



茨城大  
水戸キャンパス



J-PARC

茨城大  
東海サテライトキャンパス  
@IQBRC

KEK ☆

# 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次元螺旋軌道入射の開発

茨城大学・飯沼裕美

KEK・阿部 充志 生出 勝宣, 大沢 哲, 佐々木 憲一, 中山 久義,  
久松 広美, 深尾 祥紀, 古川 和朗, 三部 勉,  
総研大・M.A. Rehman

2018/9/23

**J-PARC**

KEK ☆

**Tokyo**

**J-PARC Facility  
(KEK/JAEA)**

**P, 3GeV**

**μ-beam**

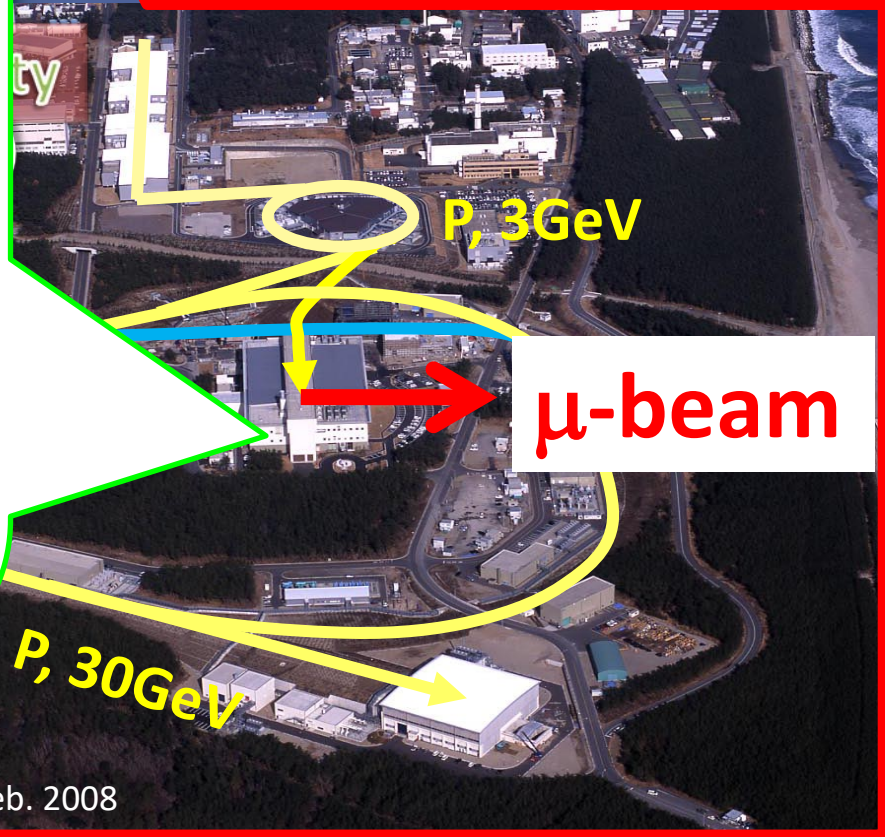
**P, 30GeV**

Bird's eye photo in Feb. 2008

Apply MRI technology

$$\vec{B}, \vec{\omega}_{\text{SPIN}}$$

J-PARC

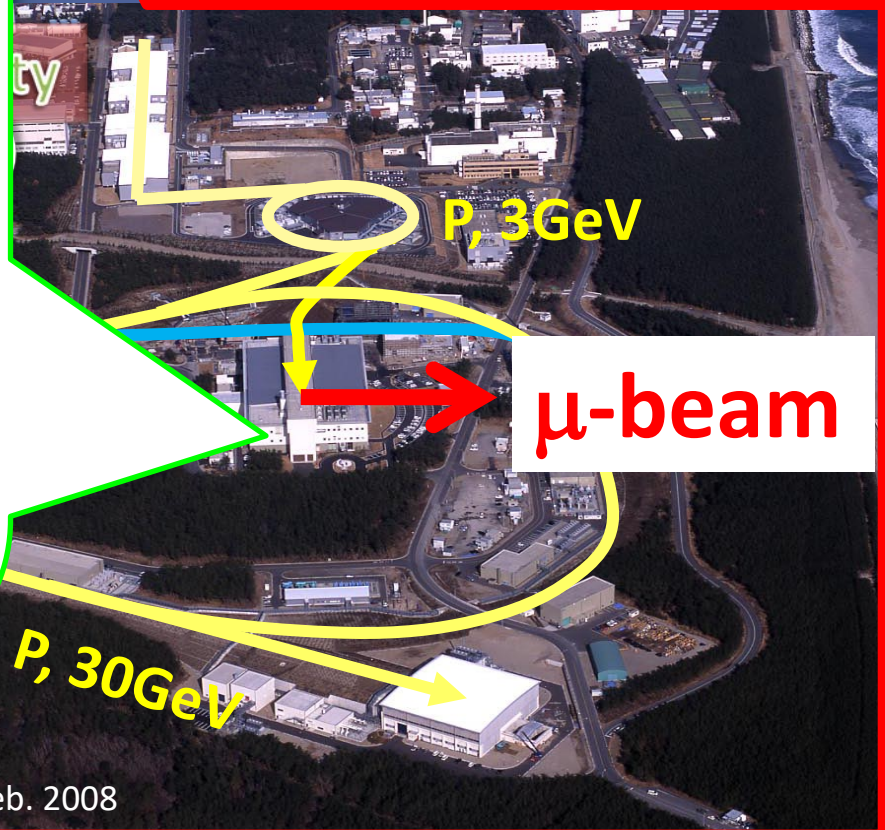


Bird's eye photo in Feb. 2008

Apply MRI technology



J-PARC

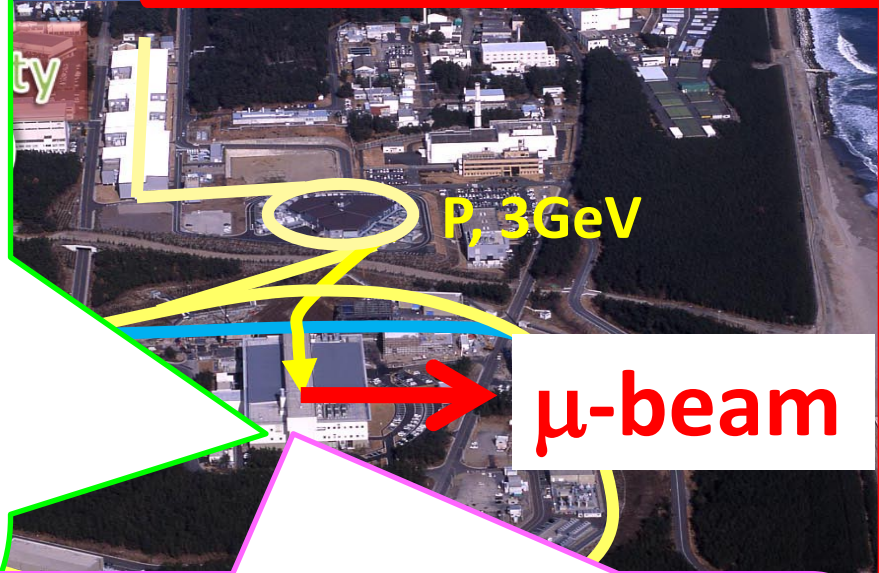


Bird's eye photo in Feb. 2008

Apply MRI technology



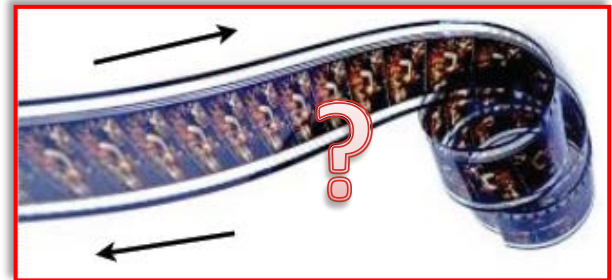
J-PARC



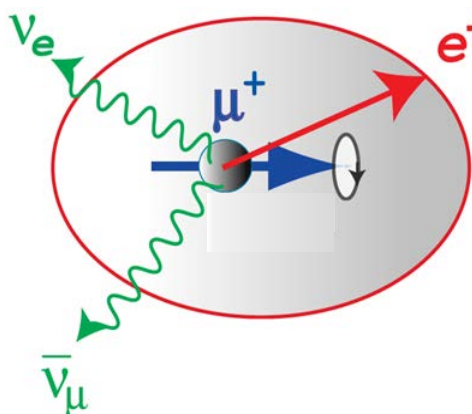
$\mu$ -beam

## 基礎物理実験

- 標準理論を超える?
- 時間反転対称性の破れ



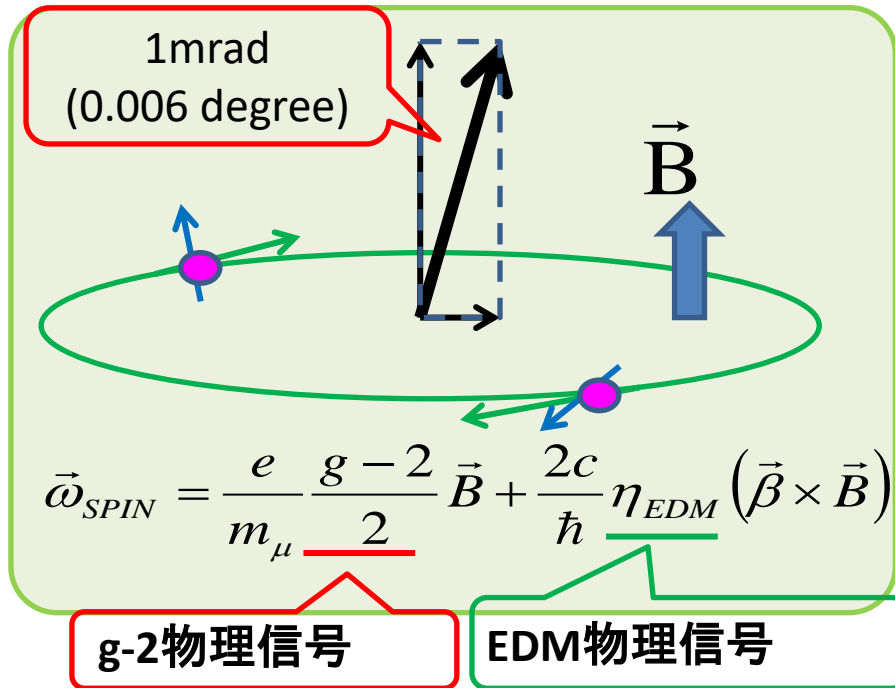
# 新しい物理はミュオンスピン歳差運動に現れる



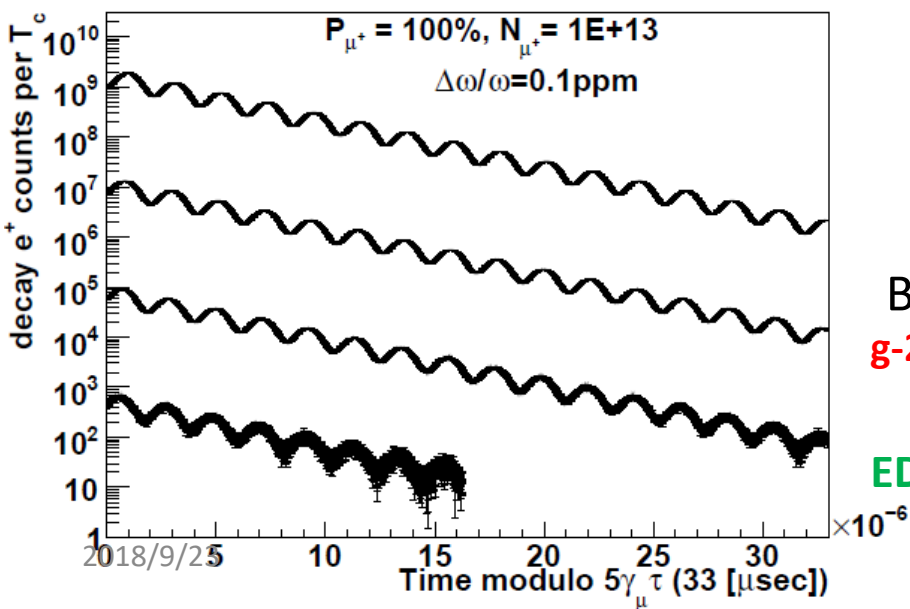
$e^+$  歳差運動周期と、角運動量ベクトルを精密測定

$$\vec{\mu}_s = \frac{g}{2} \left( \frac{e}{m_\mu} \right) \vec{S}$$

$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\gamma\tau}\right) [1 + A \cos(\omega_{mes}t + \delta)]$$



