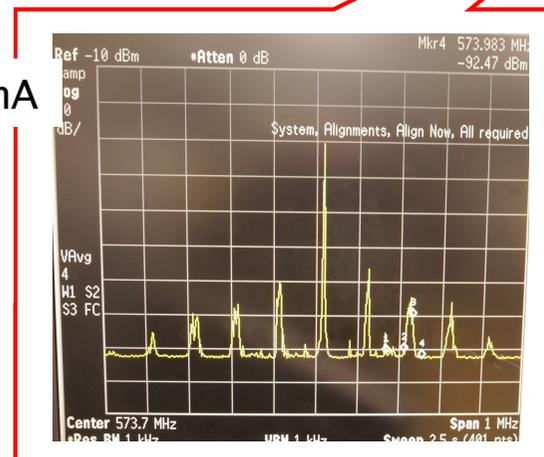
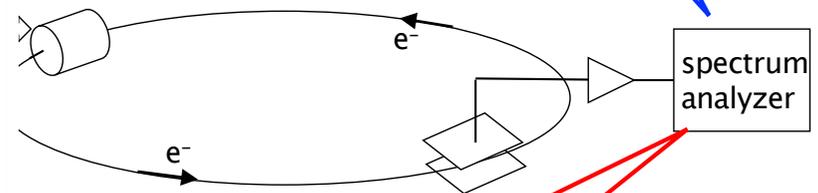
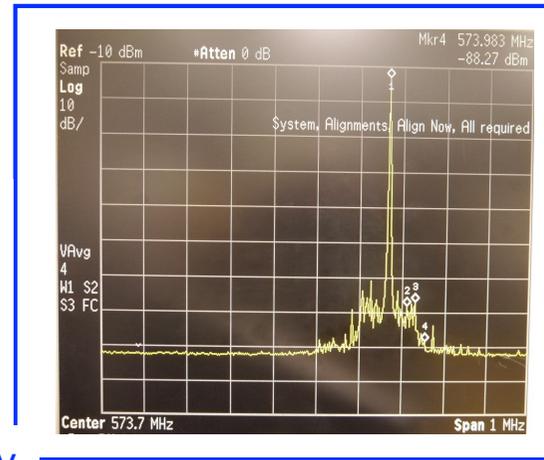
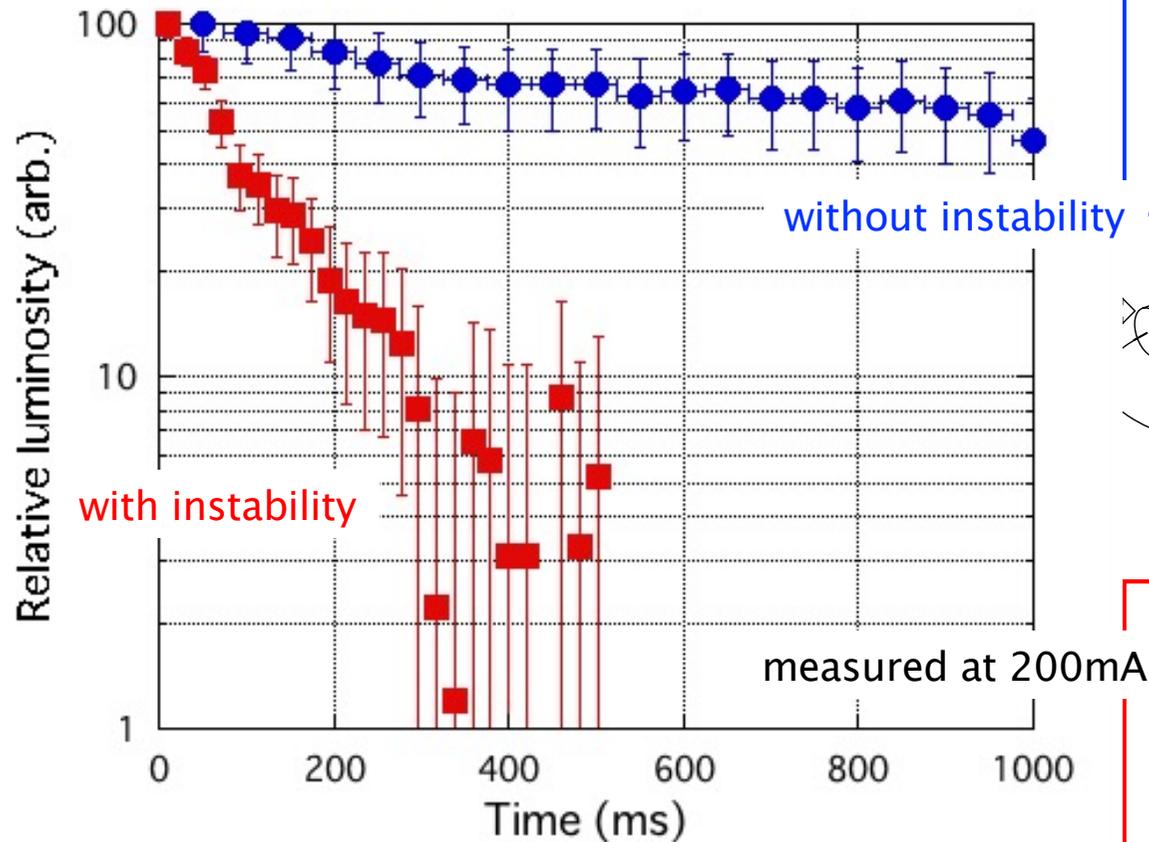
イオントラッピングについて整理 4 (ルミノシティー寿命は) Current dependence of trapping lifetime



