J-PARC MRでのウェイク場の時間構造の調査

小林愛音
KEK/J-PARC

第16回加速器学会 FROI013
2019年8月2日

共著者

外山毅、佐藤洋一、五十嵐進、吉井正人、杉山泰之

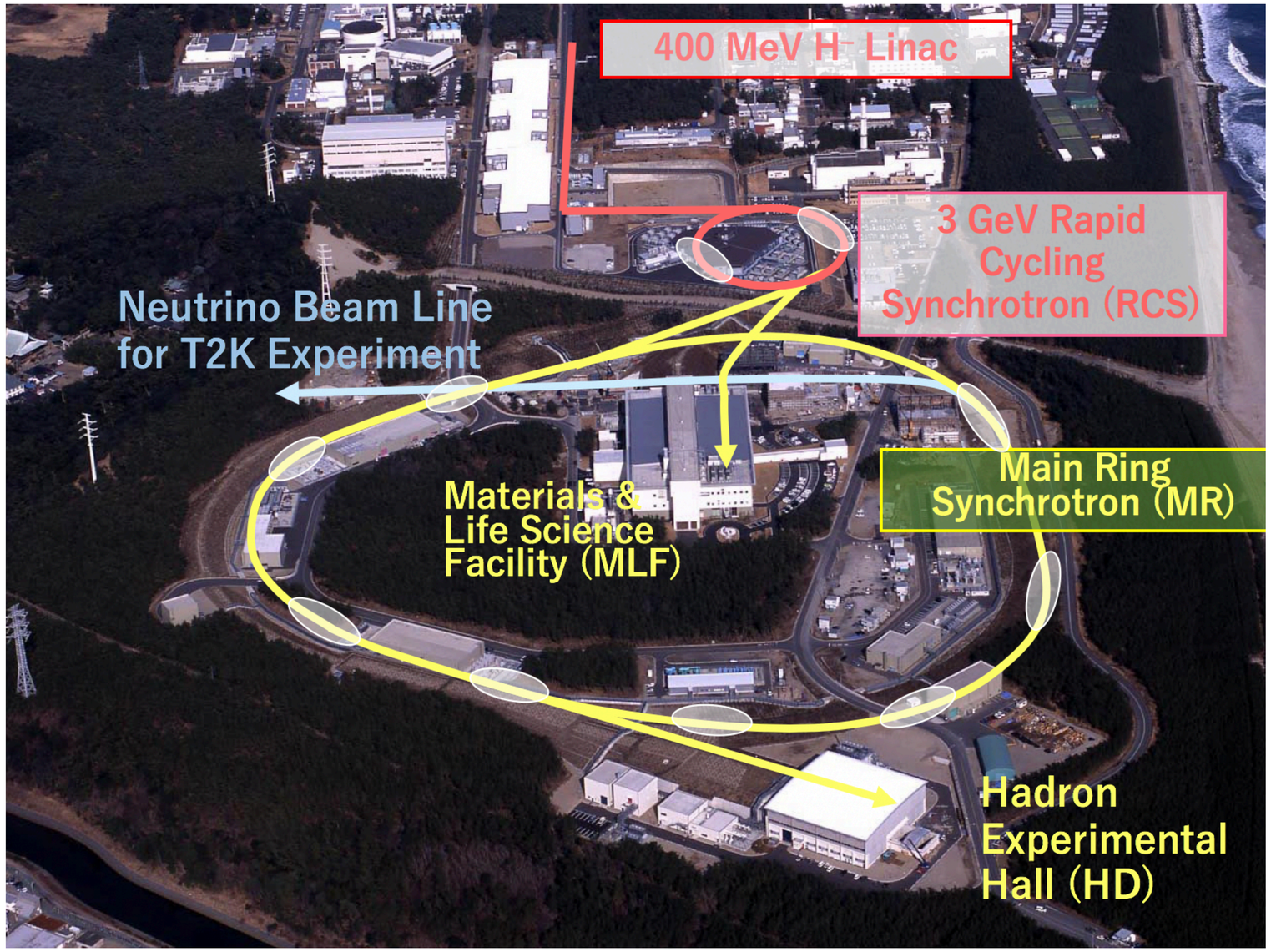
Acknowledgements

陳栄浩様：実験やウェイク場の考察についての助言
田村文彦様：RFの操作や測定についての助言
大見和史様、菖蒲田義博様：チューンシフトやウェイク場についての助言
Michael Schenk様、Bruno Salvant様：PyHEADTAILの使い方について助言
議論や実験に協力していただいた関係者の皆様に感謝申し上げます

科研費

JSPS KAKENHI Granr-in-Aid for Science Research on Innovative Areas, JP18H05537

J-PARC accelerators
大強度陽子加速器



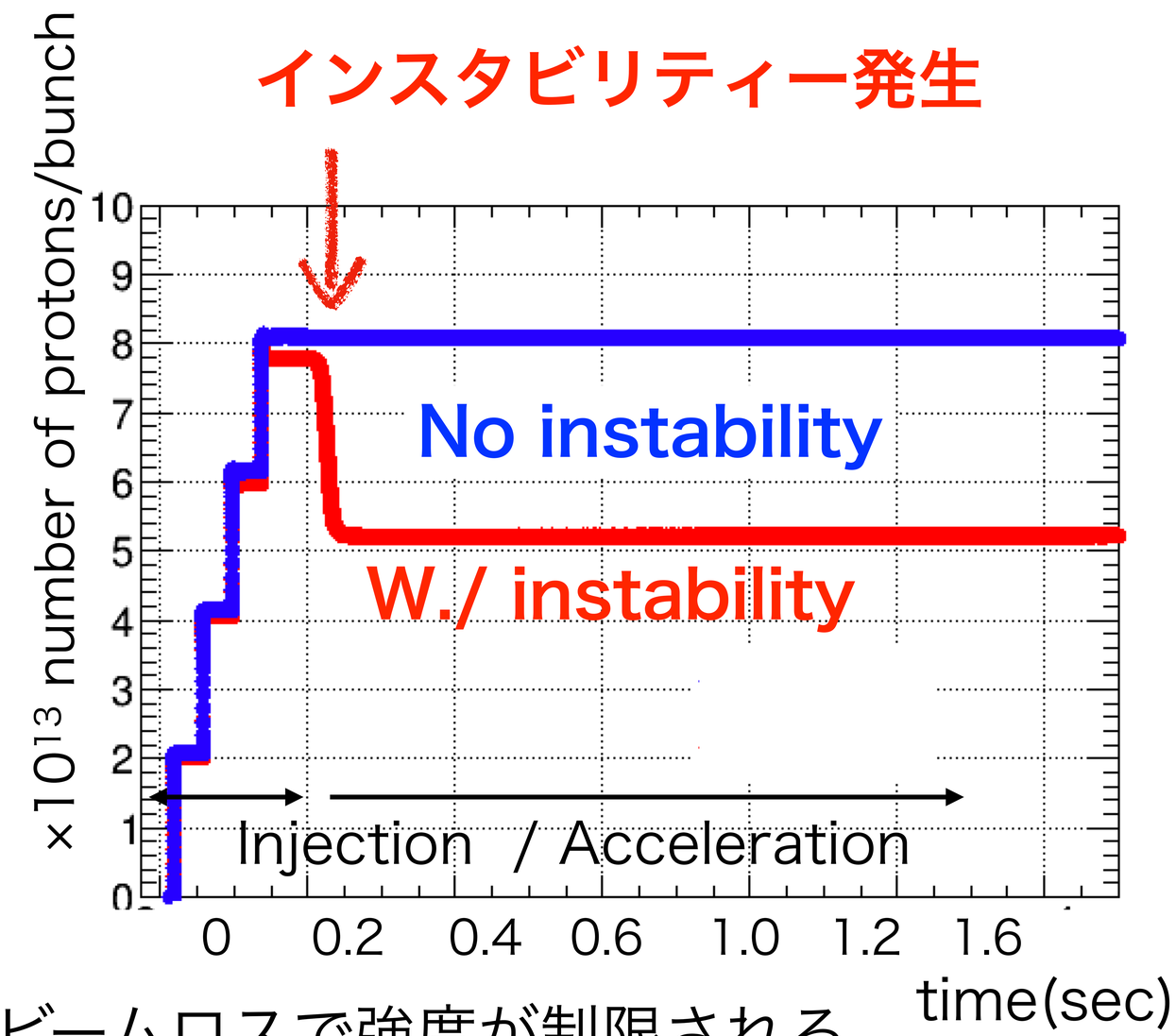
Slides from Y. Sato

Typical MR parameters

injection energy	3.0 GeV
extraction energy	30.0 GeV
circumference	1567.5 m
cycle time	2.48 sec(FX) 5.2 sec (SX)
beam power	500 kW(FX) 50 kW (SX)
harmonic number	9
RF frequency	1.67 - 1.72 MHz
tune H / V	21.35 / 21.45 (FX) 22.333 /20.8 (SX)
number of bunches	~ 8

