

飯沼 裕美¹, 松下 凌大², 大澤 哲³, 中山 久義³, 古川 和朗³,

小川 真治³, 大谷 将士³, 阿部 充志³, 佐々木 憲一³, 高柳 智弘⁴, 三部 勉⁵, 齊藤 直人⁵

¹茨城大学, ²高エネルギー加速器研究機構, ³東京大学, ⁴高エネルギー加速器研究機構, ⁵日本原子力研究開発機構, ⁶高エネルギー加速器研究機構, ⁷高エネルギー加速器研究機構, 東京大学

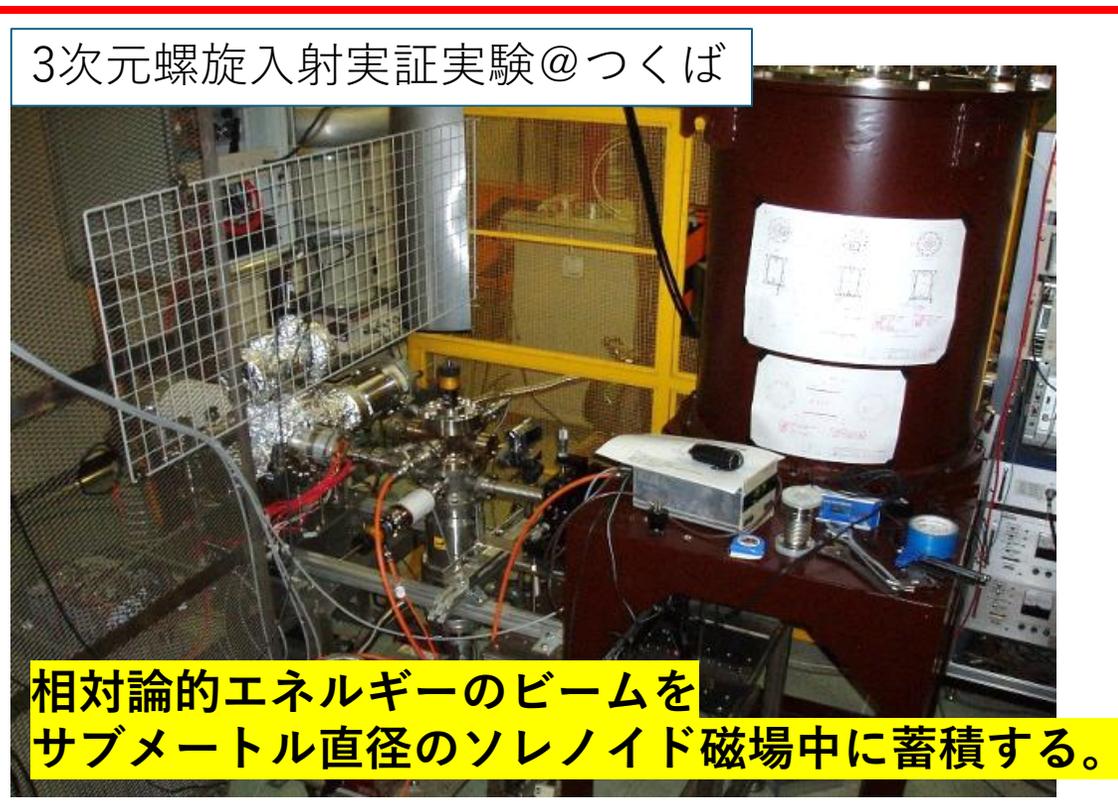
1. イントロ
2. 3次元入射とは
3. 本番実験の入射設計の現状
4. 実証実験
 - 目的と成果 (DCビーム運転、パルスビーム運転)
 - 実証実験から得た知見と今後の展望
5. まとめ



2030~

目標：標準模型を超える新物理探索

E-mail: hiromi.linuma.spin@vc.lbaraki.ac.jp



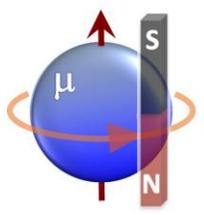
相対論的エネルギーのビームをサブメートル直径のソレノイド磁場中に蓄積する。

1. イントロ(本研究の背景)

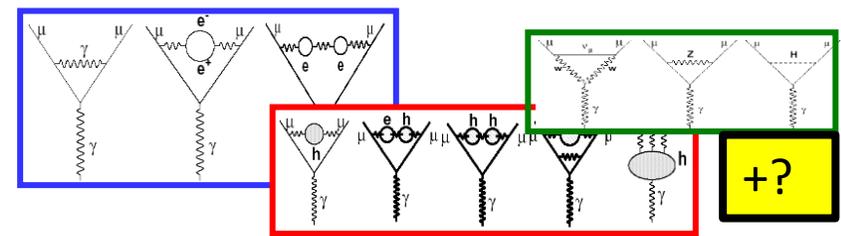
Muon spin precession tells what?

$\vec{E} = 0 \cdot \text{off-}\gamma_{magic} \cdot \text{sub-meter ring}$

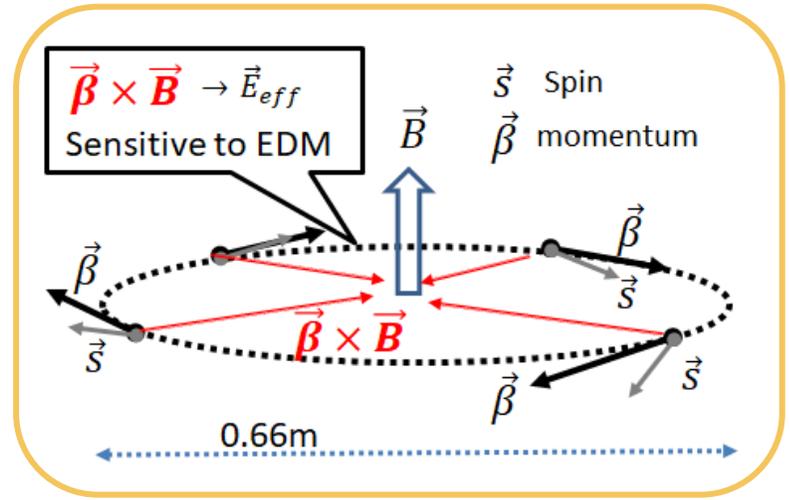
Anomalous magnetic moment



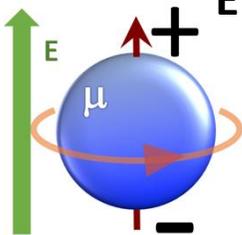
$$a_\mu = \frac{g - 2}{2} =$$



+?



Electric Dipole Moment

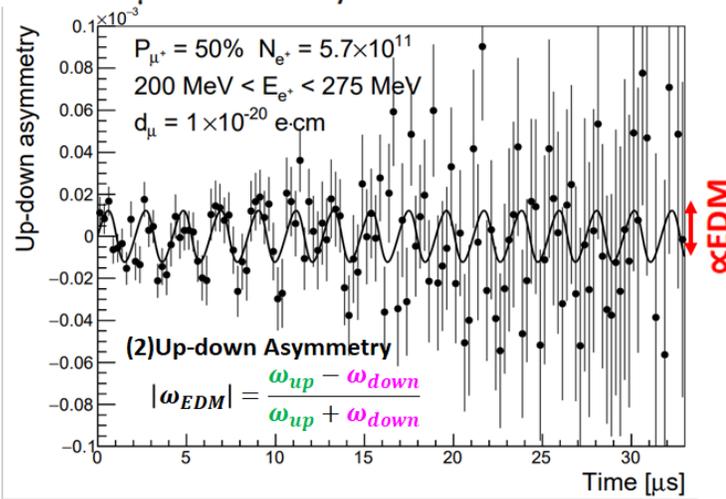
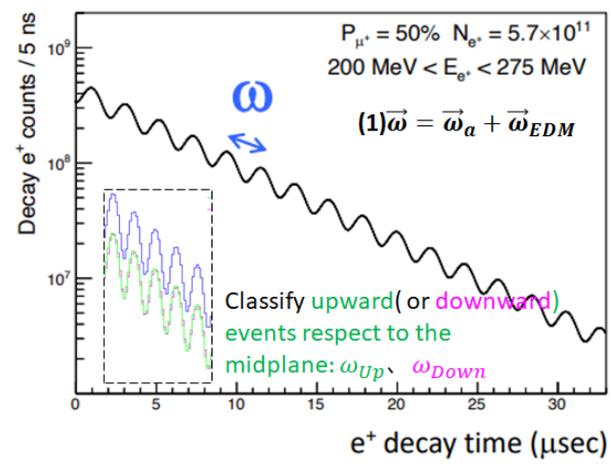


Direct evidence of new physics

The SM $\sim 2 \times 10^{-38} \text{ e}\cdot\text{cm}$
 Upper limit (E821) $< 1.9 \times 10^{-19} \text{ e}\cdot\text{cm}$ (90% CL)

Measure g-2 and EDM at a time, with the same setup but independently!

Expected time spectrum of e^+ in $\mu \rightarrow e^+ \nu \nu$ decay

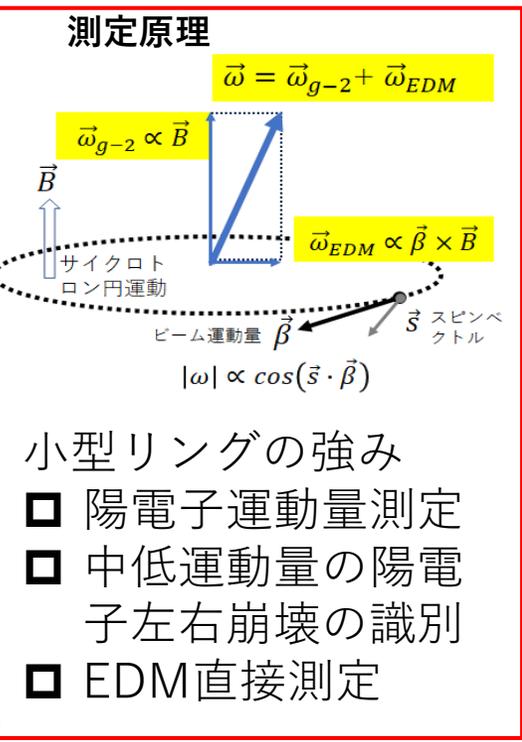
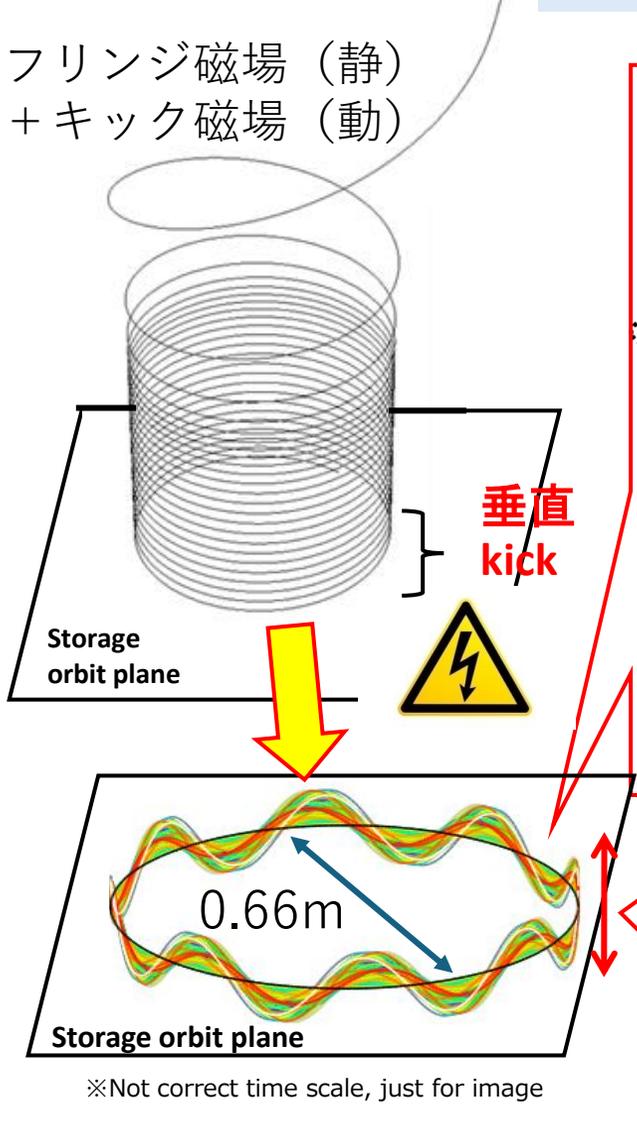
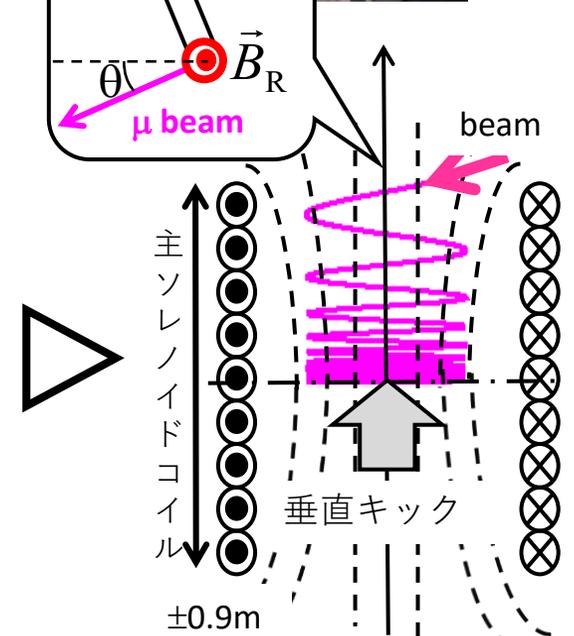
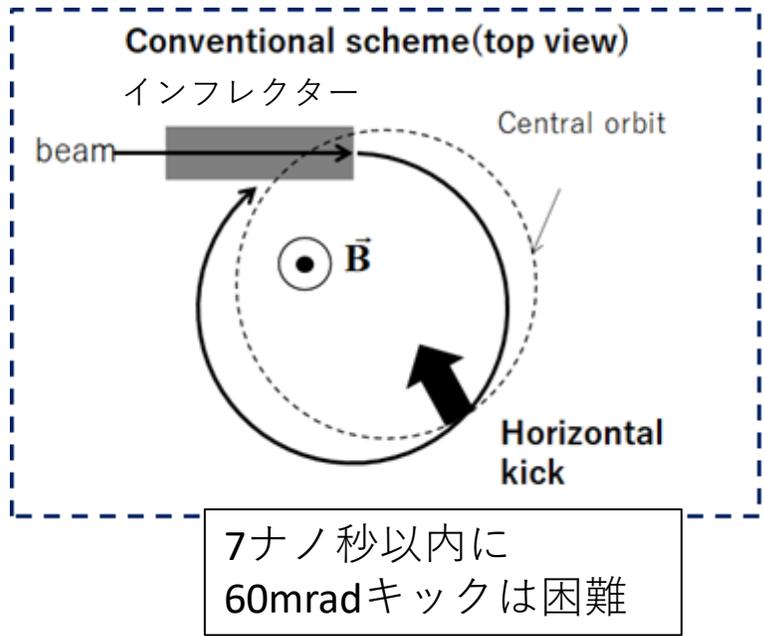


相対論的エネルギーの高品質Muonビームを磁場均一度sub-ppm, sub-m 蓄積リング中に蓄積する入射技術の開発

実験全体目標: 素敵な冷却ミュオンを最大限活用し、
先行実験よりも1/20小さい小型蓄積リングでMuon歳差運動の
角周波数ベクトル情報を取りだすために、3次元螺旋軌道入射手法を確立します。

加速器の蓄積リング
1周 3km(KEKB) ~ 27km(LHC)

ミュオン実験
米国 リング1周: 44m
日本 2.1m (入射できるのか?)

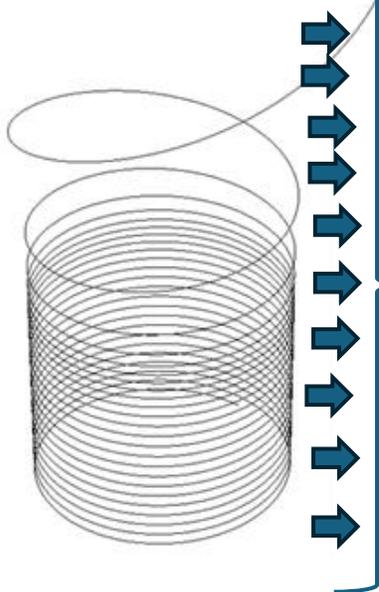


主ソレノイド磁場(3T)に加え、弱収束磁場を入れ**VBO<50mm**で蓄積ビームを制御

2.3次元入射とは（単粒子軌道）

完全に電磁気の知識: 軌道にそった積分磁場 $B_R L$ がすべて

簡単のために、粒子が感じる径方向磁場 $B_R = \text{const}$ として、粒子が止まるまでに受ける積分磁場 $B_R L$ を算出する。
→大学の入試問題レベル。



$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad \vec{F} = m_\mu \vec{a} \quad \begin{pmatrix} x_\mu \\ y_\mu \\ z_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cos \theta \\ R \sin \theta \\ z_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_L \sin \theta \\ -v_L \cos \theta \\ v_T \end{pmatrix}$$

$$B_R = \text{const} \quad \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \frac{q}{m_\mu} \begin{pmatrix} v_y B_z - v_z B_y \\ v_z B_x - v_x B_z \\ v_x B_y - v_y B_x \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_R \cos \theta \\ B_R \sin \theta \\ B_z \end{pmatrix}$$

$$a_z = \frac{q}{m_\mu} v_L B_R \quad \text{簡単のため、X-Y面状の速度 } v_L = \text{const. とする。}$$

$$v_z = \frac{q}{m} v_L B_R \int dt = \frac{q}{m} v_L B_R t = \frac{q}{m} B_R L$$

$$L = v_L \int dt = v_L t,$$

$$B_R L = \frac{m}{q} v_{z0}$$

必要な積分磁場 $B_R L$ は止めたいソレノイド軸方向の運動量が分かれば計算できる。

$p=300\text{MeV}/c$
例えば、Initial Pitch = -0.27 rad

$$B_R L = -0.267 [\text{T}\cdot\text{m}]$$

矩形パルス磁場は実現が難しいので、半サイン型パルス磁場で考える。

$$\Rightarrow B_R = B_R(R, z) \sin(\omega \times t)$$

$$I(t) = I_0 \cdot \text{half sin} \frac{2\pi}{T_K} (t - t_0)$$

at $t > t_0$

How much (vertical) volume z_0 , which has a unique spatial B_R distribution, with a given kick time period $T_K/2$?