Necessary lifetime is
~1s for practical use

Prerequisite for e-beam
 $I_e > 150mA$
without instability

Image of ion trapping with/without e-beam instability

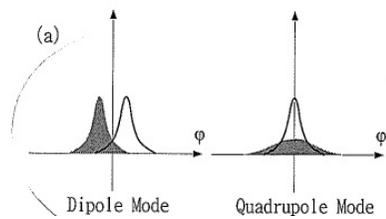


Electron beam instability

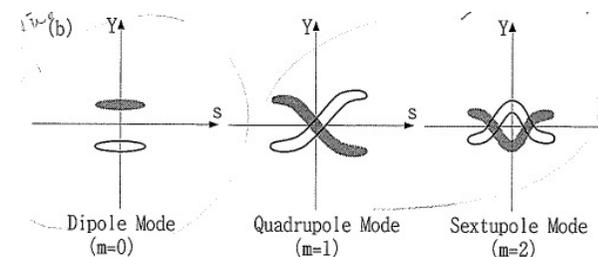
(We should take it seriously)

Microwave instability
 Coupled bunch instability
 HOM excited in cavity
 Intra-beam scattering
 Tune shift and spread
 etc.

coupled to



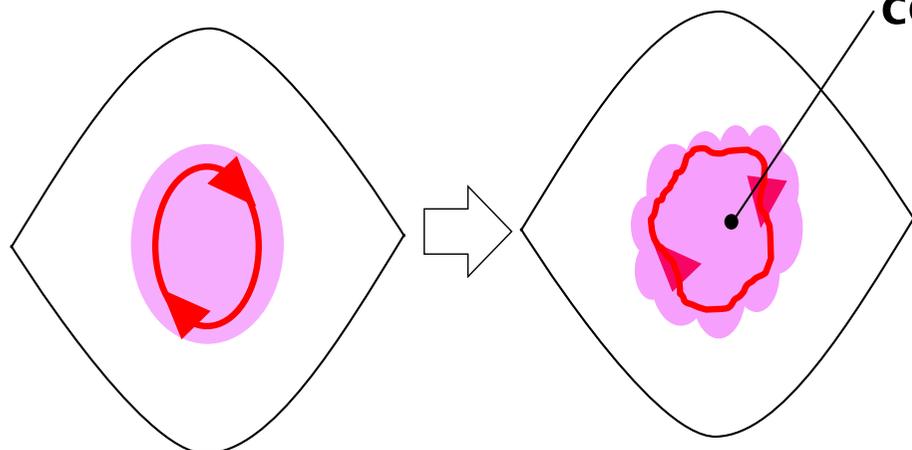
Synchrotron oscillation
 Betatron oscillation



normal

instability coupled

Induced multi-pole coherent motion

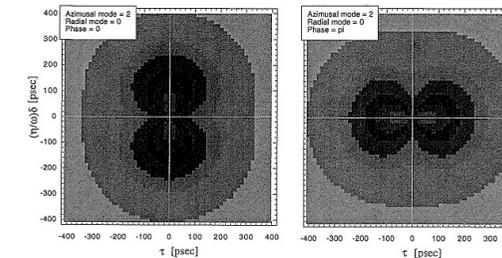
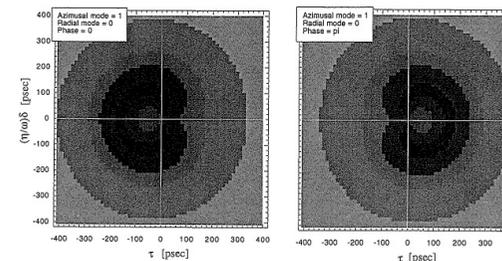


