



速い取り出し運転 大強度化を可能にした ビームダイナミクス

J-PARC MRビームコミッショニンググループ

安居 孝晃

自己紹介

安居 孝晃（やすい たかあき）

2012/4 - 2016/3 学士（東大、理物）

2016/4 - 2018/3 修士（東大、理物）

駒宮研（ICEPP）、KEK ATFで研究

2018/4 - 2021/3 博士（東大、理物）

小関研、J-PARC MRで研究

2021/4 - 2022/3 ポスドク（KEK、加速器）

2022/4 - 助教（KEK、加速器）

↓
博士以降は
J-PARC MR

素粒子分野について今ではほとんど忘れてしまったが、
修士の2年間は素粒子実験の研究室にいた。

現在はFX運転でビームコミッショニングを担当している。

加速器という分野

素粒子実験分野には様々な大規模実験・テーブルトップ実験があり、
その中でさらに個々の解析・測定器などと分かれる。

加速器も目的・形・加速粒子が加速器ごとに様々であり、
同じ加速器内でもハード・ソフト・シミュレーションと様々である。

このトークで紹介できるのはあくまで一側面
(だから5人もゾロゾロとやってきた)

J-PARC MRはそこそこの大実験であるにもかかわらず、
従事している人が少ないため、
学生でも大きく活躍・貢献できる可能性がある！

素粒子物理とビーム物理の違い

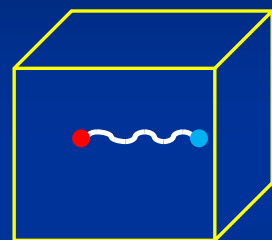
素粒子物理学の野望

宇宙の森羅万象の基礎となってる法則の解明
物質の根源の発見

時空 ・ 物質 ・ 力

超還元主義

(単純な原理を見つけたい)



⇒ 宗教的に悟るのではなく客観的に宇宙を説明したい。
哲学的な疑問を科学で解明したい。

勿論それがわかったからといって生命現象、生物の進化、
株価や政治の動向がわかるわけではないのですか...

まだ解明されていないこと

- 素粒子の質量の起源はヒッグス粒子(真空の構造)か？
- 何故3世代のクォーク・レプトンがいてそれぞれの質量が異なるのか？(ニュートリノの質量は何故軽い？ トップクォークは何故重い？)
- 何故4種類の力があるのか？
いかにして重力を理論の枠組にいれられるか？
- なぜ時空は空間3次元、時間1次元か？
隠れた次元はあるのか？
- 暗黒物質は？
- 暗黒エネルギーは？
- 宇宙はどのようにして生じたか？

エネルギーフロンティア加速器(LHC、ILC)
によって多くの謎が解明

駒宮先生のスライドより拝借

こういった素粒子物理の謎の解明したいがために、
我々は加速器開発に勤しんでいる… とは限らない

素粒子物理とビーム物理の違い

例えばJ-PARC MRでは

- ・ 時空 … 普通に空間3次元 + 時間1次元
- ・ 物質 … 陽子のみ (クォークは登場しない、実質「素粒子」扱い！)
- ・ 力 … 電磁気力のみ

電磁気力も陽子も性質が分かりきったもので(陽子の寿命を除いて)、素粒子物理屋に取っては面白味を感じないかもしれないが、そんな分かりきったものでも 10^{13} - 10^{14} 個も集まると想像を超える現象が起きる！

素粒子物理 … 超還元主義

ビーム物理 … 多体系・非線形性・カオス

興味の対象はまるっきり違うが、2分野は持ちつ持たれつでやっている

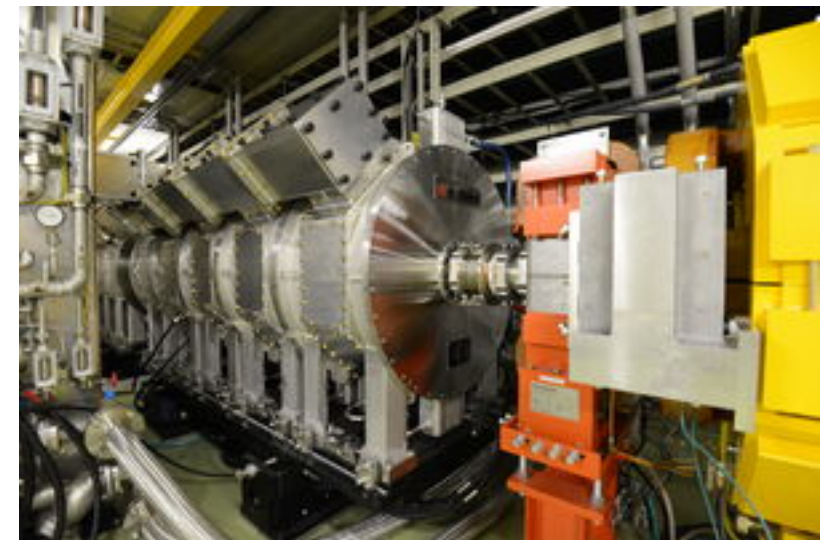
シンクロトロンの基本

シンクロトロンでは何度も粒子を**加速空洞**に通せて経済的である

円形軌道にするためにシンクロトロンでは**偏向磁石**を用いてビームを曲げている

またビームが必要以上に広がらないように
ビームの横方向に線形力を加え
レンズのような働きをする

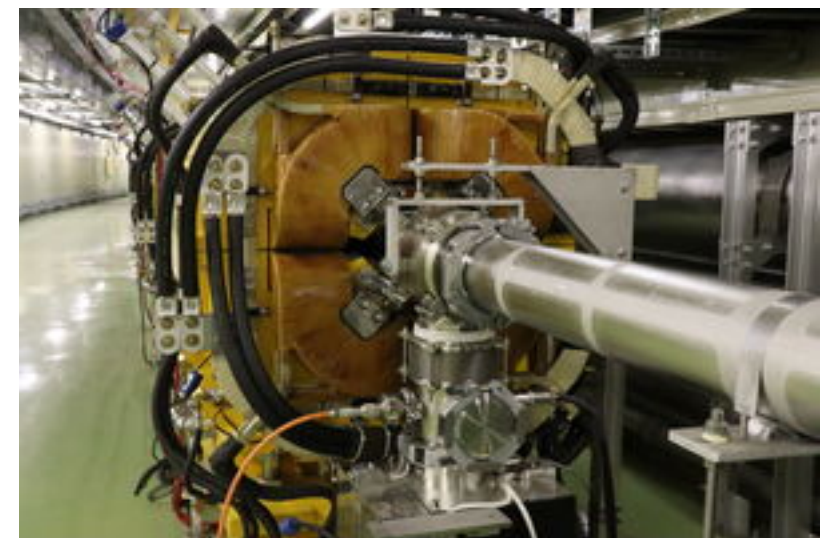
四極磁石を用いてビームを絞っている



加速空洞 in MR



偏向電磁石 in MR



四極電磁石 in MR

単粒子の横方向の運動

粒子の横方向の運動は四極磁石による線形力で制御することができる

$$x'' + \underline{K_x(s)}x = 0$$

四極磁場の強さ

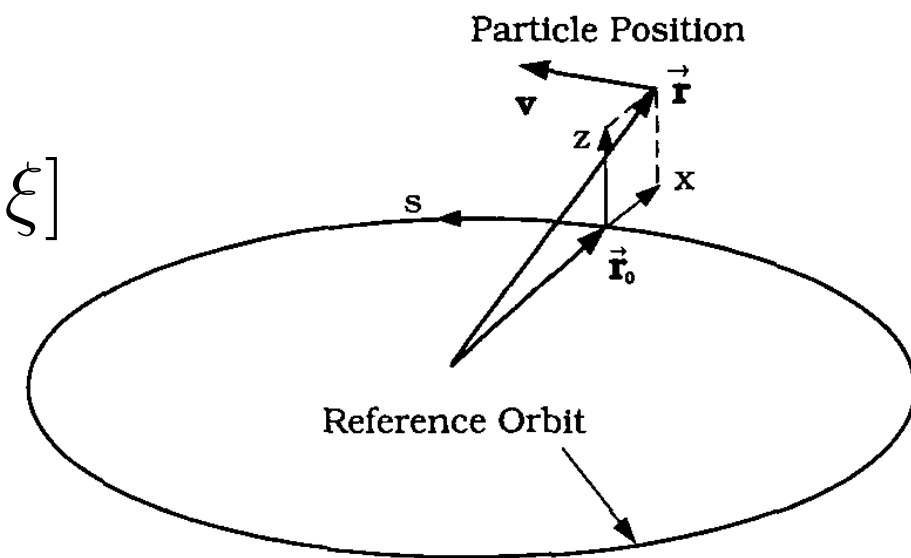
(リング加速器では独立変数としてt(時間)ではなくs=vt(位置)を使う)

これを解くと

$$x = \sqrt{2J\underline{\beta(s)}} \cos[\underline{\psi(s)} + \xi]$$

ベータatron関数
(ローレンツ β ではない)