大強度化へ向けた加速器中のインピーダンスの評価

周回ビームは加速器中のダクトや
装置、磁場等の中を通るときに
インピーダンスを受ける
→ ビームが不安定になる
(= インスタビリティー)
→ ビームロス

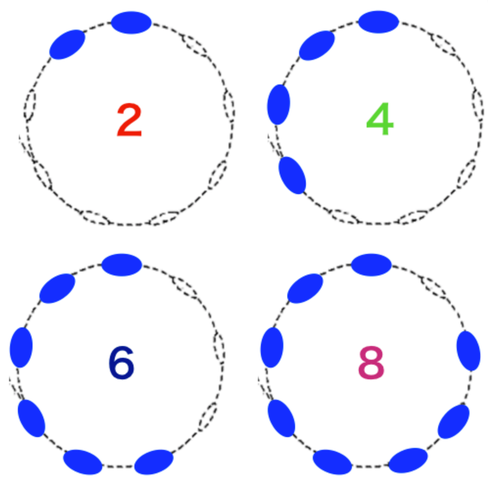


J-PARCのようなハドロン加速器ではビームロスで強度が制限される
現在MRで許容できるビームロスは残留線量でのメンテナンス性評価に基づき
約1 kW以下としている

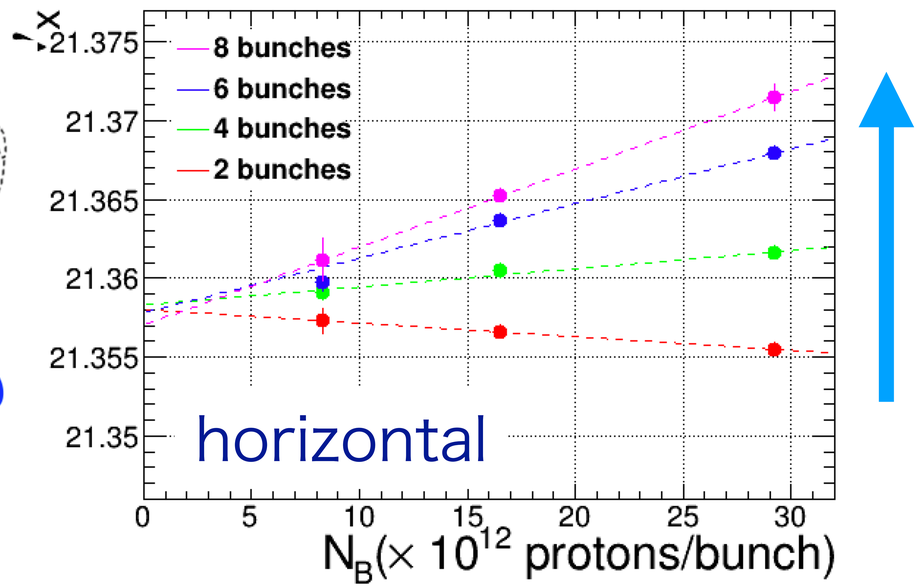
ビームロスを減らすためには加速器中のインピーダンス
の見積もりが不可欠である

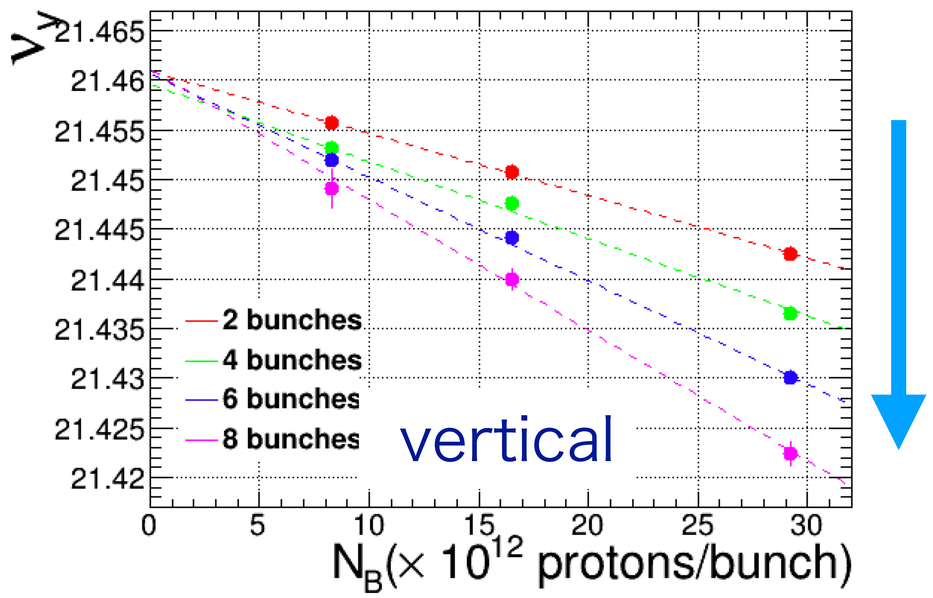
これまでの研究：MRでのベータトロン・チューンシフト

チューンシフトのマルチバンチでの測定を通して
強度・バンチ数・バンチングファクター依存性を調査し大強度運転に対応した

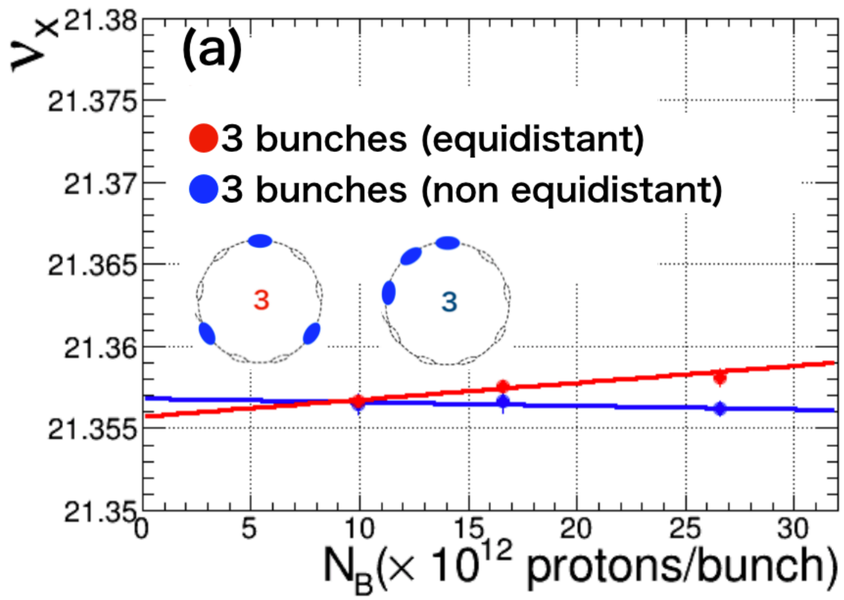


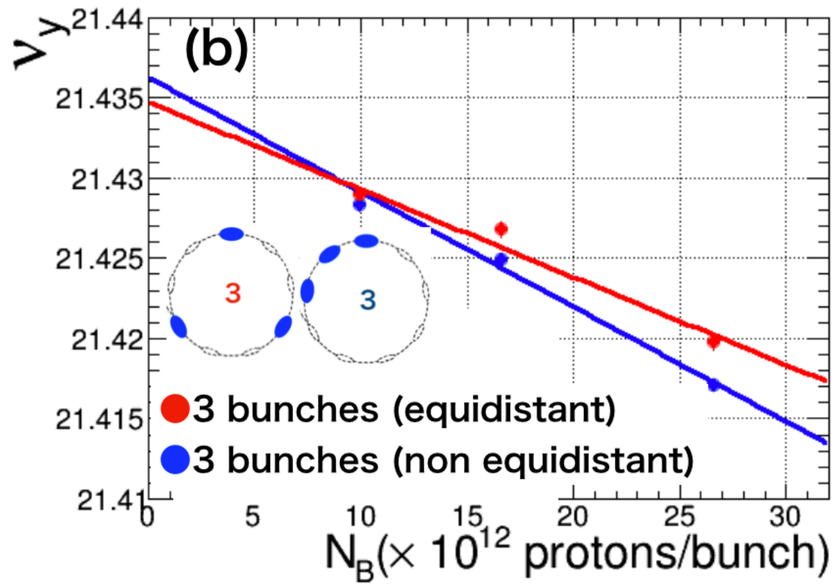
水平・垂直方向の傾きの違い





バンチ間隔による違い



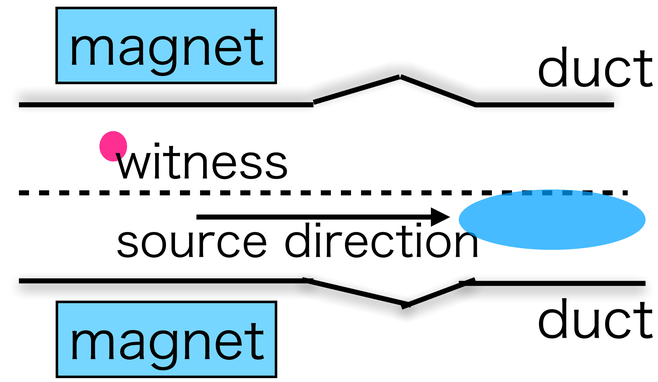


目標：メカニズムを解明し、インピーダンスを評価する

チューンシフトの起源

$$\Delta\nu = \boxed{\Delta\nu_{\text{空間電荷}}} + \Delta\nu_{\text{抵抗性壁効果}} + \Delta\nu_{\text{他}}$$