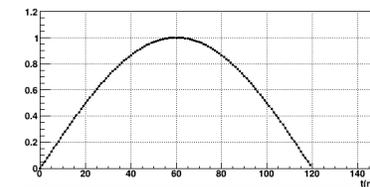
$$v_z = v_{z0} + \frac{q}{m_\mu} v_L \int B_R(R, z) \sin(\omega \times t) dt$$

$$0 \cong v_{z0} + \frac{q}{m_\mu} v_L B_R(R, z) \frac{2}{\omega}$$

$$B_R(R, z) = -\frac{m_\mu v_{z0} \omega}{2q v_L} = -\frac{m_\mu p_{z0}}{2q p_L} \omega$$

$$v_z(t) = \frac{v_{z0}}{2} [1 + \cos\{\omega \times (t - t_0)\}]$$

$$z_0 = -\int_{t_0}^{t_0 + \pi/\omega} v_z(t) dt = \frac{v_{z0} \pi}{2\omega} = \frac{v_{z0} T}{4} \left(= \frac{c}{m_\mu \gamma_\mu} \frac{T}{4} p_{z0} \right)$$



設計で決めるのは2つだけ:

1. 初期ピッチ角を何秒間でゼロにしようか?
2. $Z=0$ で止めるには、どこから蹴り始める?
→キック間のz方向の移動サイズを決める。
→ $B_R L$ が決まる。

Key-word

3. キック時間 $T_K/2$ が決まれば、ピーク磁場 B_R が決まり、ピーク電流 I_0 、上下コイル間隔決まる。
4. どこから蹴って、どういう $z(t)$, $v_z(t)$ をたどろうか、を決めればキッカーコイルの磁石内の配置が決まる。

1. イントロ
2. 3次元入射とは
3. **本番実験の入射設計の現状**
 - a. 中心軌道の設計
 - b. 位相空間を考慮した設計

4. 実証実験
 - 目的と成果 (DCビーム運転、パルスビーム運転)
 - 実証実験から得た知見と今後の展望
5. まとめ

<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2016/04/28/1000/>

Prof. K. Oide



上からなら
入るんじや
ない?

ILCは立ち上がり
1nsec キッカー使
うらしいよ!

<https://www2.kek.jp/accl/legacy/topics/topics140310.html>

Prof. A. Yamamoto



20年は頑張れ!

Prof. H. Nakayama

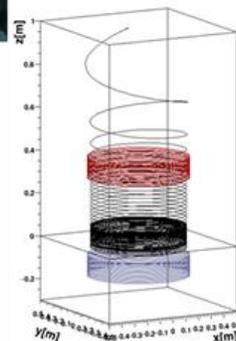


Dr. M.
Abe

電圧下げて!

7nsec以内に30mrad!?
無理に決まってるだろ!!

3次元らせん軌道入射 との出会い



1. 本番実験の入射設計の現状

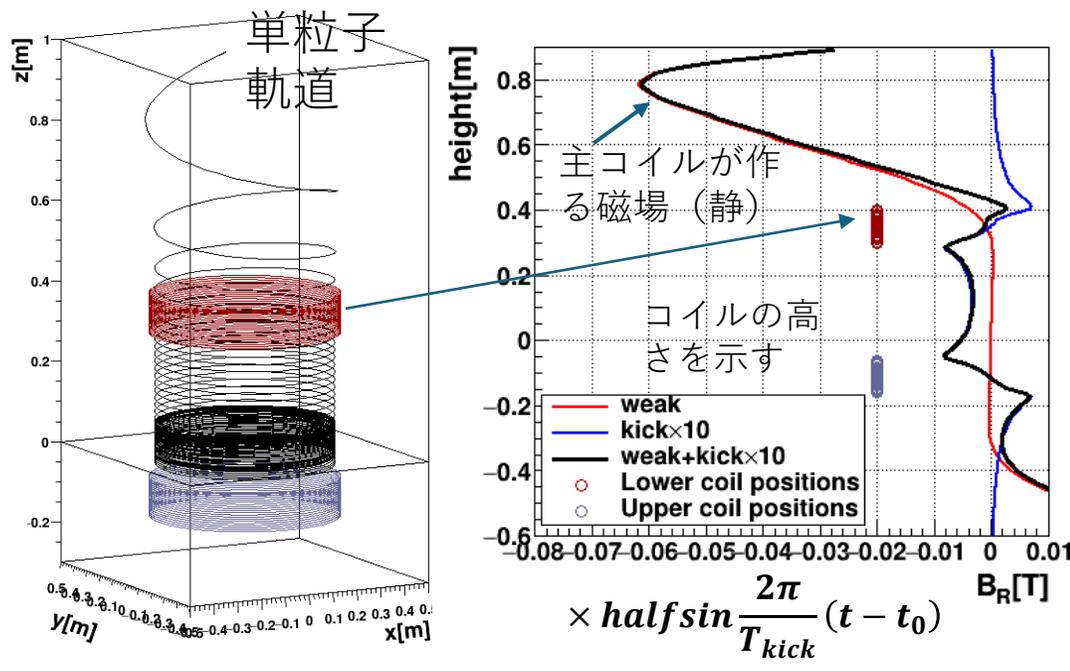
a. 中心軌道の設計

どういいうキック軌道 $z(t)-z'(t)$ を設計するか、でキッカーコイル配置を決める。6
 実際には空間分布 $BR(z,R)$ 分布をもつキック磁場。

PASJ2022
TUP036

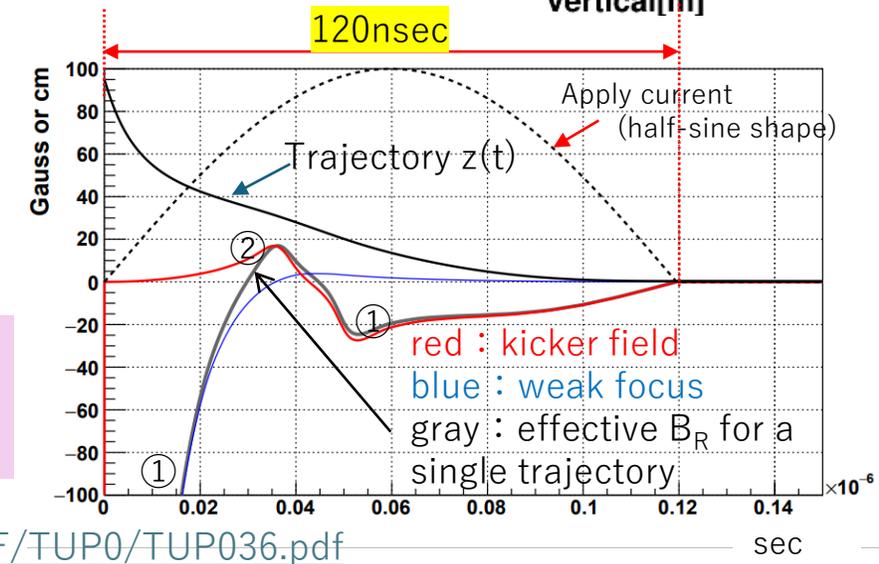
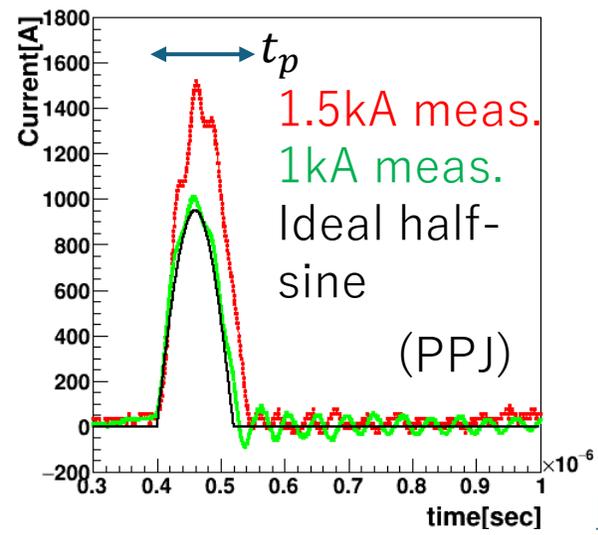
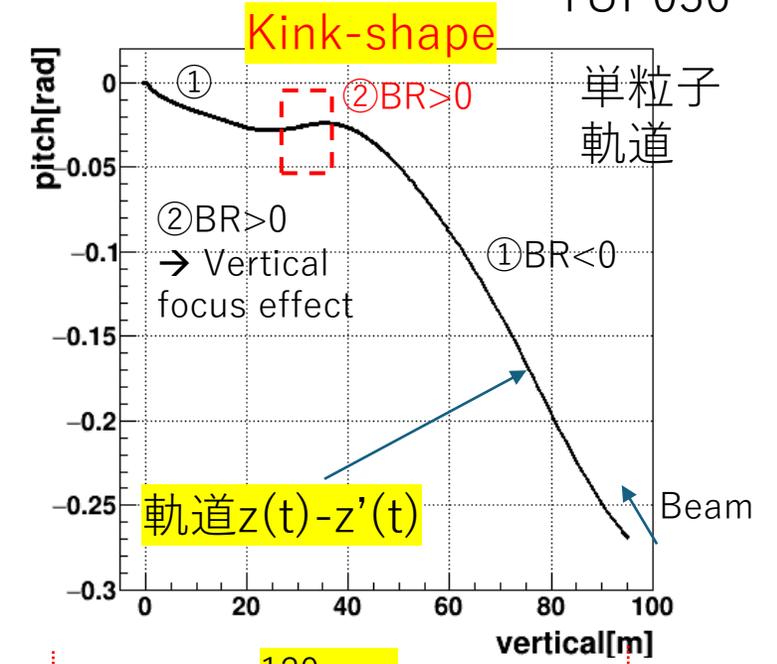


有効磁場は主コイル+弱収束コイルがつくる静磁場 +
 キッカーパルス磁場 $= B_{R0}(r,z) + B_R(z) \sin \frac{2\pi}{T_{kick}}(t-t_0)$



円筒シート型コイル
 Coil radius = 35cm (orbit 33.3cm)

- 単粒子の入射：キッカーが作る空間分布、時間分布を調整して $B_R L$ 積を $-0.267[\text{T}\cdot\text{m}]$ 程度にすればよい。
- Kink-shape は多粒子軌道制御 (ビーム) で役に立つ。

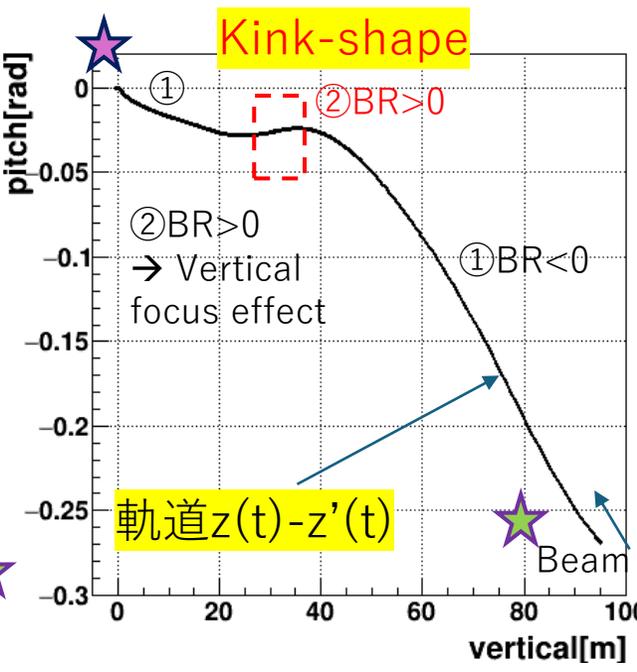
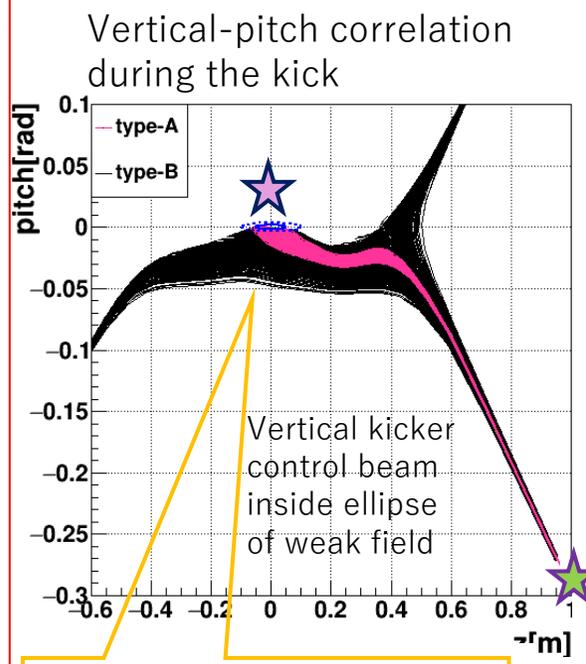
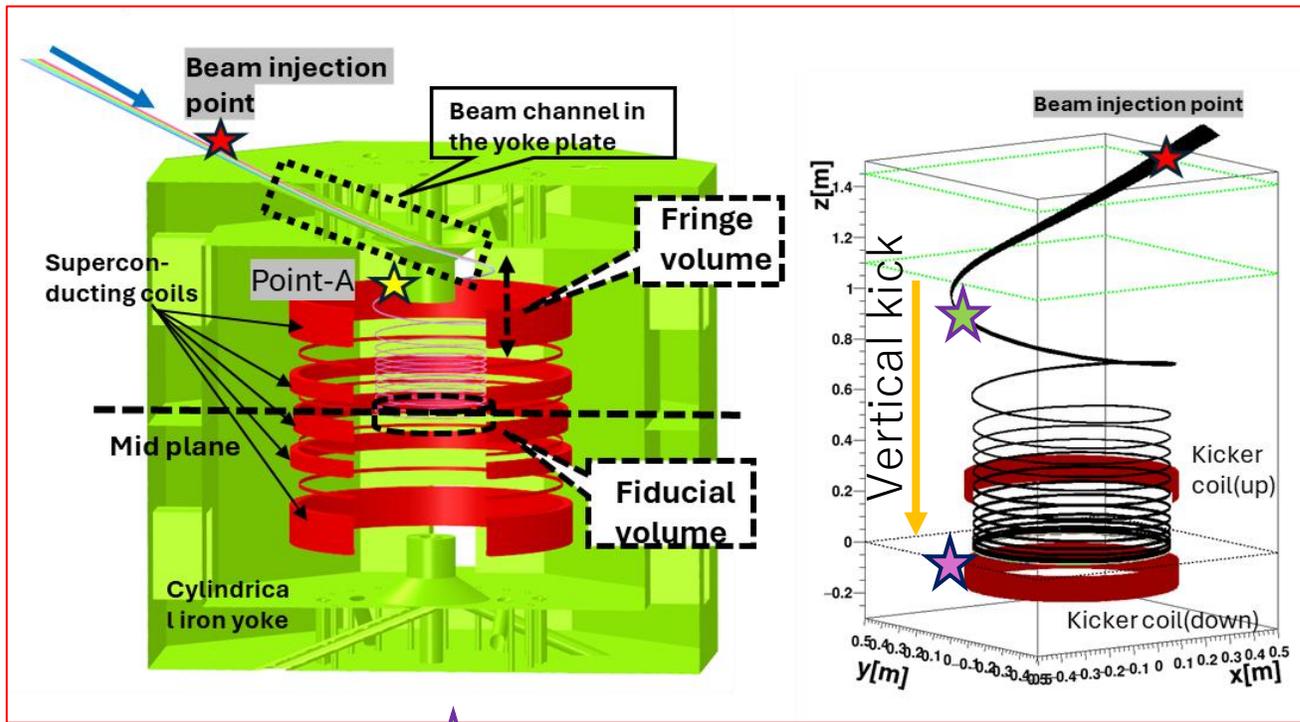


1. 本番実験の入射設計の現状

- a. 中心軌道の設計
- b. 位相空間を考慮した設計

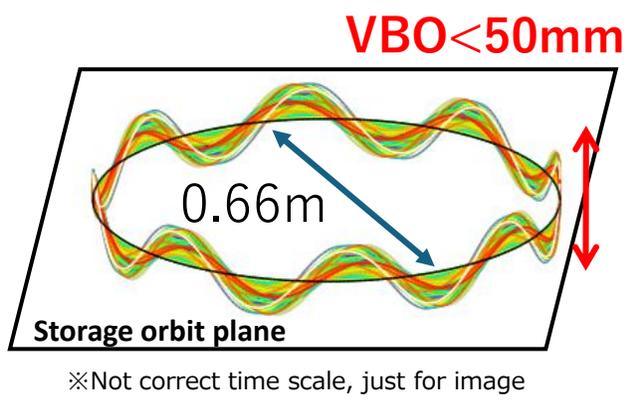
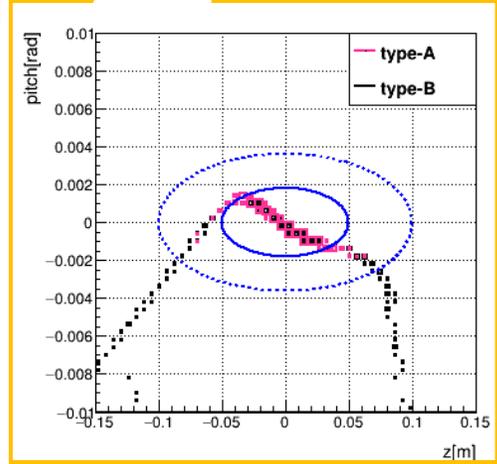
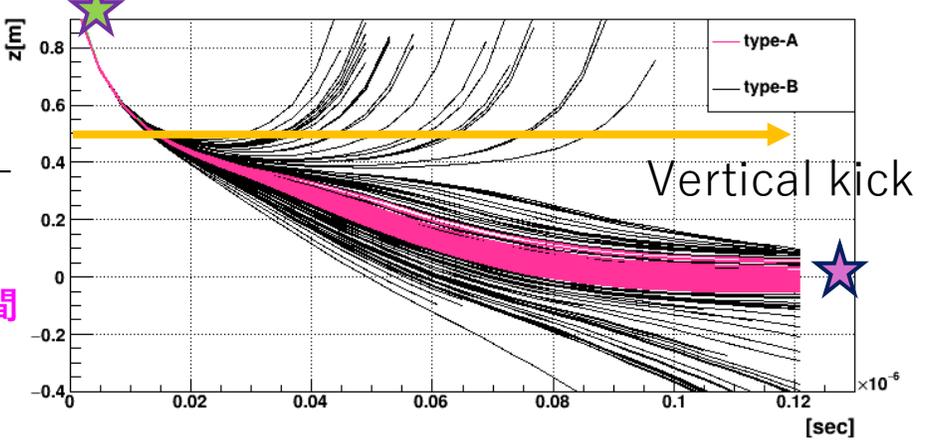
難しい点 = まっすぐなビームラインではないこと