Beam motion in longitudinal phase space

Dipole →

Quadrupole →

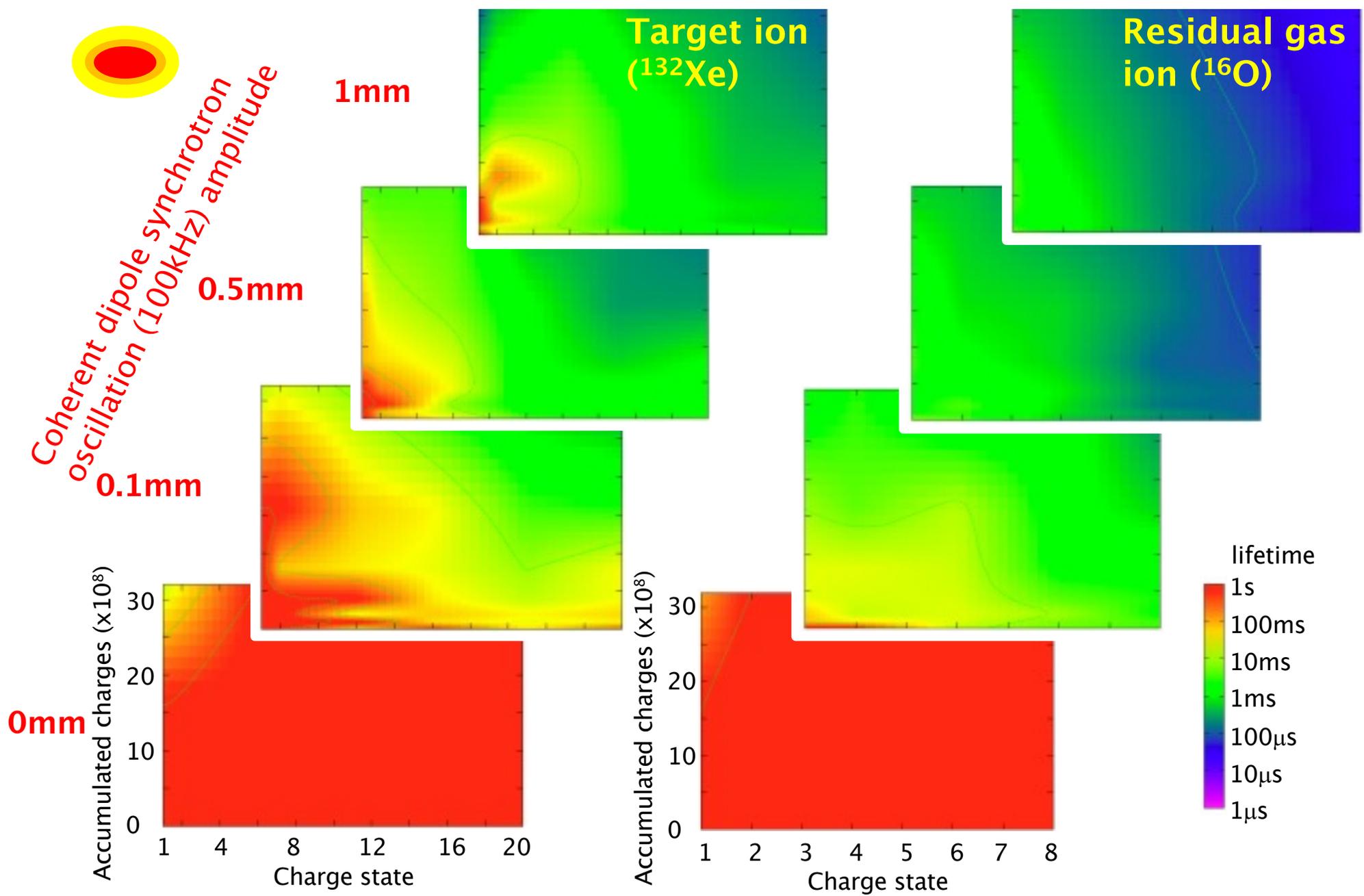
Octapole →



.....

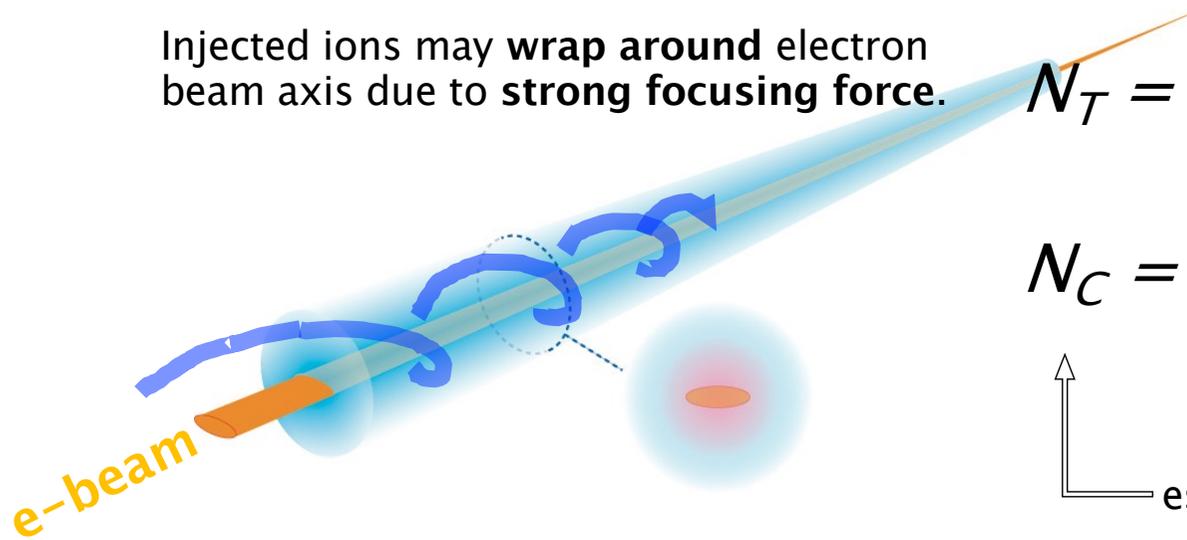
dispersionのあるSCRIT位置では縦振動も横振動を生む

Influences of e-beam oscillation and space charge on trapping lifetime



Trapping efficiency ϵ_{trap} and overlap efficiency ϵ_{ov}

Injected ions may wrap around electron beam axis due to strong focusing force.