鏡像電磁場によるindirect space charge効果
ダクト形状や磁石、ビームで定義される

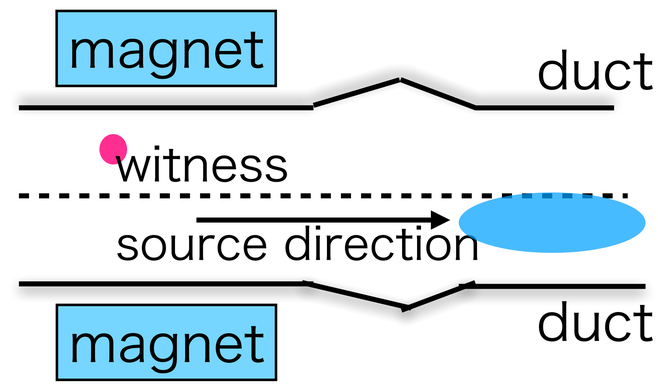


Laslet, 1963

チューンシフトの起源

$$\Delta\nu = \Delta\nu_{\text{空間電荷}} + \Delta\nu_{\text{抵抗性壁効果}} + \Delta\nu_{\text{他}}$$

鏡像電磁場によるindirect space charge効果
ダクト形状や磁石、ビームで定義される



Laslet, 1963

ダクトの材質や形状、ビームで定義される
抵抗性壁効果

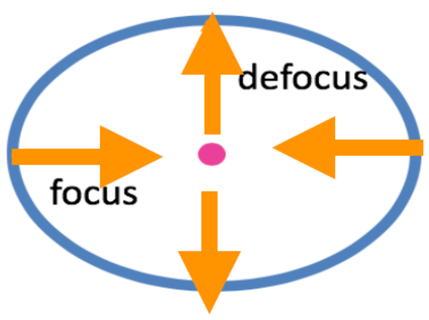
Chao et al., Phys. Rev. A. B. 5, 111001, 2002
Shobuda et al., Phys. Rev. E 66, 056501, 2002

dipole wake field

ダクト断面

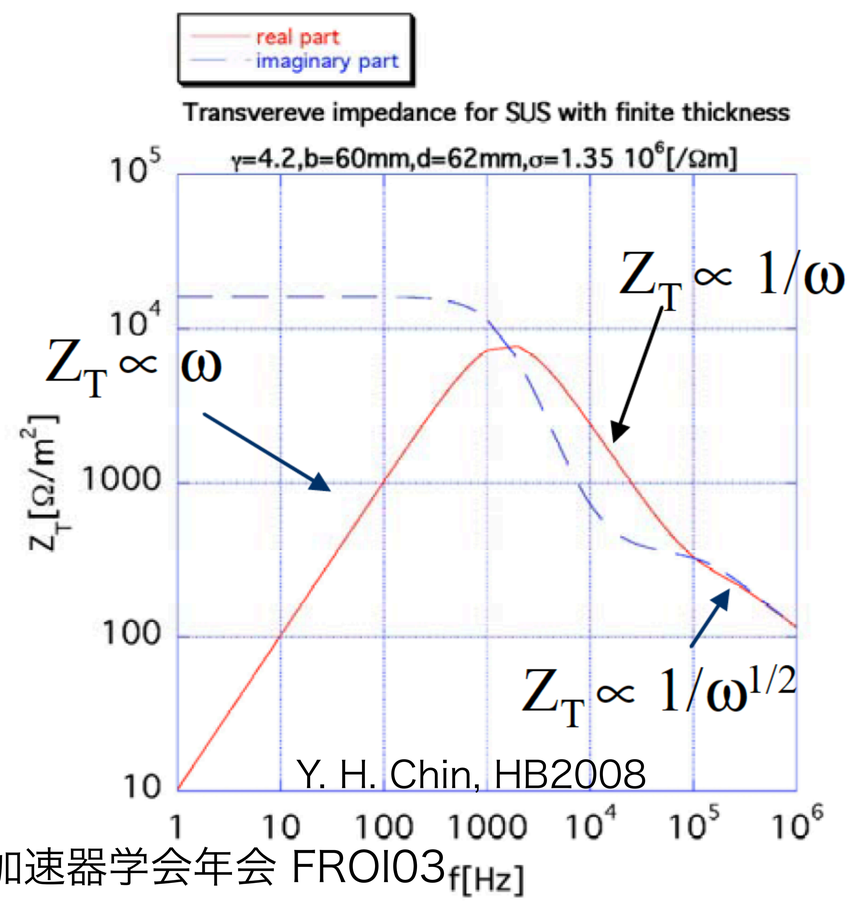
◉beam

quadrupolar wake field



asymmetry for
horizontal and vertical

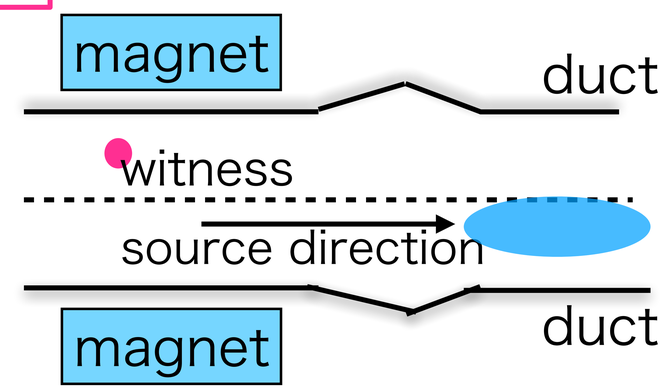
multi-bunchで顕著になる



チューンシフトの起源

$$\Delta\nu = \Delta\nu_{\text{空間電荷}} + \Delta\nu_{\text{抵抗性壁効果}} + \Delta\nu_{\text{他}}$$