Simulated Wiggle Plot for This Experiment



BNL/E821実験

g-2: 0.54ppmで計測

標準理論と3σのズレ

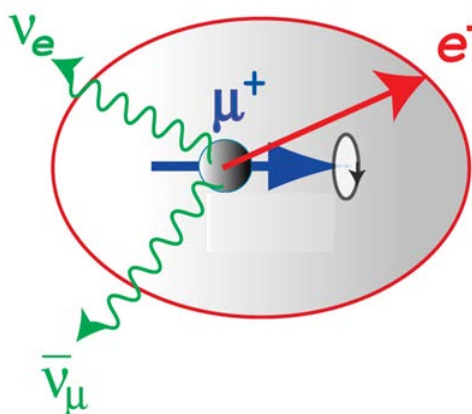
EDM: 上限値  $\sim 1e-19$  e.c.m

J-PARC実験目標

精度: 0.37ppm

感度:  $1.3e-21$  e.c.m

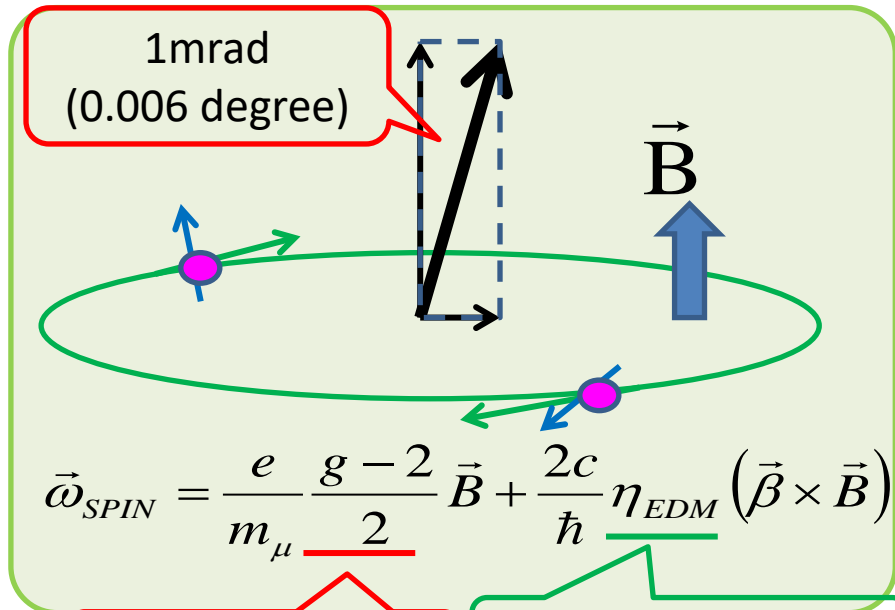
# 新しい物理はミュオンスピン歳差運動に現れる



$e^+$  歳差運動周期と、角運動量ベクトルを精密測定

$$\vec{\mu}_s = \frac{g}{2} \left( \frac{e}{m_\mu} \right) \vec{s}$$

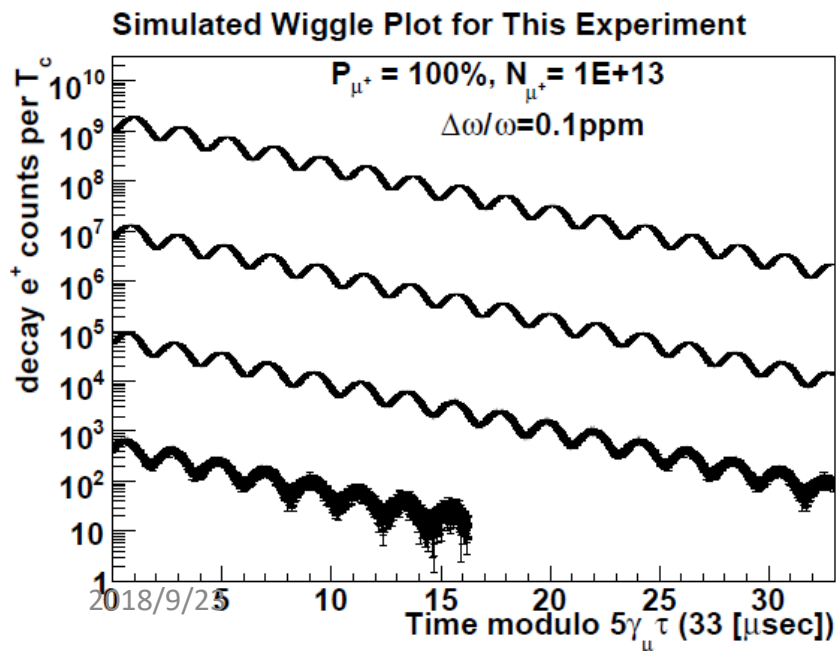
$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\gamma\tau}\right) [1 + A \cos(\omega_{mes}t + \delta)]$$



$$\vec{\omega}_{SPIN} = \frac{e}{m_\mu} \frac{g-2}{2} \vec{B} + \frac{2c}{\hbar} \eta_{EDM} (\vec{\beta} \times \vec{B})$$

g-2物理信号

EDM物理信号



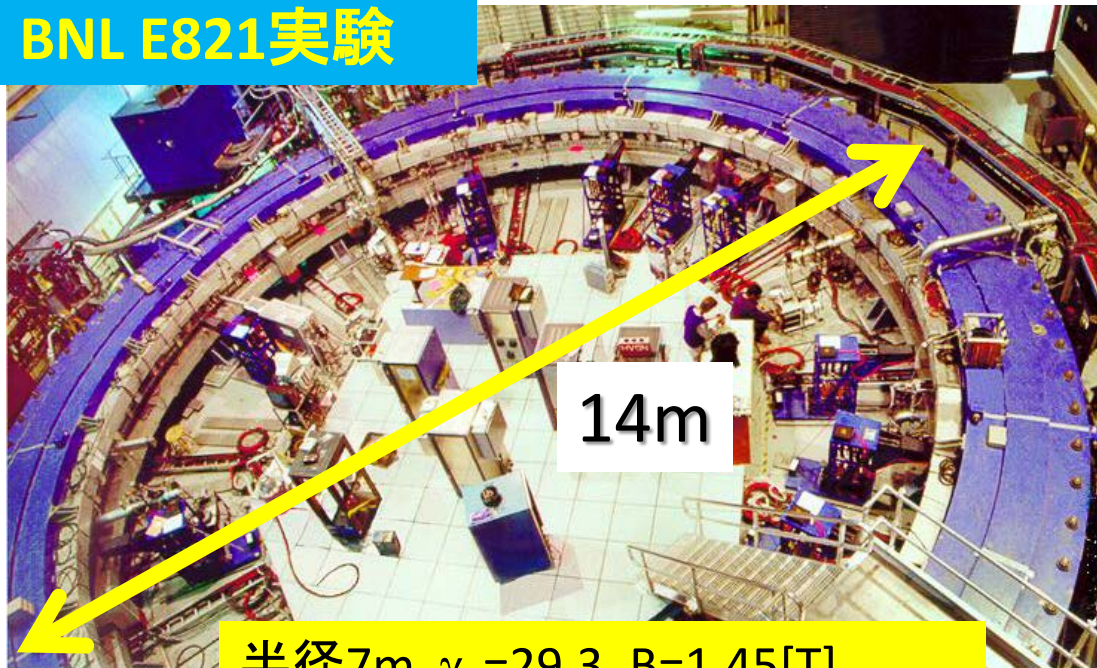
EDM測定のコモは、  
 ミューオンビーム軌道  
 安定制御！！

BNL/E821  
 g-2: 0.54ppm  
 標準理論  
 EDM: 上限

# ビーム軌道の安定制御＝高品質なビーム＋超精密な蓄積磁場

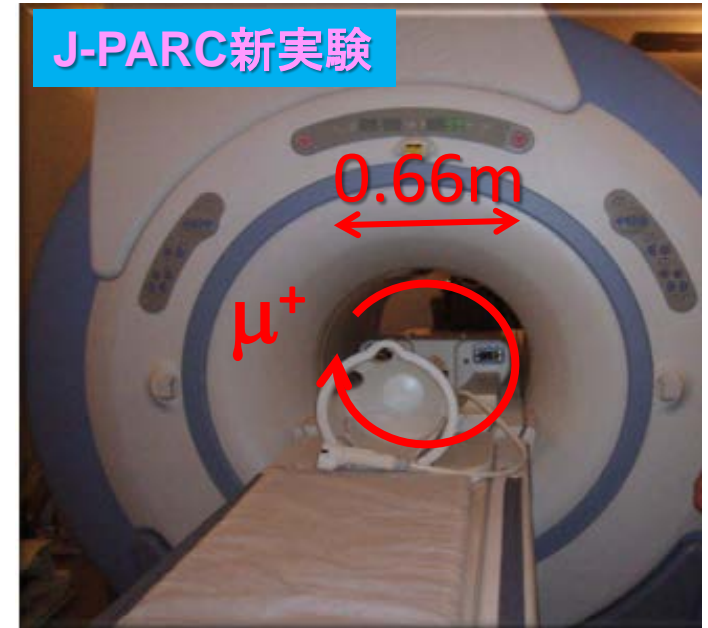
- E821実験：ビーム品質が悪いので収束の電気4極が必要。
- 魔法運動量=29.7GeV/cは電気4極がスピン運動に与える影響をキャンセルするが、蓄積リングが大きくなる。

## BNL E821実験



半径7m,  $\gamma_\mu=29.3$ ,  $B=1.45$ [T]  
貯蔵リングヨークは12分割構造  
ローカルな磁場精度 $\sim 100$ ppm