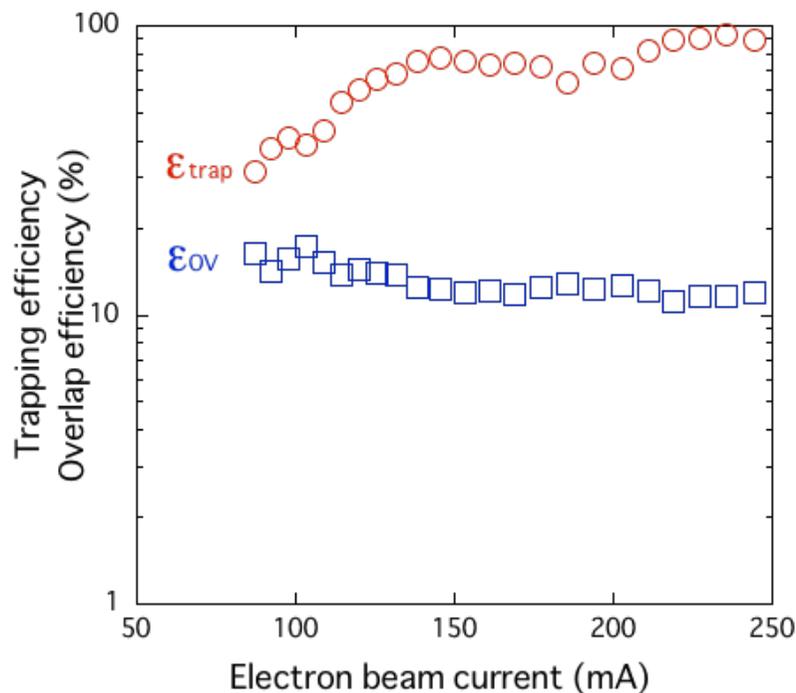
$$N_T = \epsilon_{trap} N_0$$

measurable

$$N_C = \epsilon_{ov} N_T = \epsilon_{ov} \epsilon_{trap} N_0$$

measurable

estimated from luminosity



$\epsilon_{trap} > 90\%$

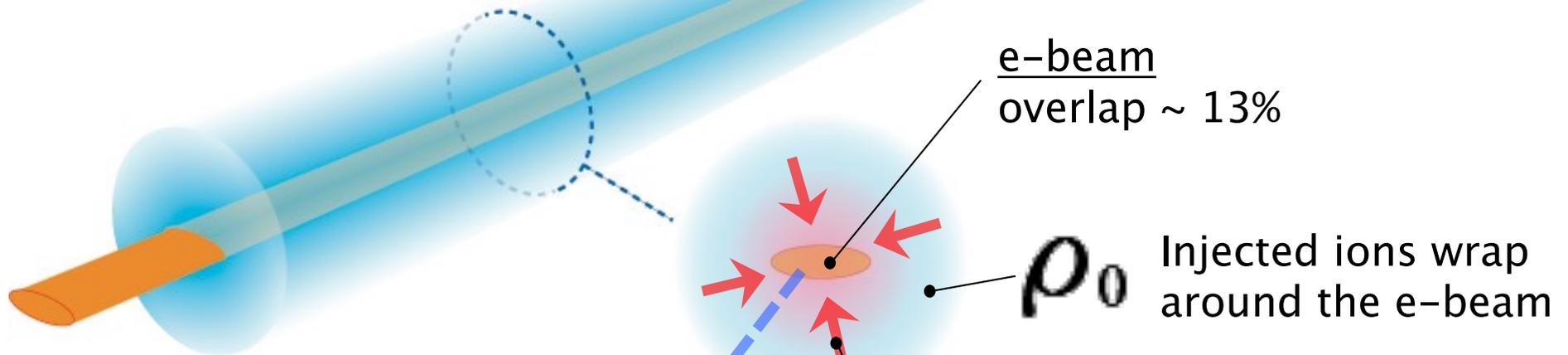
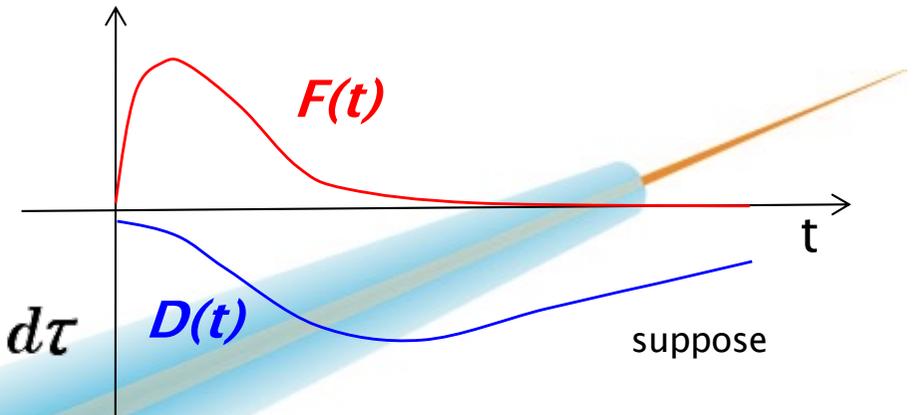
$\epsilon_{ov} \sim 13\%$