鏡像電磁場によるindirect space charge効果
ダクト形状や磁石、ビームで定義される



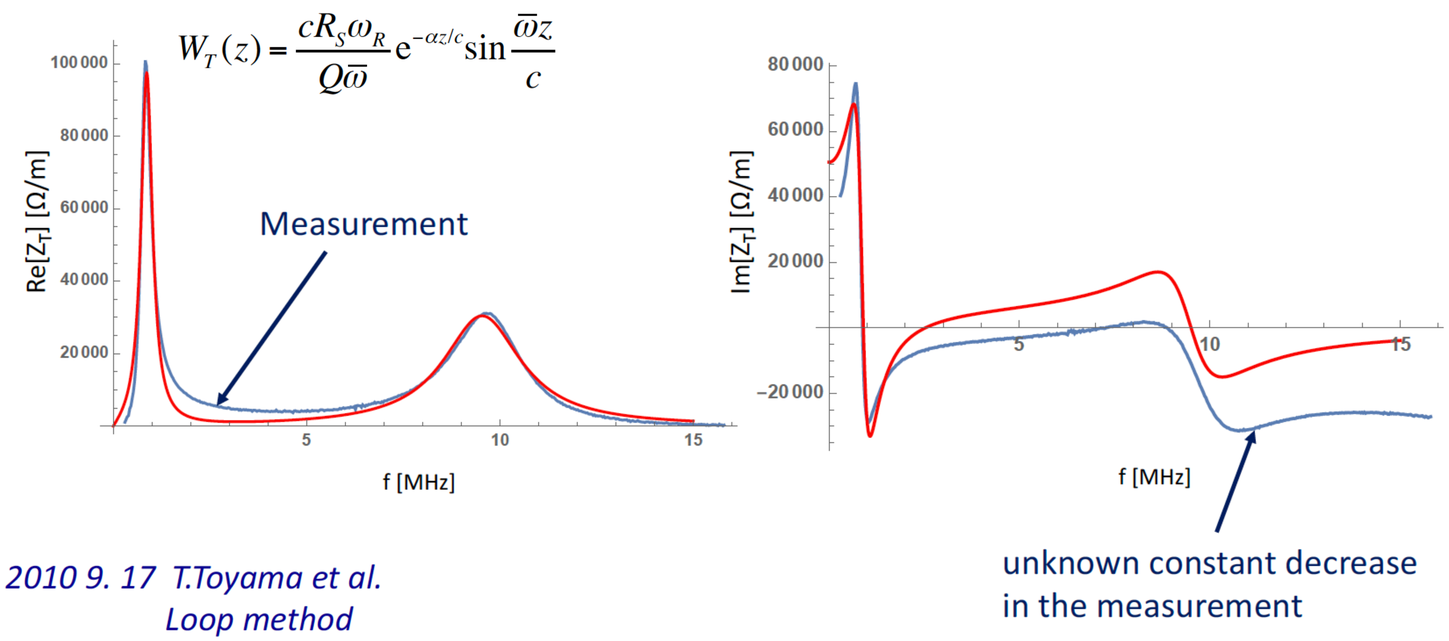
Laslet, 1963

ダクトの材質や形状、ビームで定義される
抵抗性壁効果

他のインピーダンス源、キッカー等

理論による定性的理解は得た

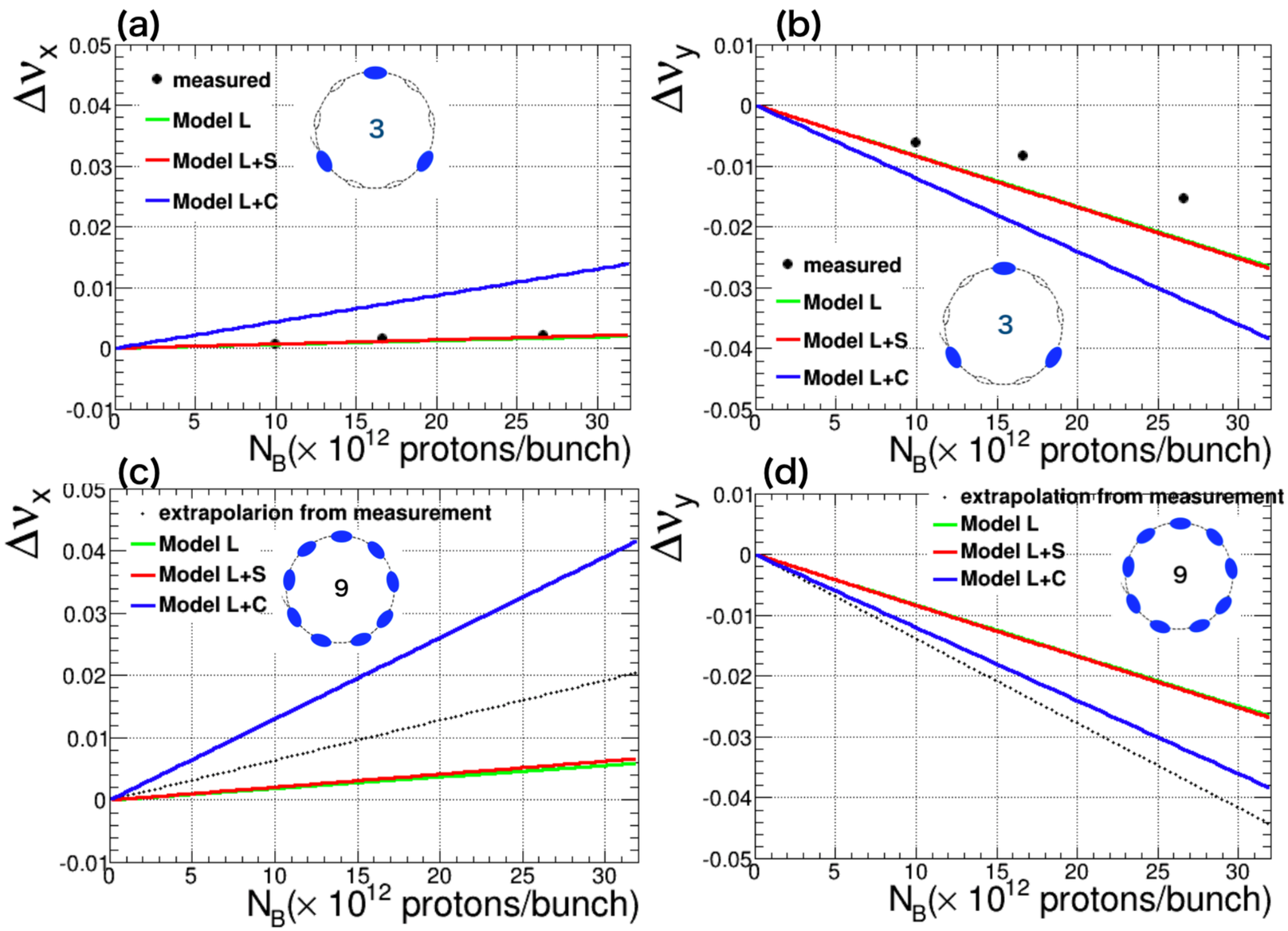
キッカー



2010 9. 17 T.Toyama et al.
Loop method
Zx - Zy

モデルと測定との比較

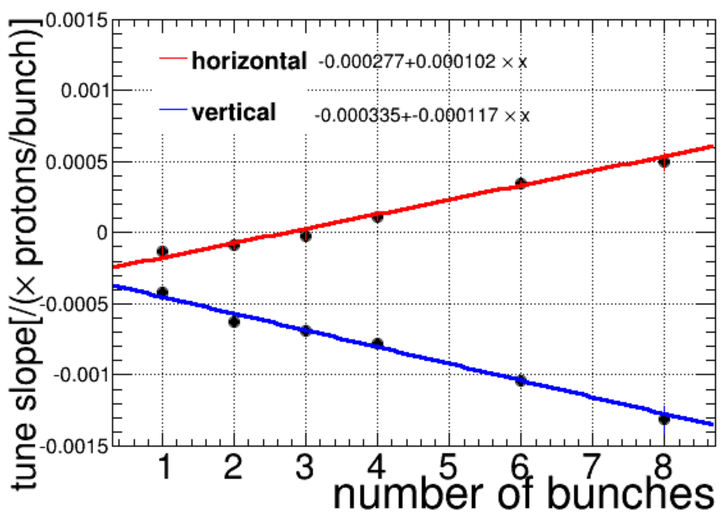
モデルの条件である、均等にバンチが詰まっている状態の測定を行なった



Model

- L : indirect space charge (Lastlet)
- S：抵抗性壁効果（Shobuda et al.）
- C：抵抗性壁効果（Chao et al.）