位相

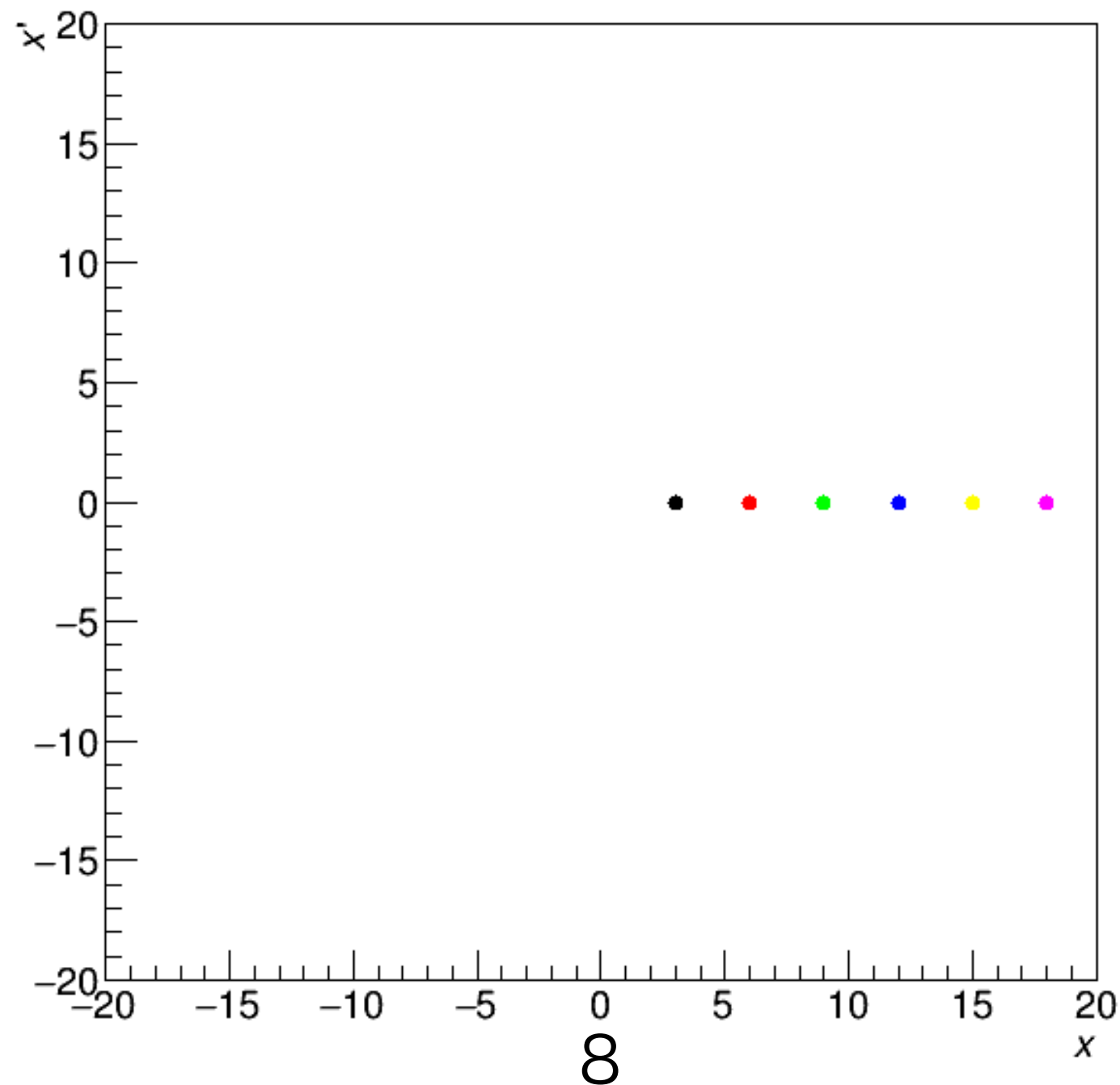


この粒子の軌道軸周りの運動をベータatron振動と呼ぶ

調和振動子の軌道

超簡単な例として $Kx(s)=1$ とした調和振動子を考えよう

$$x'' + x = 0$$



エラーの影響

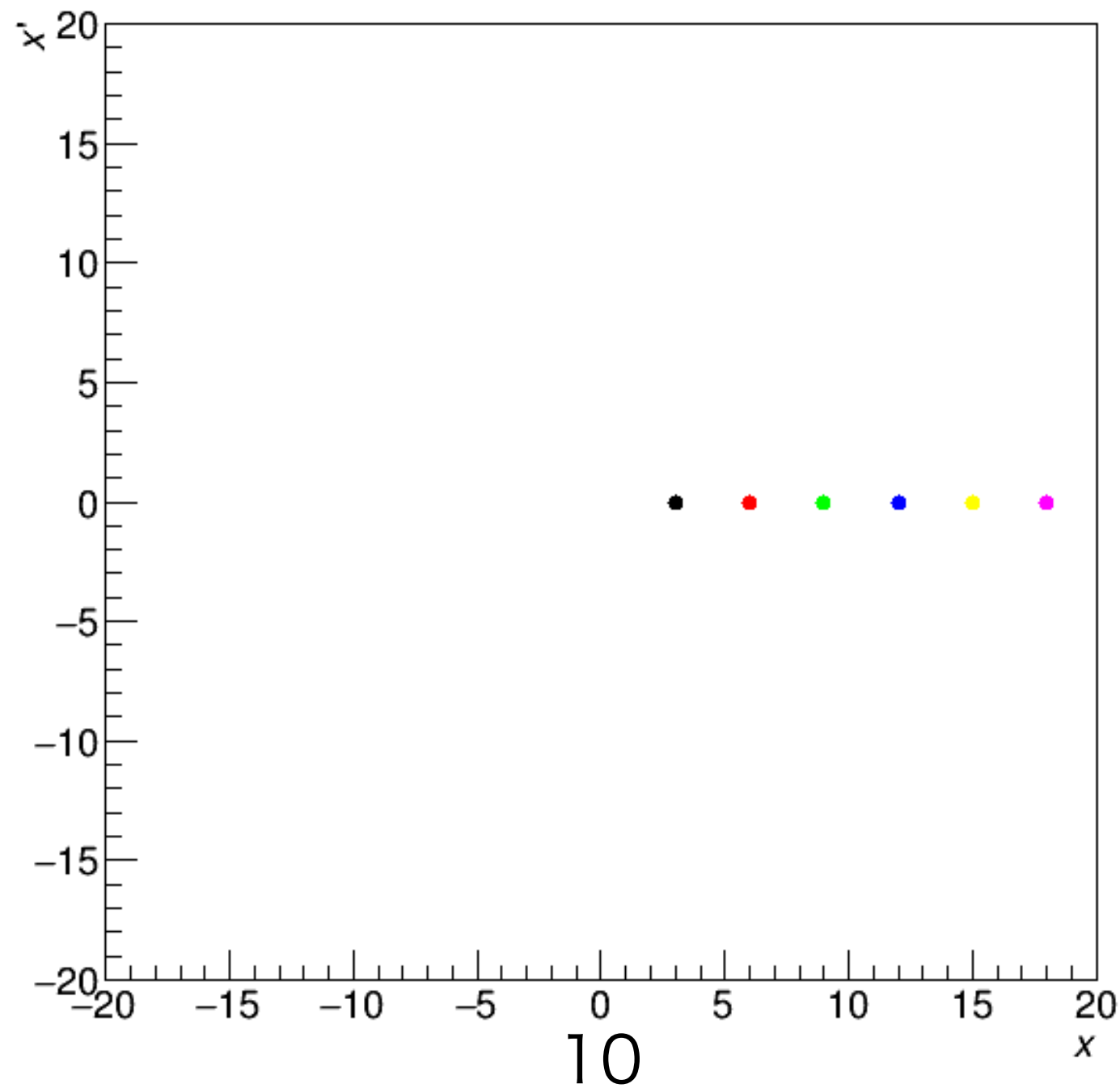
現実の装置には様々なエラーがつきものである

加速器の場合は、磁石の設置位置エラー、磁場勾配エラーなど

エラーの影響でビームは想定外のキックを受ける

エラーがあるときの軌道

ちょうど一周するタイミングで毎週エラーによるキックを受けると…？



数式で書くと

粒子がリングを1周する周期を T , 角周波数 $\omega_0=2\pi/T$, a を定数として、

$$\begin{aligned}\ddot{x} + \omega^2 x &= a \sum_n \delta(t - t_0 - nT) \\ &= \frac{a}{T} \sum_k e^{ik\omega_0(t-t_0)}\end{aligned}$$

$\omega \doteq k\omega_0$ のときに共鳴

ベータトロン振動の1周の振動数(tune)を

$$\nu \equiv \frac{\omega}{\omega_0}$$

と定義すると、 ν は整数にしてはいけないことがわかる。

関係のない周波数を落とし少し一般化すれば、擬Hamiltonianは

$$H(x, \dot{x}, t) = \frac{1}{2}\dot{x}^2 + \frac{1}{2}\omega^2 x^2 + A_k x \cos(k\omega_0 t + \phi_k)$$

高次の項1

強制振動項が x^2 になったらどうなるか？

$$H(x, \dot{x}, t) = \frac{1}{2}\dot{x}^2 + \frac{1}{2}\omega^2 x^2 + \frac{1}{2}B_k x^2 \cos(k\omega_0 t + \phi_k)$$

$$\ddot{x} + \omega^2 x + B_k x \cos(k\omega_0 t + \phi_k) = 0$$

無摂動解から $x \simeq a \cos(\omega t + \theta)$ のような形として、強制振動項は

$$\frac{B_k}{2} \cos[(k\omega_0 - \omega)t + \phi_k - \theta] + \frac{B_k}{2} \cos[(k\omega_0 + \omega)t + \phi_k + \theta]$$

この振動数のうちどちらかが ω に近づくと共鳴

$$\omega \simeq k\omega_0 - \omega \quad \rightarrow \quad \omega \simeq \frac{k\omega_0}{2}$$

Tune $\nu = \omega / \omega_0$ は半整数にしてもダメである

高次の項2

強制振動項が x^3 になったらどうなるか？

$$H(x, \dot{x}, t) = \frac{1}{2}\dot{x}^2 + \frac{1}{2}\omega^2 x^2 + \frac{1}{6}C_k x^3 \cos(k\omega_0 t + \phi_k)$$

$$\ddot{x} + \omega^2 x + \frac{1}{2}C_k x^2 \cos(k\omega_0 t + \phi_k) = 0$$

無摂動解から $x^2 \simeq a^2 \cos^2(\omega t + \theta) = \frac{a^2}{2}[1 + \cos(2\omega t + 2\theta)]$ のような形として、

強制振動項は $k\omega_0, k\omega_0 \pm 2\omega$ の角周波数を含む。

この振動数のうちどれかが ω に近づくと共鳴

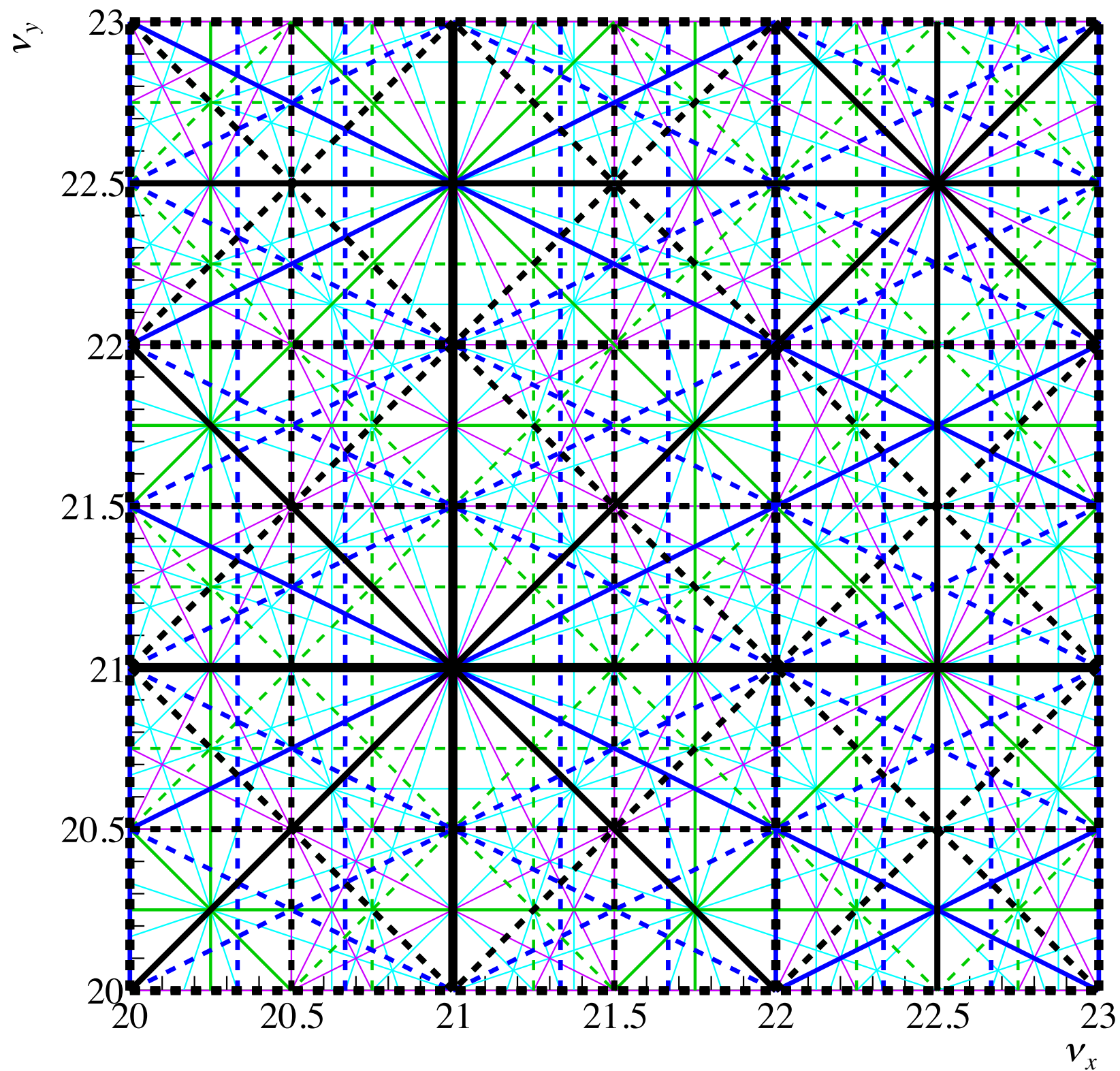
$$\omega \simeq \frac{k\omega_0}{3}, k\omega_0$$