- I. 磁場中を通す設計軌道の最適解は？設計軌道を決める**基点**はどこか？
- II. 設計軌道の基点における位相空間(**X-Y結合**)の最適解を探す方法は？



蓄積磁石入射点 (z~150cm) から横方向エミッタンス 0.1mm·mrad のビームを入射する。

Type-A: 適切なX-Y位相空間
Type-B: ガウス分布

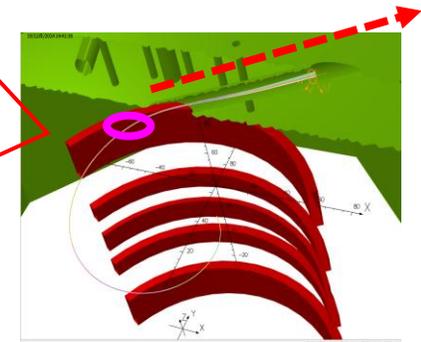
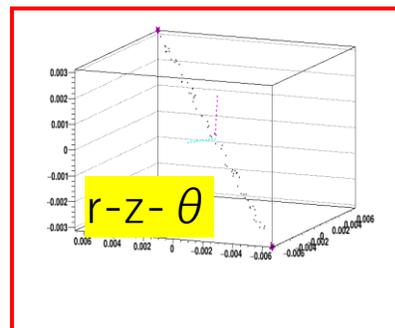


ビーム座標系ではなく
磁石原点で議論します。

蓄積磁石内部の逆軌道の利用

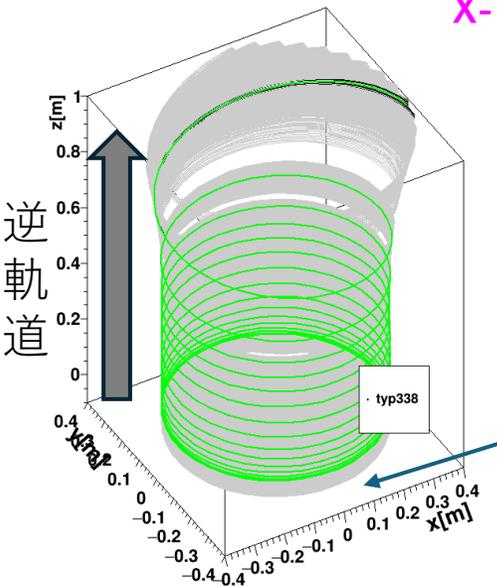
1. 本番実験の入射設計の現状
 - a. 中心軌道の設計
 - b. 位相空間を考慮した設計

- ◆ 入射点(z=1.5m)のビーム位相空間の要求を知るために、**磁石内部のz=0.95mの基点まで、z=0から逆軌道**を用いて算出する。
- ◆ ソレノイド軸回転対称な磁場分布:**X-Y結合させたビーム**
- ◆ **Z=0.95m 基点の位相形状はVBO<50mmの条件が明確に反映される。**
- ◆ Z=1.5mの位相空間は **基点z=0.95mから逆算・延長**すれば良い。

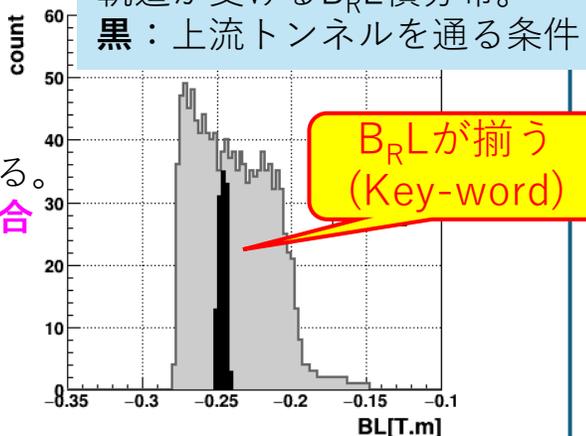


緑：中心軌道
黒：Z=0.9mでのB_RLを選択

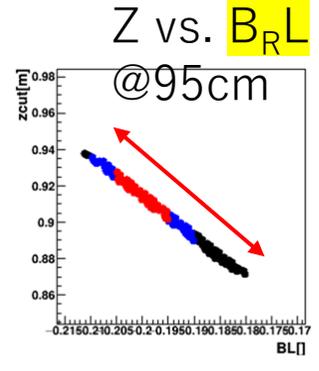
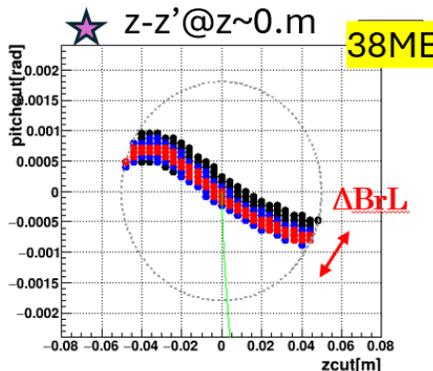
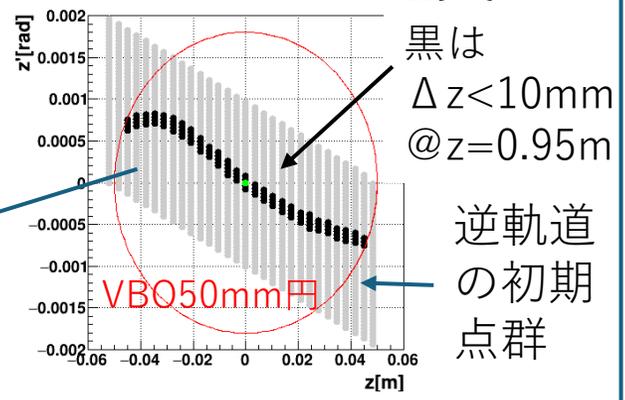
Z軸-回転対称な“リボン”形状になる。
X-Y結合



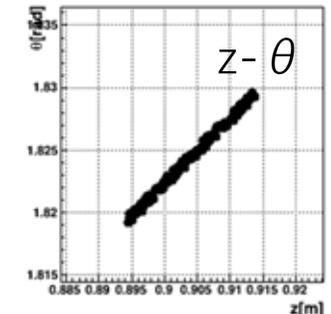
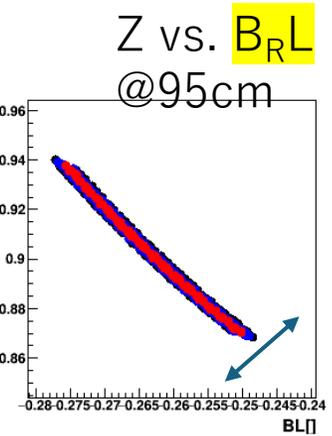
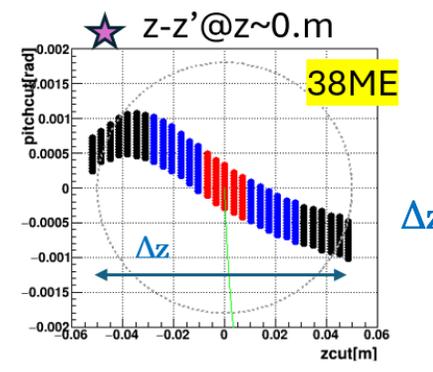
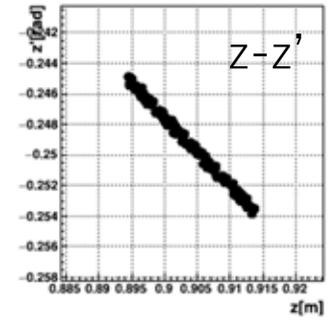
軌道が受けるB_RL積分布。
黒：上流トンネルを通る条件



B_RLが揃う
(Key-word)



各軌道のある時刻の位置・運動量ベクトル
 $\vec{r}, \vec{p}, \cos\theta = \vec{r} \cdot \vec{p} / (|\vec{r}| |\vec{p}|)$

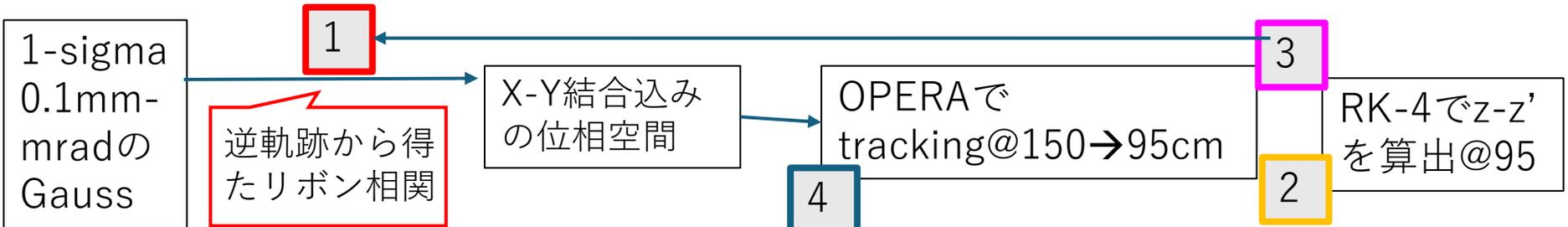
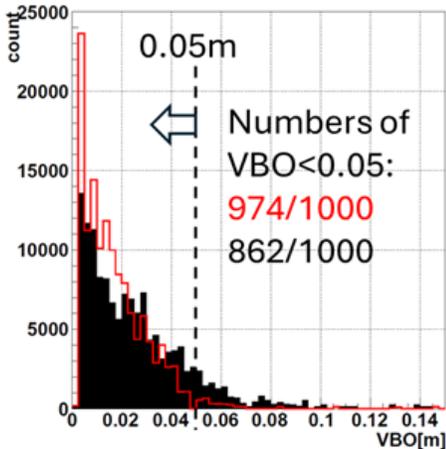
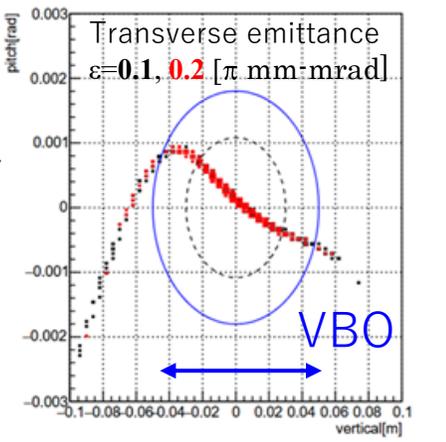
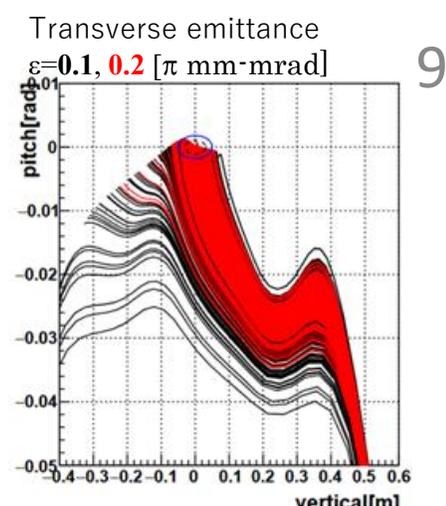
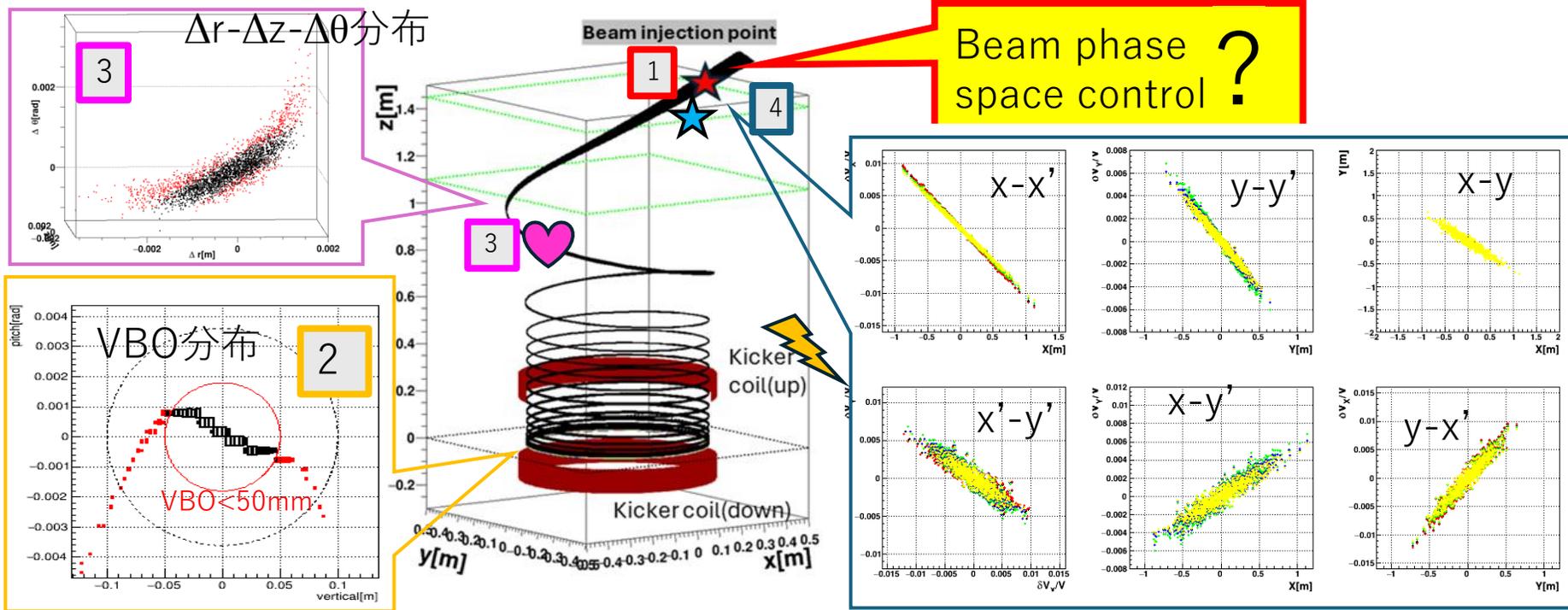


1. 本番実験の入射設計の現状

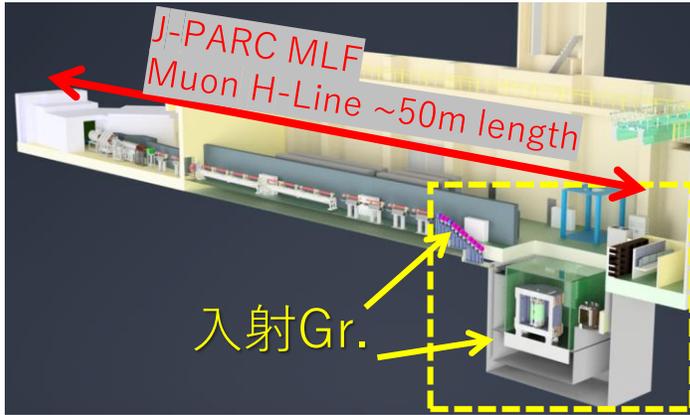
a. 中心軌道の設計, b.位相空間を考慮した設計

結局は2~3回のイタレーション計算

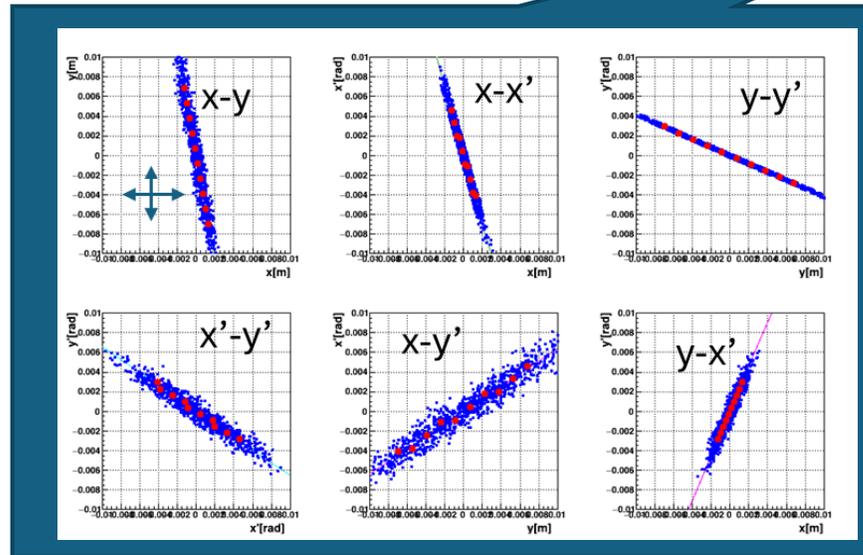
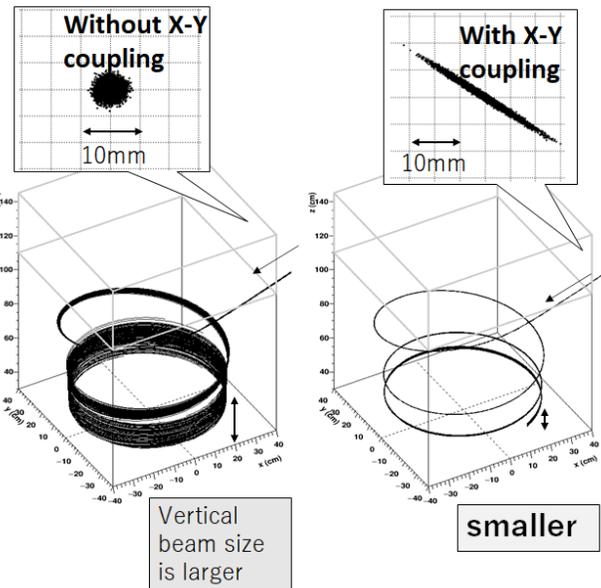
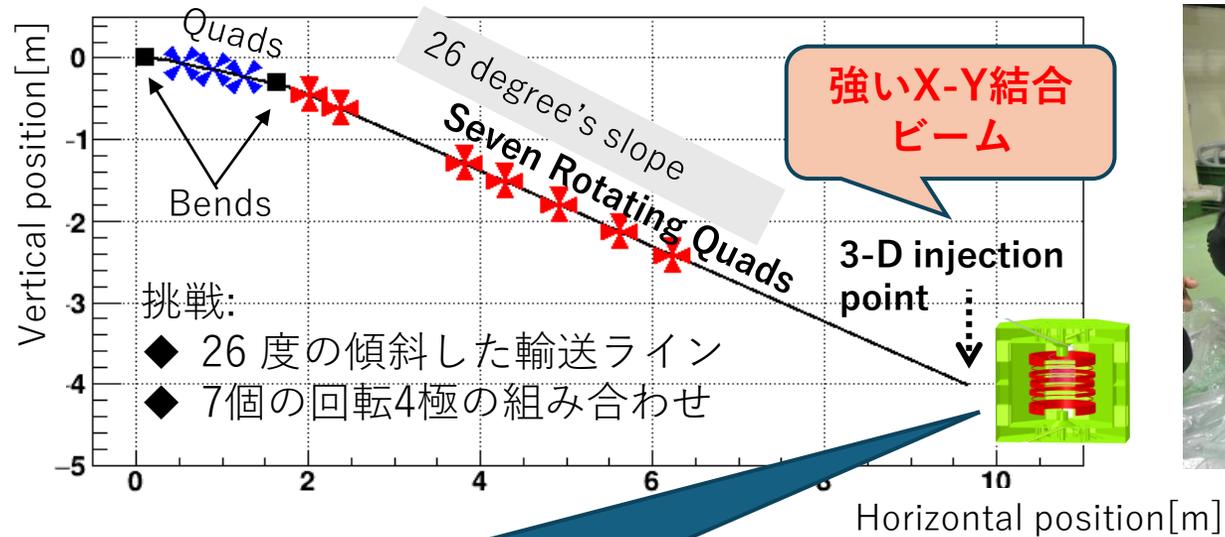
- まず入射。Z~95cmの Δr - Δz - $\Delta \theta$ 分布とキック後のVBO分布の比較 1 2 3
- Δr - Δz - $\Delta \theta$ 分布が理想に近づくように行列Dで調整
- 入射点(磁石外)までトラックバックし、ビーム座標系に変換の後、Twiss再計算 4



前項で示した入射効率 (~90%)を達成するビーム：*strong X-Y coupled beam* の生成は、上流輸送ラインで行う。



Seven rotating quadrupole magnets in the transport line control X-Y coupling at the injection point.