## J-PARC新実験



半径0.33m,  $\gamma_\mu=3$ ,  $B=3$ [T]  
MRI型一体型貯蔵リング構造  
ローカルな磁場精度 $\sim 1$ ppm

新しい方式では：

- 高品質なミュオンビーム源を利用→超冷ミュオンビーム
- 磁場を高精度制御するためリングサイズを小さくする。→MRI磁石

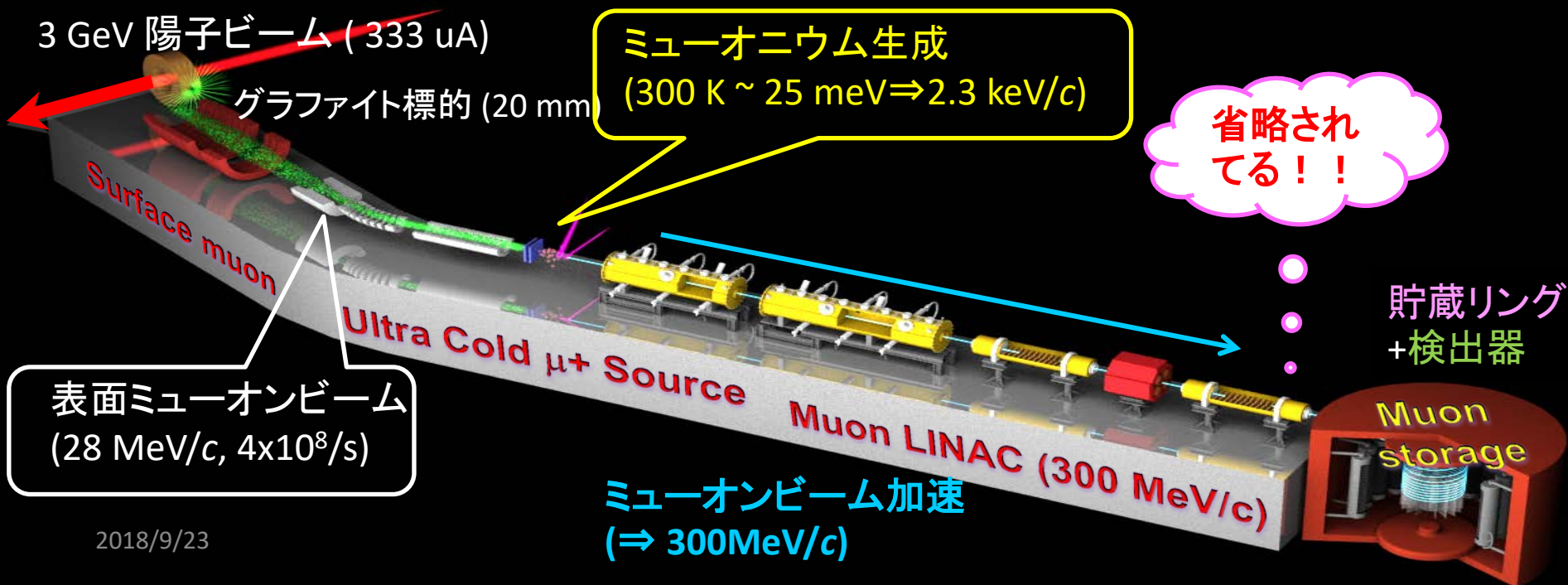


# 挑戦あるのみ！

実験成功の鍵は新しい  
ビームライン

1. ミューオニウムから生成する超冷ミュオンビーム
2. MRI技術を応用し高精度に磁場調整された蓄積磁石
3. 蓄積磁石内へのビーム入射と蓄積ビームの軌道制御

2010年頃につくったイメージ



# 挑戦あるのみ！

実験成功の鍵は新しい  
ビームライン

1. ミューオニウムから生成する超冷ミュオンビーム
2. MRI技術を応用し高精度に磁場調整された蓄積磁石
3. 蓄積磁石内へのビーム入射と蓄積ビームの軌道制御

- **FROL14 大谷将士**  
負ミュオニウムを用いたミュオンRF加速実証試験
- **THP045 中沢雄河**  
ミュオン線形加速器APF方式IH-DTLプロトタイプの性能試験
- **THP078 安田 浩昌**  
J-PARC muon g-2/EDM 実験におけるミュオンスピン反転装置の開発
- **THP084 中沢雄河**  
紫外光由来負水素イオンビームを用いたミュオンRF加速試験用 診断ビームラインの試運転
- **THP085 須江祐貴**  
J-PARC E34 muon g-2/EDM実験: 低レートミュオンバンチ縦方向構造測定装置の開発
- **WEP047 近藤 恭弘**  
バンドRFQの低電力試験

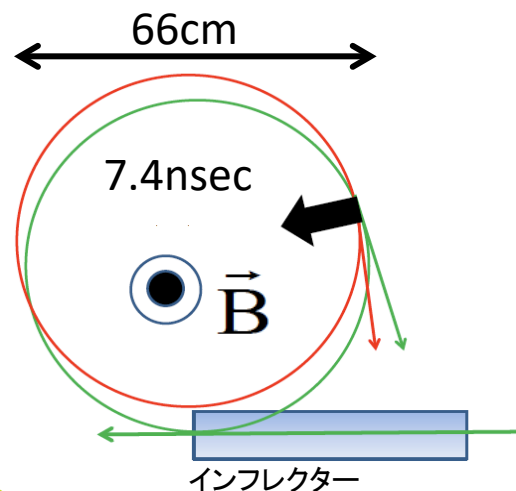
3 GeV

表面  
(28 M

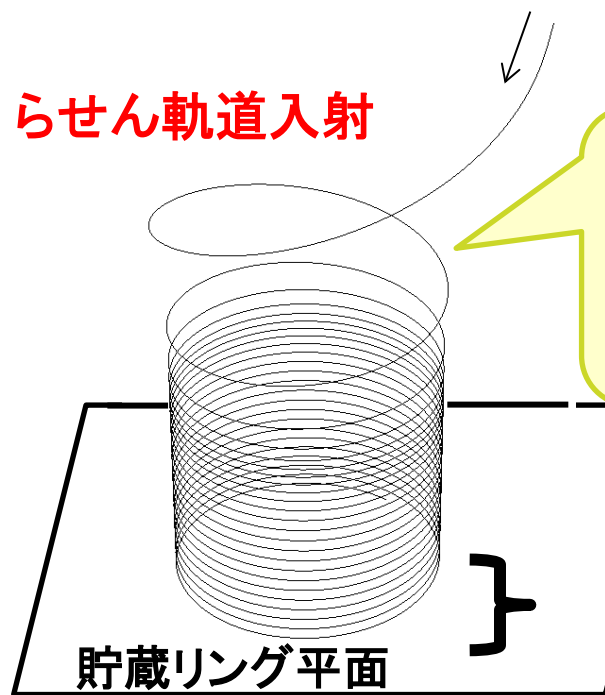
# 3次元らせん軌道入射手法の開発

コンパクト強磁場リングへの水平入射は技術的に難しい:

- インフレクターで3[T] 磁石のフリンジ磁場を消す
- 1ターン以内に水平キック(~ 60 mrad)



らせん軌道入射

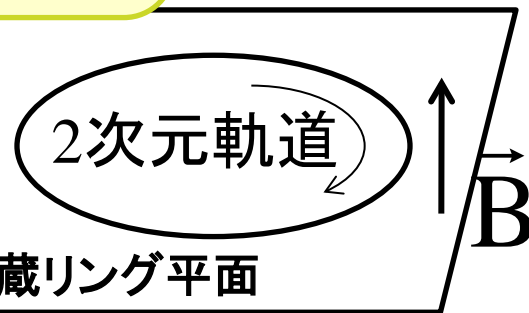


- 入射部と蓄積部を長手方向に距離を取りつつなめらかにつなぐ一体型磁石を採用可能
- 3次元的な動きを止めるキックも1ターン以内にする必要がない。

入射時に貯蔵空間に誤差磁場を与えない



垂直方向キック



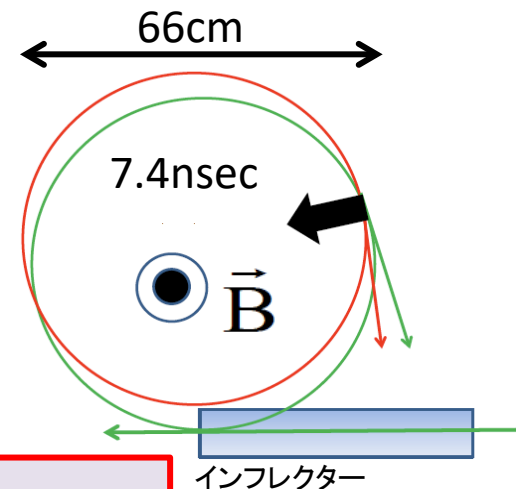
MRI型ソレノイド磁石1個で入射と蓄積リングを実現!

前例がない。

# 3次元らせん軌道入射手法の開発

コンパクト強磁場リングへの水平入射は技術的に難しい:

- インフレクターで3[T] 磁石のフリンジ磁場を消す
- 1ターン以内に水平キック(~ 60 mrad)



らせん軌道

## ➤ 科研費サポートで独自研究

- 3次元らせん軌道ビーム入射のためのパルス状磁場発生装置(垂直キッカー)の開発  
(若手B:2011年4月~2014年3月)
- ソレノイド型蓄積磁石への3次元らせん軌道によるビーム入射の実証試験  
(基盤B:2014年4月~2018年3月)

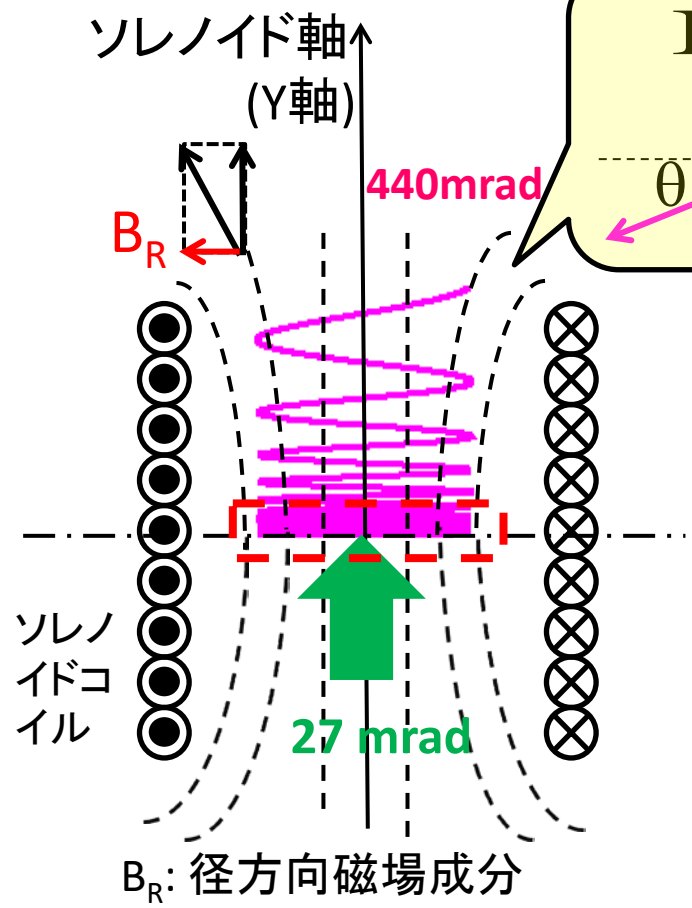
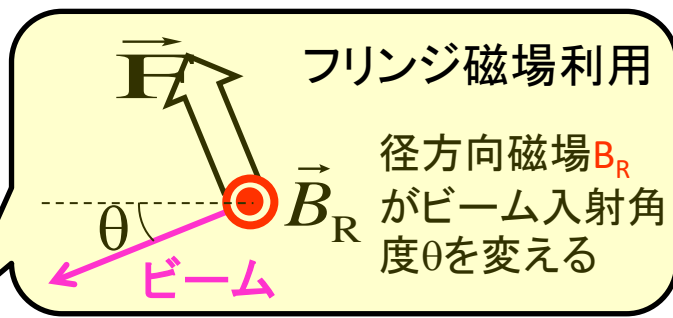
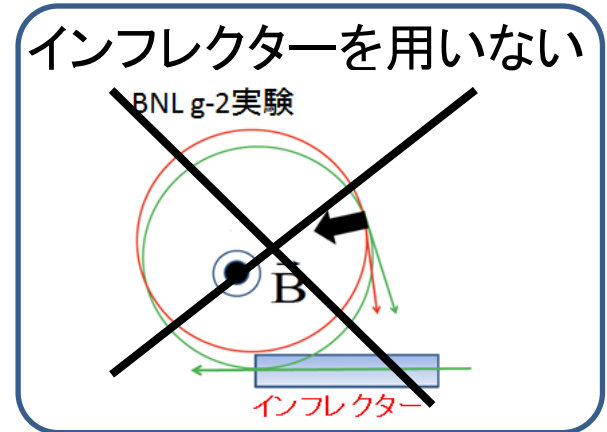
に貯蔵空間に  
場を与えない