一般に共鳴条件は、tune $\nu = \omega/\omega_0$ を用いて

$$l\nu_x + m\nu_y = n \quad (l, m, n \in \mathbb{Z})$$

と書け、これをできるだけ避けなければならない。

Tune diagram



空間電荷効果

ビーム粒子はビーム自身が作る電磁場の影響を受ける(空間電荷効果)

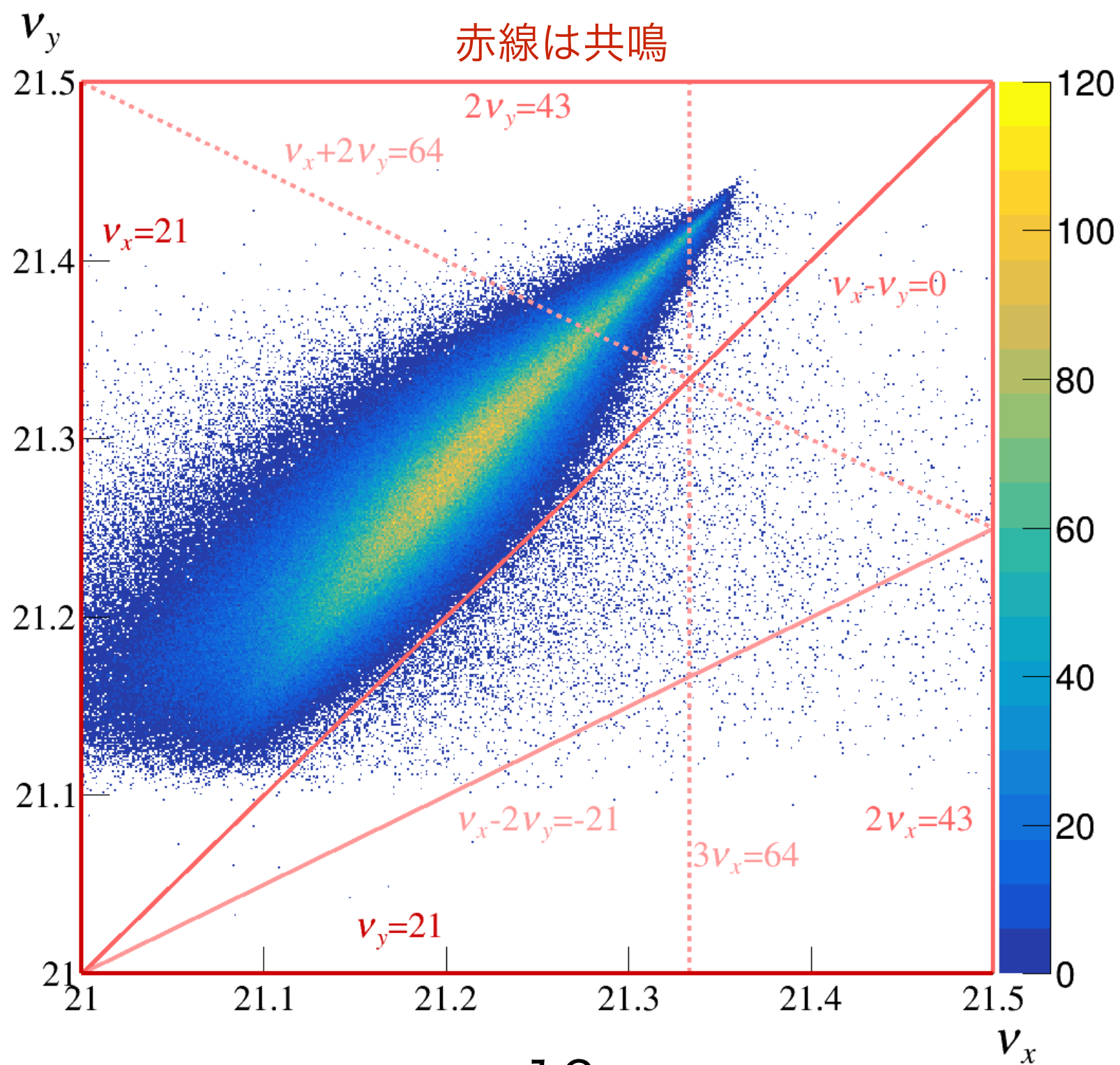
空間電荷力は粒子によって異なるため、
tuneも粒子によってバラけてしまう！

J-PARC MRのパルスあたりビーム粒子数は世界最大

パルスあたりビーム粒子数						
Ring	Institute	Energy [GeV/u]	f_{rep} [Hz]	Particle / pulse	Power [kW]	
MR (FX)	J-PARC	30	0.403	2.66×10^{14}	515	ニュートリノ向け 連続900 kW, 1shot 1MW
MR (SX)	J-PARC	30	0.192	5.95×10^{13}	55	ハドロン向け
RCS	J-PARC	3	25	4.99×10^{13}	600	連続100 kW
MI	FNAL	120	0.75	5.20×10^{13}	750	
SPS	CERN	400	0.17	4.59×10^{13}	500	
SNS [†]	ORNL	1.4	60	1.04×10^{14}	1400	
ISIS	STFC	0.8	40	3.12×10^{13}	160	
CSNS	IHEP	1.6	25	1.25×10^{13}	80	
PSR [†]	LANL	0.8	20	3.12×10^{13}	80	
AGS	BNL	24	0.5	5.20×10^{13}	100	