ID	angle	K-value
Q3	45.0	16.449
Q4	45.0	-0.278
Q5	60.0	2.091
Q6	-60.0	0.063
Q7	-60.0	0.814
Q8	45.0	-0.041
Q9	-60.0	-1.825

又は

ID	angle	K-value
Q3	-30.6	-20.2
Q4	-51.3	3.7
Q5	-61.6	0.71
Q6	-57.2	0.64
Q7	61.1	1.04
Q8	-36.8	-0.64
Q9	-58.2	-2.31

又は?

1. イントロ
2. 3次元入射とは
3. 本番実験の入射設計の現状
 - a. 中心軌道の設計
 - b. 位相空間を考慮した設計

本学会での関連報告

8月6日 加速構造：14:50 - 16:10 会場：7号館71A/71B

WEO704 [ミュオン加速用Disk-and-Washer試作機の低電力試験](#)

○近藤 彩夏¹, 飯嶋 徹¹, 鷺見 一路¹, 竹内 佑甫², Cieck Ersin³, 恵郷 博文³, 大谷 将士³, 中沢 雄河³, ニツ川 健太³, 三部 勉³, 吉田 光宏³, 近藤 恭弘⁴, 森下 卓俊⁴, 岩下 芳久⁵

¹名大, ²上海交通大学, ³KEK, ⁴JAEA, ⁵京大

8月7日 加速構造・ビーム診断：8:50 - 10:50 会場：7号館71A/71B

THO703 [低エミッタンスミュオンビーム測定のためのチェレンコフ放射型プロファイルモニターの開発](#)

○中川 鈴彩¹, 宮原 房史², 大谷 将士², 橋本 義徳², 三橋 利行²

¹総合研究大学院大学, ²高エネルギー加速器研究機構

8月8日 電磁石・レーザー：14:40 - 16:40 会場：6号館61C

FRO607 [g-2/EDM 精密計測用磁石の磁場構成と調整方法の検討](#)

○阿部 充志¹, 佐々木 憲一¹, 三部 勉¹, 小川 真治¹, 福村 省三², 飯沼 裕美³

¹高エネルギー加速器研究機構, ²新潟大学, ³茨城大学

現在進行中：毎年の素核研レビュー

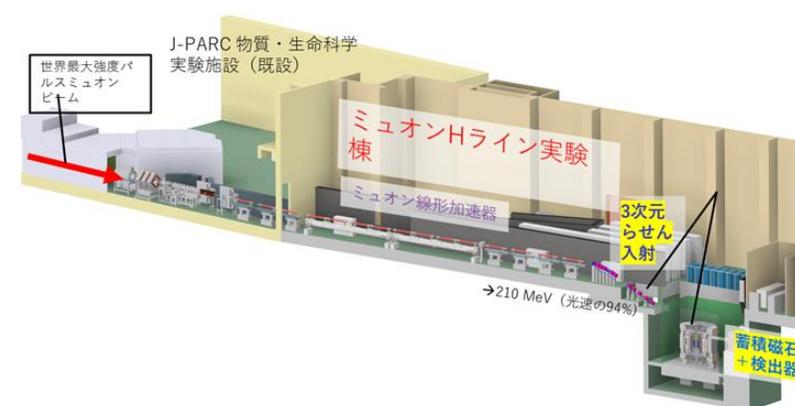
- 輸送ライン設計：長手方向ビーム分布の考慮、スピン計算
- 蓄積磁石内部のビーム調整・ビーム診断機構
- 垂直キッカーの電源設計、実験室での動作確認
- 垂直キッカー導体の過渡応答計算
- 陽電子シリコン検出器の共存
- . . . まだまだあります。

8月7日 学会賞受賞講演：18:20 - 18:45 会場：7号館71A/71B

THOP01 [J-PARCミュオンg-2/EDM実験のための低エミッタンスミュオンビーム加速に関する研究](#)

○鷺見 一路¹

¹元名古屋大学（現 株式会社アイシン）



4. 実証実験

項目	本番(J-PARC g-2/EDM)	実証実験
主磁束密度	3T	80 gauss
ビーム粒子	Muon(<1ns pulse)	電子(DC~100ns pulse)
運動量	300MeV/c	300keV/c
サイクロトロン周期	7.4ns	5ns
蓄積半径	0.33m	0.11m
弱収束	1.5E-4	1E-2 ~ 5.6E-2
回転4極の数	7	3
kicker	120ns, 1.2kA	140ns, 45A



実機の3分の1サイズの更にコンパクト軌道でできることは？
(電子ビームを直接測る方式でできること)

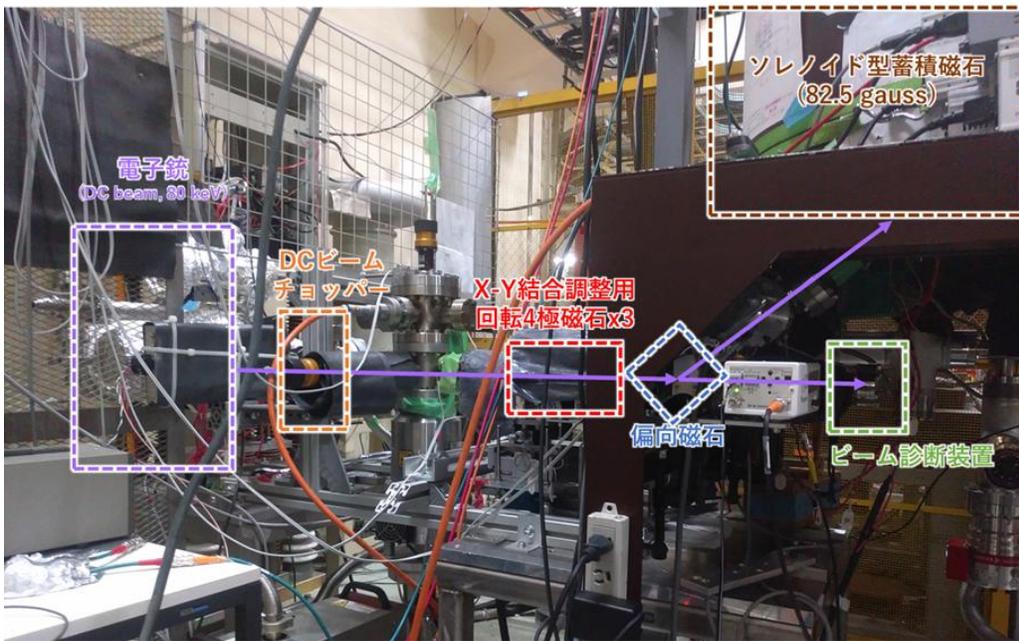
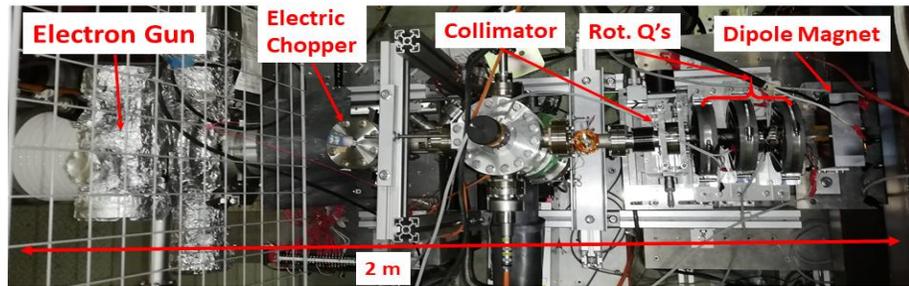
我々の腹囲くらい？

- i. 螺旋軌道ビームの可視観測 (蓄積槽はほぼ空っぽ)
 - ✓ **基準軌道が直線ではない = どこにビームが居るのか、捕まえるのが重要**
- ii. ビーム運動を電磁気学との比較。特に、直線部で横方向位相空間の制御
- iii. 垂直キッカー、弱収束磁場を用いた「ビーム蓄積」の実現
- iv. 弱収束磁場の強度を $n=1E-2 \sim 5.6E-2$ まで可変 (本番は $n=1.5E-4$ に固定) し、蓄積ビーム分布の変動を観測

東大 KEK加速器
松下さん 中山さん
大澤さん

4. 実証実験

- 目的と成果 (DCビーム運転、パルスビーム運転)
- 実証実験から得た知見と今後の展望



3次元螺旋入射実証実験：KEKつくば¹³ 構内にテストビームライン

- 2011年 キッカー装置試作
- 2014年 電子銃を用いた実証ビームライン建設開始
- 2016年 ビーム運転開始(DCビーム)
- 2019年 X-Y結合制御 (平山)
ワイヤースキャナー開発(Rehman)



**マイルストーン1:
3次元軌道の可視化・X-Y結合制御**

DCビームの画像取得時間を300秒
→10秒に改善!

- 2020年 キッカーコイル・電源準備
DCビームをパルス化(松下)
- 2021年 パルスビーム検出器開発 (松下)
- 2022年 キッカー装置設置 (小田)
- 2022年 蓄積兆候? PASJ/FROB05
- 2023~2024年 蓄積データ取得

学位取得者

- 2020年度 総研大 博士
- 2021年度 茨大 修士1名
- 2021年度 東大学際理学修士1名
- 2022年度 茨大修士1名

2025年度 東大学際理学博士1名の予定。

3次元らせんビーム入射実証ビームライン建設@KEKつくば入射器棟

入射器 Staff と運転員の方々、長期にわたりサポートを頂きました、ありがとうございます。



2014年Oct.

電子銃を
拝借する。



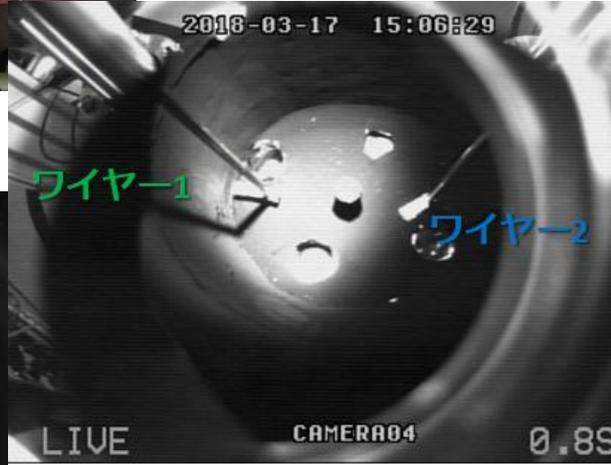
2014Oct.



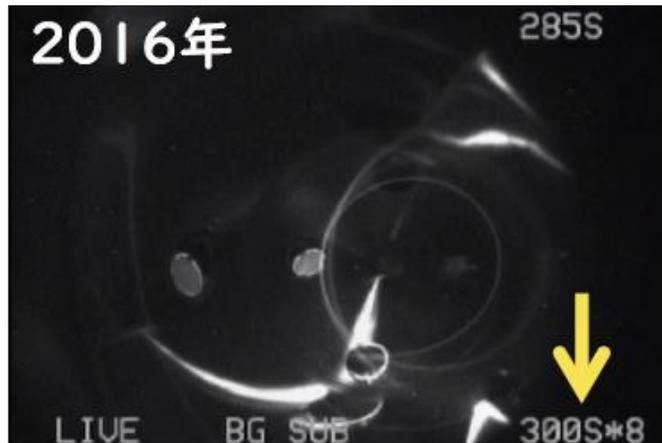
2015Apr.

新規製作のソレノイド
磁石をインストール

蓄積磁石内側の
チェンバ内の様子

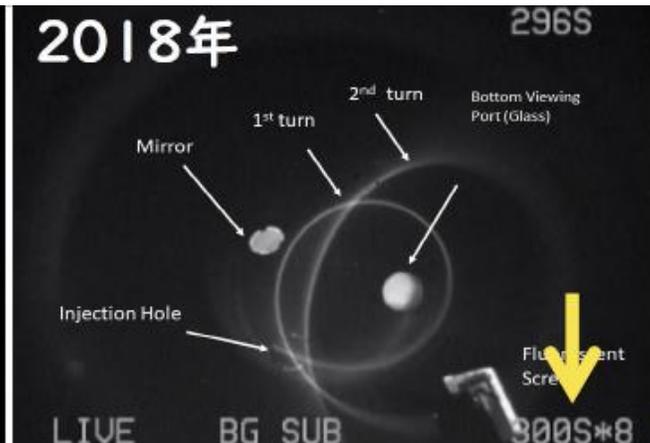


毎月3~4回KEKつくばに通い、 KEKスタッフと連携して研究に取り組む



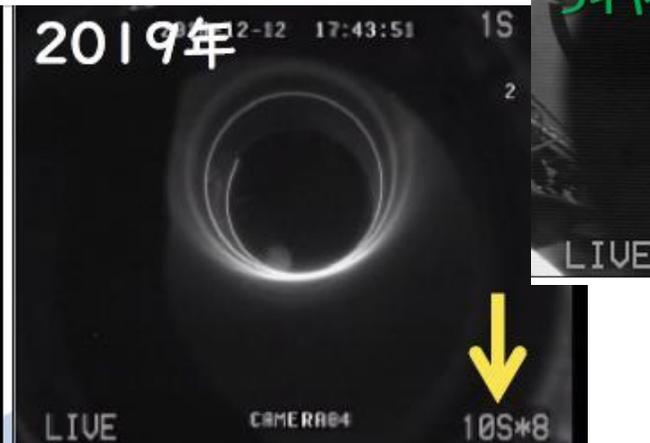
2016年

285S
LIVE BG SUB 300S*8



2018年

296S
Mirror
1st turn
2nd turn
Bottom Viewing Port (Glass)
Injection Hole
Fluorescent Screen
LIVE BG SUB 300S*8



2019年

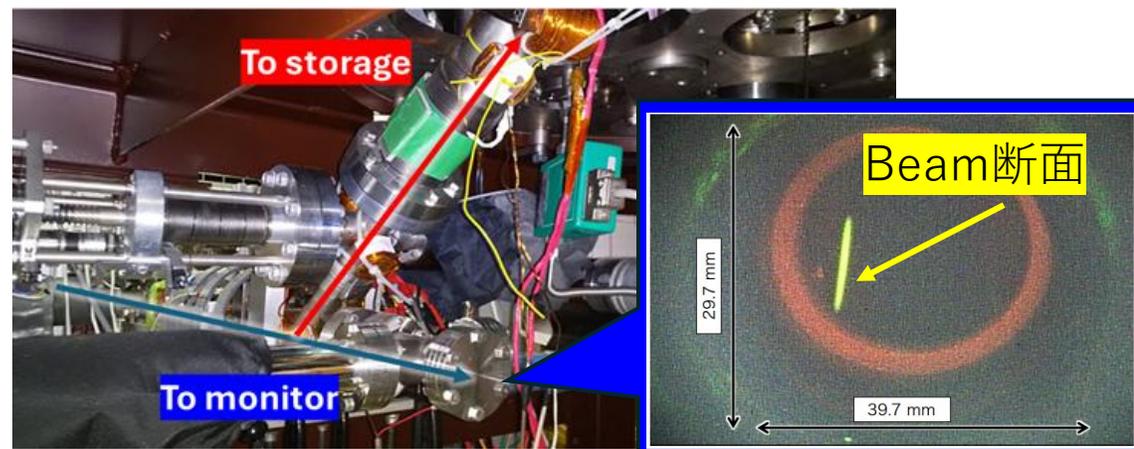
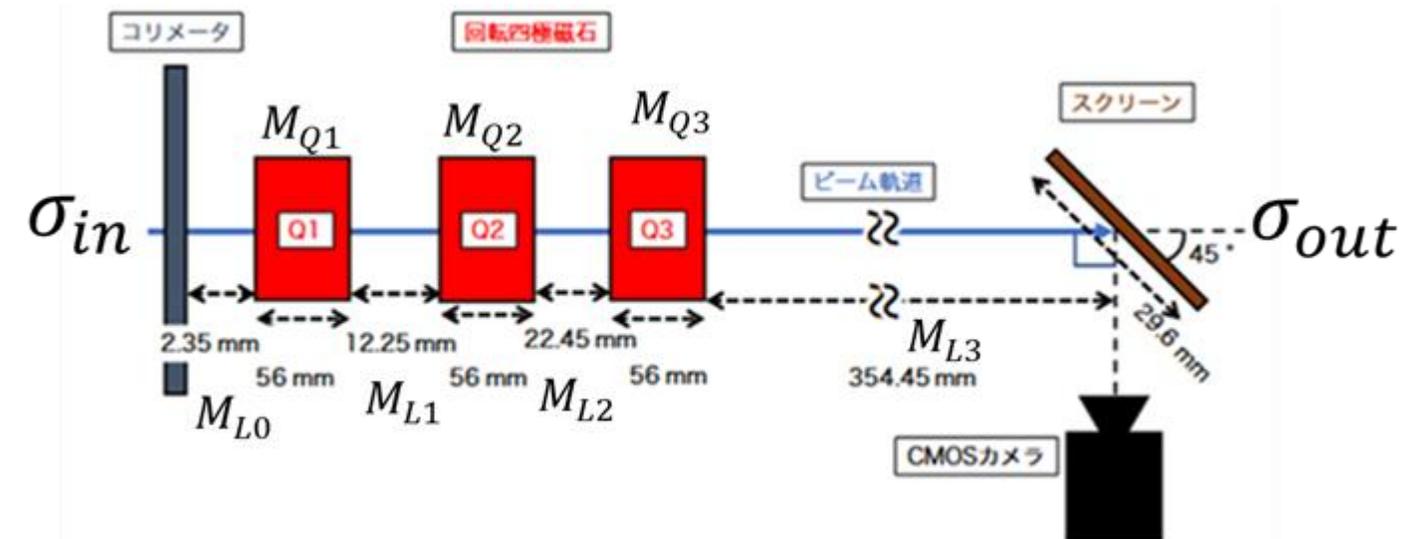
2-12 17:43:51 1S
2
LIVE CAMERA04 10S*8