• THP006 Muhammad Abdul Rehman

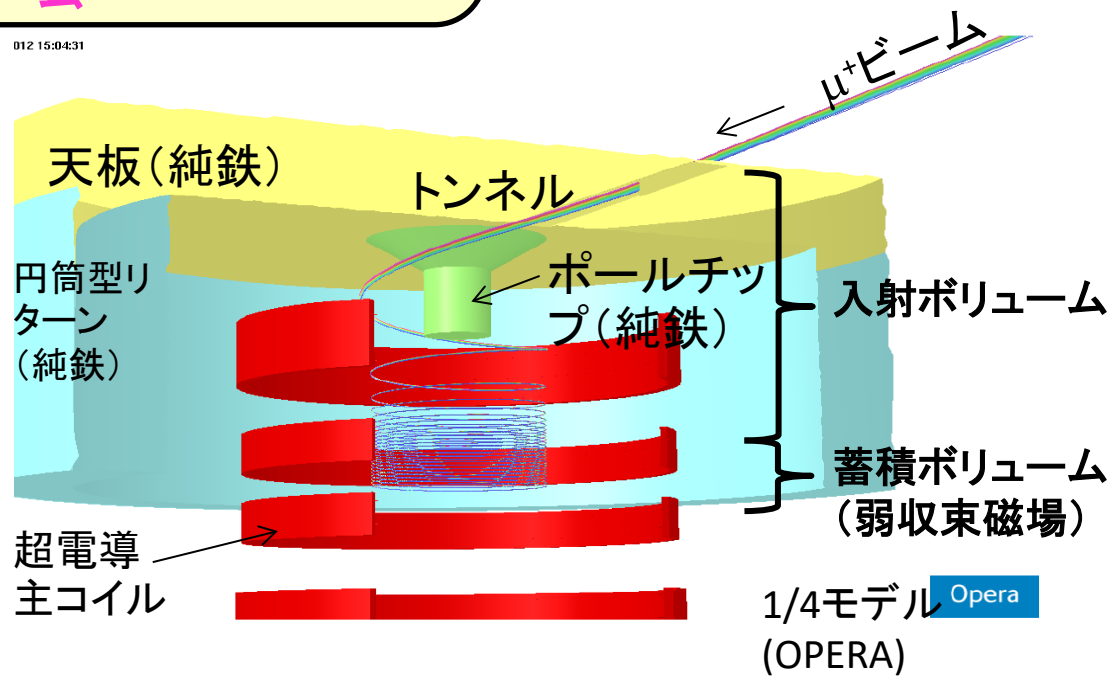
Development of the Pulsed Magnetic Kicker for the Spiral Injection Test Experiment

前例がない。

# 3次元螺旋入射は ソレノイドフリンジ磁場を活用



012 15:04:31

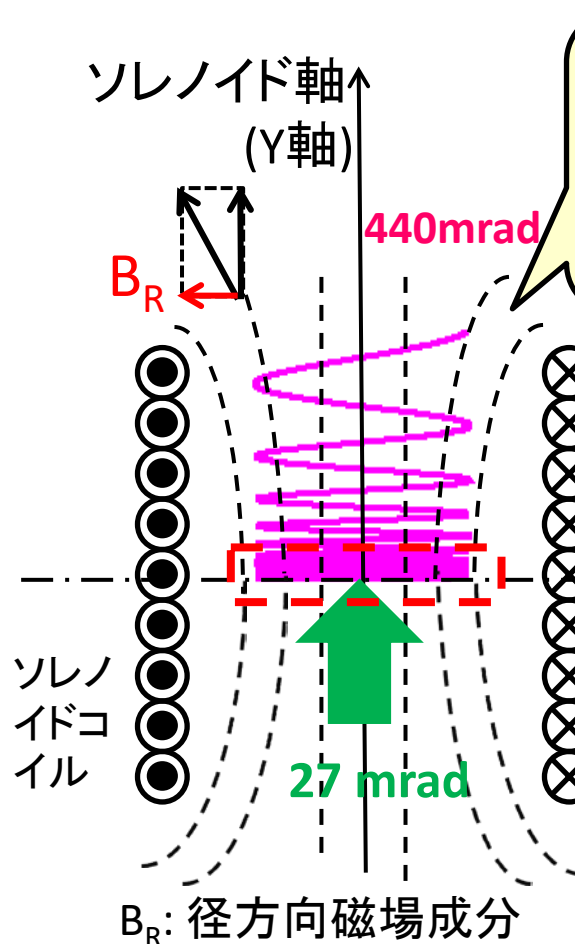
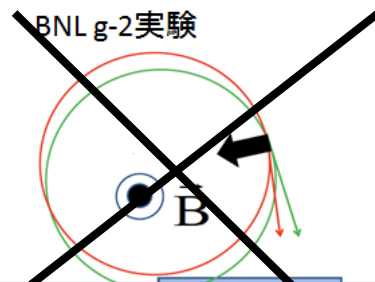