表は2021年時点のもの

Tuneの分布



非線形項による共鳴

磁石のエラーが共鳴を引き起こすと紹介した。

しかしHamiltonianの議論ですでに一般化したように
共鳴は非線形な磁場によっても引き起こされるし、
single kickである必要もない

非線形な磁場を生むのは…

六極磁石、より高次の磁石

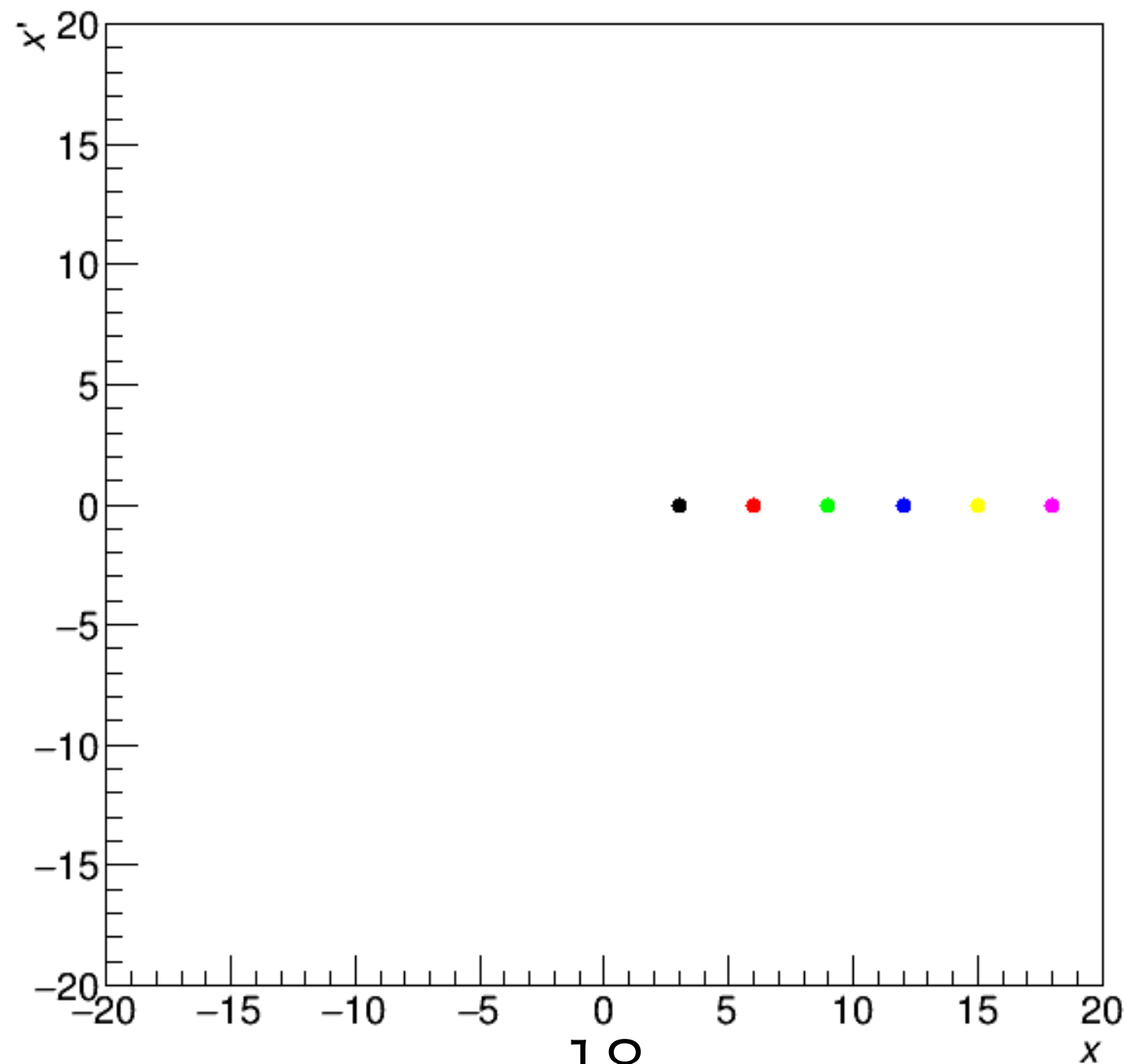
空間電荷効果

非線形効果によって軌道がどう変わるか見てみよう。

非線形項がある場合の軌道

調和振動子に x^3 の項を付け加えた場合を考えよう

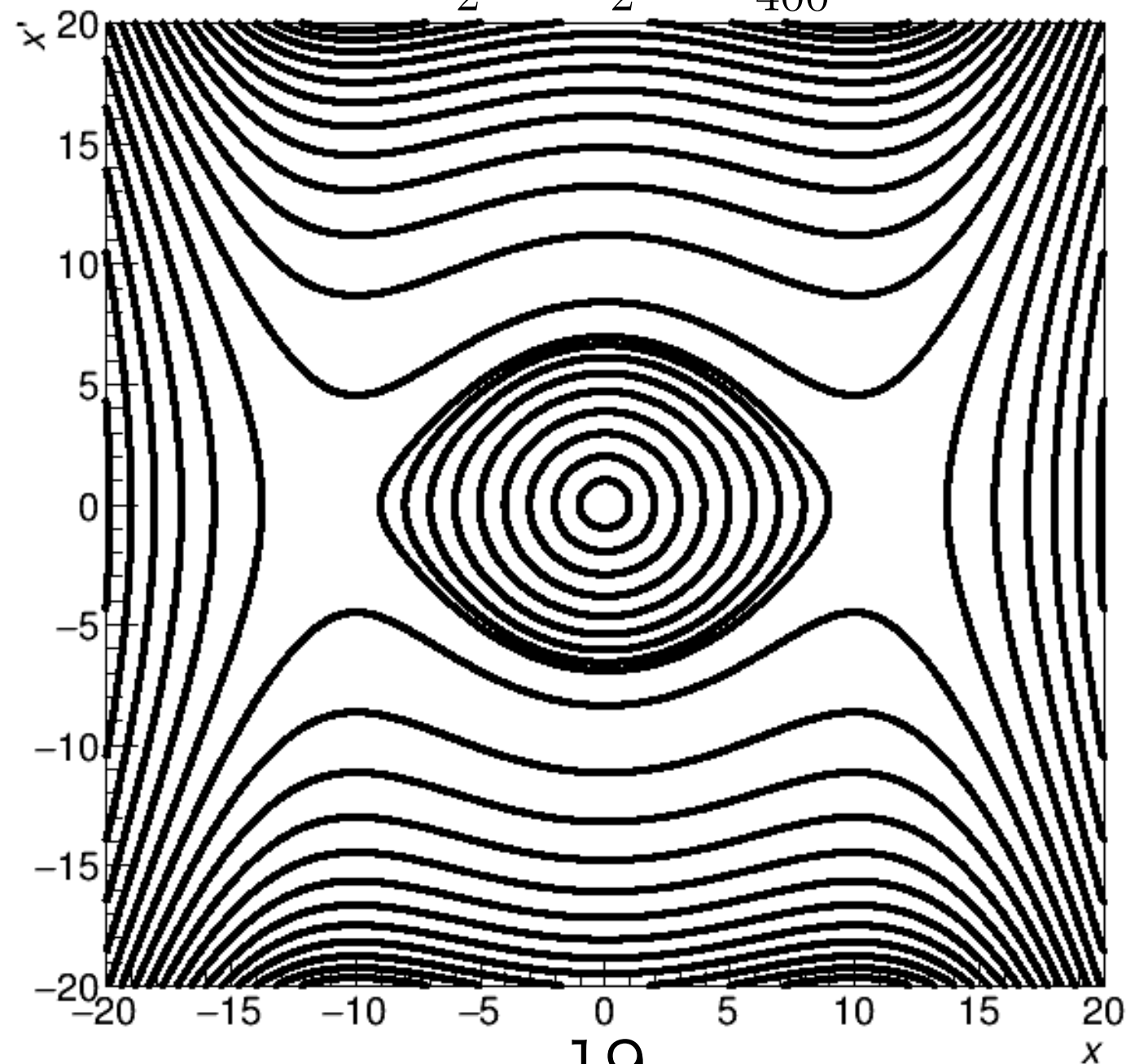
$$x'' + x - x^3/100 = 0$$



非線形項がある場合の軌道

等Hamiltonian線を描くところなる

$$H = \frac{1}{2}x'^2 + \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{400}x^4$$



共鳴の利用例 ～遅い取り出し～

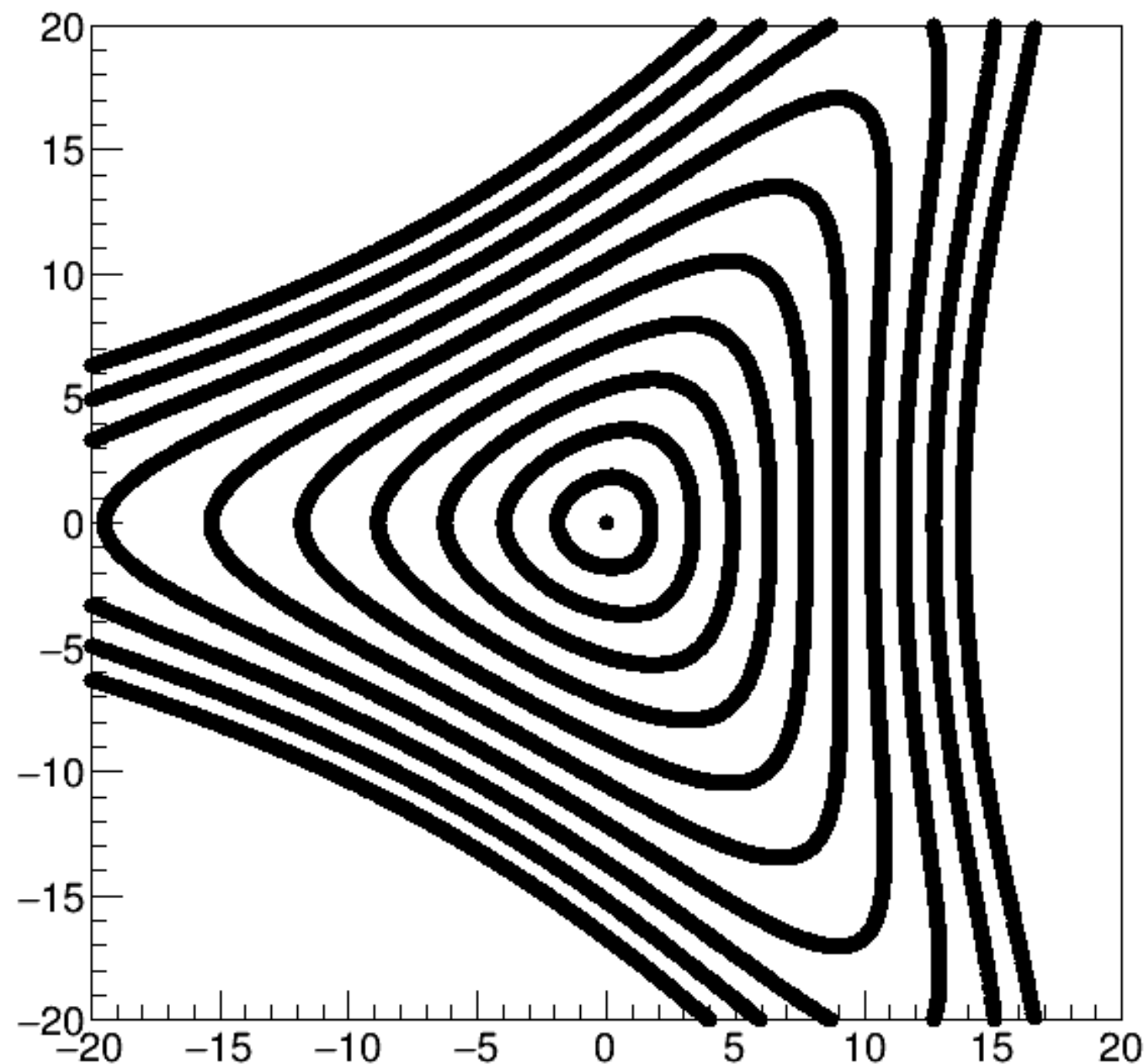
非線形項の条件によっては安定領域が制限されることが分かった。

一見良いとこなしの共鳴現象だが、
粒子の位相空間の分布が安定/不安定領域に分かれることを
むしろ逆手に取ってビームを少しずつ取り出そうとする
クレイジーな(褒め言葉)技術が遅い取り出し(SX)なのである！！

J-PARC MRのSX運転では六極磁石であえて
ハミルトニアンに x^3 の項を作ること(運動方程式では x^2 の項)
3次共鳴を励起している。

3次共鳴を利用したSXのイメージ

$$H = \frac{1}{2}x'^2 + \frac{1}{2}x^2 + \underline{a}J + bJ^2 + cJ^{3/2}\cos 3\psi \quad \left(x = \sqrt{\frac{2J}{\omega}}\cos\psi, \quad \omega = 1\right)$$
$$= (1 + \underline{a})J + bJ^2 + cJ^{3/2}\cos 3\psi$$



tune shiftに対応する項

$$\underline{a} = 0.5$$

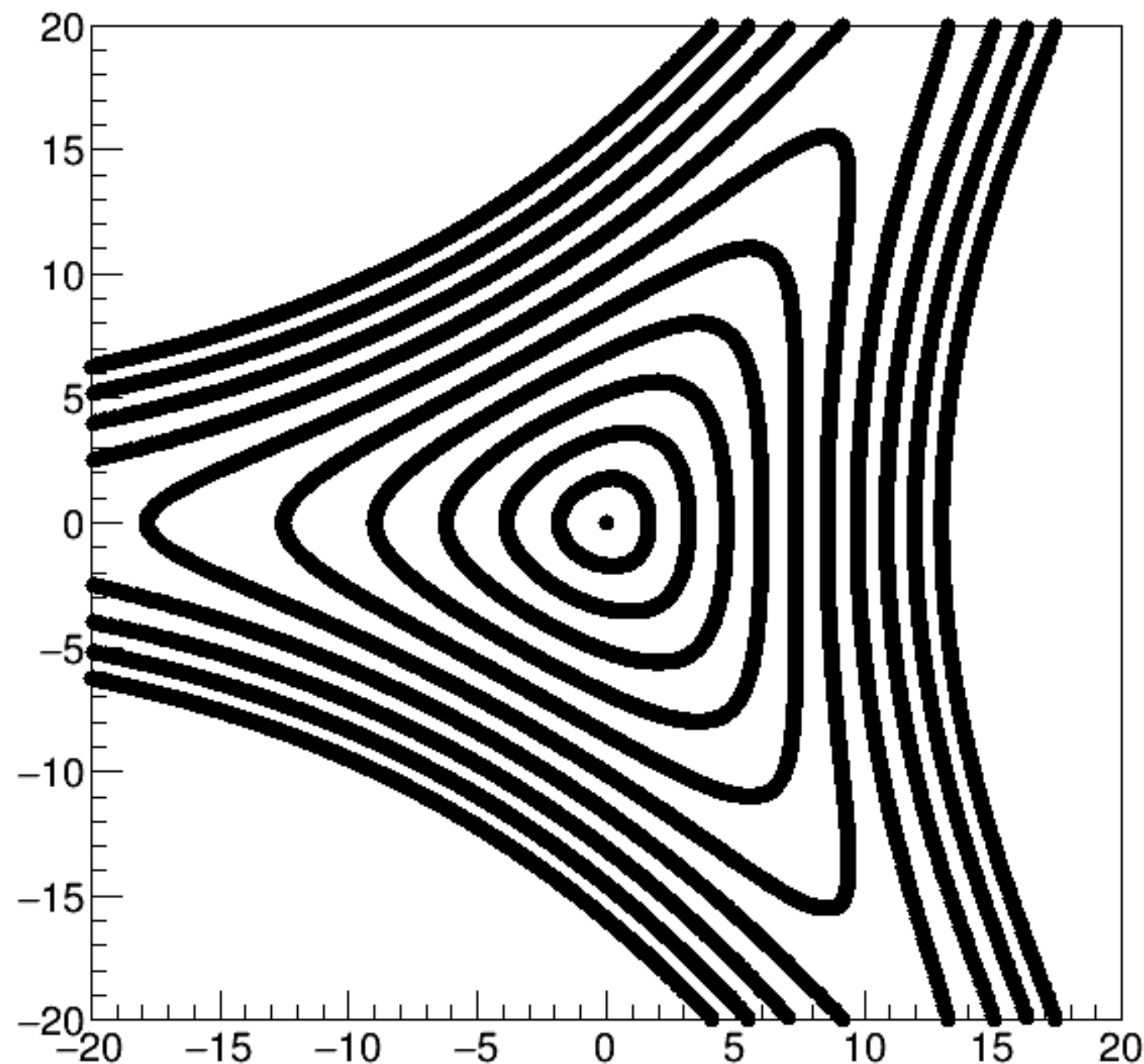
$$b = 0.002$$

$$c = 0.09$$

※J-PARC MR
SX運転の値とは
全然違います

3次共鳴を利用したSXのイメージ

$$H = \frac{1}{2}x'^2 + \frac{1}{2}x^2 + \underline{a}J + bJ^2 + cJ^{3/2}\cos 3\psi \quad \left(x = \sqrt{\frac{2J}{\omega}}\cos\psi, \quad \omega = 1\right)$$
$$= (1 + \underline{a})J + bJ^2 + cJ^{3/2}\cos 3\psi$$