- テスト実験の最終目的：ビーム蓄積試験完了 → 本講演で結果報告
- 3次元らせん軌道入射の実証経験を本番実験へ活かす。

科研費+KEKのサポート
基盤研究B:2014~2018,基盤研究 A 2019~2022

4. 実証実験

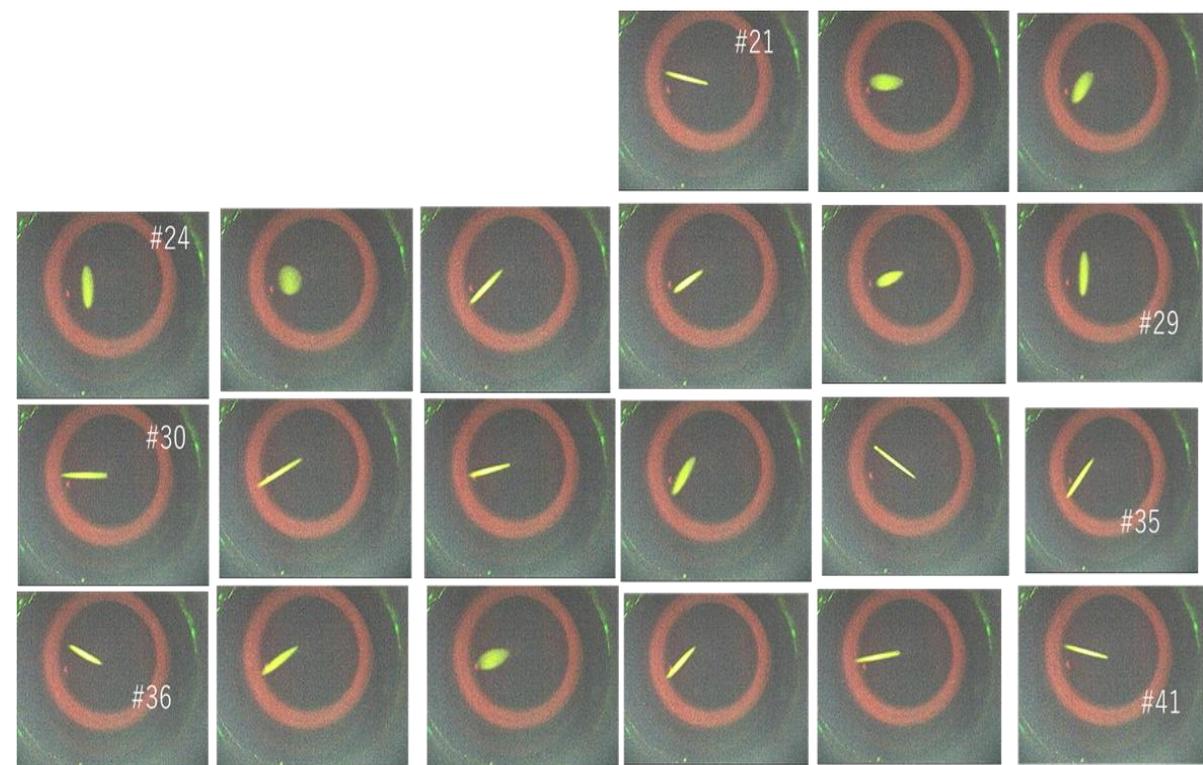
- DCビーム運転：直線部横方向位相空間の制御→輸送ライン転送行列の理解&シグマ行列測定



- 終点の σ_{out} の部分成分の測定値と輸送ライン転送行列 M を用いて、始点の σ_{in} 行列を得る。
- Q-scan法も併用

□ 独立変数は10個

$$\sigma = \begin{bmatrix} \langle xx \rangle & \langle xx' \rangle & \langle xy \rangle & \langle xy' \rangle \\ \langle x'x \rangle & \langle x'x' \rangle & \langle x'y \rangle & \langle x'y' \rangle \\ \langle yx \rangle & \langle yx' \rangle & \langle yy \rangle & \langle yy' \rangle \\ \langle y'x \rangle & \langle y'x' \rangle & \langle y'y \rangle & \langle y'y' \rangle \end{bmatrix}$$

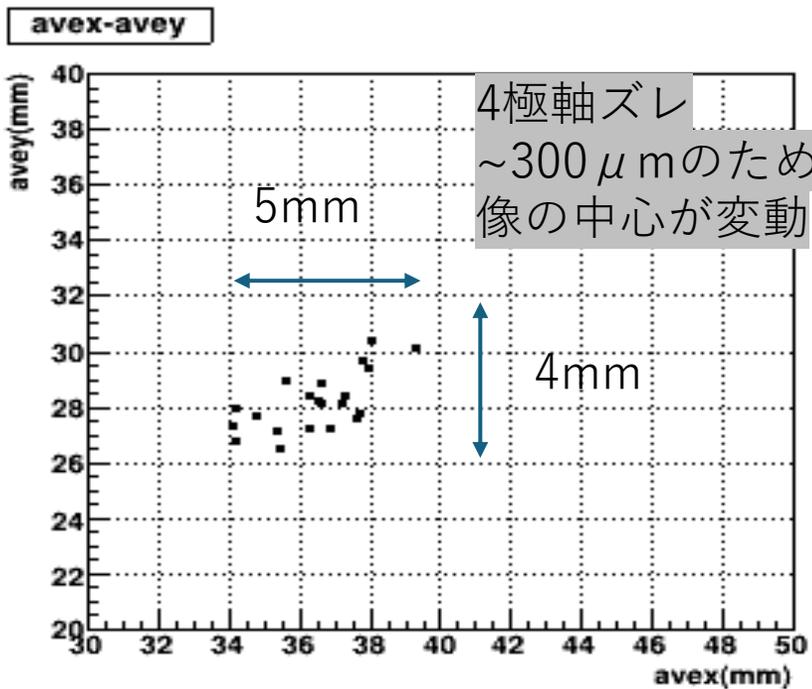
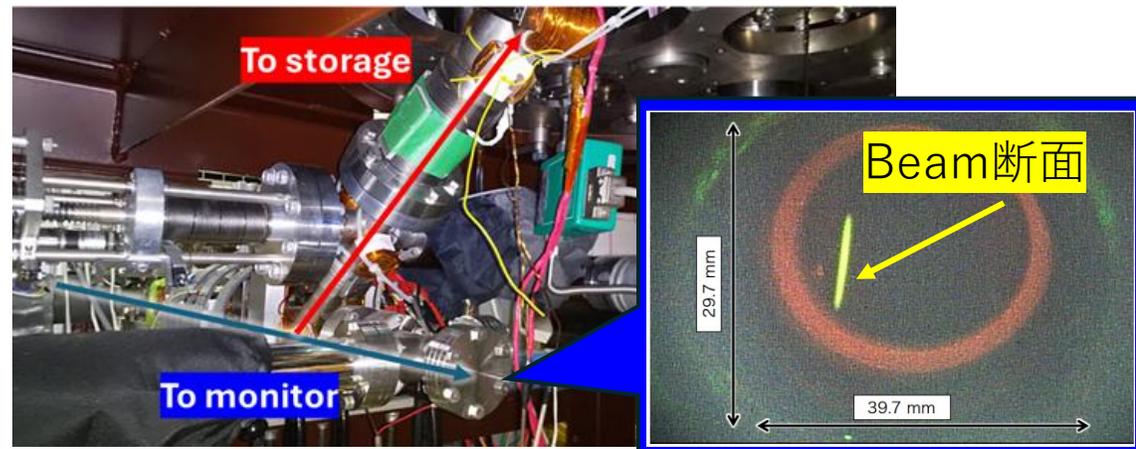
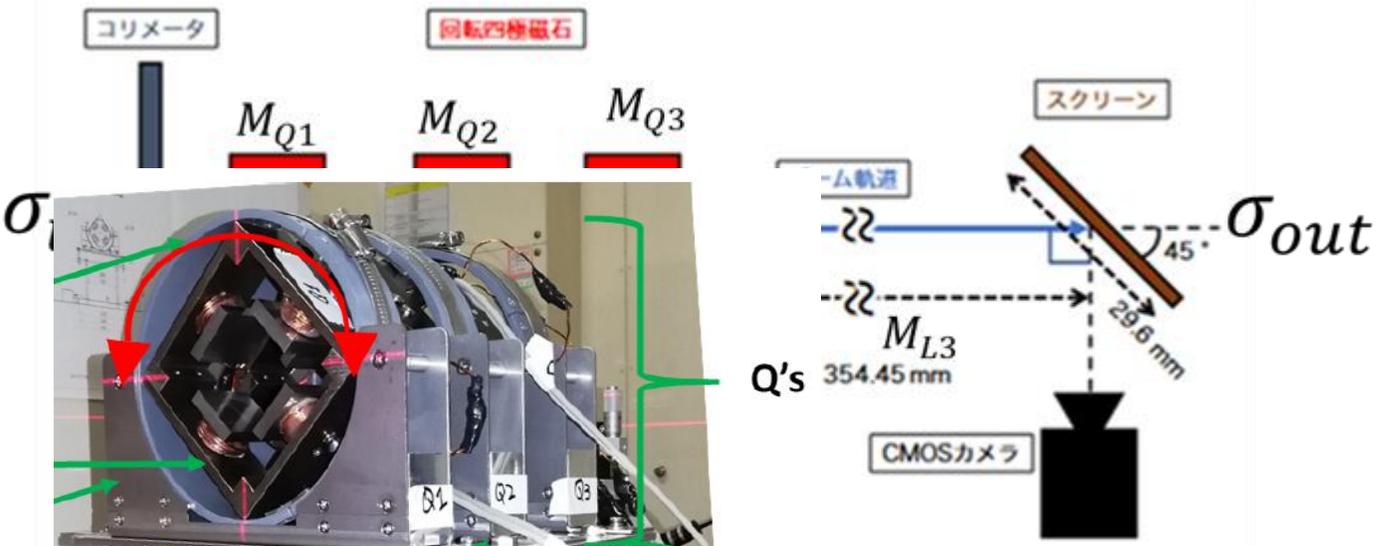


3つの回転4極は任意の角度 ϕ

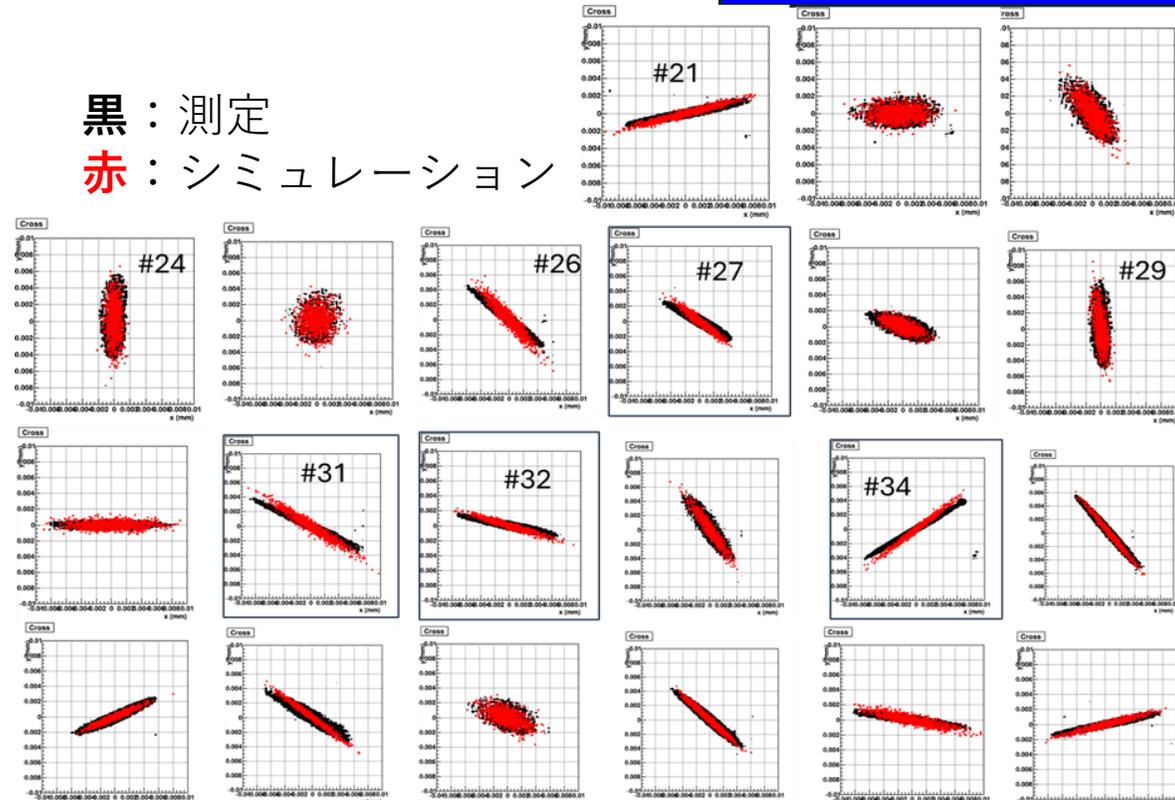
$$M_Q = R_\phi^{-1} N_Q R_\phi, \quad R_\phi = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi & 0 \\ 0 & \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi & 0 \\ 0 & -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix}$$

4. 実証実験

- DCビーム運転：直線部横方向位相空間の制御→輸送ライン転送行列の理解&シグマ行列測定



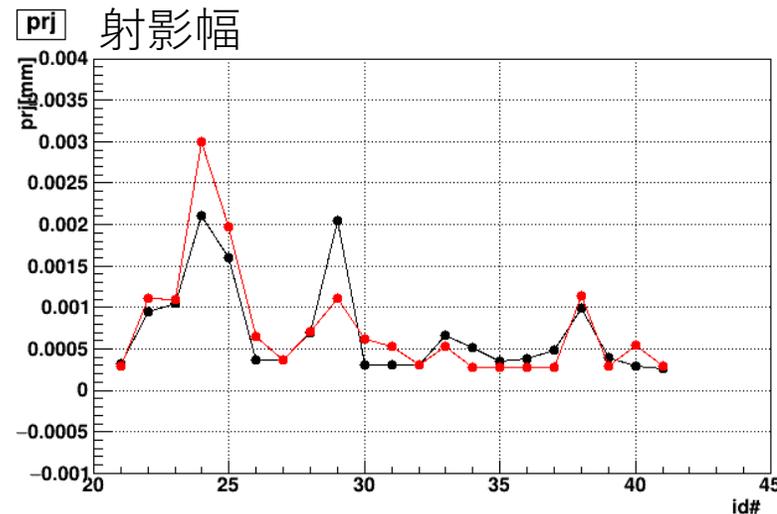
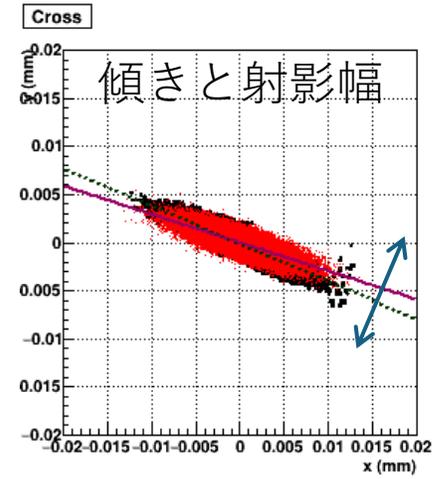
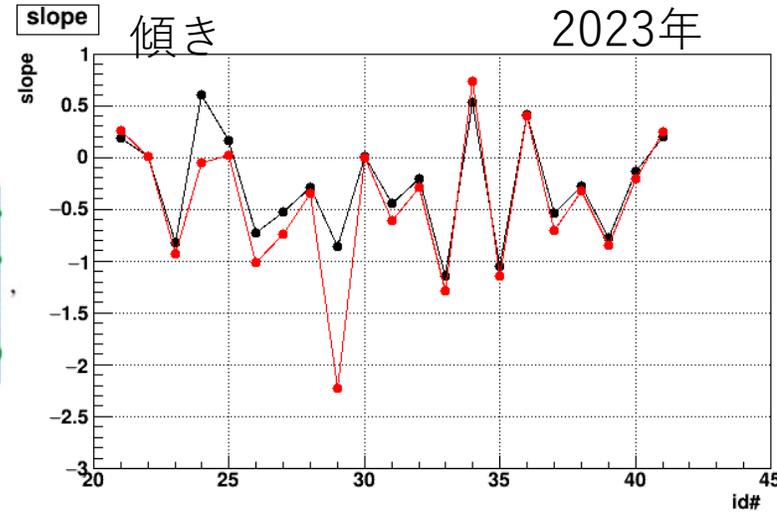
黒：測定
赤：シミュレーション