ソレノイド磁石具体設計進行中

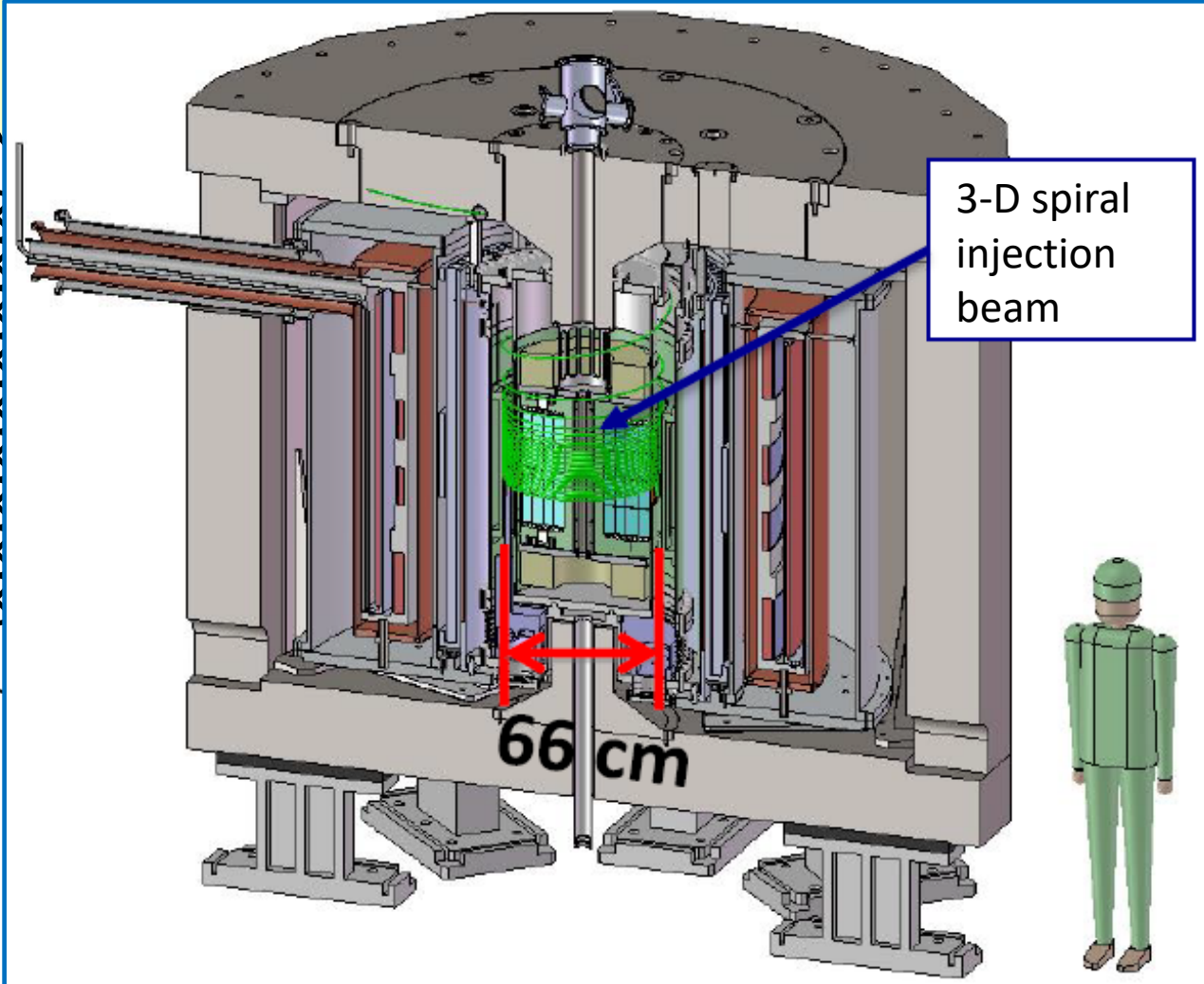
- ✓ KEK低温センター
- ✓ 日立研究所と共同研究

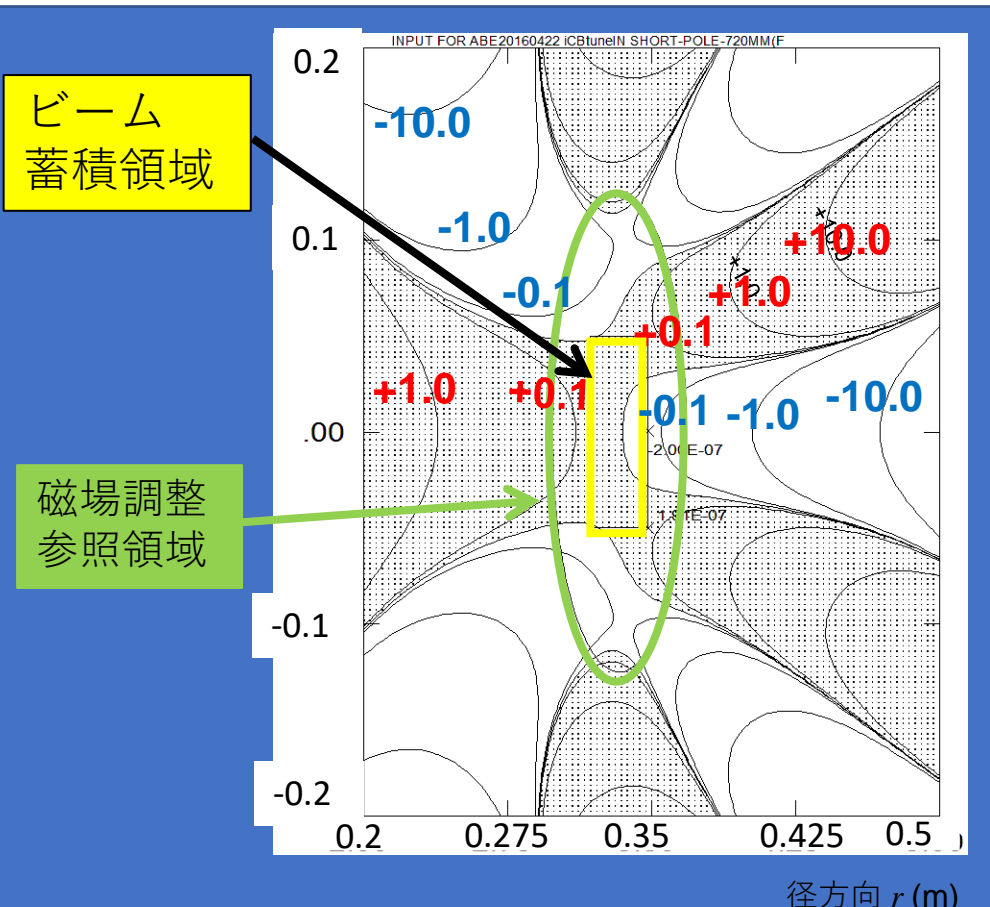
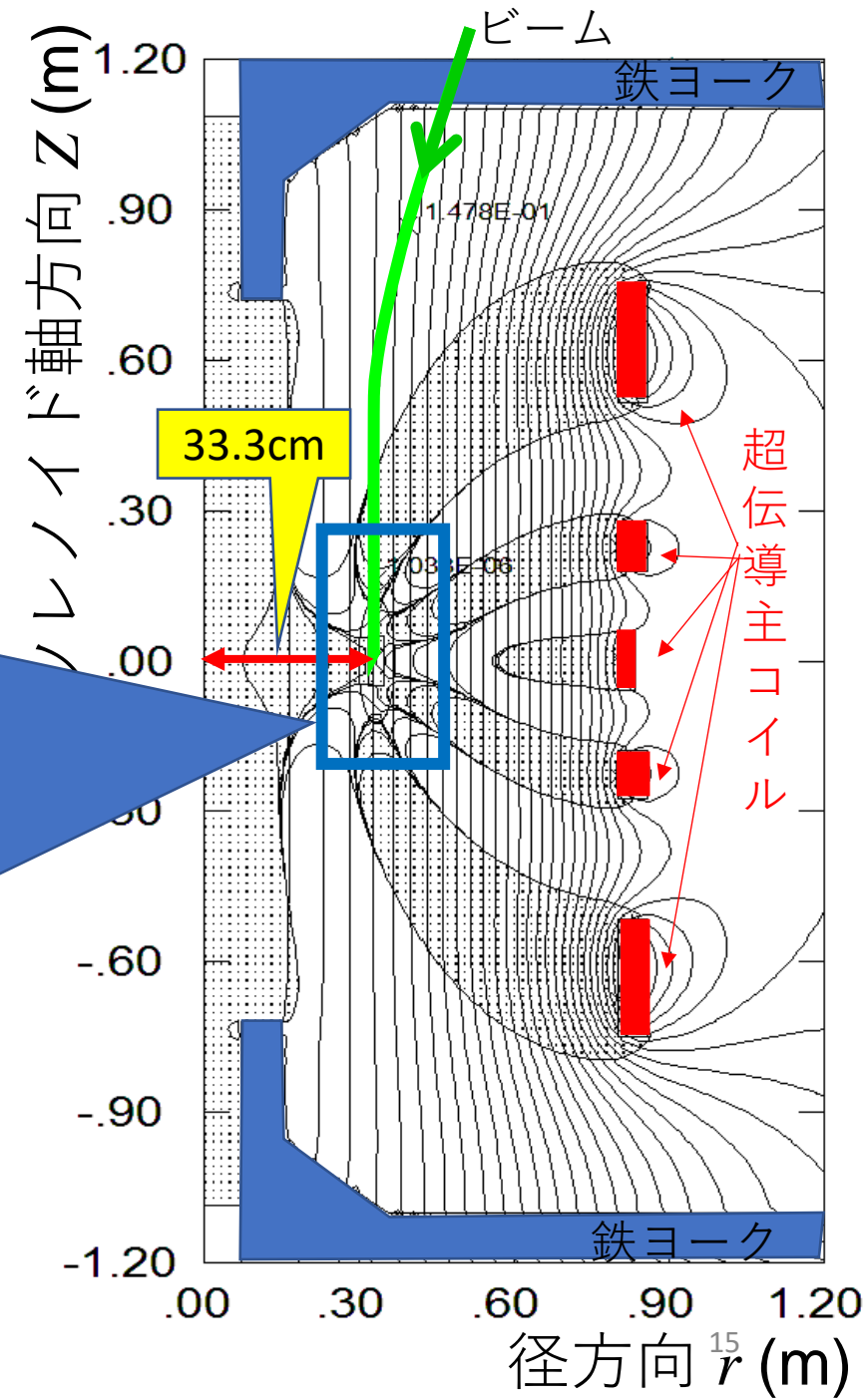
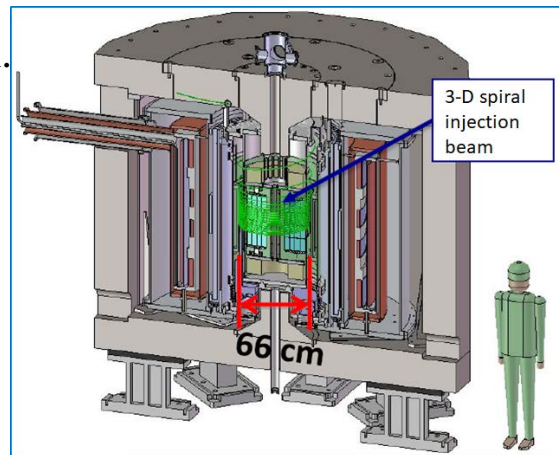
# 3次元螺旋入射は ソレノイドFRINGE磁場を活用

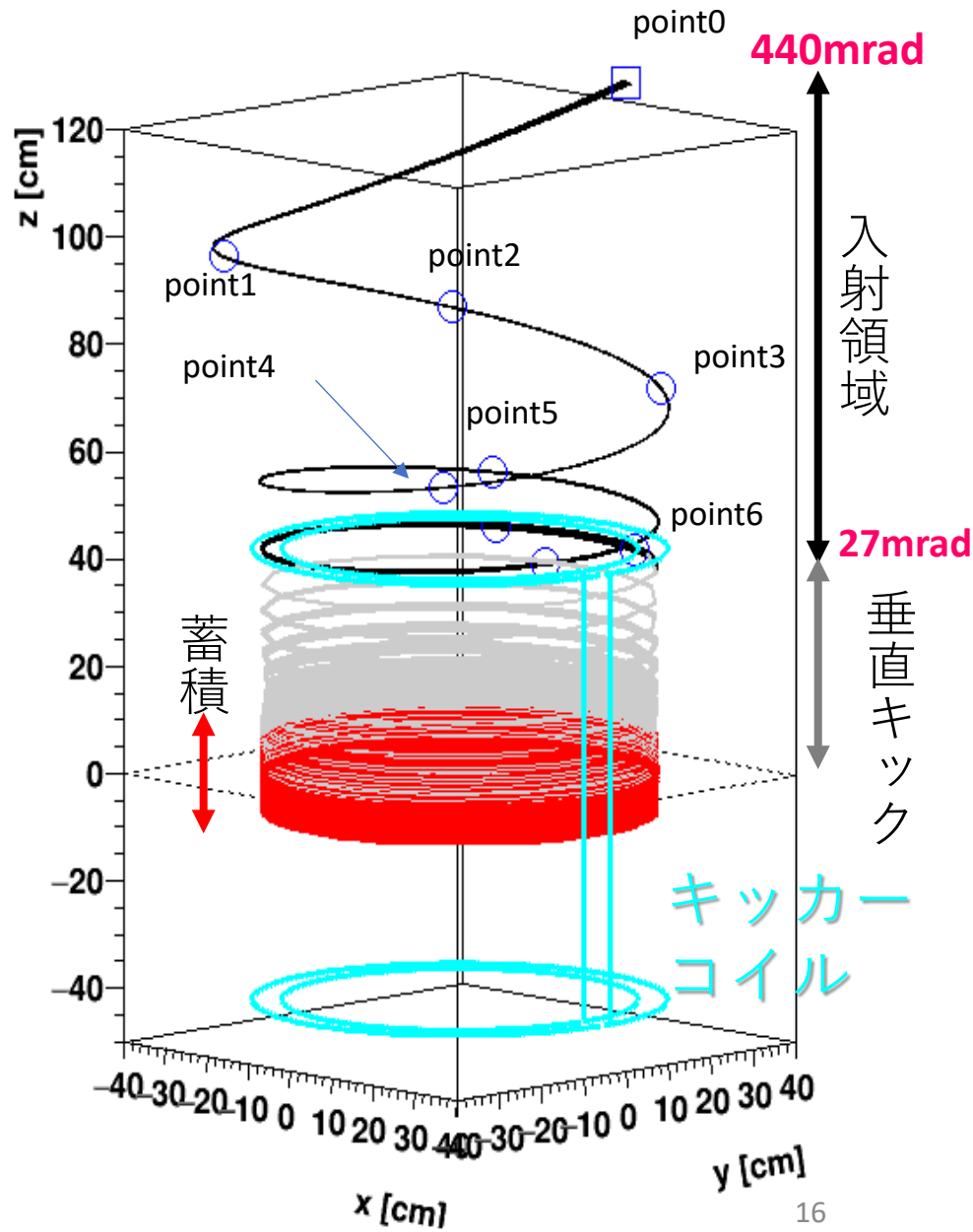
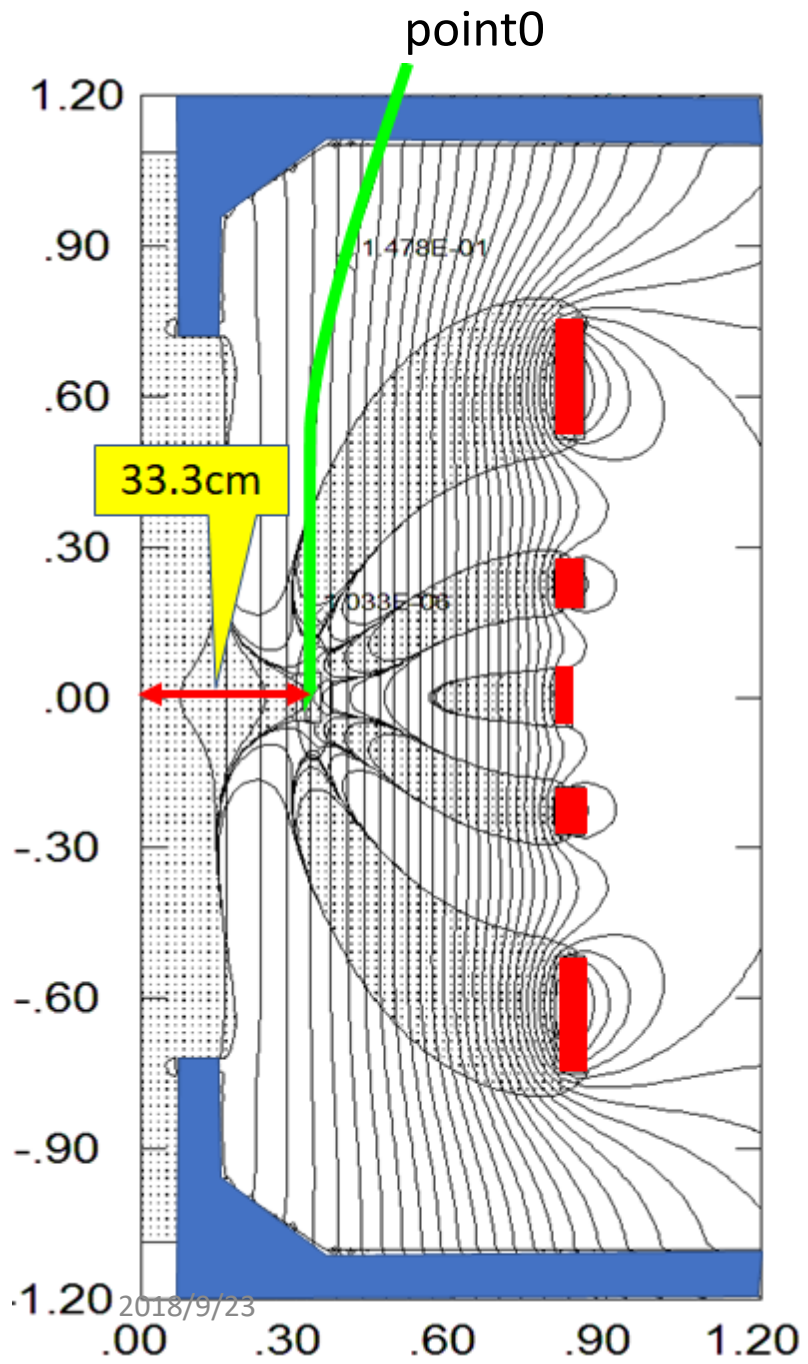
インフレクターを用いない