tune shiftに対応する項

$$\underline{a} = 0.25$$

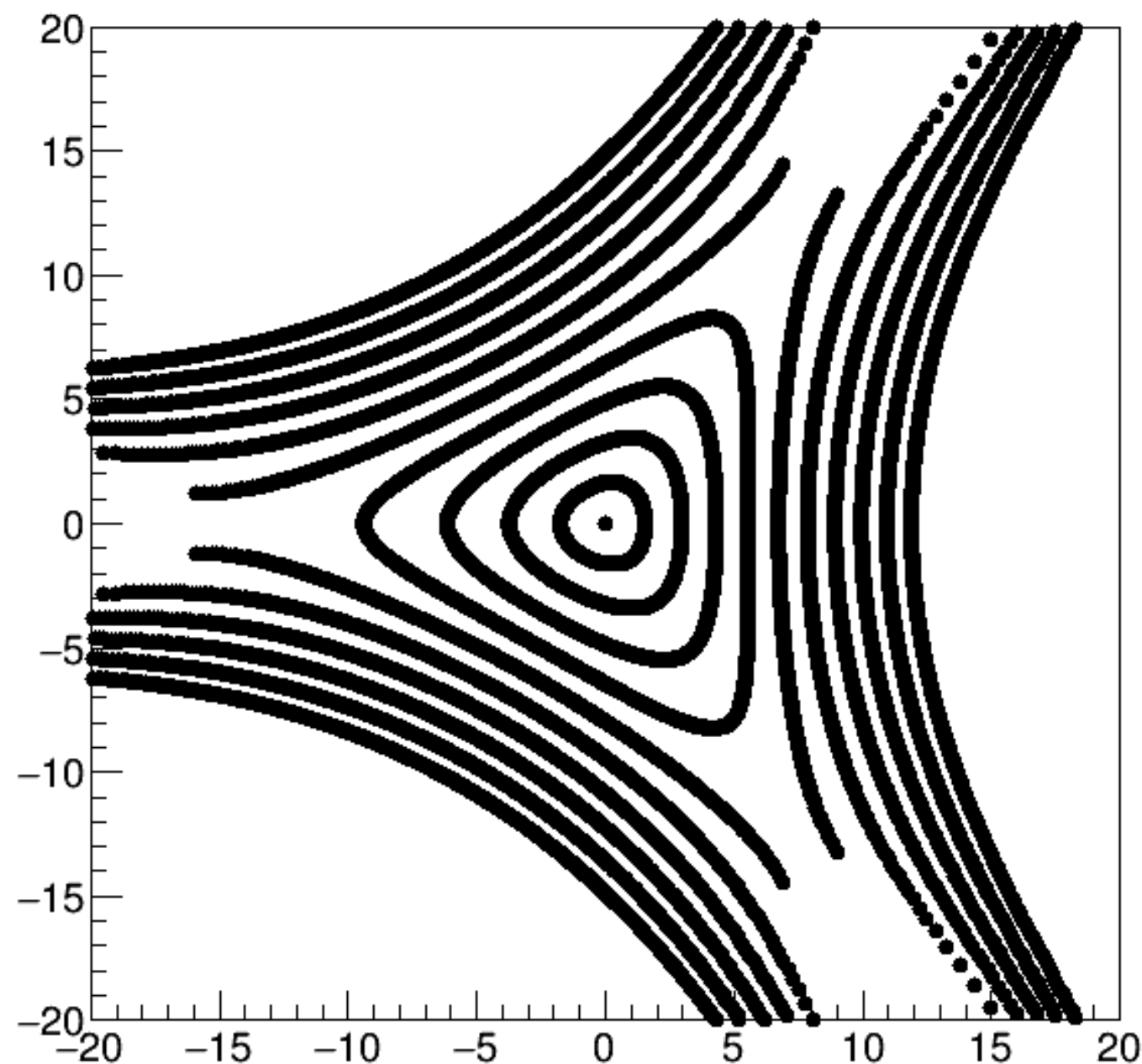
$$b = 0.002$$

$$c = 0.09$$

※J-PARC MR
SX運転の値とは
全然違います

3次共鳴を利用したSXのイメージ

$$H = \frac{1}{2}x'^2 + \frac{1}{2}x^2 + \underline{a}J + bJ^2 + cJ^{3/2}\cos 3\psi \quad \left(x = \sqrt{\frac{2J}{\omega}}\cos\psi, \quad \omega = 1\right)$$
$$= (1 + \underline{a})J + bJ^2 + cJ^{3/2}\cos 3\psi$$



tune shiftに対応する項

$$\underline{a} = 0$$

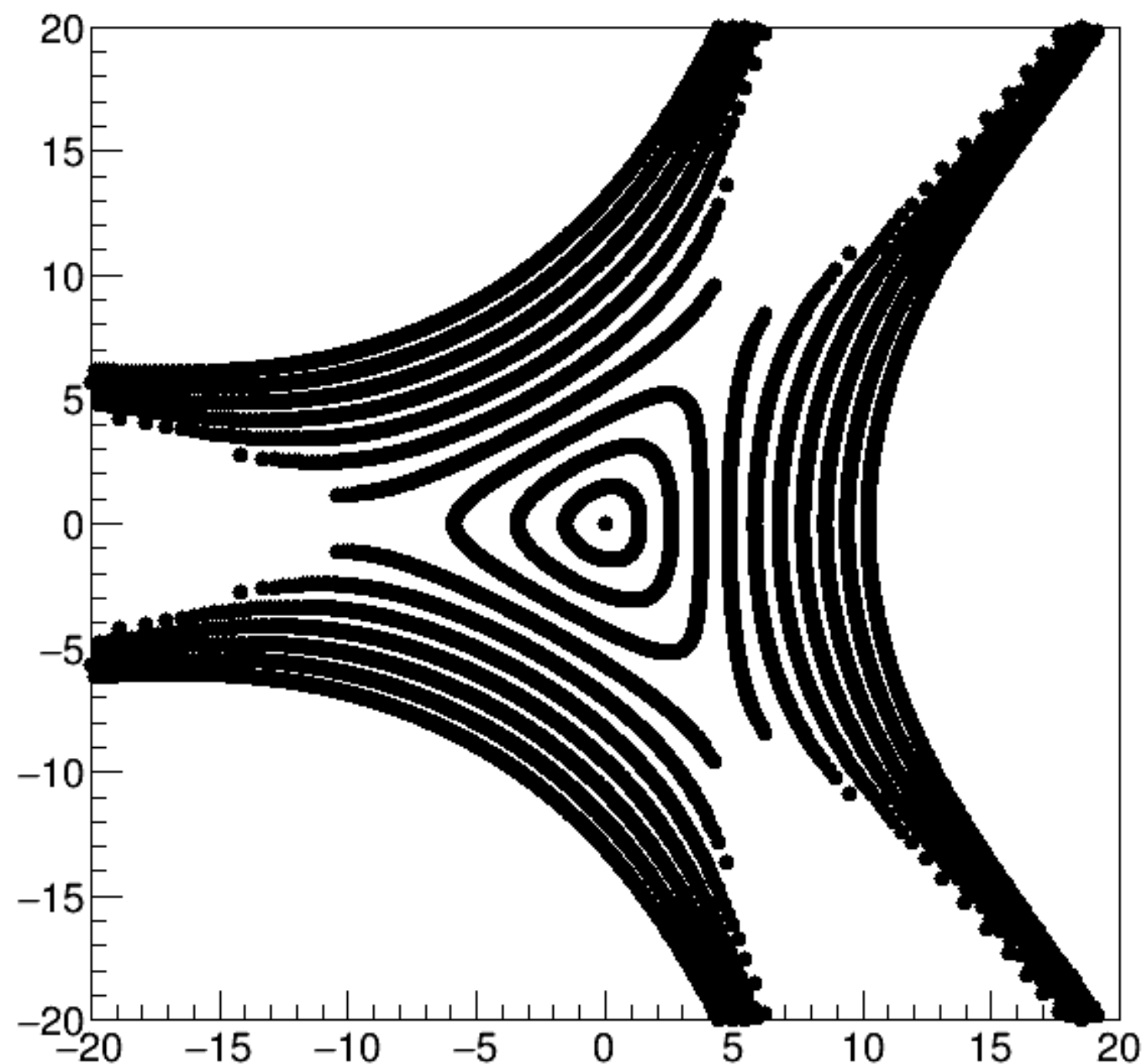
$$b = 0.002$$

$$c = 0.09$$

※J-PARC MR
SX運転の値とは
全然違います

3次共鳴を利用したSXのイメージ

$$H = \frac{1}{2}x'^2 + \frac{1}{2}x^2 + \underline{a}J + bJ^2 + cJ^{3/2}\cos 3\psi \quad \left(x = \sqrt{\frac{2J}{\omega}}\cos\psi, \quad \omega = 1\right)$$
$$= (1 + \underline{a})J + bJ^2 + cJ^{3/2}\cos 3\psi$$