チューンシフトの傾きのバンチ数依存性

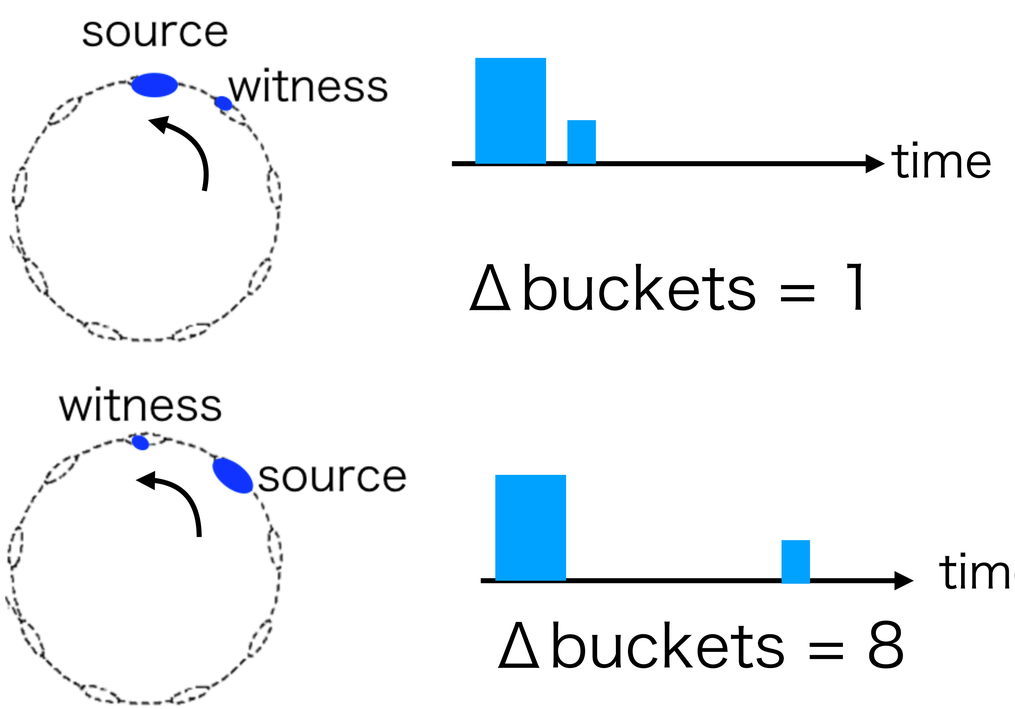


1~8バンチ測定の結果より
9バンチの傾きを求めた

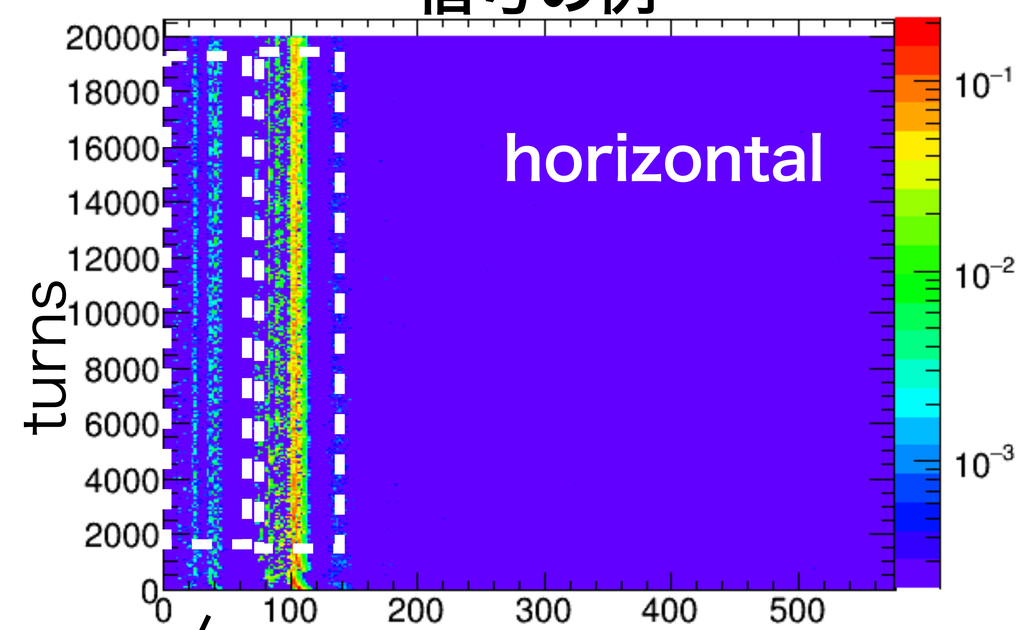
定量的評価には他の検証も必要

Wake fieldの減衰時間（1）

マルチバンチの効果を調べるため、source (大強度バンチ)と、witness(その1/16の小さい強度のバンチ)を用いチューンシフトを調べた

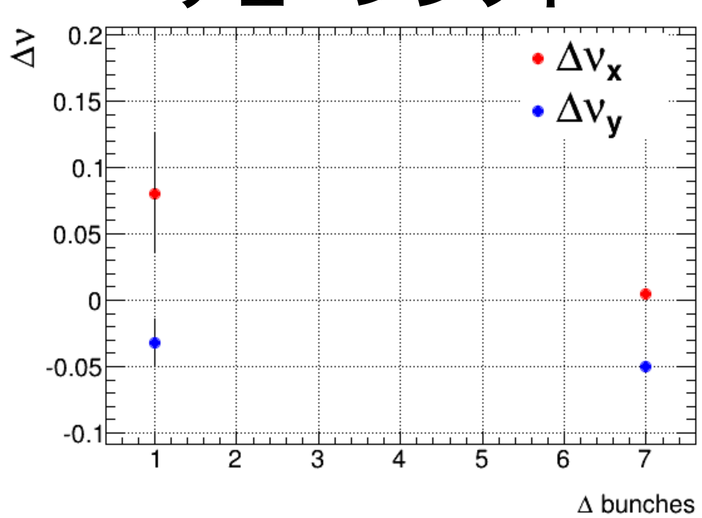


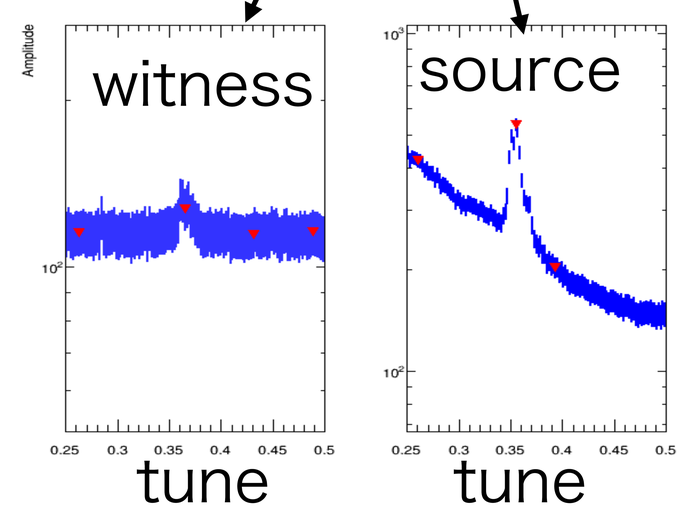
信号の例



1バンチ目　　Slices(時間)　　2バンチ目

チューンシフト

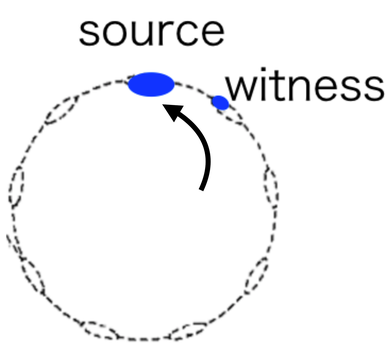




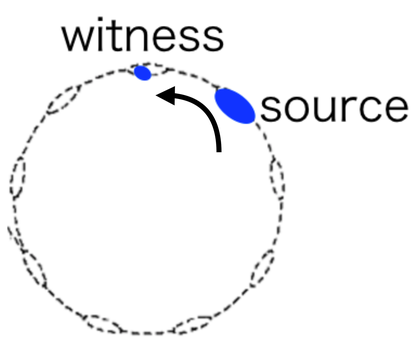
窓関数の適用、FFT

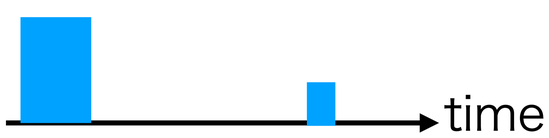
Wake fieldの減衰時間（2）

周波数帯域が長いインピーダンス源を抵抗性壁効果だけとした

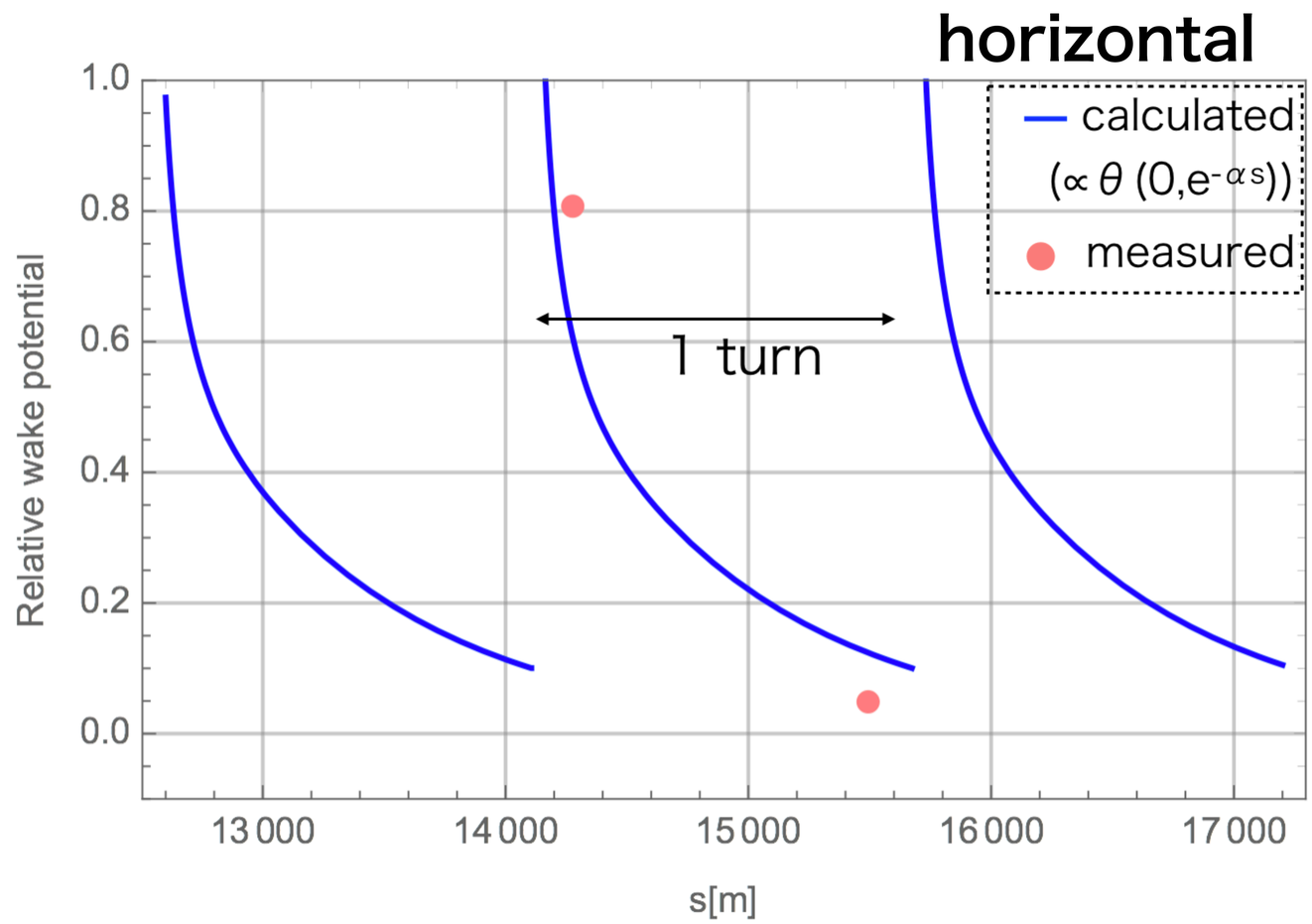


Δbuckets = 1





Δbuckets = 8



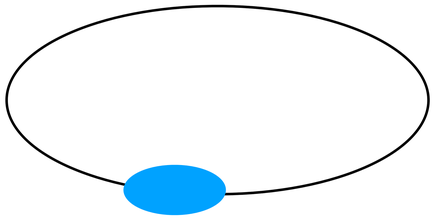
抵抗性壁効果のモデルはShobuda et al. (PRE2002)の式を参考