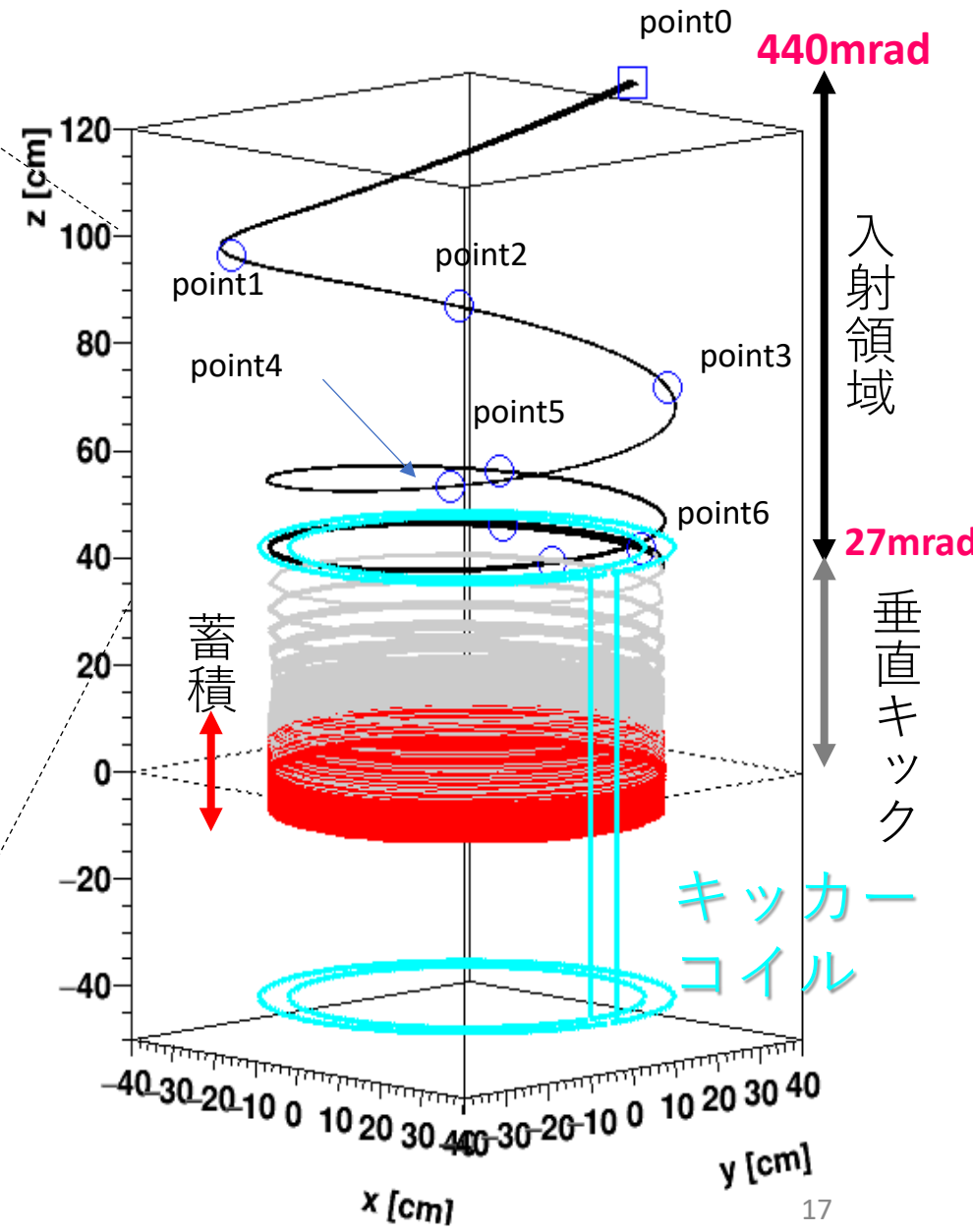
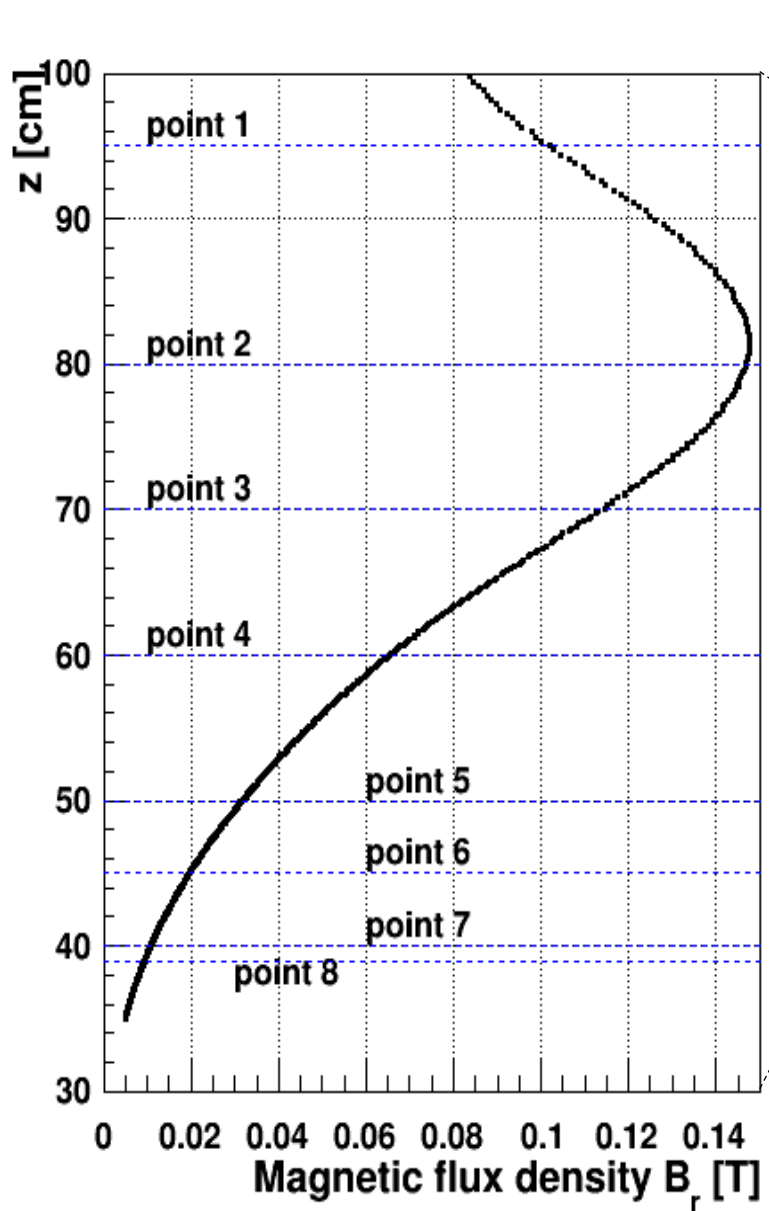
FRINGE磁場利用  
径方向磁場











# 入射ポイントのビーム形状

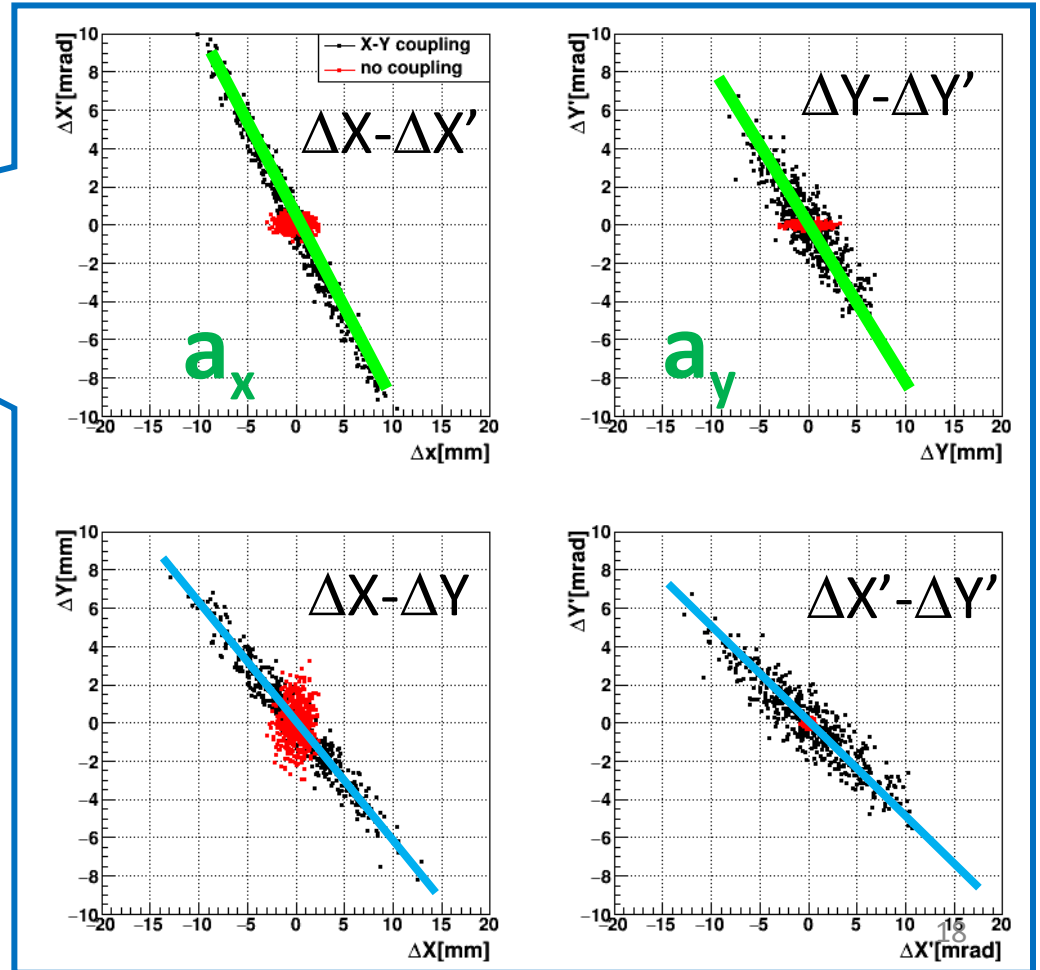
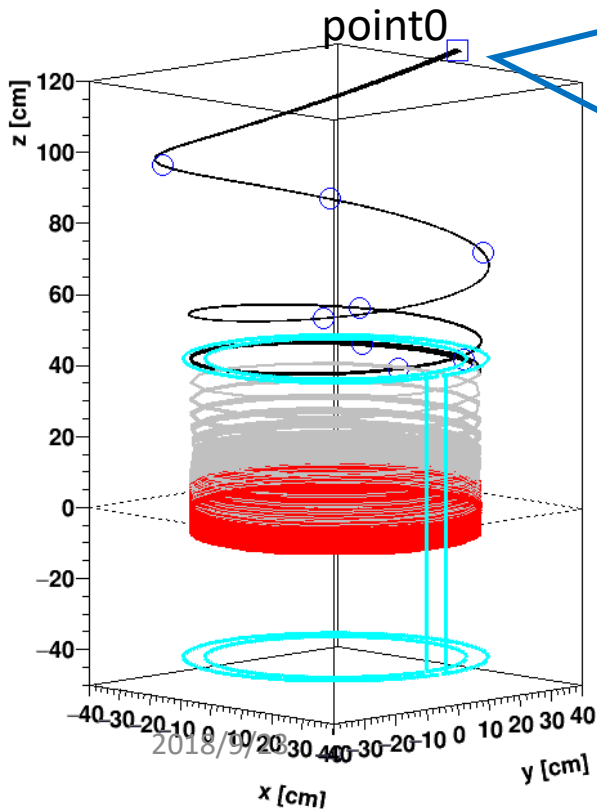
- 軸対称磁場へ入射するため、**強いX-Y結合**が必要
- $\Delta X-\Delta X'$ ,  $\Delta Y-\Delta Y'$ ,  $\Delta X-\Delta Y$ ,  $\Delta X'-\Delta Y'$ の相関より転送行列Mを算出