tune shiftに対応する項

$$\underline{a} = -0.25$$

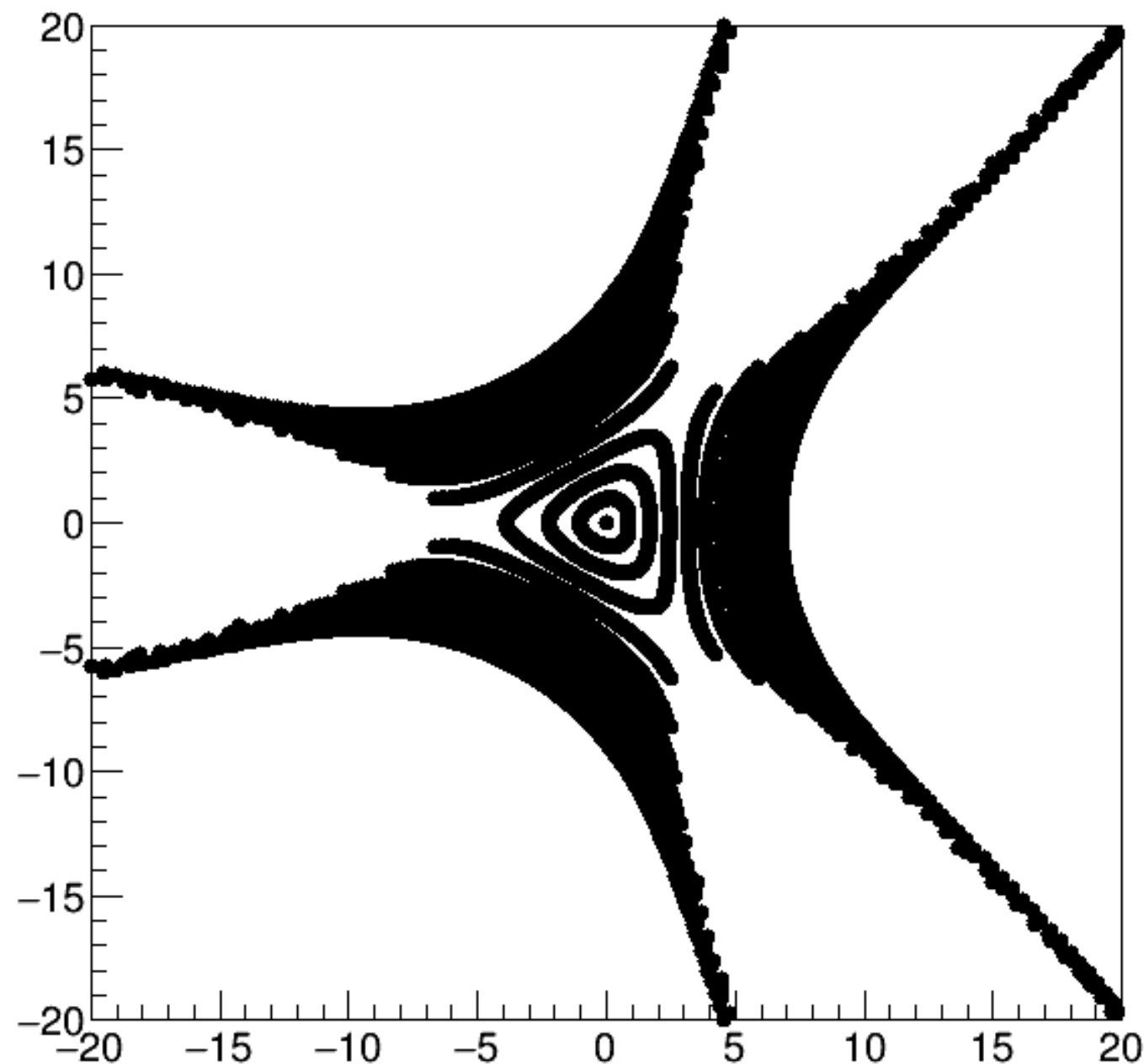
$$b = 0.002$$

$$c = 0.09$$

※J-PARC MR
SX運転の値とは
全然違います

3次共鳴を利用したSXのイメージ

$$H = \frac{1}{2}x'^2 + \frac{1}{2}x^2 + \underline{a}J + bJ^2 + cJ^{3/2}\cos 3\psi \quad \left(x = \sqrt{\frac{2J}{\omega}}\cos\psi, \quad \omega = 1\right)$$
$$= (1 + \underline{a})J + bJ^2 + cJ^{3/2}\cos 3\psi$$



tune shiftに対応する項

$$\underline{a} = -0.5$$

$$b = 0.002$$

$$c = 0.09$$

※J-PARC MR
SX運転の値とは
全然違います

本日のタイトル

「速い取り出し(FX)運転大強度化を可能にしたビームダイナミクス」

SX運転と比較すると、FX運転は

- ・ デバンチしない
- ・ 共鳴をあえて作ったりしない
- ・ ビームを少しずつ削り出したりしない

ため、シンプルである。

ただしFXで1サイクルに加速する粒子数はSXの3倍！

SXでは気にならない共鳴も

FXでは深刻なビームロスの原因になったりする。

MR beam power upgrade plan

$$\text{Power} = \text{Energy}(30 \text{ GeV}) \times \text{Number of protons} / \text{Cycle time}$$

JFY2021		515 kW	2.66×10^{14} ppp	2.48 s
Mar. 2025		830 kW	2.36×10^{14} ppp	1.36 s
Feb. 2026	(continuous)	900 kW	2.41×10^{14} ppp	1.28 s
	(1 shot)	1000 kW	2.69×10^{14} ppp	
JFY2028		1300 kW	3.3×10^{14} ppp	1.16 s

ppp ... protons per pulse

MR beam power upgrade plan

$$\text{Power} = \text{Energy}(30 \text{ GeV}) \times \text{Number of protons} / \text{Cycle time}$$

				Beam loss
JFY2021	515 kW	2.66×10^{14} ppp	2.48 s	2.1%
Mar. 2025	830 kW	2.36×10^{14} ppp	1.36 s	1.5%
Feb. 2026	(continuous) 900 kW	2.41×10^{14} ppp	1.28 s	0.4%
	(1 shot) 1000 kW	2.69×10^{14} ppp		1.1%
JFY2028	1300 kW	3.3×10^{14} ppp	1.16 s	

ppp ... protons per pulse

周期を短くするとビームパワーは上がるが、**ビームロス**も同時に上がる
作業エリアでビームロスすると残留放射線量が上がり、
メンテナンスできなくなってしまう。

ビームロス原因同定の流れ

ビームロスが起きたことはDirect-Current Current Transformer (DCCT)や比例計数管といったモニターから知ることができるが、「なぜビームロスが起きたか」の情報を与えてくれる訳ではないため、原因については自分たちで考える必要がある。

まずは基本的な設定が問題ないか
片っ端から確認！

これも結構大変だが...

例えば電磁石だけ考えてもMRには
偏向電磁石：96台 (6種の電源)
四極電磁石：216台 (16種の電源)
六極電磁石：72台 (2種の電源)
の数があり、かつ各電磁石の個体差もある！

実際にビームを出してビームの状態を測定する。

まずは低強度でスタートしてtuneなどの基本的なパラメータ測定

そのためにも加速器にはモニターは必要不可欠

ビームロス原因

よくある基本的なビームロスの原因

- ・ 何かの配線が間違っている(新しい加速器立ち上げ時にありがち)
- ・ 何かの電源が入っていない、入ってはいても挙動がおかしい
- ・ 何かの機器の設定がおかしい・タイミングがずれている
- ・ tuneが整数・半整数に近い
- ・ 縦方向の安定領域から外れてしまっている(バケツこぼれ)
- ・ 入射時の振幅が大きい、入射マッチングが取れていない
- ・ そもそも真空が悪い
- ・ そもそも上流から来るビーム品質が良くない

などなど

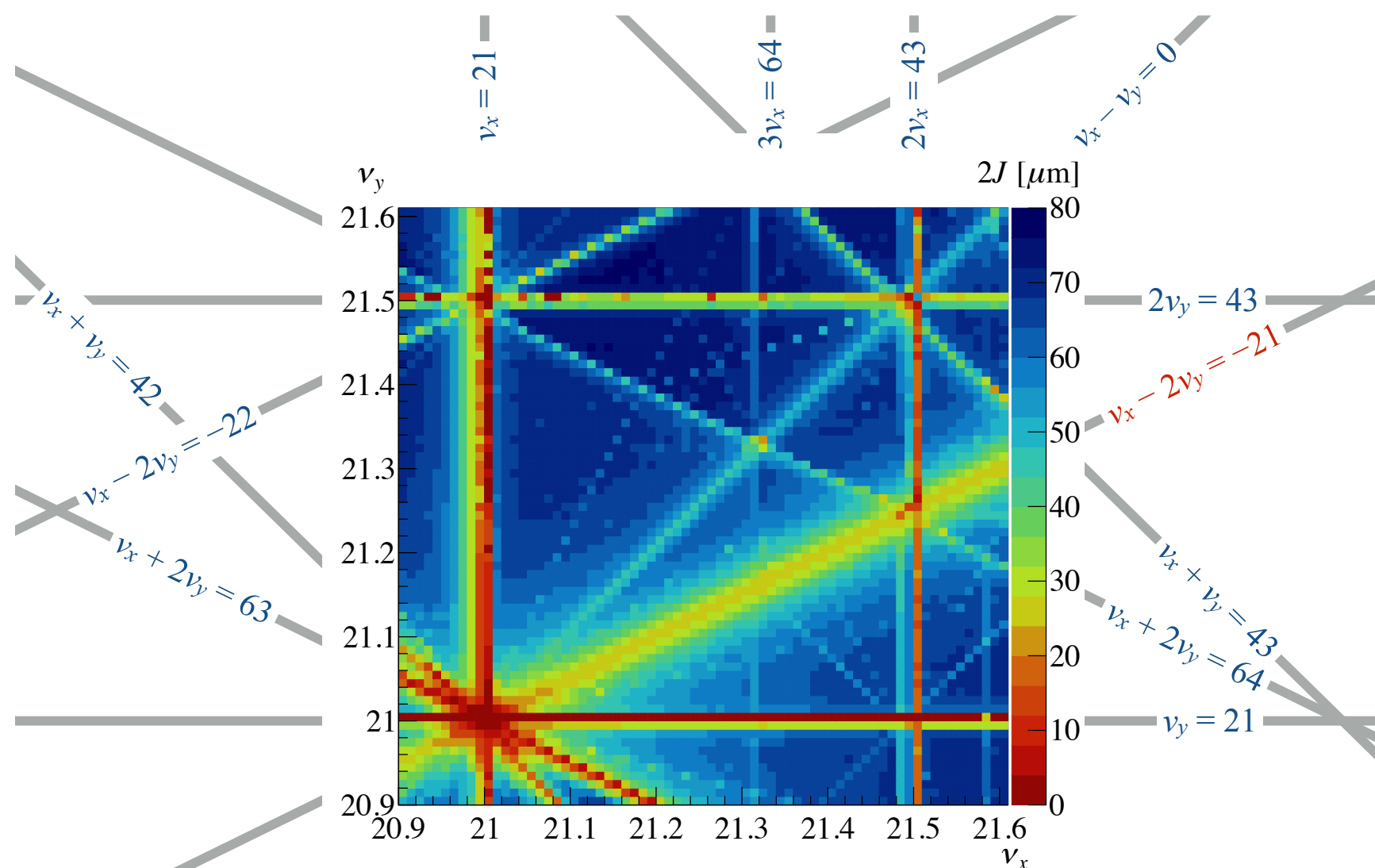
これらを乗り越え(時には甘んじて受け入れ)た先に
高次の共鳴による(あるいは不安定性による)ビームロスが待っている。

共鳴補正の例 (ぼくのD論)