~10% of injected target ions participate collision

Ion trapping imagined from our measurements

$$\frac{d\rho_T(t)}{dt} = F(t) + D(t)$$

$$\rho_T(t) = \rho_0 + \int_0^t [F(\tau) + D(\tau)] d\tau$$



$D(t)$ Ion escape due to

- e-beam instability
- space charge effect
- Dropout of higher charge state

$F(t)$ Spatial ion distribution gradually shrinks with increasing charge state

イオントラッピングについて整理4（ルミノシティー寿命は）

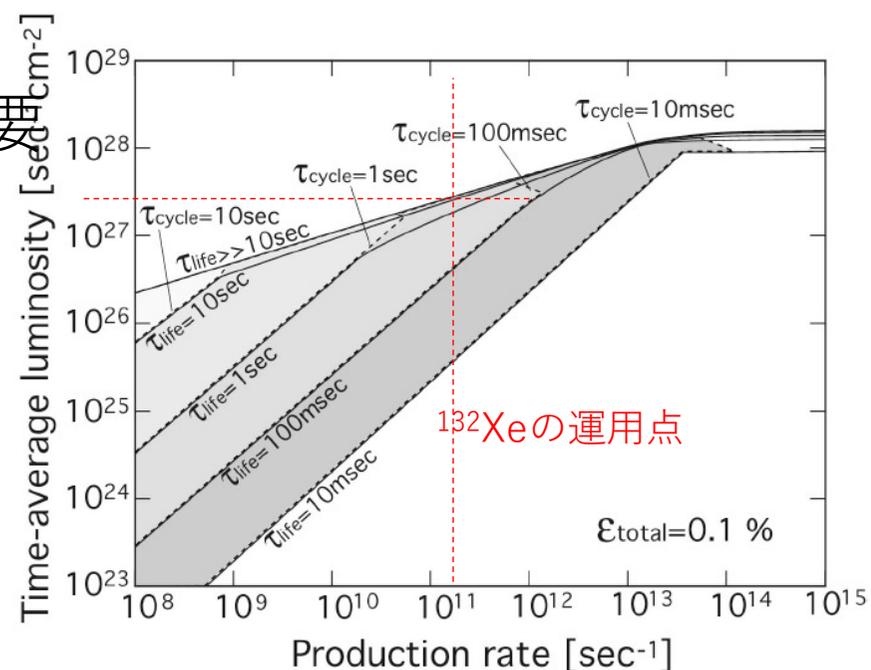
- 電子ビーム電流を増やす
- 安定したビームを回す
- 多価化速度とトラップ寿命の折合い点
（必要な持続時間があればいい）

電子ビームサイズに集中せず周りに
巻きついている程度がちょうどいい

SCRIT特性の整理

- 多価ほどアクセプタンスは狭い
- 平衡点は存在しない（常に時間と共に変動）
- Instabilityに脆弱
- 標的厚とルミノシティと寿命に原理的限界
- 圧倒的な簡便さ
- 衝突（effective overlap）調整が不要

Projectileとして、イオントラップカの
同時二役の長所と欠点



もっと高ルミノシティと少数標的数での
実験実施を目指すには（次世代型SCRIT）

トラップとprojectileの役割分離

超高真空環境の整備または残留ガスイオンの物理的排除

標的イオンリサイクルシステム（スタックできるシステム）

（Pierreも言っていた）

やがてcolliderと勝負する日が来る

（そもそも、colliderを検討する意味をなくす）

（超高エネルギーの要がなければ、colliderが勝てる通りがない）

ELEMENTARY PARTICLES AND FIELDS
Experiment

DERICA = Dubna Electron-Rare Isotope Collider fAcility

DERICA Project and Strategies of the Development
of Low-Energy Nuclear Physics

L. V. Grigorenko^{1),2),3)*}, G. N. Kropachev^{4),1)}, T. V. Kulevoy⁴⁾,
I. N. Meshkov^{5),6),7)}, S. M. Polozov²⁾, A. S. Fomichev^{1),8)},
B. Yu. Sharkov^{9),2)}, P. Yu. Shatunov¹⁰⁾, and M. I. Yavor¹¹⁾