初期条件(LINAC出口設計値より少し大きめ)

$$\sigma_{\Delta X-\Delta X'} = 0.3\pi \text{ mm-mrad}$$

$$\sigma_{\Delta Y-\Delta Y'} = 0.1\pi \text{ mm-mrad}$$

ビーム座標系



# 入射ポイントのビーム形状

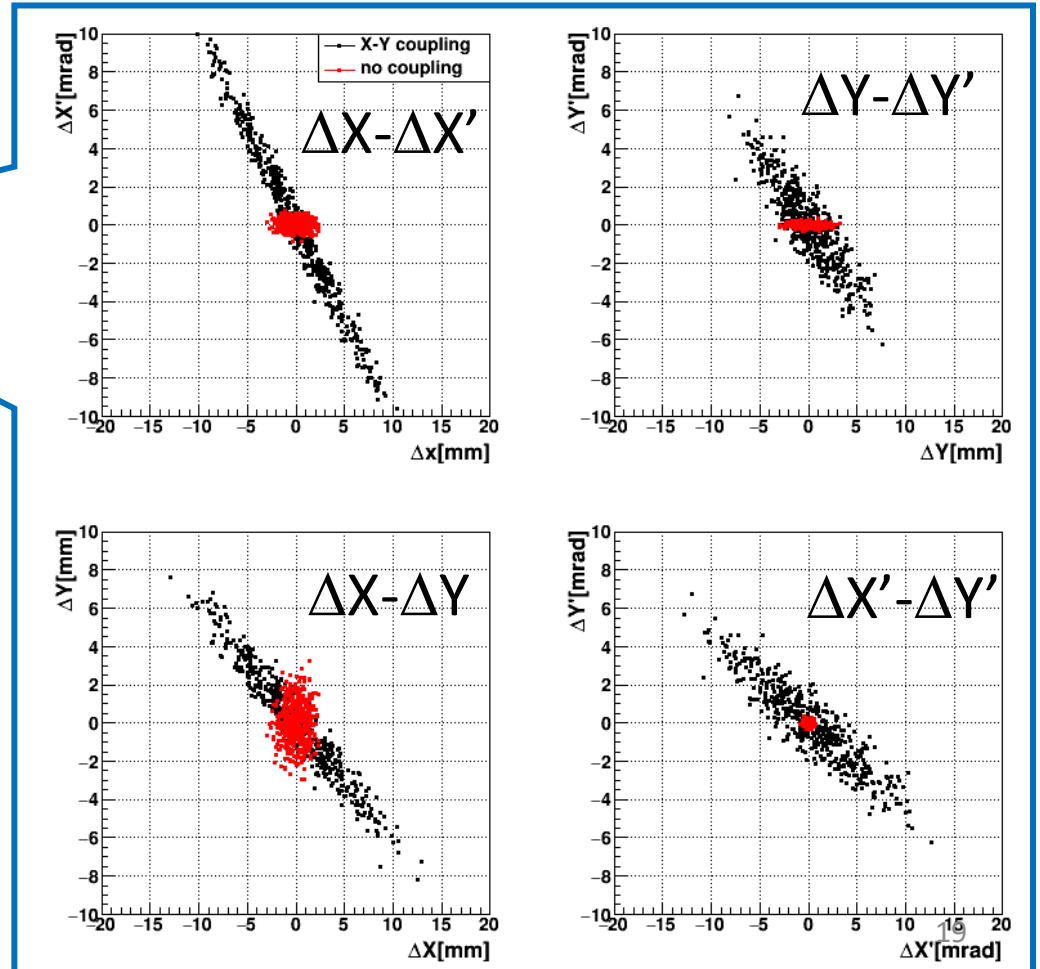
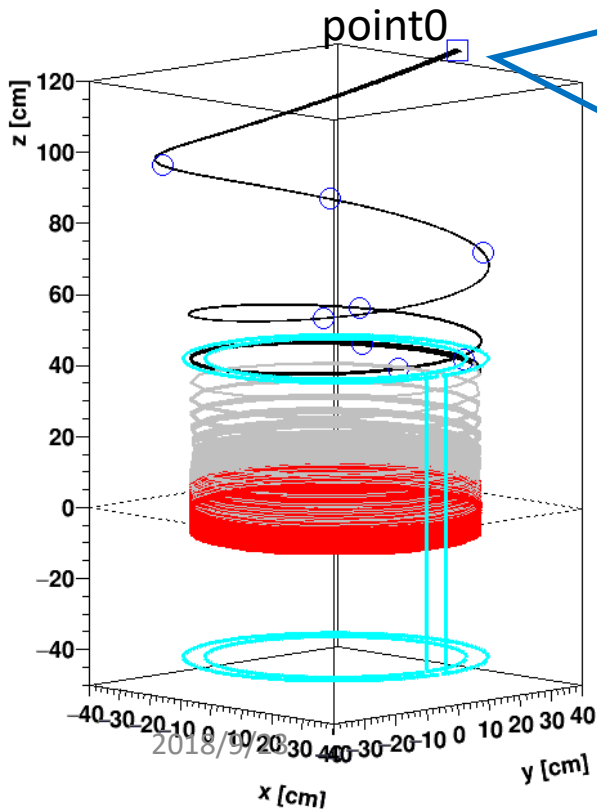
- 軸対称磁場へ入射するため、**強いX-Y結合**が必要
- $\Delta X-\Delta X'$ ,  $\Delta Y-\Delta Y'$ ,  $\Delta X-\Delta Y$ ,  $\Delta X'-\Delta Y'$ の相関より転送行列Mを算出

初期条件(LINAC出口設計値より少し大きめ)

$$\sigma_{\Delta X-\Delta X'} = 0.3\pi \text{ mm-mrad}$$

$$\sigma_{\Delta Y-\Delta Y'} = 0.1\pi \text{ mm-mrad}$$

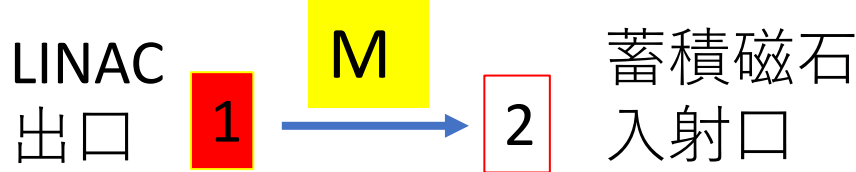
ビーム座標系



# 転送行列Mの設計

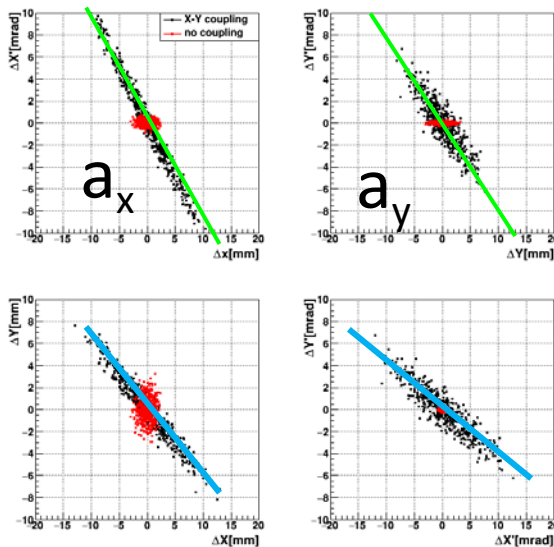
(LINAC出口～蓄積磁石入射口までの輸送ライン)

(4 × 4 Matrix)



単位行列

$$M = U_2^{-1} D U_1$$



$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_x & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & a_y & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

区分対角行列  
非結合変数の運動

$$U_2 = \begin{bmatrix} \mu I & & -R_4 & R_2 \\ R_1 & R_2 & & \\ R_3 & R_4 & & \\ & & \mu I & \end{bmatrix}$$

Rotation matrix

R <sub>1</sub>	-1.0975
R <sub>2</sub>	-2.36
R <sub>3</sub>	-2.865
R <sub>4</sub>	-1.92

$$\mu = \sqrt{1 - (R_1 R_4 - R_2 R_3)}$$

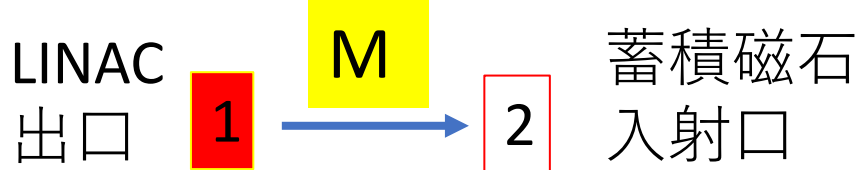
- $a_x, a_y$  は入射口の Twiss parameter  $\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y$  に関連

**自由パラメータは8つ:  $\alpha_{x,y}, \beta_{x,y}$  (for x and y components),  $R_1 \sim R_4$**

# 転送行列Mの設計

(LINAC出口～蓄積磁石入射口までの輸送ライン)

(4 × 4 Matrix)



単位行列

$$M = U_2^{-1} D U_1$$

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 832 (2016) 51–62

Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/nima](http://www.elsevier.com/locate/nima)

Three-dimensional spiral injection scheme for the  $g-2/EDM$  experiment at J-PARC<sup>☆</sup>

Hiroimi Iinuma<sup>a,\*</sup>, Hisayoshi Nakayama<sup>a</sup>, Katsunobu Oide<sup>a</sup>, Ken-ichi Sasaki<sup>a</sup>, Naohito Saito<sup>a</sup>, Tsutomu Mibe<sup>a</sup>, Mitsushi Abe<sup>b</sup>

<sup>a</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho 1-1, Tsukuba 305-0801, Japan  
<sup>b</sup> Center of Technology Innovation-Energy, Hitachi Ltd., Hitachi 319-1221, Japan

分対角行列  
合変数の運動

ation matrix

1	-1.0975
2	-2.36
3	-2.865
4	-1.92

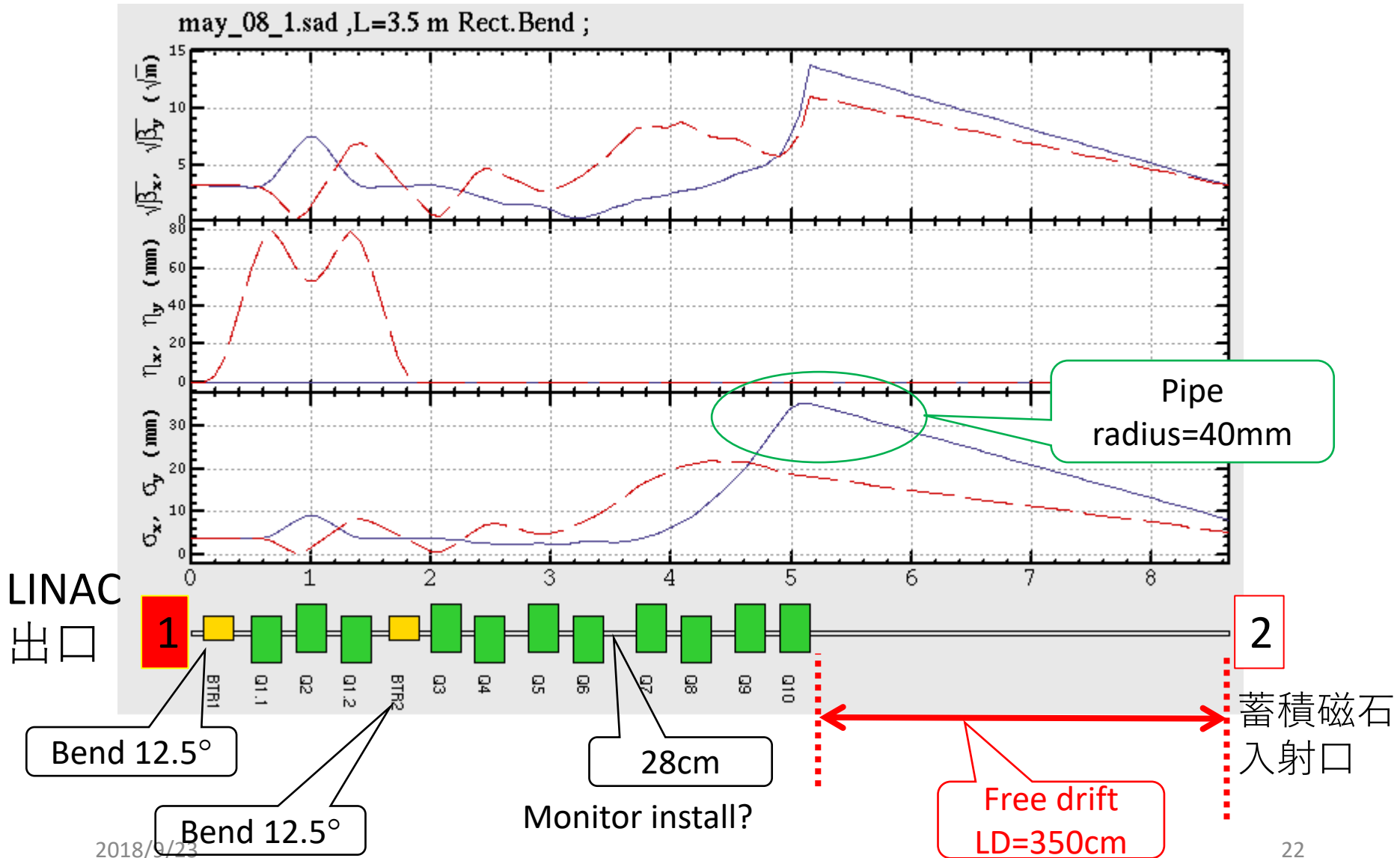
$$\mu = \sqrt{1 - (R_1 R_4 - R_2 R_3)}$$