六極磁場ポテンシャルの xy^2 の項が作る

共鳴 $\nu_x - 2\nu_y = -21$ が強いことが知られていた

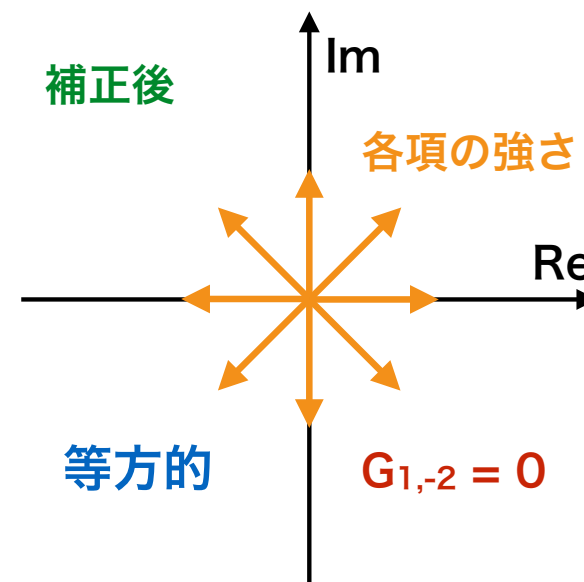
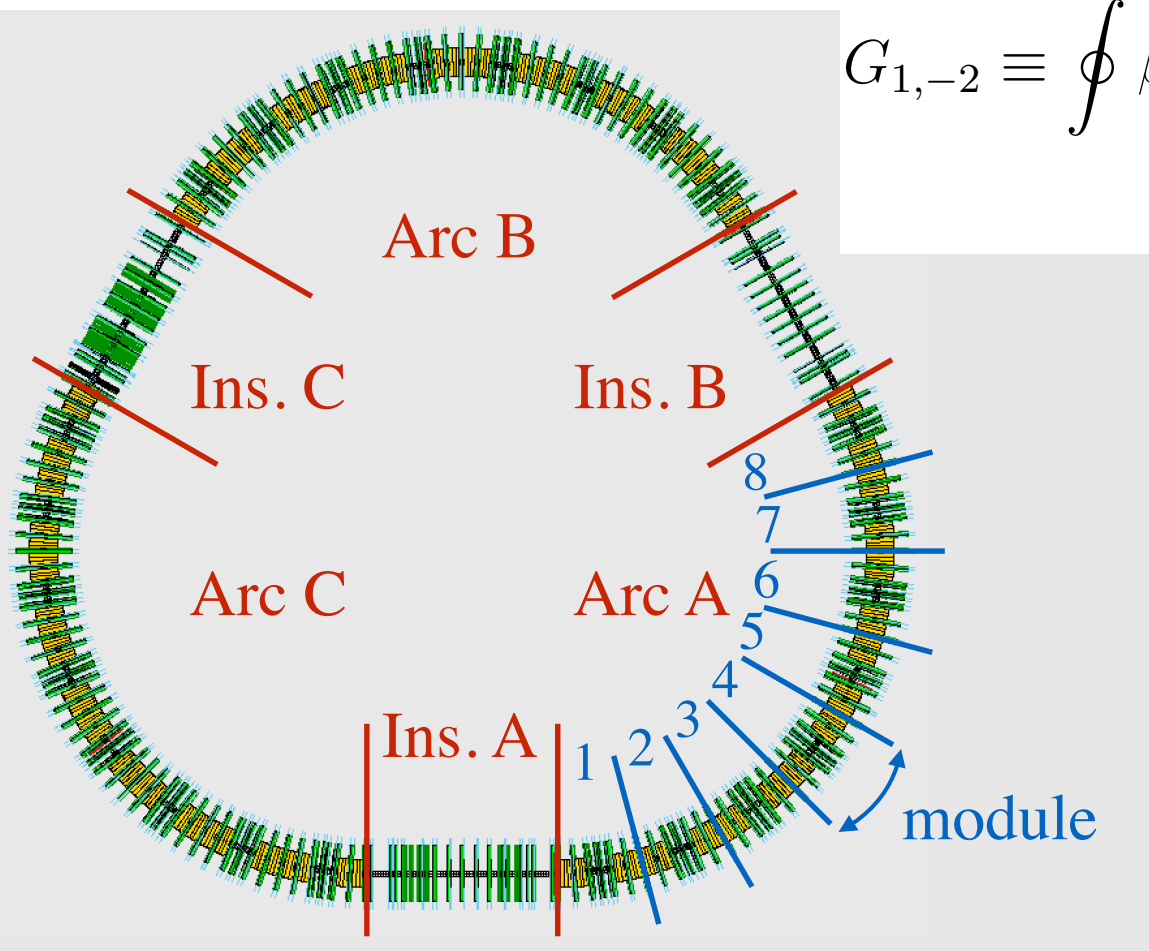
六極磁石を使っている限り、この共鳴は避ける他ないとされていた



共鳴補正の例

MRの六極磁石がある曲線部は8つの構造が連続したものより、
曲線部の位相を調整することで共鳴を相殺できることに気づいた

$$G_{1,-2} \equiv \oint \underbrace{\beta_x^{1/2} \beta_y K_2}_{\text{六極磁場の強さ}} e^{i(\psi_x - 2\psi_y)} ds \simeq \sum_j \underbrace{\beta_{xj}^{1/2} \beta_{yj} (K_2 \Delta L)_j}_{\text{同じものが複数ある}} e^{i(\psi_{xj} - 2\psi_{yj})} \quad \text{位相を調整}$$



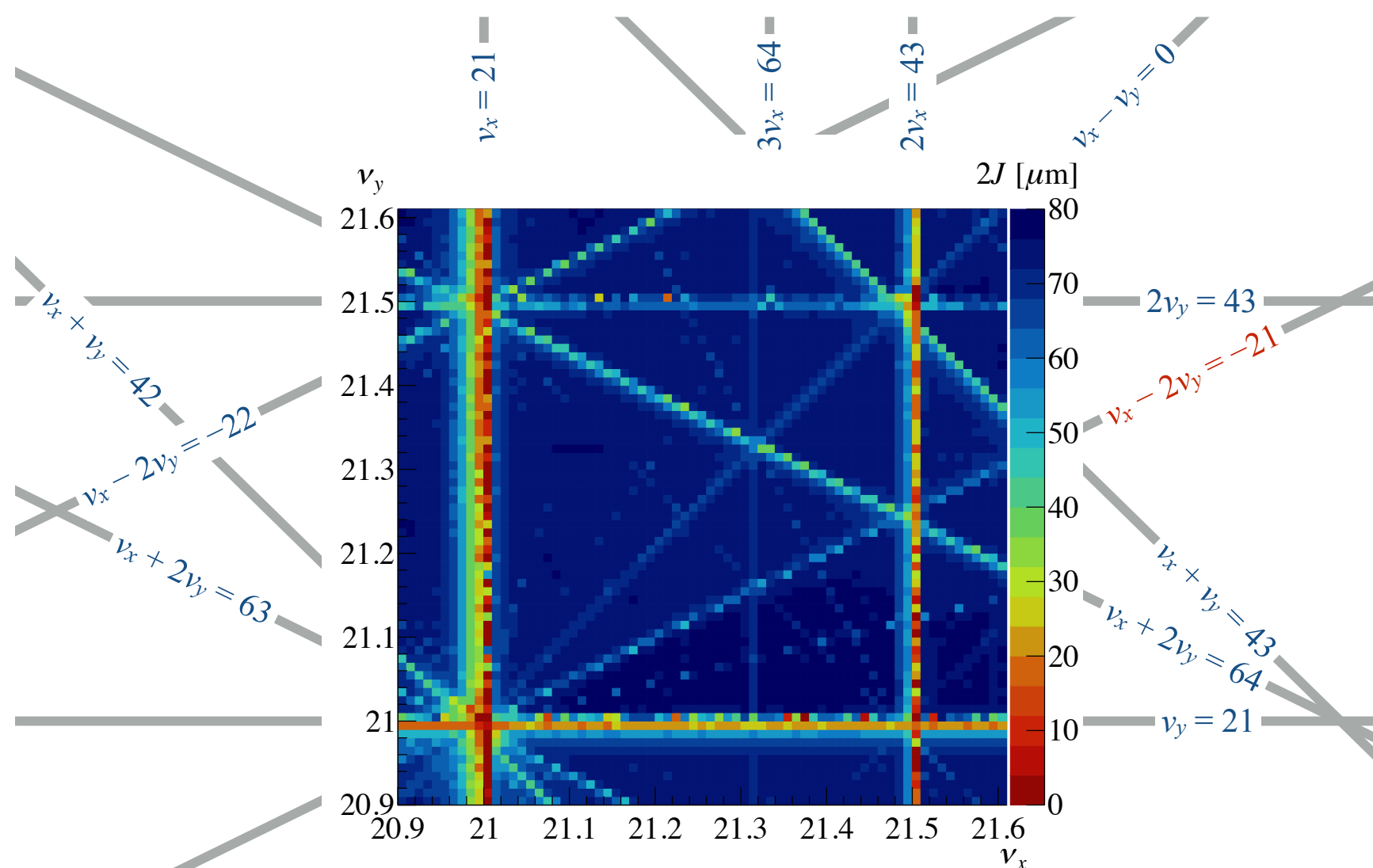
$$\sum_{k=0}^7 \cos\left(2\pi \frac{k}{8} + \phi\right) = 0$$

このような構造のシンクロトロンは多いので、意外と応用範囲は広い

共鳴補正の例

共鳴 $\nu_x - 2\nu_y = -21$ を補正することに成功！

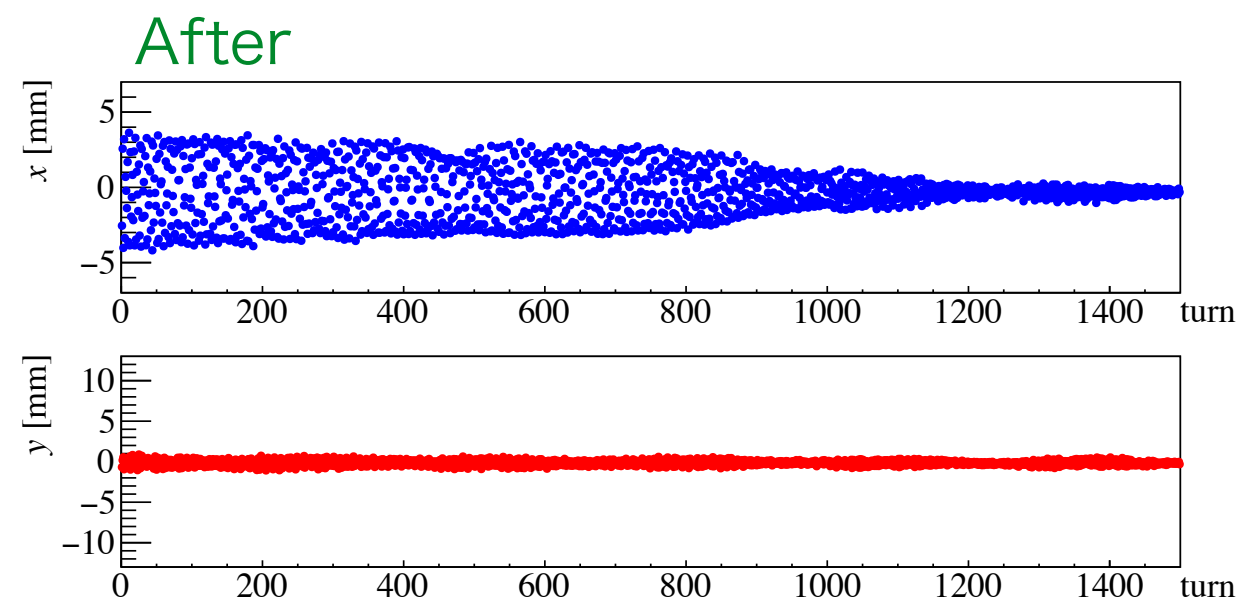
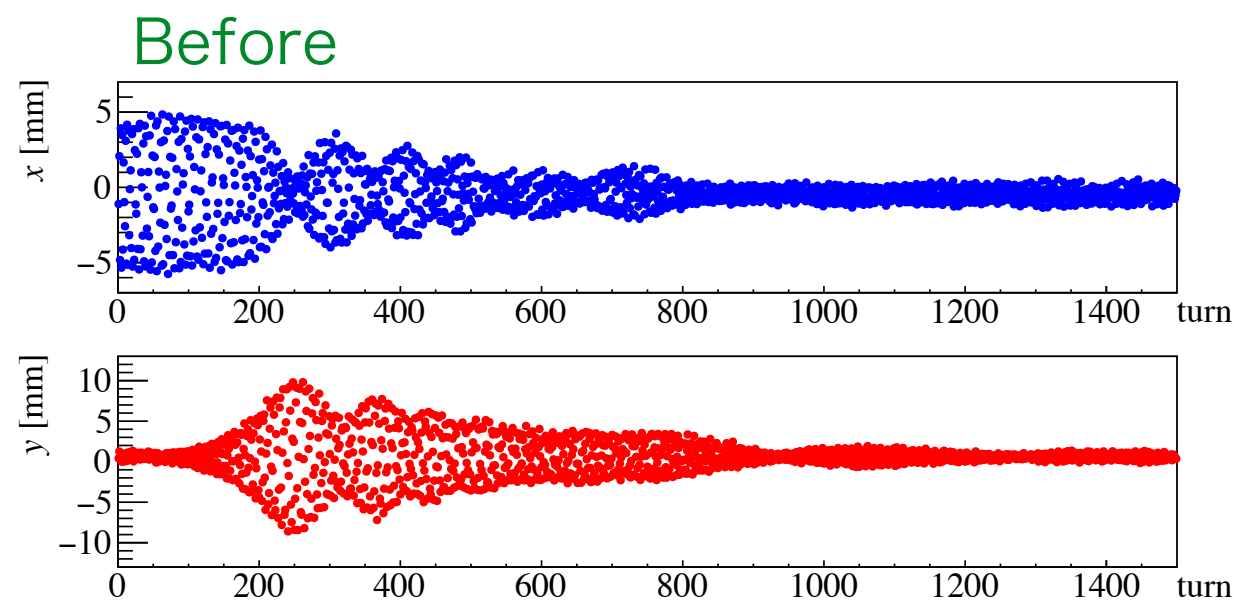
T. Yasui *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 013G01 (2022).