Dubna 副所長

Received May 24, 2020; revised May 24, 2020; accepted May 24, 2020

不安定核物理に出遅れた
ロシアが4億ドルを投じる
起死回生のプロジェクト

e-RI scatteringはultimate goal

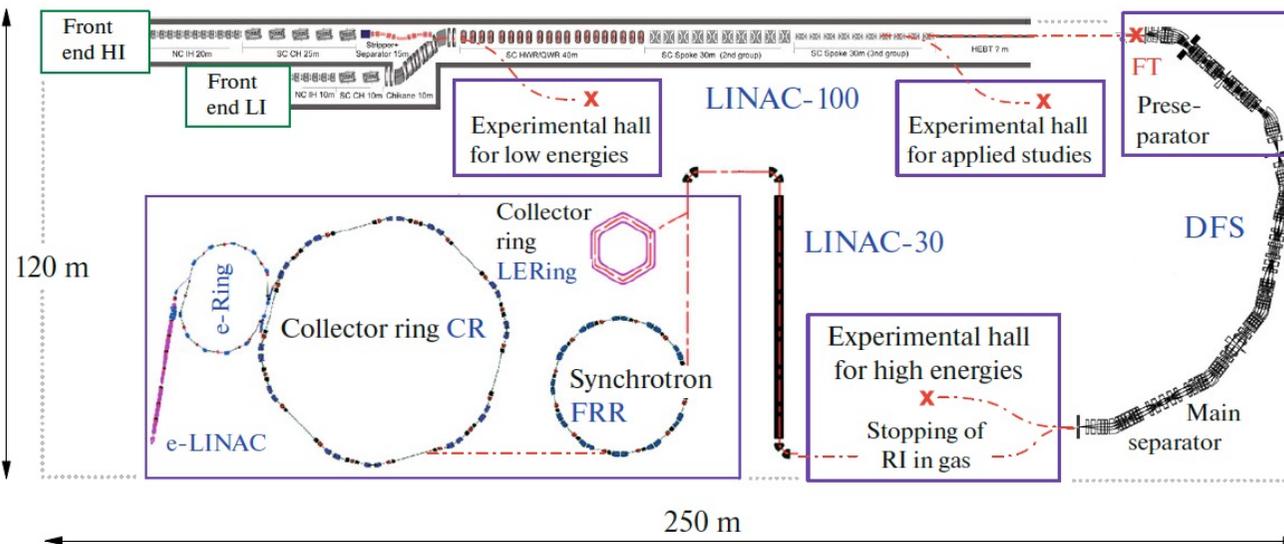


Fig. 1. Preliminary general view of the facilities involved in the DERICA project. LINAC-100, which is a high-current superconductor driver operating in a continuous-wave mode, pushes the energy of a beam of stable ions to values in the range between 100 and 160 MeV per nucleon (see Subsection 3.1). Radioactive isotopes (RI) are produced on a production fragmentation target (FT); the primary beam and unneeded fragments are absorbed in the radiation-loaded zone of the preseparator of the DERICA Fragment Separator (DFS). The required RI are selected by the main separator of DFS (see Subsection 3.4) and are used in the experimental hall for high energies to study reactions at intermediate energies (50 to 100 MeV per nucleon) or are stopped in a gas. Radioactive isotopes stopped in the gas are ionized, are accelerated by LINAC-30 (a pulsed normally conducting accelerator) up to an energy of about 30 MeV per nucleon, and are transported to a collector-ring (CR) complex (see Subsection 3.5)—in particular, for a further acceleration by means of a synchrotron (FRR) to about 500 MeV per nucleon and investigation in the CR/e-Ring collider.

もっと高ルミノシティと少数標的数での 実験実施を目指すには（次世代型SCRIT）

トラップとprojectileの役割分離

超高真空環境の整備または残留ガスイオンの物理的排除

（案）小川原・高木チャージブリーダーの発展型

強力なトラップ力（projectile e-beamに影響されないほど）

トラップ中のイオン運動の完全固有化（mass spectrometerにもなるくらい / ex. MRTOF）

→ トラップ中のイオン種の識別能力を持たせる

EBIS型&イオン運動固有化SCRIT

バンチビーム収束力より強いEBISのDCトラップカ

ソレノイドコイル (0.13T)

検出器
チャンネルトロン

分析電磁石

コレクター

イオンビーム

- ・ 標的 残留ガス
- ・ エネルギー 10 keV/q

-21 kV

電子ビームの
回収効率 99%

トラップ電極 +10 kV

300 mm

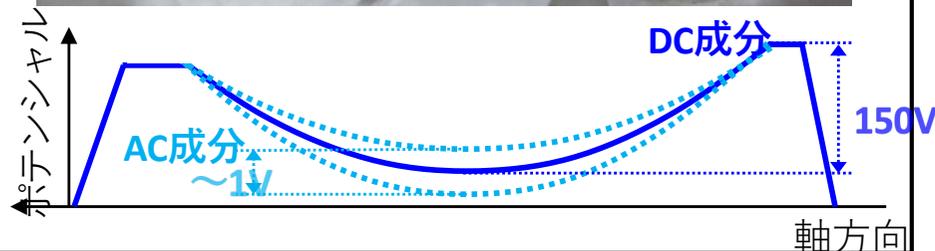
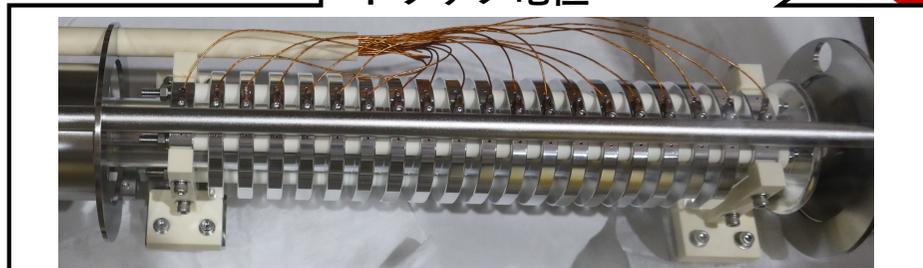
電子銃