$$W_\perp(s) = 2\frac{cZ_0\rho_0}{\pi b^2 d}\cdot\vartheta_2(0, e^{-\alpha s})\cdot D_\perp$$

$$\alpha = \pi^2\rho_0/d^2$$

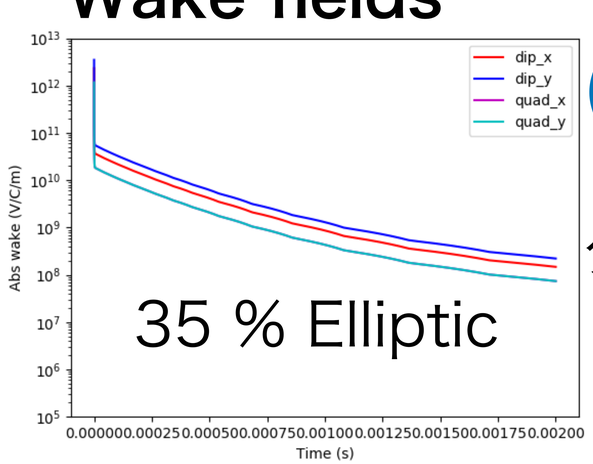
今はElliptic theta functionを適当にスケール

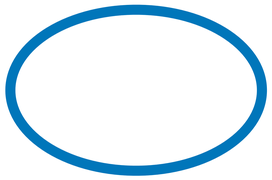
抵抗性壁効果のシミュレーション(1)



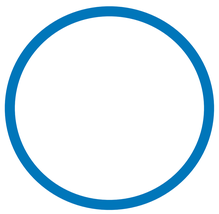
- macro particle simulation (PyHEADTAIL)を用いた計算
- インピーダンスモデル：MRでの抵抗性壁効果をImpedance Wake 2Dで計算した先行研究（B. Yee-Rendon氏：IPAC'18）の結果を引用
- 条件：実験（FX大強度）と同じ値を使用

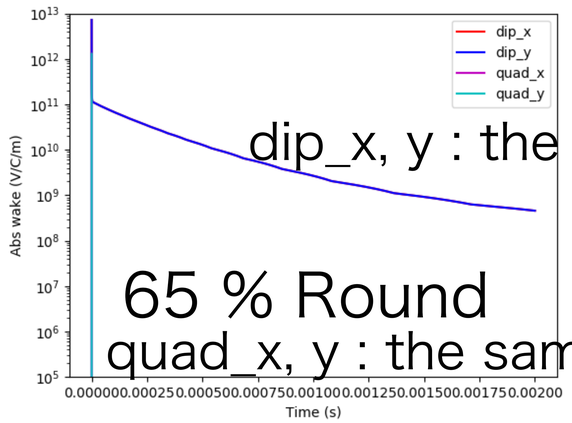
Wake fields



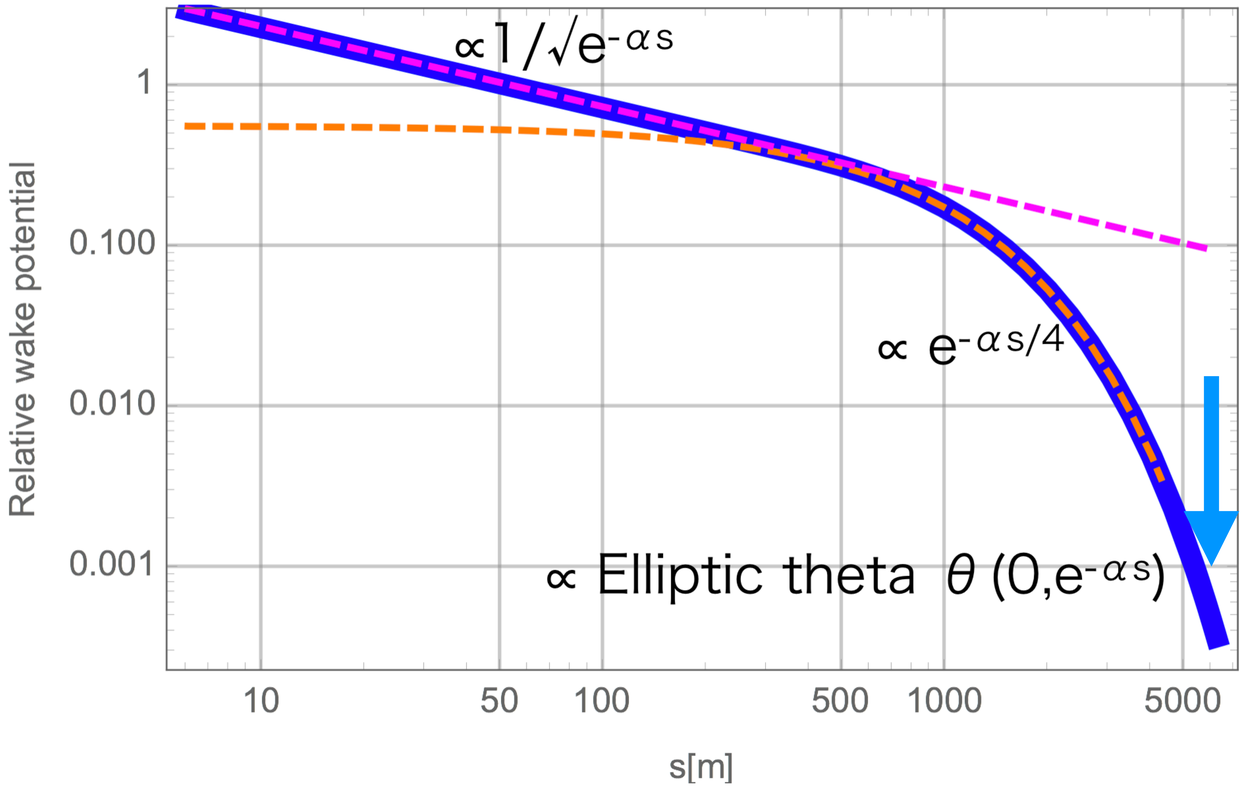


ダクト断面





Wakeの減衰 4 turnで0.1 %以下、シミュレーションで5 turnで定常状態でconsistent



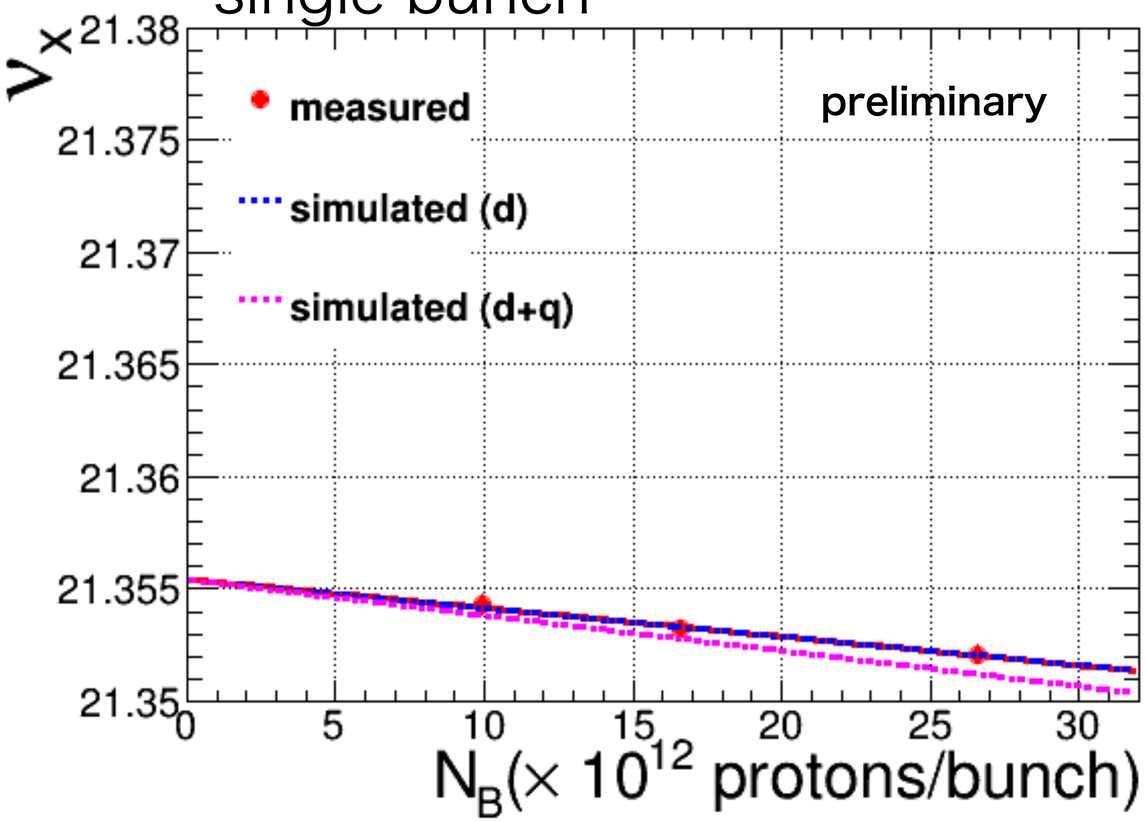
$$W_\perp(s) = 2\frac{cZ_0\rho_0}{\pi b^2 d}\,\vartheta_2(0, e^{-\alpha s})\cdot D_\perp \qquad \alpha = \pi^2\rho_0/d^2$$