1 前頁で紹介した21通りのモニター部画像から求めた始点のシグマ行列と転送行列から算出した結果と比較をする。

$$\sigma_{out} = M\sigma_{in}M^t$$

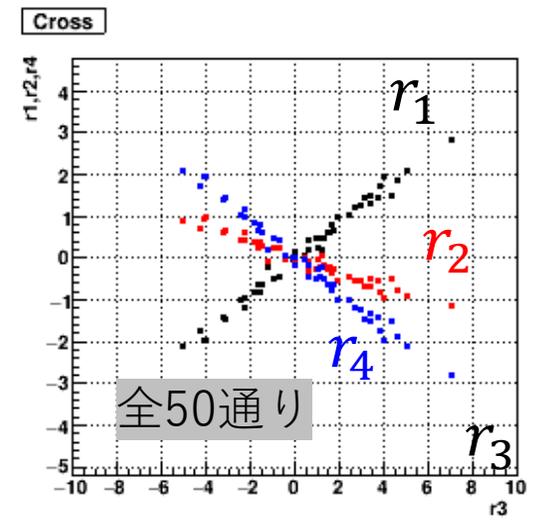
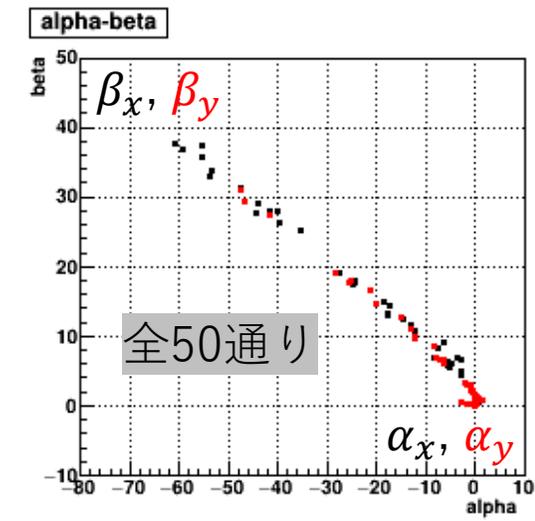
$$\sigma = \begin{bmatrix} \langle xx \rangle & \langle x'x \rangle & \langle xy \rangle & \langle x'y \rangle \\ \langle x'x \rangle & \langle x'x' \rangle & \langle x'y \rangle & \langle x'y' \rangle \\ \langle yx \rangle & \langle y'x \rangle & \langle yy \rangle & \langle yy' \rangle \\ \langle y'x \rangle & \langle y'x' \rangle & \langle y'y \rangle & \langle y'y' \rangle \end{bmatrix}$$



2 実証実験直線部で生成したビームのTwissを算出

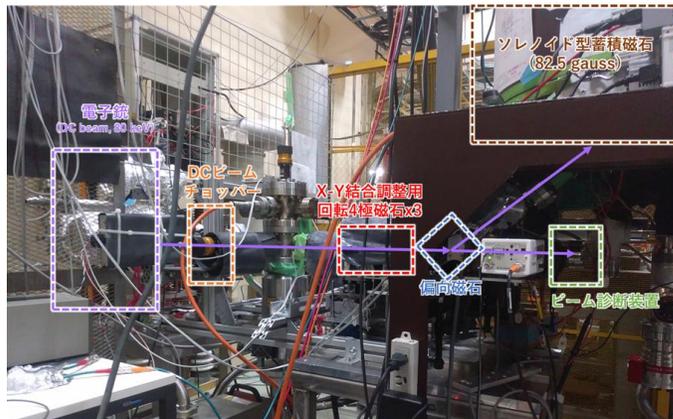
- 前項で紹介した21通り等から、出口の Twiss parameter の取りうる領域を確認。

$$M = U_{out}^{-1}D, \quad U = \begin{bmatrix} \mu & 0 & -r_4 & r_2 \\ 0 & \mu & r_3 & r_1 \\ r_1 & r_2 & \mu & 0 \\ r_3 & r_4 & 0 & \mu \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} \beta_x & -\alpha_x & & 0 \\ -\alpha_x & \gamma_x & & \\ & & \beta_y & -\alpha_y \\ & & -\alpha_x & \gamma_x \end{bmatrix}$$



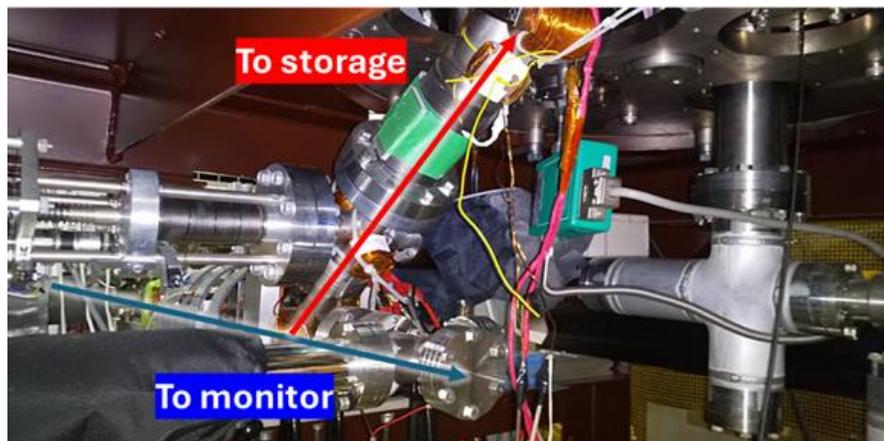
直線部、 α が常に負（常に発散）だった・・・
ことが後になって分かった。

蓄積槽へ



蓄積槽内部 (DCビーム運転)

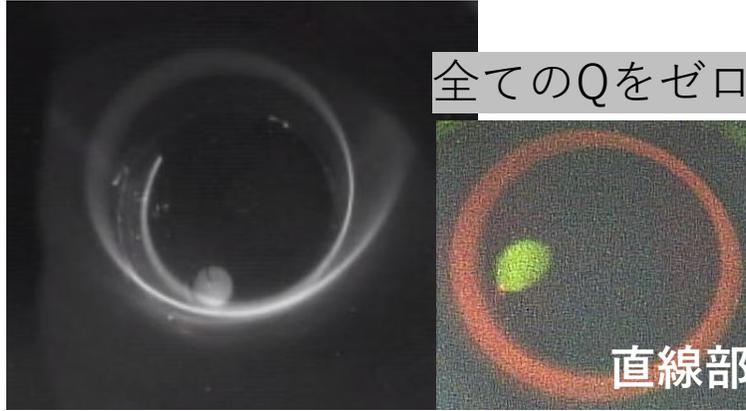
- 作動排気により、蓄積層内部は窒素ガス (7E-3 torr)を入れる (コリメータ部をインダクタンスにし、電子銃部の真空はキープ)
- 螺旋軌道の可視化
- 2本のワイヤースキャンでDCビームのZ分布を測定



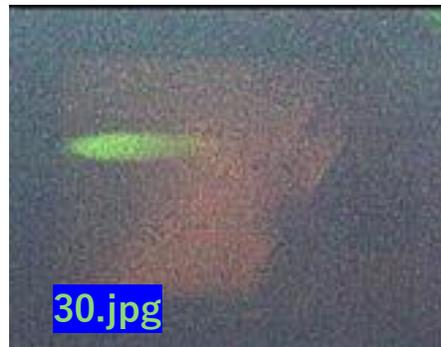
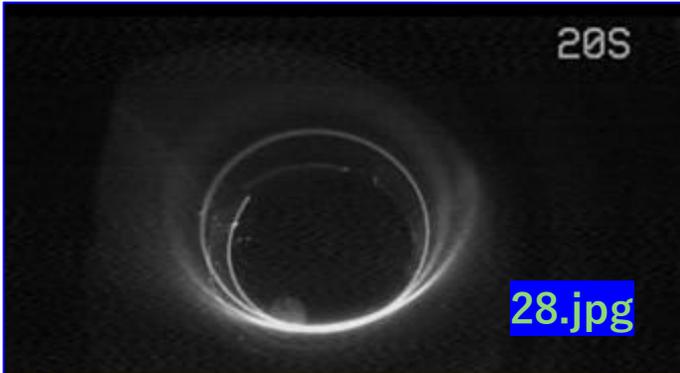
蓄積槽内部 (パルスビーム運転)

- DCビームを切り出す
- 垂直キッカーで弱収束磁場内にパルスビームを誘導
- シンチレーティングファイバーでビームの時間・Z分布を測定
- **パルス幅よりも十分長い時間、ビーム信号を検出できるか？**

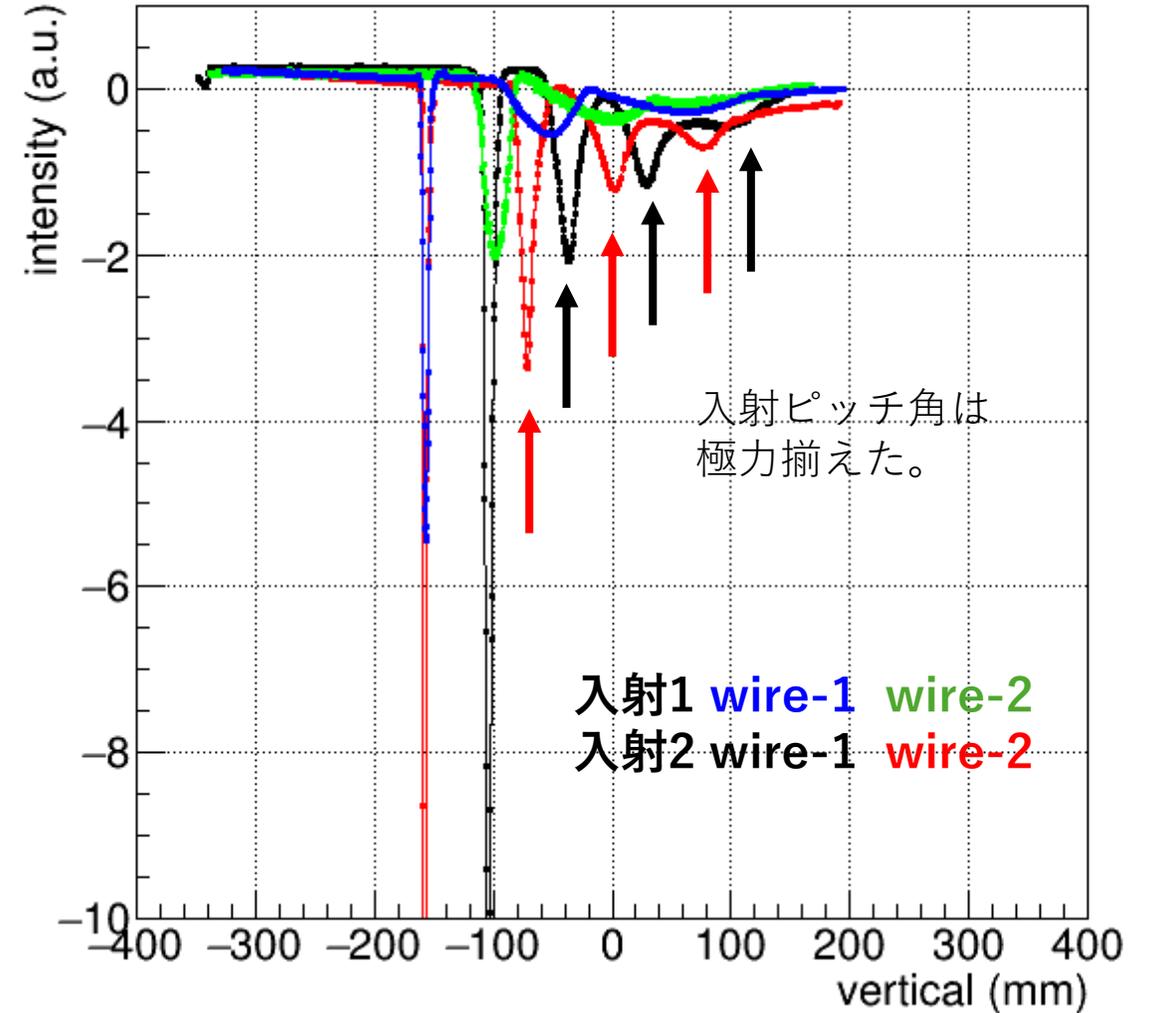
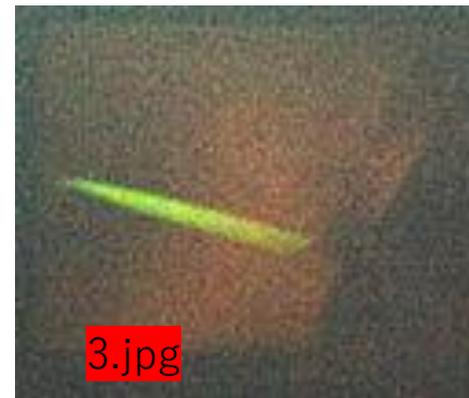
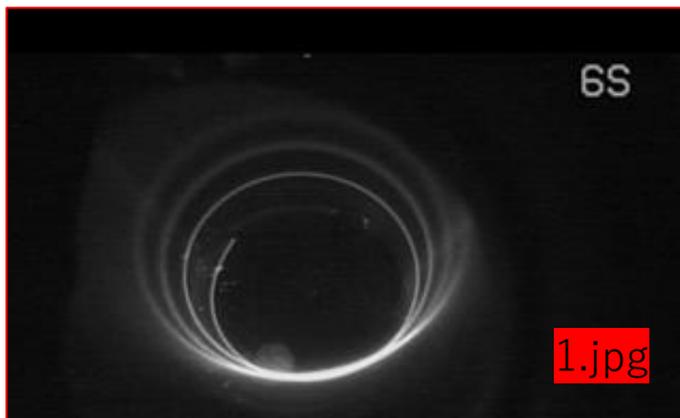
wire-1&2



入射1



入射2



◆ シミュレーションで4極設定のスタート地点を決め、現場で調整して「最善」を出した

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROB/FROB05.pdf

蓄積に向けた準備-1: パルスビーム切り出し

東大・松下

Collimator: $\phi 3\text{ mm}$
Reflection angle: 40 mrad
500 mm
5 mm

蓄積槽上部より入射軌道撮影
DCビーム
パルスビーム
露光時間: 20 s
露光時間: 100 s

鉛直方向にワイヤスキャン
Intensity (a.u.)
vertical (mm)

チョッパー装置により、ビーム軌道が変わるかどうかが、窒素ガス電離発行を利用した3次元軌道の画像確認に加え、ワイヤスキャナーで確認

準備3: キッカーコイルを電流源に接続

東大・松下、
茨大・小田

キッカーパルス電源
マッチング素子
ログスキーコイル
フィードスルー部分拡大

- 蓄積チャンバーの蓋を閉じた後、上から撮影した俯瞰図
- キッカーに流す電流波形は、ログスキーコイルで測定
 - 印加したHV: 5kV
 - 電圧 --> 電流への変換

HV = 5kV
Current [A]
Time [μs]

**パルス電源
PPJ製**

準備-2: キッカーコイル設置

東大・松下、
茨大・小田

- 2022年3月末、蓄積槽内部に、キッカーコイルを設置
- キッカーコイルには、ビームがぶつかりチャージアップ対策のため導電性塗料を塗布

+5kV パルス電流源
径方向パルス磁場 $B_r(t)$

入射口
フィードスルー接続用の端子
蓄積槽内部 (上から撮影)

準備4: 蓄積槽内のモニター

東大・松下

蓄積磁石内部の検出器 (横から見た図)

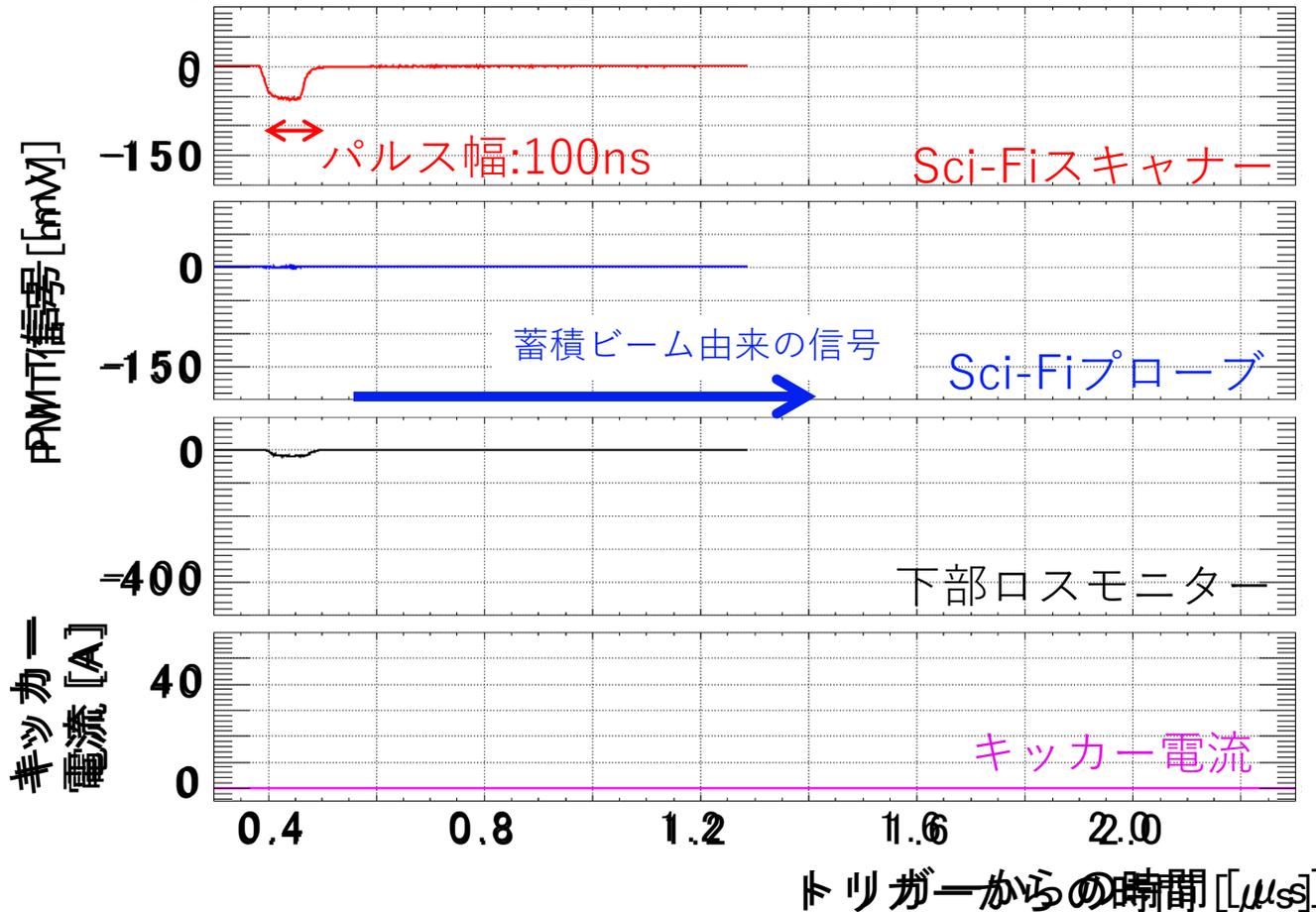
12 cm 12 cm
17 cm 15 cm
3 cm
17 cm
3 cm
Sci-Fi
Sci-Fi スキャナー
Sci-Fi プロブ
キッカーコイル
磁石中心
下部ロスモニター
Sci-Fi
下部ロスモニター