共鳴補正の実証

実験的にも共鳴補正を確認した

補正前に見えていた水平・鉛直方向の重心運動のカップリングが
共鳴補正後は一切測定されなくなった

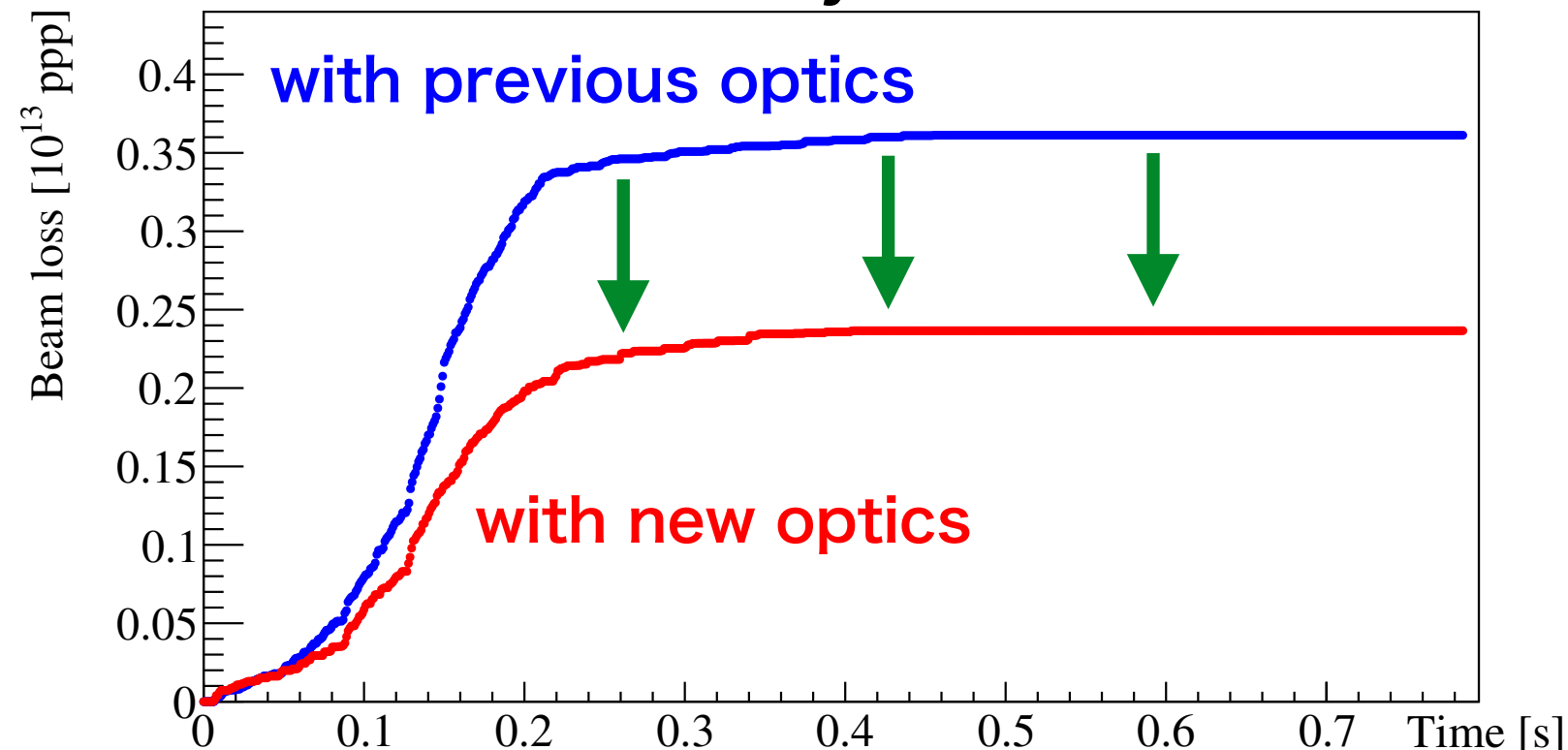
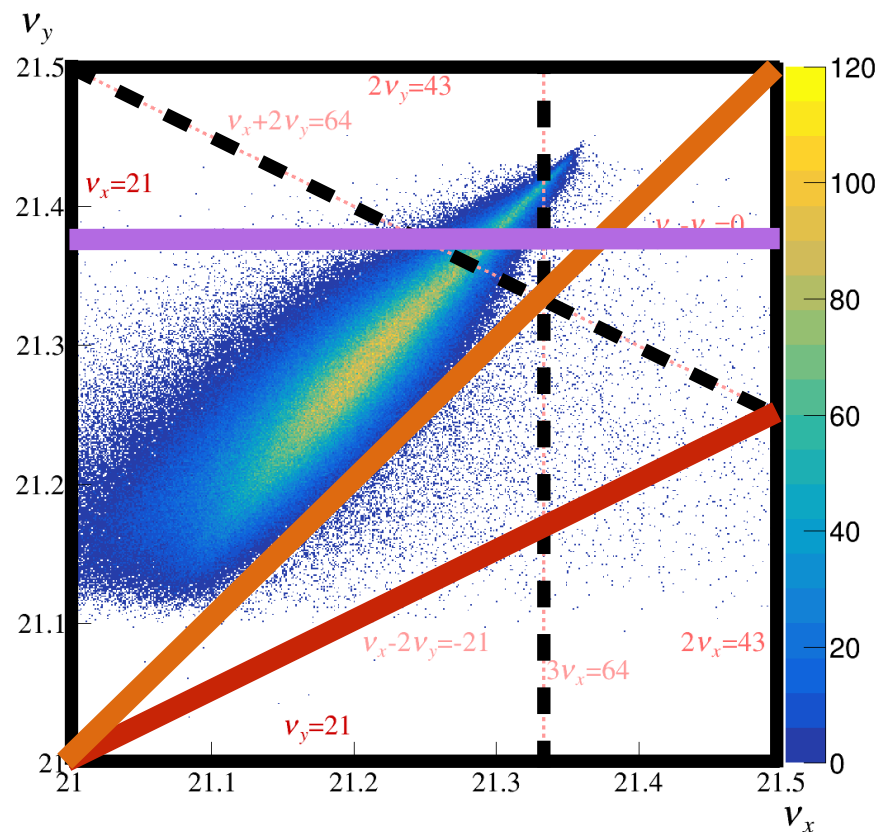


New beam optics

新opticsは空間電荷由来の共鳴に対しても抑制効果があった。

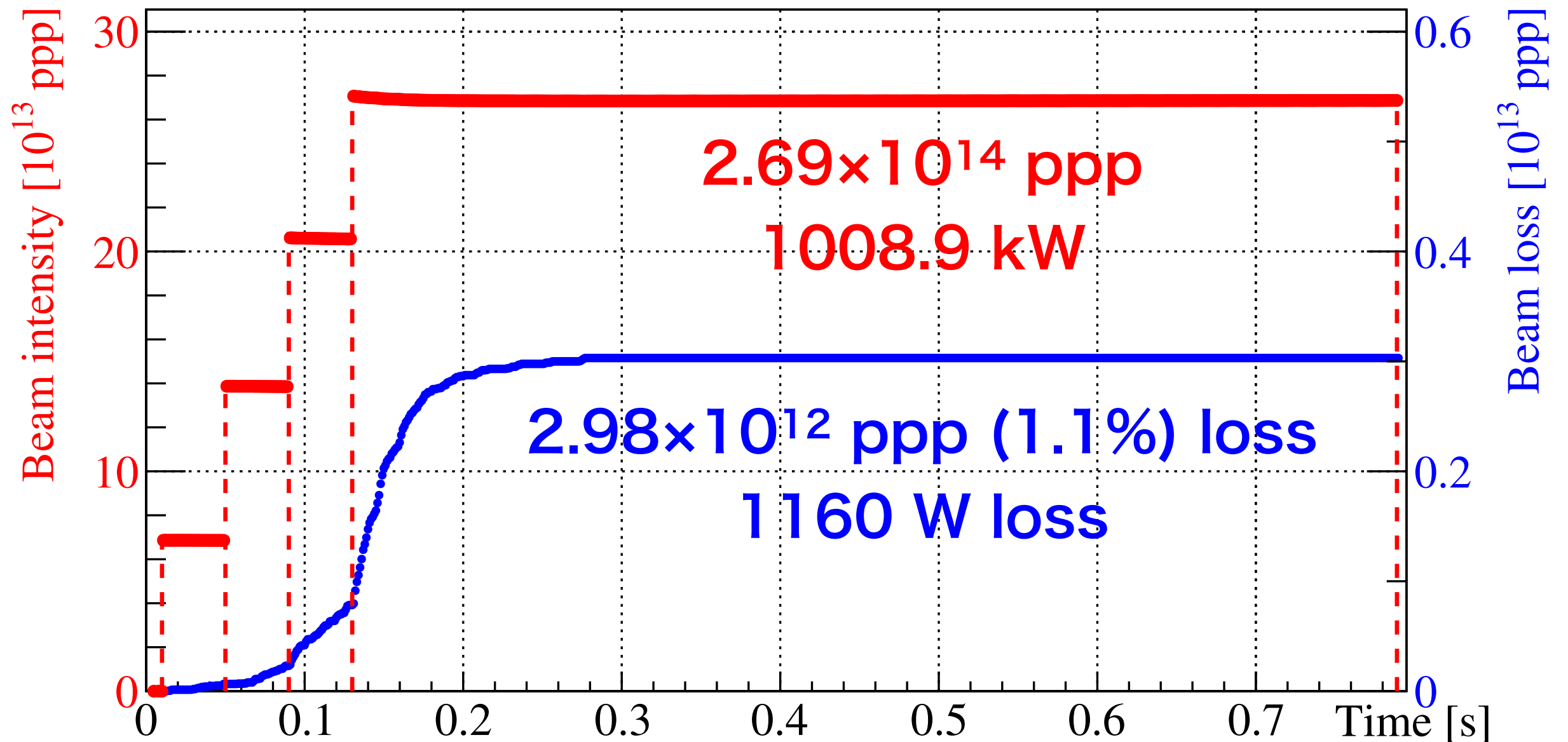
- $\nu_x - 2\nu_y = -21$ (driven by sext. field) T. Yasui *et al.*, PTEP **2022**, 013G01 (2022)
- $2\nu_x - 2\nu_y = 0$ (driven by space charge)
- $8\nu_y = 171$ (driven by space charge) T. Yasui and Y. Kurimoto, PRAB **25**, 121001 (2022)

Beam loss of 830 kW beams
estimated by the DCCT



1 MW demonstration

Beam intensity and **beam loss** estimated by the DCCT



Beam loss at the neutrino beamline was also acceptable.

まとめ

ビーム物理には素粒子物理はない。
しかし全く異なる物理(多体系、非線形、カオス、…)を楽しめる。
(ハードウェア開発もたくさんある！)

非線形項は共鳴の原因となりうる。
ハドロン向け運転では逆にこの共鳴現象を利用することで
遅い取り出しを実現している。

ニュートリノ向け運転では共鳴は敵である。
ビームロスの原因を模索しながら、更なる研究・開発を進めている。