抵抗性壁効果のシミュレーション(2)

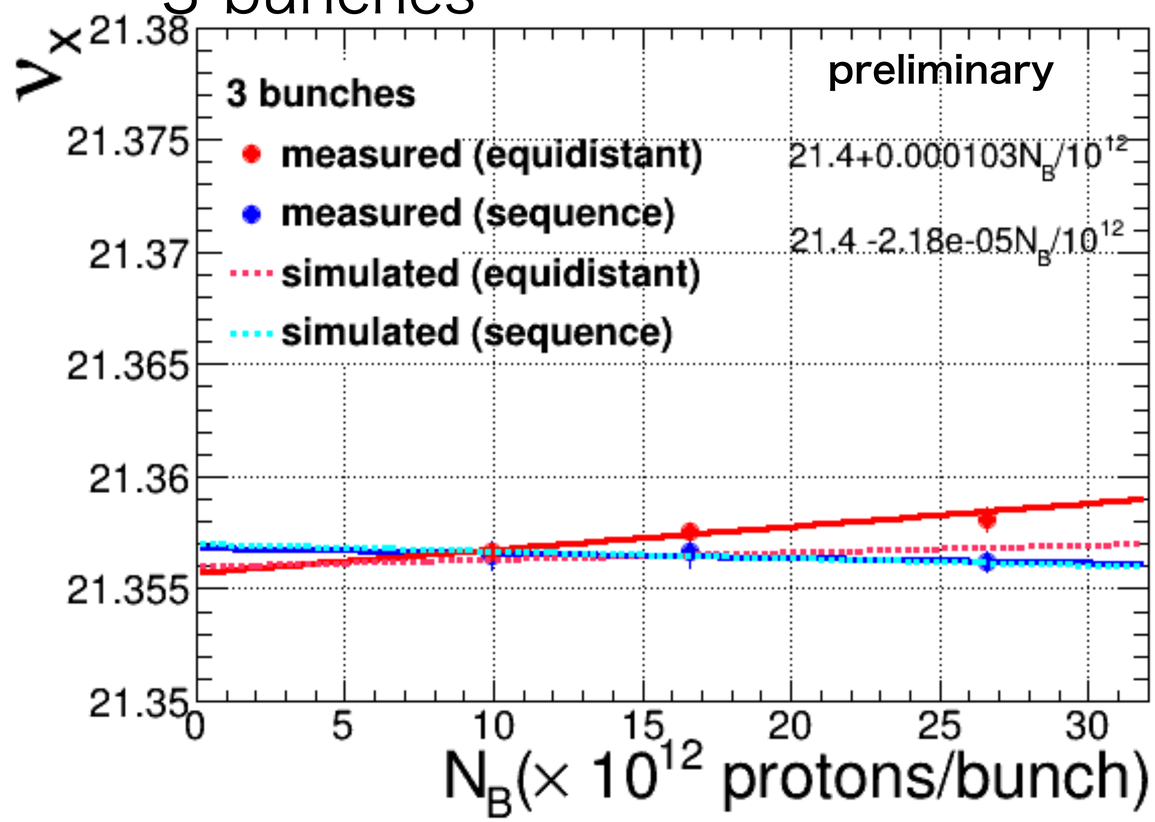
定性的には合う

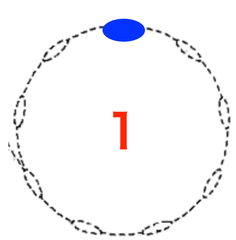
定量的評価のための準備を進めている

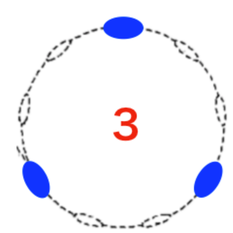
single bunch

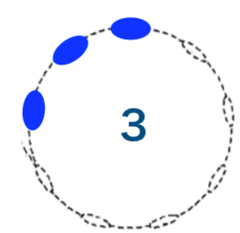


3-bunches





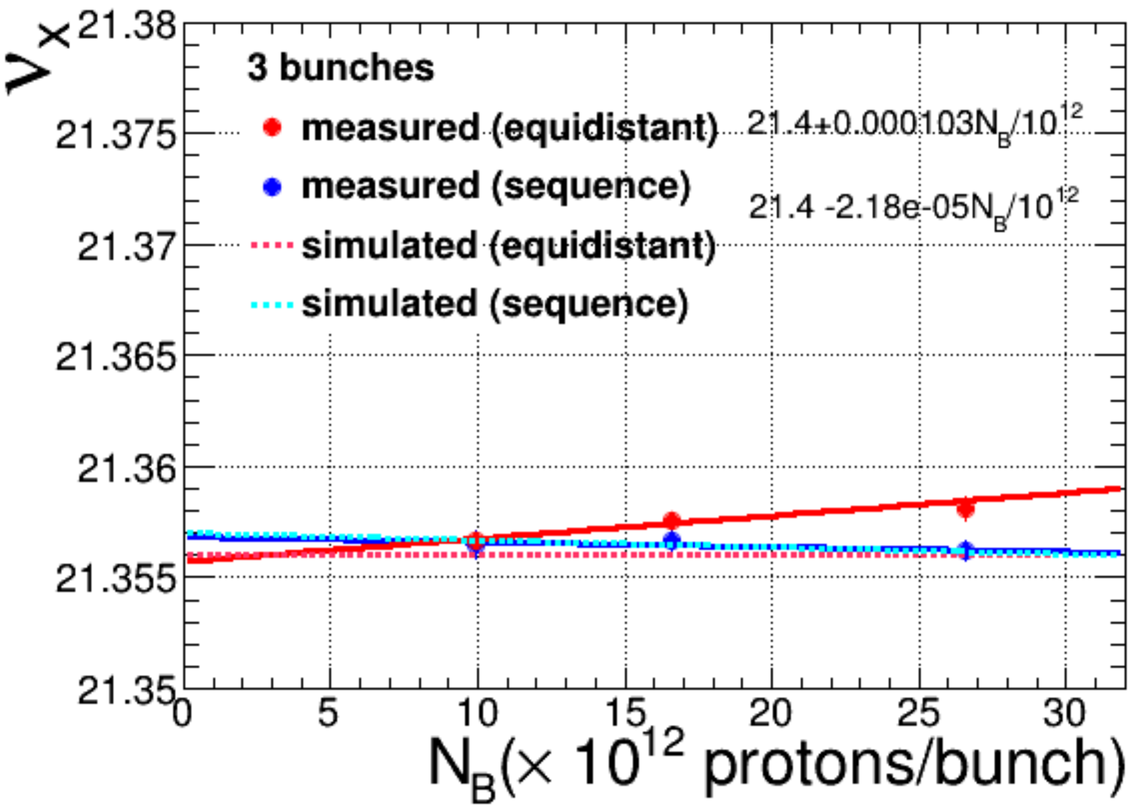




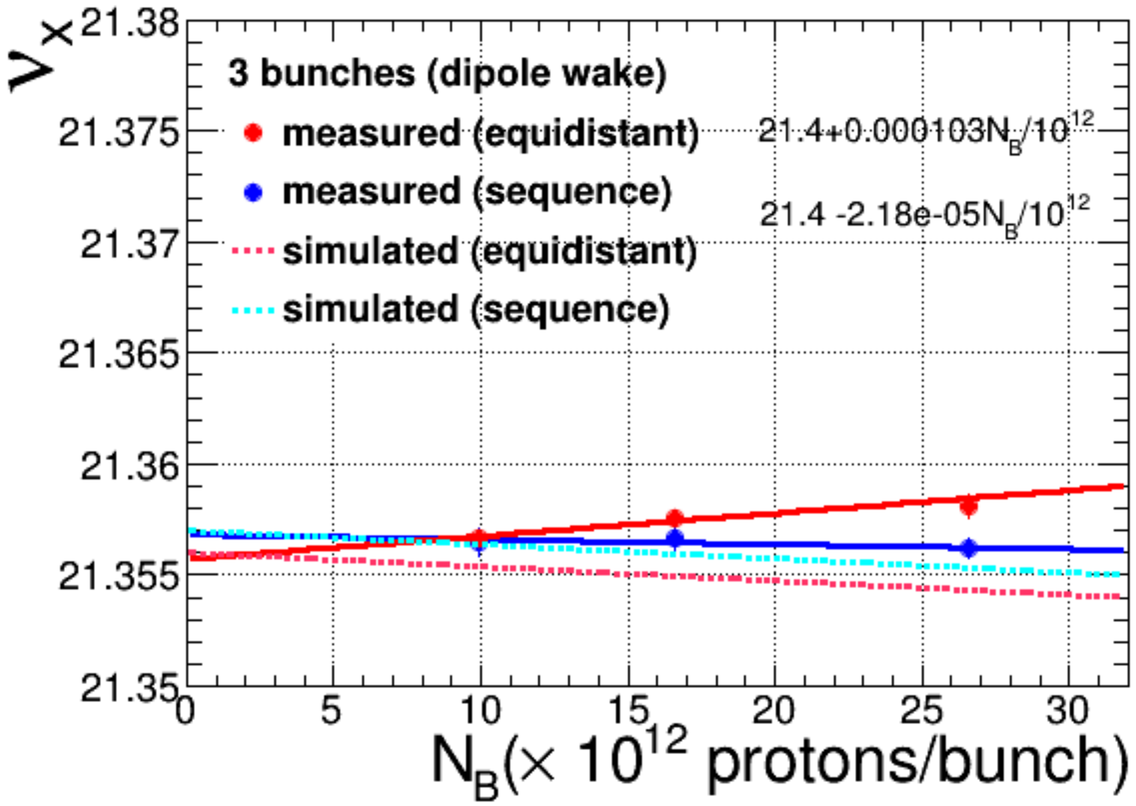
verticalについてはシミュレーション条件の見直しを行なっている

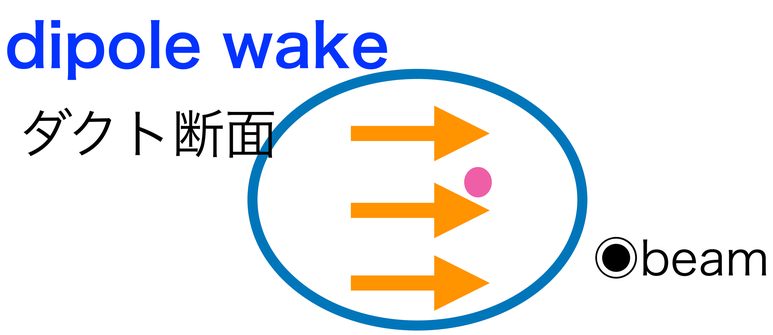
抵抗性壁効果のシミュレーション(3)

Elliptic部分（bend）の寄与



dipole wake成分の寄与





ウェイク場源の要素毎の評価を行い、定量的なインピーダンスの導出を進めている

まとめ

- J-PARC MRのインピーダンスを評価するために、チューンシフトを測定し、モデルと比較した
- ウェイク場の減衰を測定し、抵抗性壁効果の理論式と比較した