- ビーム調整、蓄積に成功/失敗したビームを検出するための、3種類の検出器
 - Sci-Fiプロブ: 蓄積ビーム用
 - Sci-Fiスキャナー: ビーム調整用
 - 下部ロスモニター: 反射したビーム用
- シンチファイバー(Sci-Fi)を使用
 - 光信号をPMTで電気信号に変換し、オシロで読み出し

蓄積ビーム測定

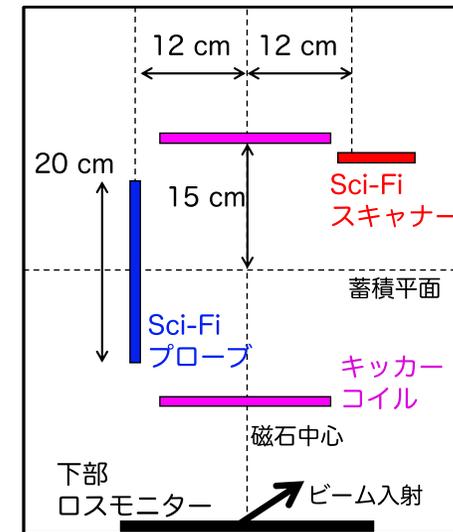
- パルス幅100 nsのパルスビームを入射し、キック、測定
 - 入射ビーム：パルス幅100ns、繰り返し5Hz
- 蓄積ビーム由来の信号確認に成功
 - 蓄積ビームの運動状態の詳細な理解はまだ

キック有り



50 shotsの平均化波形

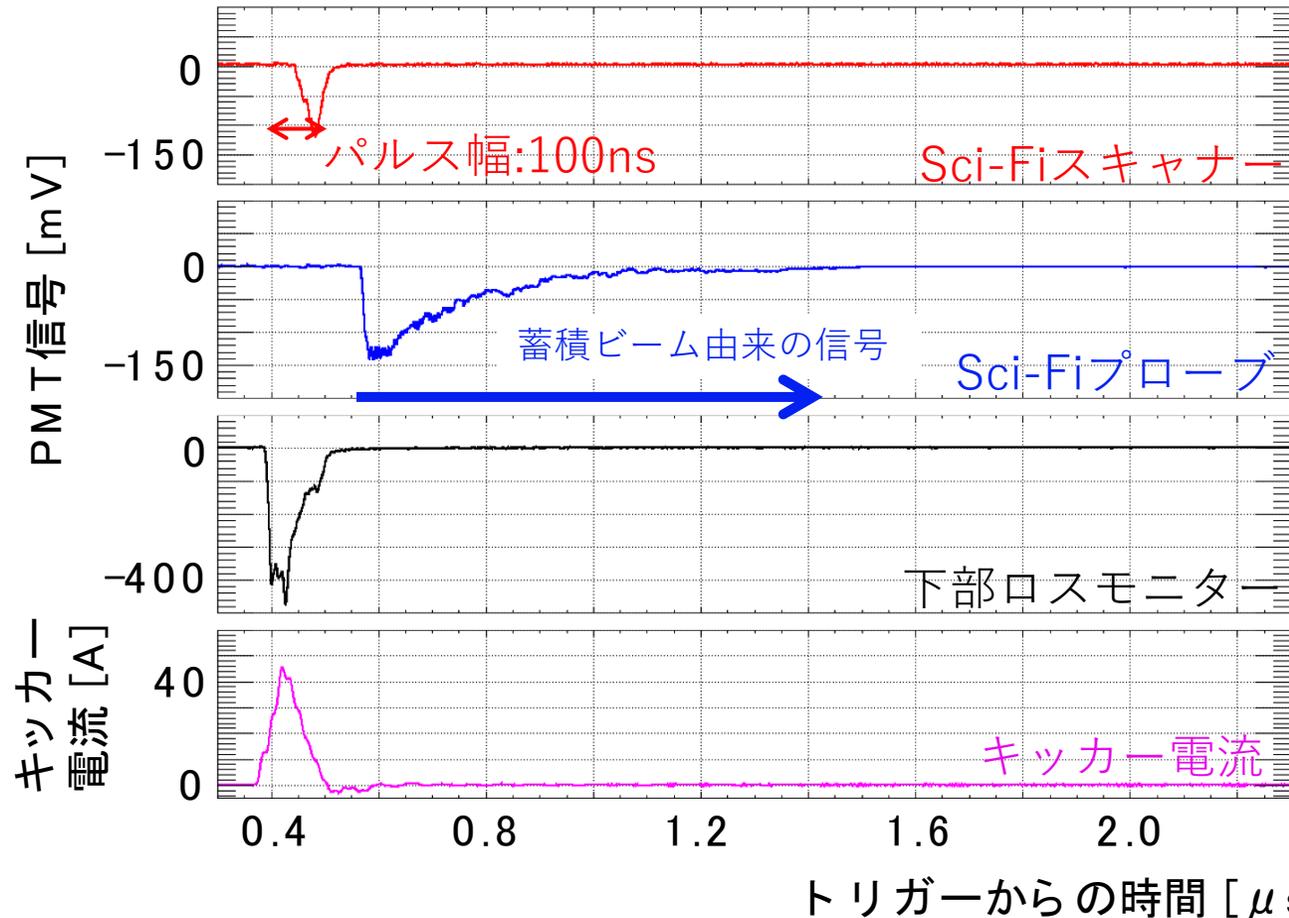
検出器の配置
(蓄積磁石を横から見て)



蓄積ビーム測定

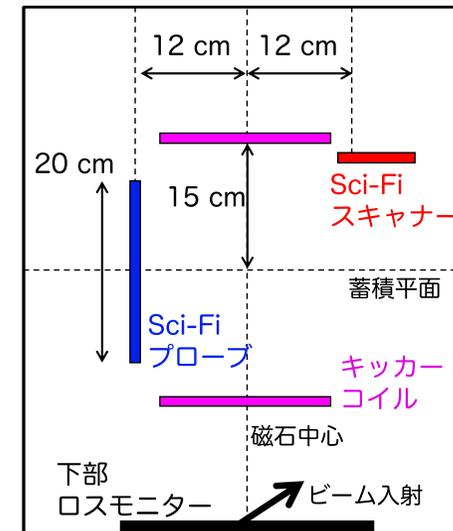
- パルス幅100 nsのパルスビームを入射し、キック、測定
 - 入射ビーム：パルス幅100ns、繰り返し5Hz
- 蓄積ビーム由来の信号確認に成功
 - 蓄積ビームの運動状態の詳細な理解はまだ

キック有り

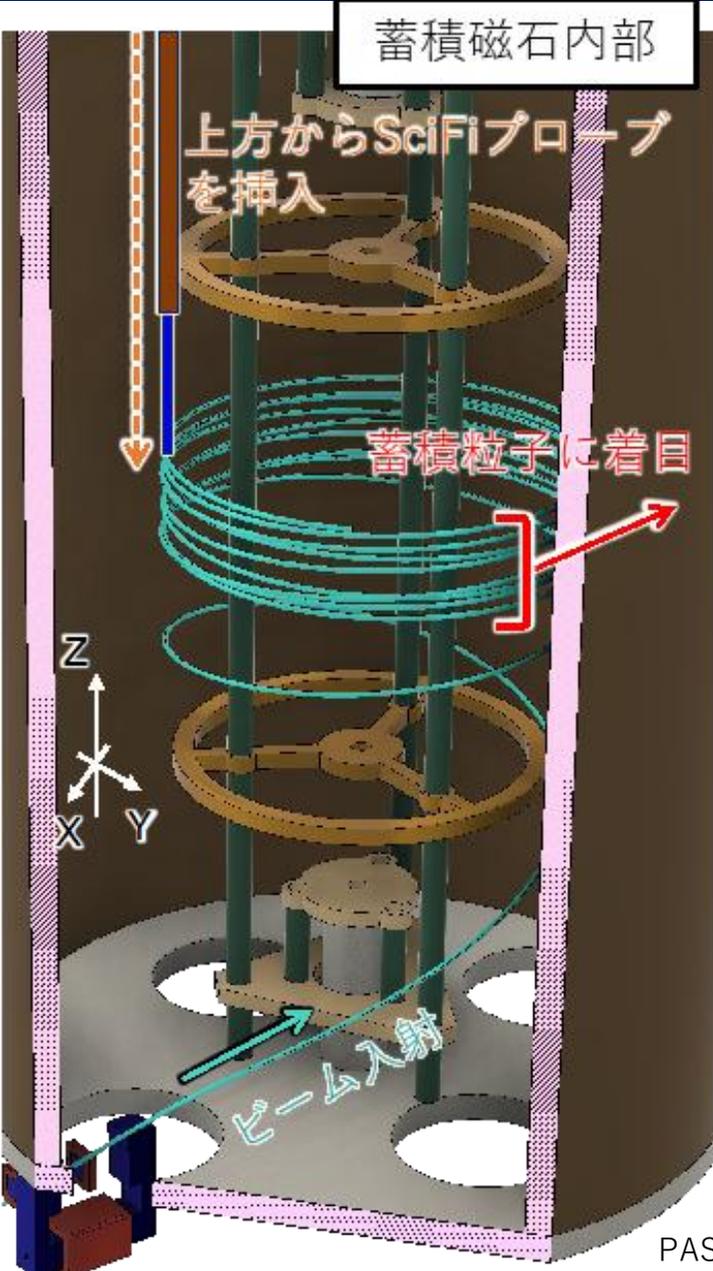


50 shotsの平均化波形

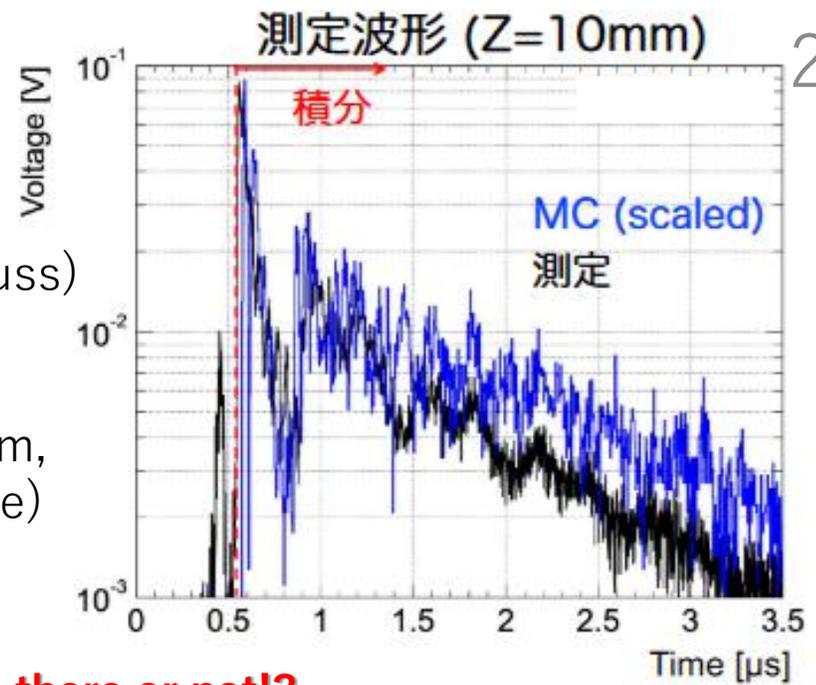
検出器の配置
(蓄積磁石を横から見て)



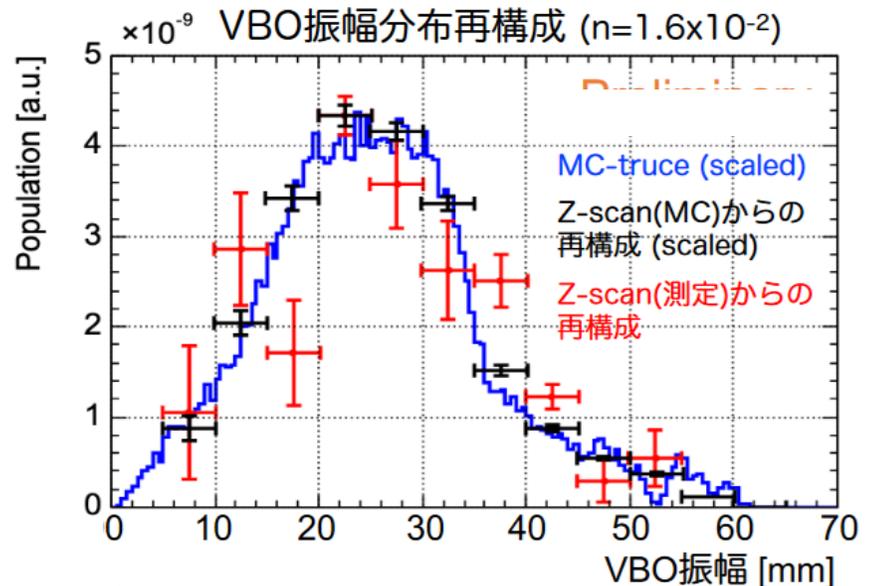
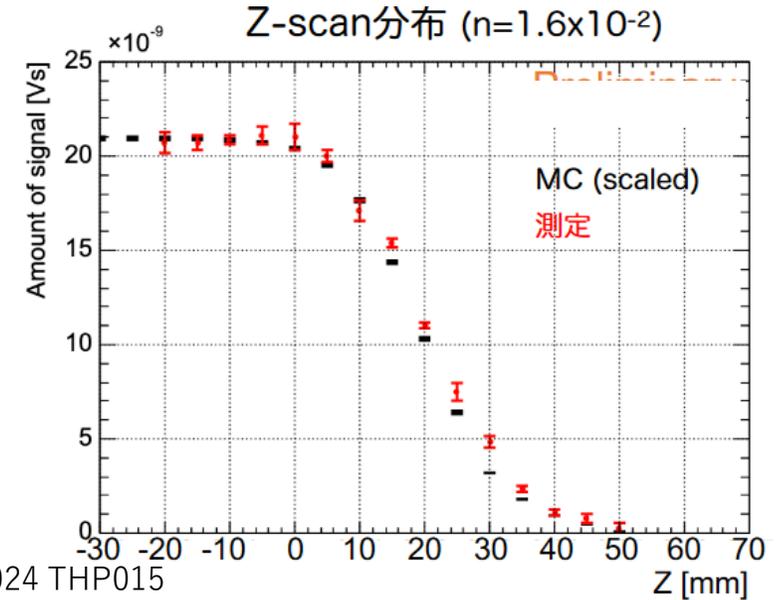
パルスビーム蓄積信号-2



- Condition of beam injection
- 100ns pulse, 25Hz
 - Apply the vertical kick (45A, <1gauss) coincide with the pulse
- Measurement
- Set SciFi edge at $(-30\text{mm} < z < 50\text{mm})$, every 5mm step from the mid plane)
 - Accumulate 1000shots to detect averaged waveform