-22 kV

電子ビーム

- ・ エネルギー 32 keV
- ・ 電流 10 mA
- ・ 半径 (FWHM) 300 μ m

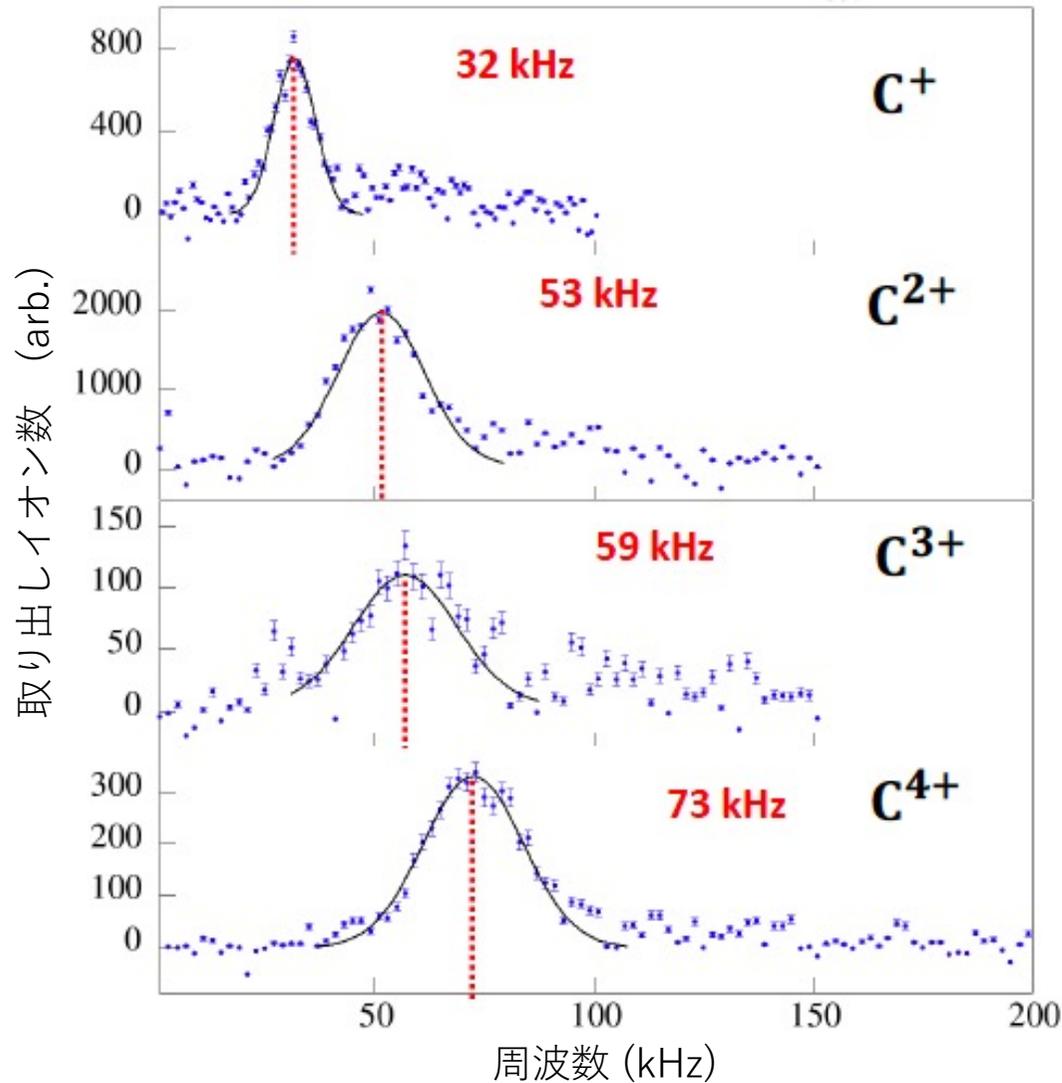
トラップ電極



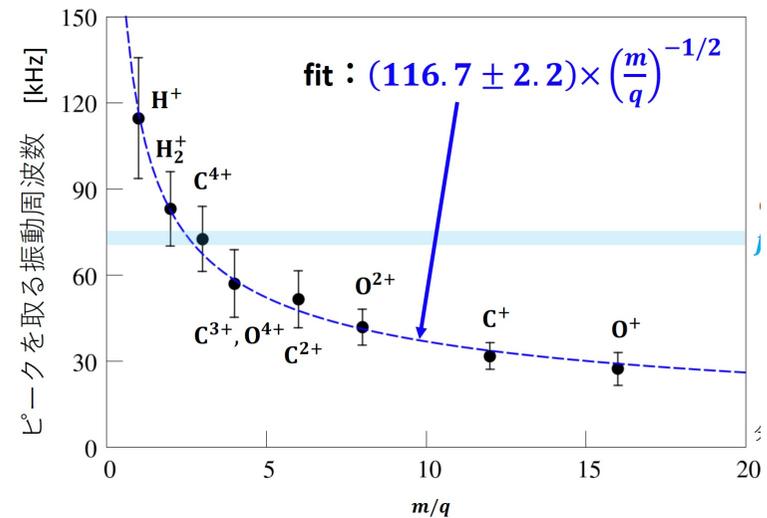
Harmonic Oscillationをさせ運動を固定することでイオン種を識別