- シミュレーションを行い、dipoleウェイク場とquadrupoleウェイク場の寄与、またバンチの詰め方の違いについて調べた
- 理解と評価の準備を進めている

今後

- 他のインピーダンス源の検討
- インピーダンスの実部であるインスタビリティーの測定、シミュレーションとの比較
- その結果をインピーダンスの虚部であるチューンシフトと合わせることで インピーダンスの評価を行う

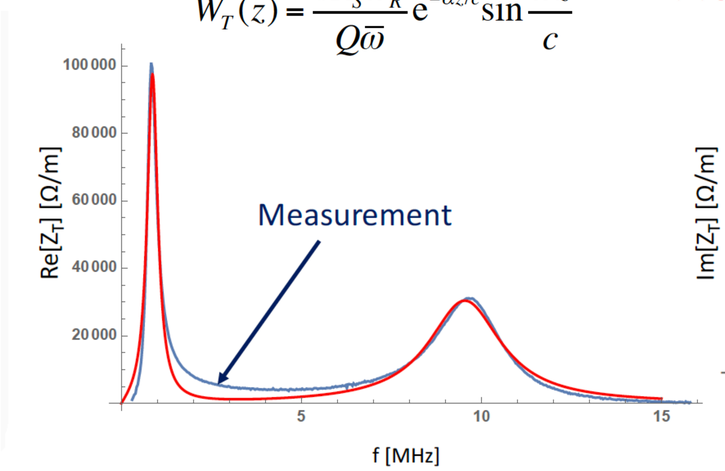
backups

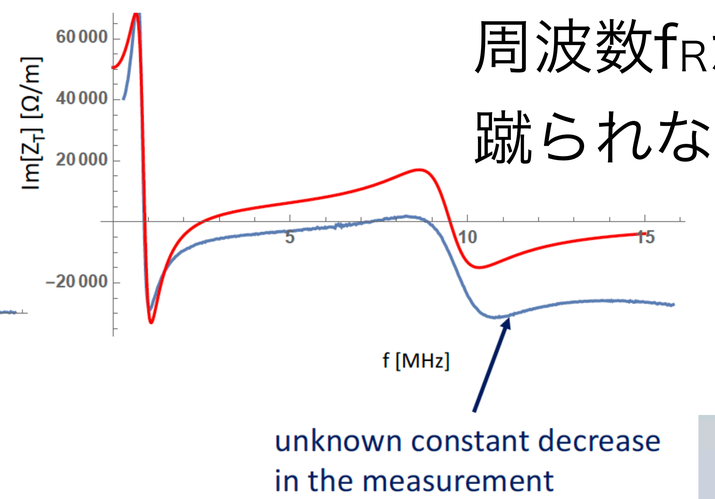
Kickerによるチューンシフトの寄与

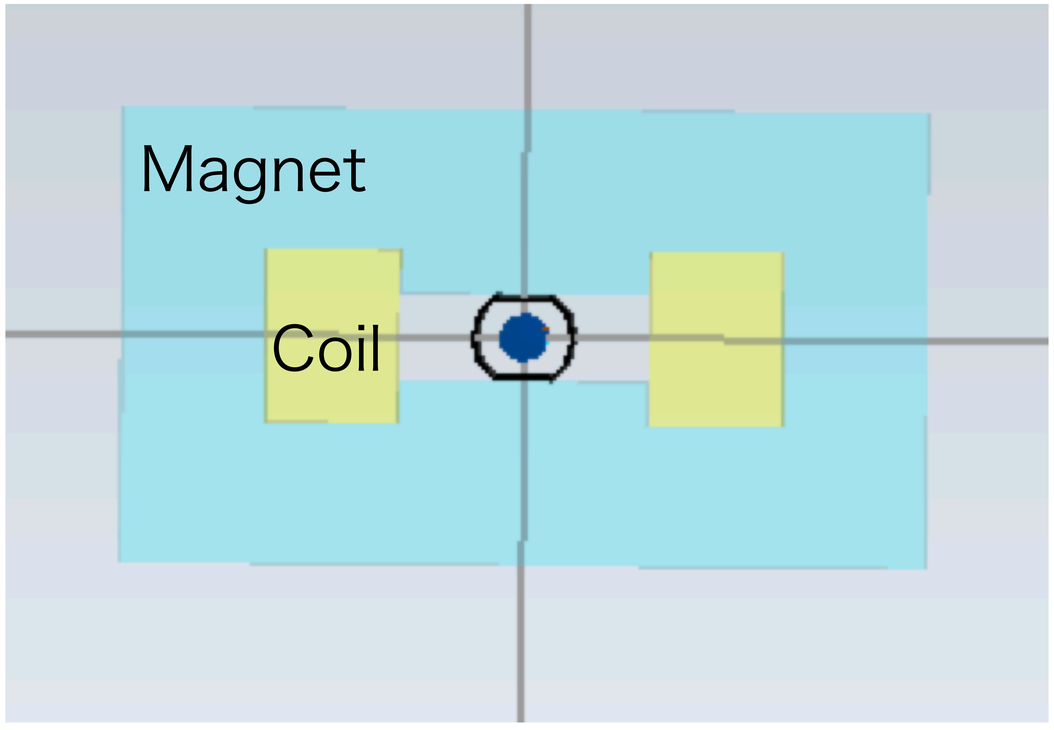
$$W_T(z) = \frac{cR_S\omega_R}{Q\bar{\omega}} e^{-\alpha z/c} \sin\frac{\bar{\omega} z}{c}$$

Fit by two resonances: resonance-1 f_R = 0.89 MHz, Q = 2.3, Rs = 1.8 kΩ
resonance-2 f_R = 9.6 MHz, Q = 4.8, Rs = 6.3 kΩ

周波数f_Rがビームの周回周波数の整数倍であり、蹴られないと考えられる





measured by T.Toyama 2010

CSTによるシミュレーションにより詳細を調べる