**How to judge whether stored beam is there or not!
The beam should be stored within weak focusing field potential**



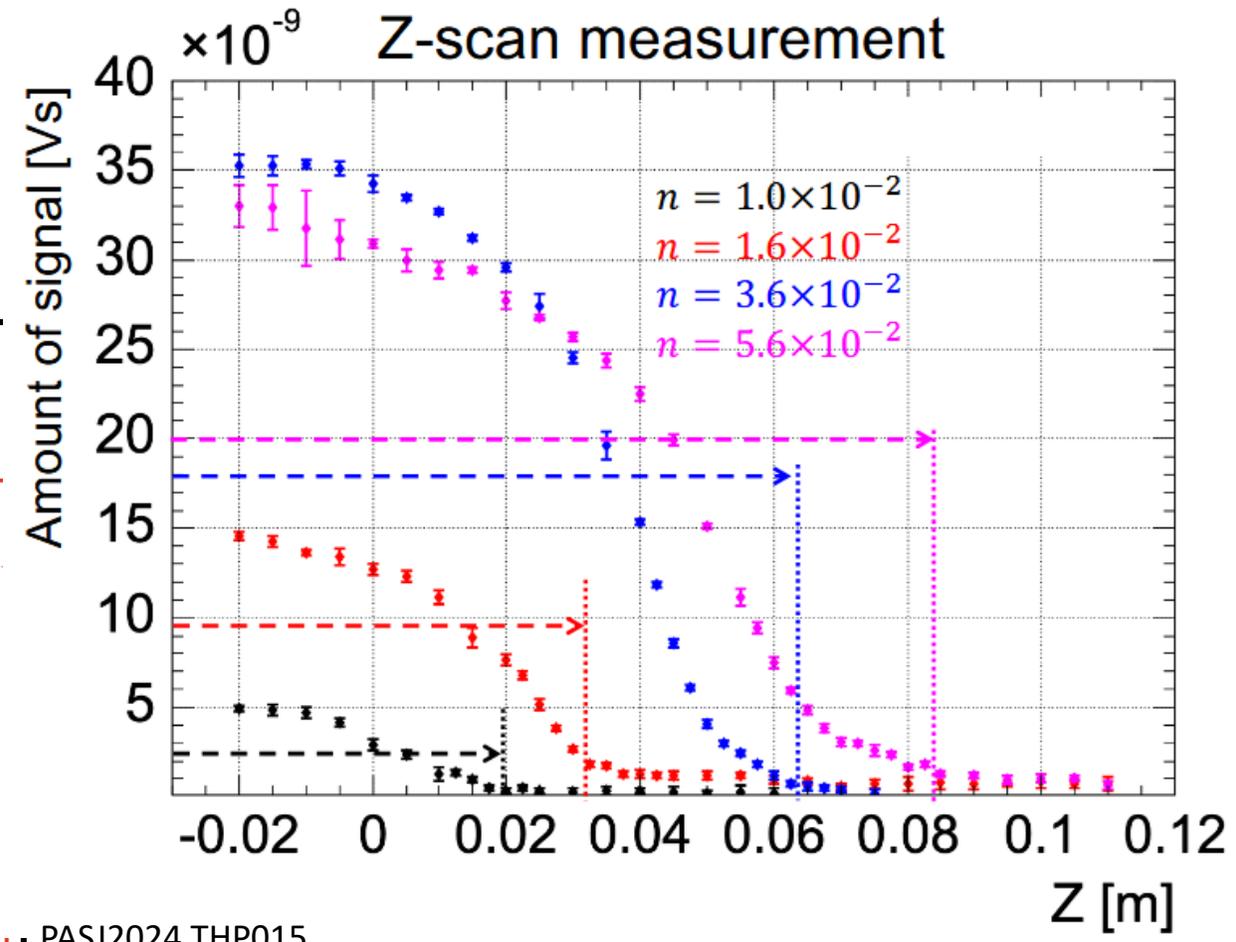
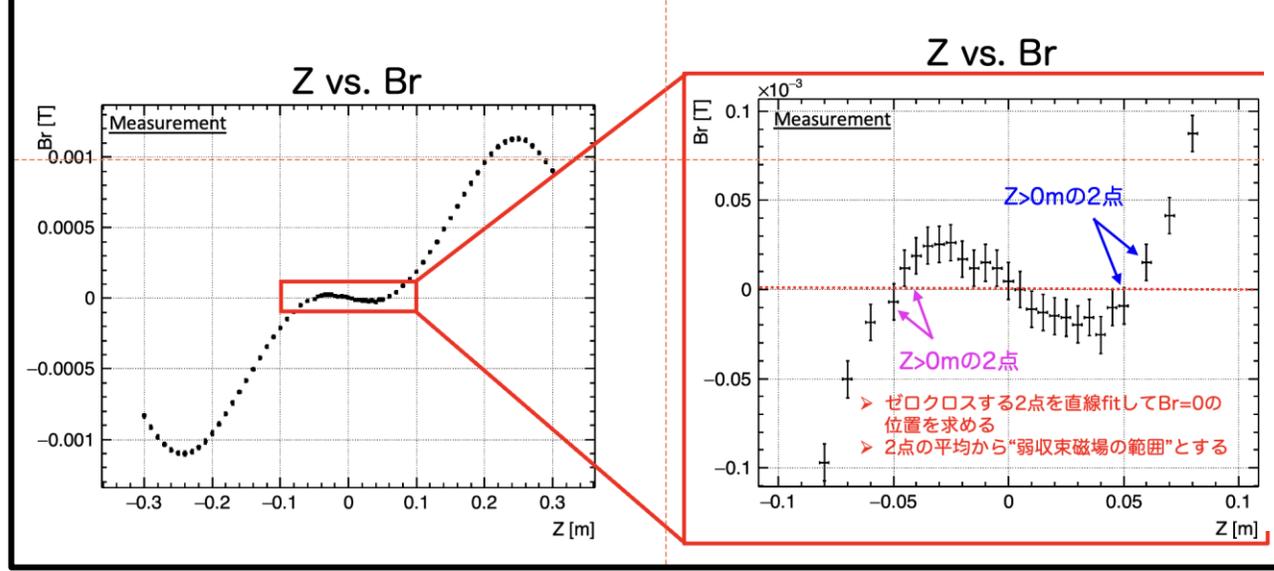
弱収束の強さが可変である特徴を活かして

1. 磁場測定から求めた、蓄積可能範囲
2. 蓄積ビーム測定から求めた、ビーム分布の端

を比較する。

Field condition: (I_{main} , I_{aux})	Length of storage region [m]	Edge of Z-scan dist. [m]
(9.60A, 8.72A)	$(9.1 \pm 0.3) \times 10^{-2}$	$(5.6 \pm 0.2) \times 10^{-2}$
(9.20A, 7.16A)	$(7.5 \pm 0.3) \times 10^{-2}$	$(4.2 \pm 0.1) \times 10^{-2}$
(8.82A, 5.67A)	$(5.0 \pm 0.5) \times 10^{-2}$	$(2.7 \pm 0.2) \times 10^{-2}$
(8.70A, 5.20A)	$(3.9 \pm 1.2) \times 10^{-2}$	$(1.2 \pm 0.3) \times 10^{-2}$

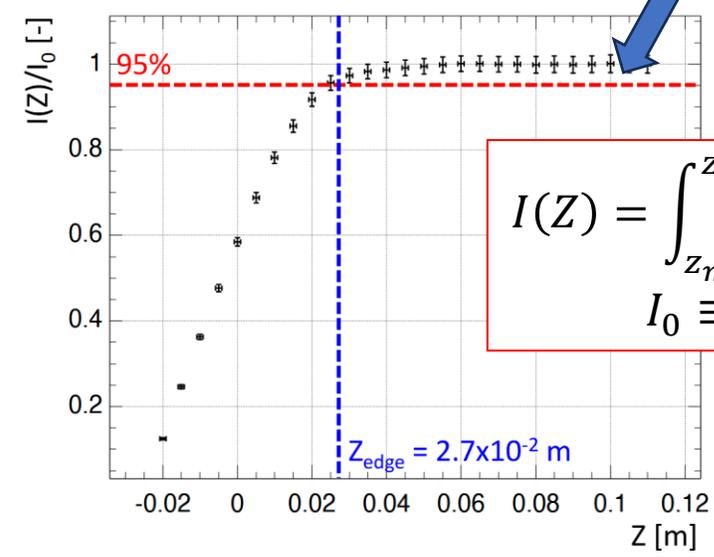
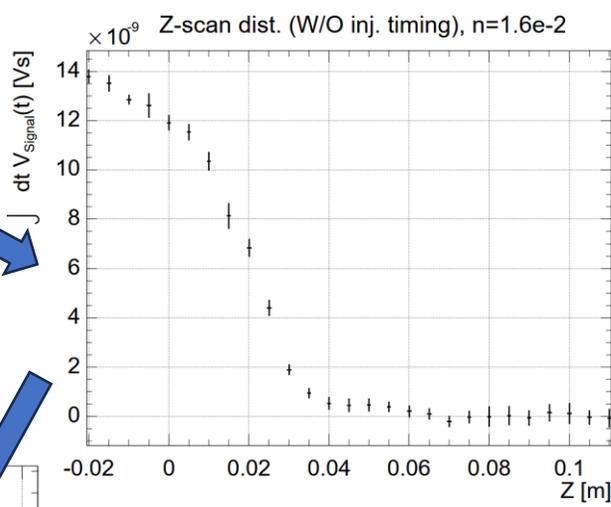
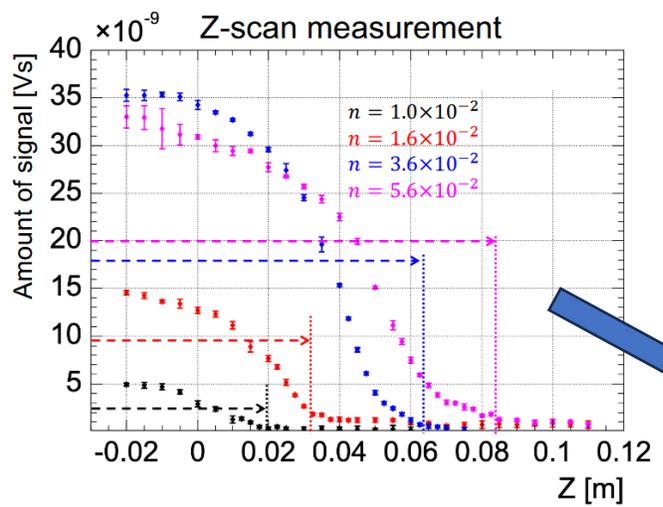
- Z vs. Brの測定結果から、弱収束磁場の範囲を計算
- 測定結果の例 (条件: (I_{main} , I_{aux}) = (8.82A, 5.67A)のZ vs. Br分布)



PASJ2024 THP015

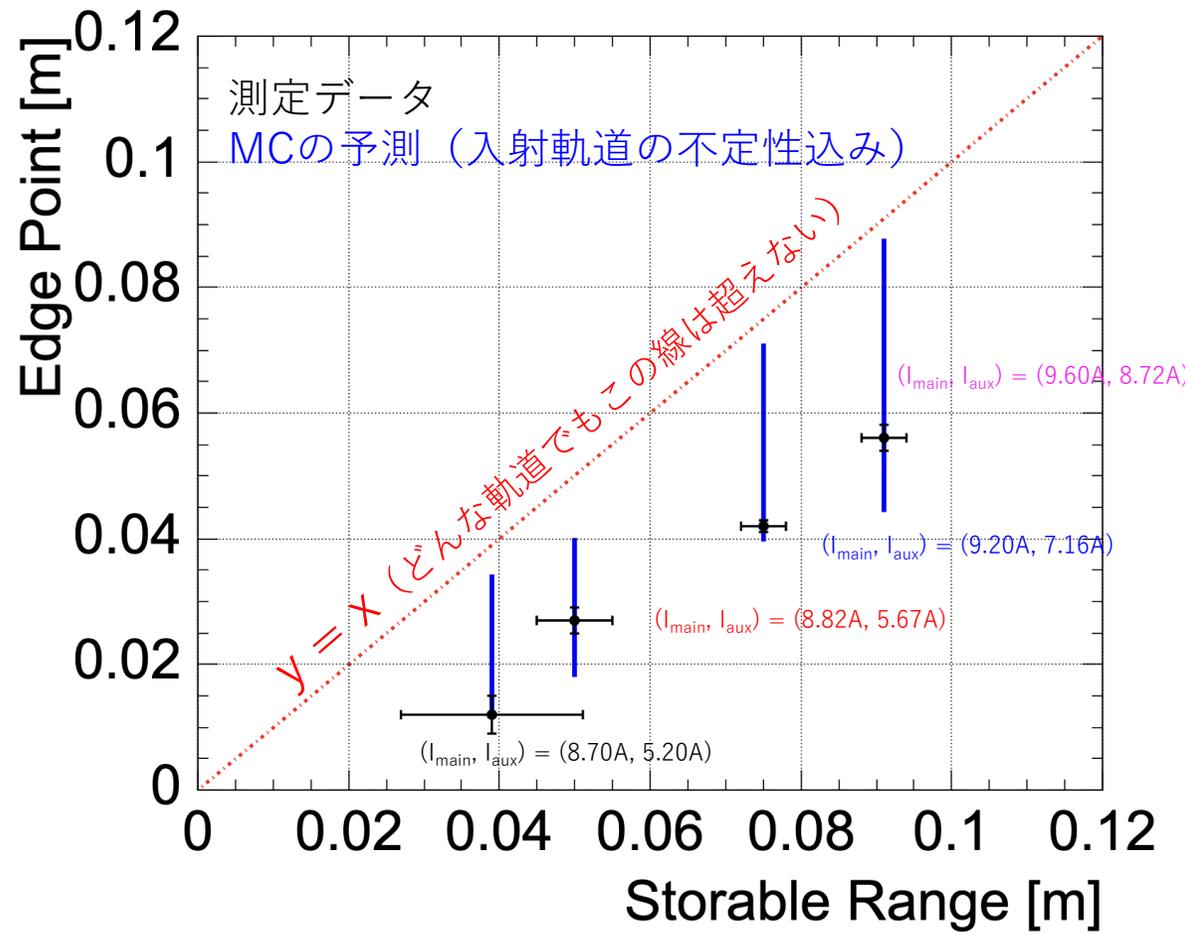
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2024/proceedings/PDF/THP0/THP015.pdf

蓄積ビーム測定から求めた、
ビーム分布の端を求める



$$I(Z) = \int_{Z_{min}}^Z dz' Q_{signal}(z')$$

$$I_0 \equiv I(Z_{max})$$



結論：
蓄積ビーム分布が弱収束磁場形状に依存
ビーム蓄積が弱収束磁場によるものであることを確認

1. イントロ
2. 3次元入射とは
3. 本番実験の入射設計の現状

4. 実証実験

- 目的と成果 (DCビーム運転、パルスビーム運転)
- 実証実験から得た知見と今後の展望

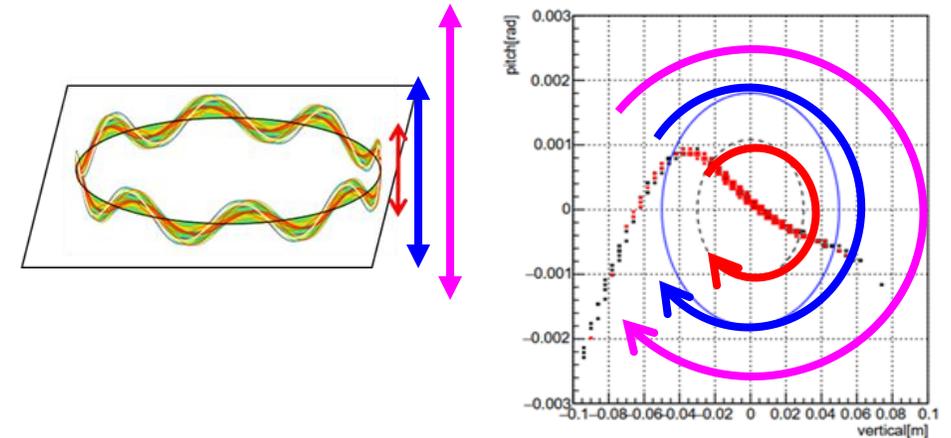
5. まとめ

- i. 実機の3分の1サイズの更にコンパクト軌道でできることは？
- ii. (電子ビームを直接測る方式でできること)
- iii. 螺旋軌道ビームの可視観測 (蓄積槽はほぼ空っぽ)
✓ 基準軌道が直線ではない=どこにビームが居るのか、最初に捕まえるのが重要
- iv. ビーム運動を電磁気学との比較。特に、直線部で横方向位相空間の制御
- v. 垂直キッカー、弱収束磁場を用いた「ビーム蓄積」の実現
- vi. 弱収束磁場の強度を $n=1E-2 \sim 5.6E-2$ まで可変 (本番は $n=1.5E-4$ に固定) し、蓄積ビーム分布の変動を観測

現在進行中：毎年の素核研レビュー

- 蓄積磁石内部のビーム調整・ビーム診断機構
- 垂直キッカー・・・まだまだあります。

実証実験の蓄積ビームで何を確認できたのか



- ◆ ビームパルスが長いので z' が積分されてしまい、VBO運動の特徴的な周波数や、 z' そのものを測定しているわけではない。
- ◆ 振動現象の積分値の弱収束の強さとの関連を測ったことになる。

2030年コミッショニング開始に向けて頑張ります。



実験コラボレータ募集中。

謝辞

KEK入射器の皆様、運転員の皆様
岡安様、矢野様、諏訪田様

KEKB真空 久松様

KEK機械工作センターの皆様、高富様

ネクストクリエイイトサービス 牛久様
(蓄積磁石、4極、2極磁石)

PPJ 徳地様、皆様 (キッカー電源)

実験に関わった卒業生の皆様

(Rehmanさん、平山さん、小田さん、小久保さん、
中村さん、杉田さん、大金さん、楊井さん、
中沢さん、、)

参照資料一覧

E-mail: hiromi.linuma.spin@vc.lbaraki.ac.jp

2024山形

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2024/proceedings/PDF/FRP0/FRP009.pdf

Muon g-2/EDM 実験用蓄積磁石の鉄ヨークチャンネル内磁場線形性の評価および中心軌道設計

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2024/proceedings/PDF/THP0/THP015.pdf

3次元らせん入射手法によるビーム蓄積の実証 **第21回年会 (第13回) 受賞**

2023船橋

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/THP0/THP04.pdf

J-PARC Muon g-2/EDM 実験用 ビーム蓄積磁石内部の強い X-Y 結合をもつビーム位相空間調整装置の仕様と設計検討

2022オンライン

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/TUP0/TUP036.pdf

J-PARC muon g-2/EDM 実験用ビーム入射キッカーの磁場設計

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROB/FROB05.pdf

J-PARC muon g-2/EDM 実験に向けた 3次元らせん入射実証実験

IPAC2025

<https://meow.elettra.eu/81/pdf/WEPM029.pdf>

TRAJECTORY DESIGN FOR PASSING THROUGH SOLENOID MAGNET FRINGE FIELD AND METHOD FOR ADJUSTING ITS STRONGLY X-Y COUPLED PHASE SPACE FOR THREE-DIMENSIONAL SPIRAL BEAM INJECTION



第20回年会 (第12回) 受賞者

小川 真治 THOA2

J-PARC muon g-2/EDM実験における精密な3次元ビーム入射のための蓄積ビームモニター

第21回年会 (第13回) 受賞者

松下 凌大 THP015

3次元らせん入射手法によるビーム蓄積の実証

PASJ2020 WEPP49

「高度な X-Y 結合を用いた 3 次元螺旋ビーム入射のための輸送区間のビーム制御
およびモニター手法の仕様」

DISCUSSIONS OF BEAM CONTROL AND MONITORING METHOD OF TRANSPORT
SECTION FOR 3-D SPIRAL BEAM INJECTION USING STRONG X-Y COUPLING

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WEPP/WEPP49.pdf

PASJ2014-SUP061

3次元らせん軌道ビーム入射のための
X-Y カップリングの大きいビームの調整・輸送ラインの設計

DESIGN OF A STRONGLY X-Y COUPLED BEAM TRANSPORT LINE
FOR A SPIRAL INJECTION

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUP0/SUP061.pdf

PASJ2020 FRPP46

g-2/EDM 精密計測用超電導磁石内設置能動磁気遮蔽型
ステアリング磁石の試設計

TRIAL DESIGN OF A STEERING MAGNET TO BE PLACED IN MUON STORAGE
MAGNET FOR G-2/EDM PRECISION MEASUREMENT

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/FRPP/FRPP46.pdf

PASJ2018 WEOM07

MRI サイズの小型リングへ入射するための高度の X-Y 結合を伴う
3次元螺旋入射手法の開発

DEVELOPMENT OF THREE-DIMENSIONAL SPIRAL BEAM INJECTION SCHEME
WITH X-Y COUPLING BEAM FOR MRI SIZED COMPACT STORAGE RING

CONFERENCES

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEOM/WEOM07.pdf