EBIS型&イオン運動固有化SCRIT

まだまだ始まったばかり



Scalayとの共同開発でもいいかも

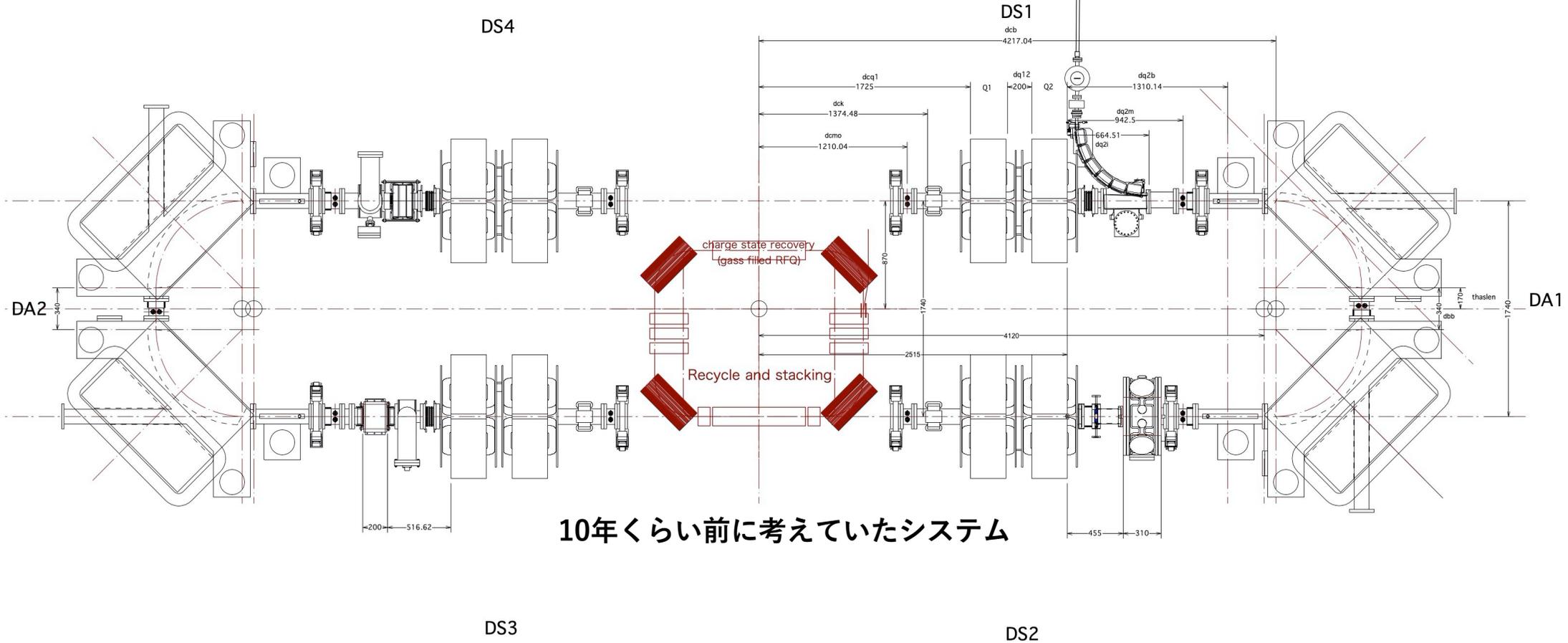


- 電流値10~20mAでトラップ力は同等
→ 100~200mA以上が必要
→ バンチビームが摂動的に働くレベルへ
- イオン種識別分解能（運動の固有化）が足りない
→ ポテンシャル作りに工夫が必要
- 識別できた場合のゴミの排除方法の考案
- 広角散乱電子の捉え方
- e-beamとのoverlapの自動化
- 強いソレノイド場をもち電子リングオプティックス

もっと高ルミノシティーと少数標的数での 実験実施を目指すには（次世代型SCRIT）

標的イオンリサイクルシステム（スタックできるシステム）

（Pierreも言っていた / 生成量の少ないRIへの展開には必須）



まとめ

現SCRITの原理の再認識

b-beamの一人二役では限界があり、これを少しの工夫で打開するのは困難

最大ルミノシティは、 $\sim 10^{28} /(\text{cm}^2\text{s})$

実用的トラップ寿命は、 $\sim 1 \text{ s}$

(改良点) 真空の向上、e-beamの安定化

次世代SCRITの検討とR&Dを急ぐ

役割の分離によるトラップ安定化

トラップイオン種の運動状態の固有化によるゴミの排除

リサイクルによる低生成量のRIへの展開

Colliderとの勝負 (次世代SCRITができれば勝負にならないと思うが)

電子散乱に限らず、RUNBAなど、RIを標的にしたい全ての研究に使われる