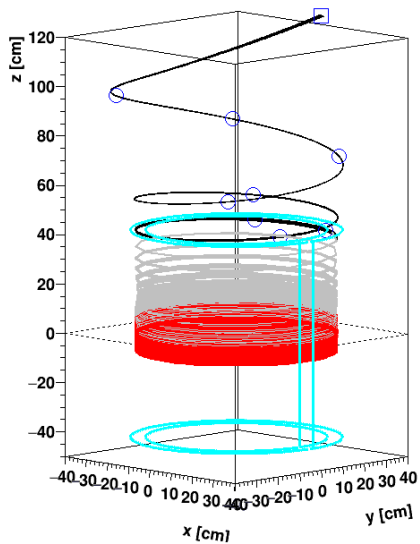
- $a_x, a_y$  は入射口の Twiss parameter  $\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y$  に関連

自由パラメータは8つ:  $\alpha_{x,y}, \beta_{x,y}$  (for x and y components),  $R_1 \sim R_4$

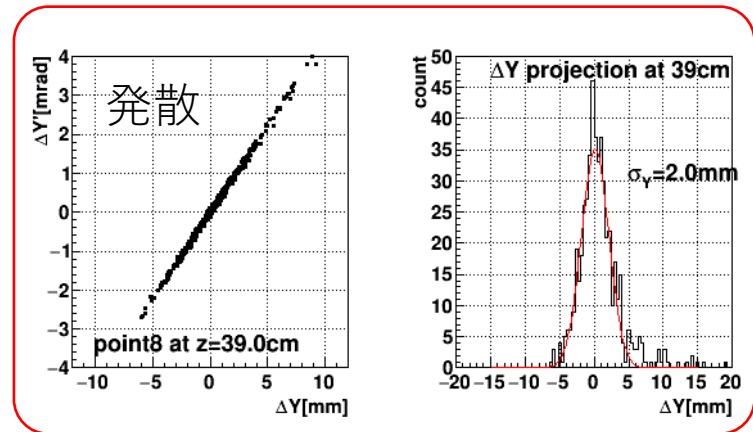
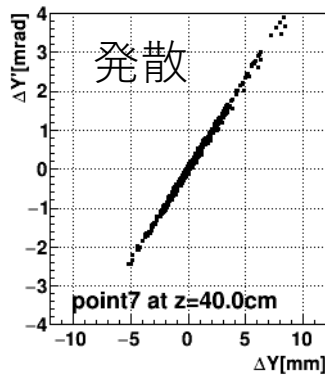
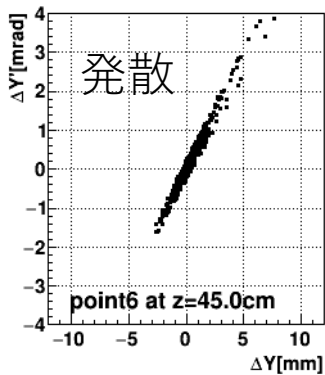
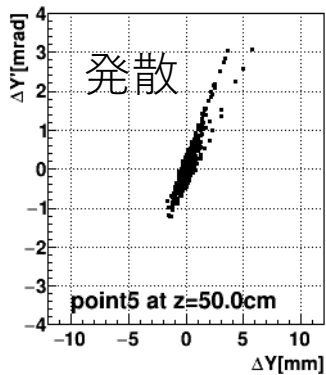
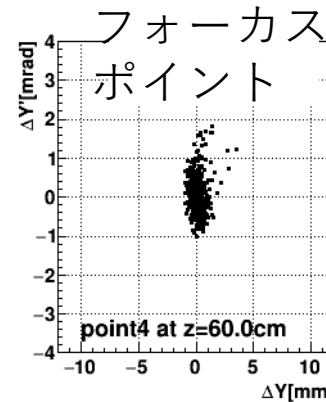
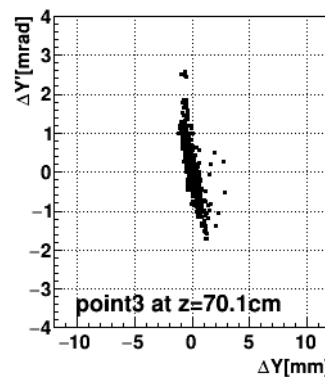
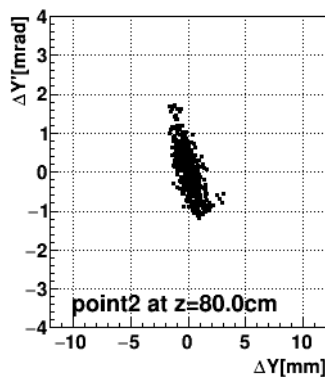
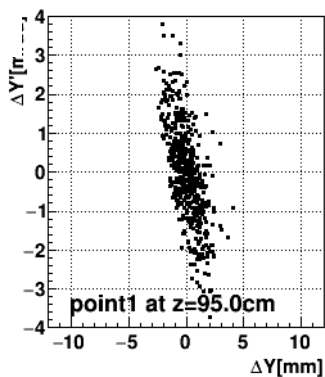
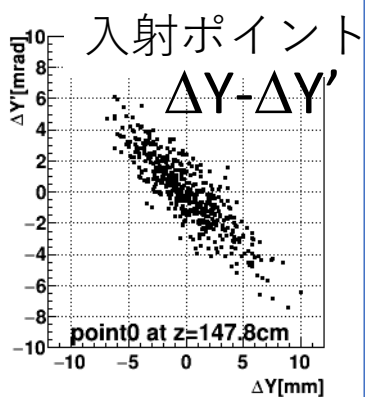
# 転送行列Mを満足する輸送ラインの設計 (案)

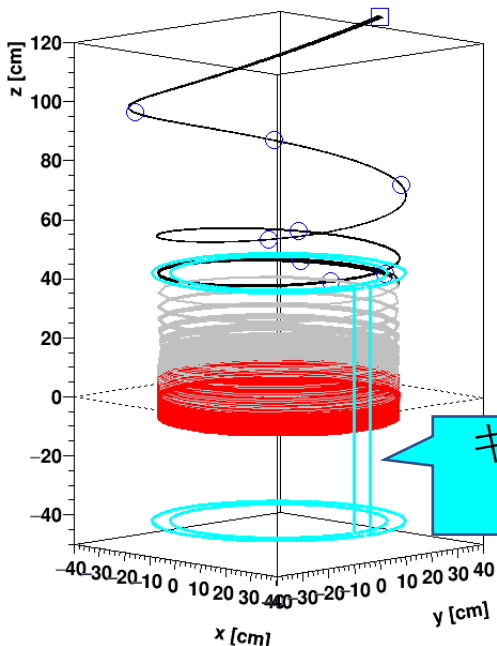
全長8m, 25度斜め入射用2極磁石と11個の4極磁石 (うち8個は任意の回転4極磁石)





- 入射点からキックまでの入射区間のビーム座標系Y成分の位相空間分布 $\Delta Y-\Delta Y'$ を示す。
- 入射地点では $\Delta Y-\Delta Y'$ の傾きが負のフォーカス状態だが、 $z=60\text{cm}$ のpoint 4で最も収束し、それ以降は $\Delta Y-\Delta Y'$ の傾きが正の発散状態になっている。
- この区間の発散を極力小さく抑えるように、転送行列Mを調整する。
- 右下の図に示すようにキックポイント（高さ39cm）での $\Delta Y$ 分布を正規分布でフィットすると、 $\sigma=2\text{mm}$ を得た。





# パルス磁場キッカーと弱収束磁場で ビームを蓄積領域へと誘導する

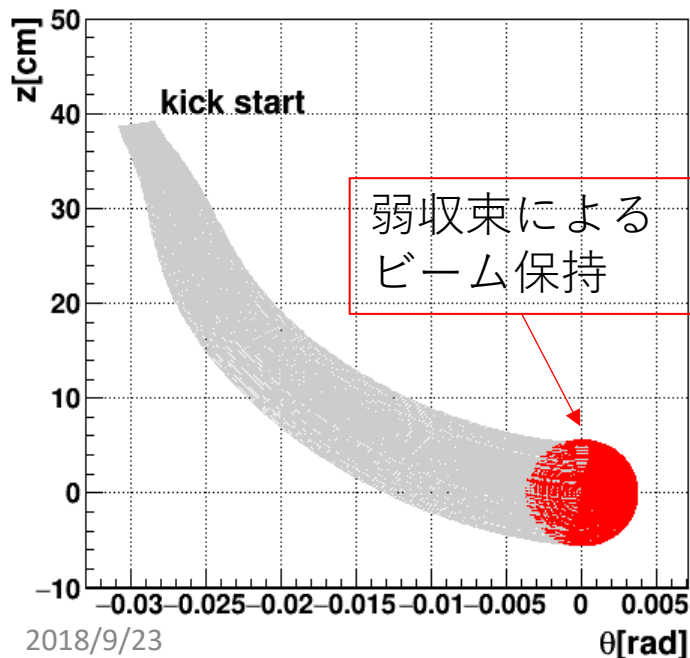
半サイン時間形状の軸対称パルス磁場をキッカーコイルで生成。

$$B_{kick}(t - t_0) = B_{coil} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t - t_0}{T_{kick}}\right) \times g(t - t_0)$$

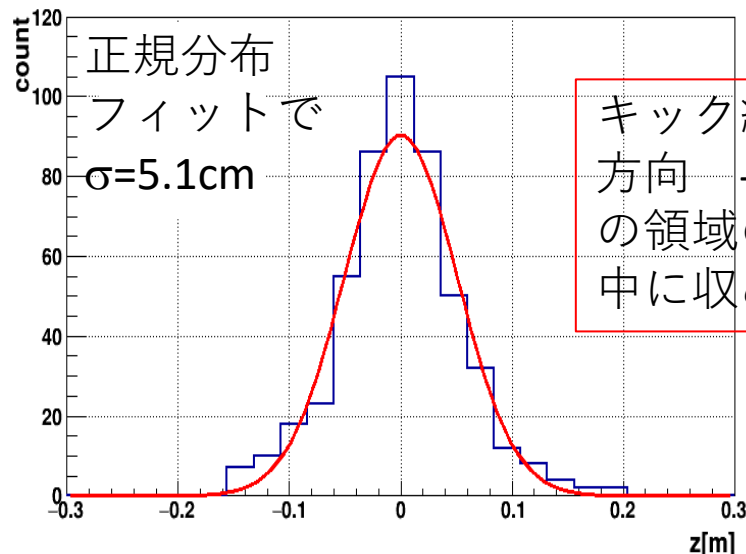
$$g(t - t_0) = 1, \quad t < T_{kick}/2$$

$$g(t - t_0) = 0, \quad t > T_{kick}/2$$

キック期間  
100~130nsec  
15~20周回くらい



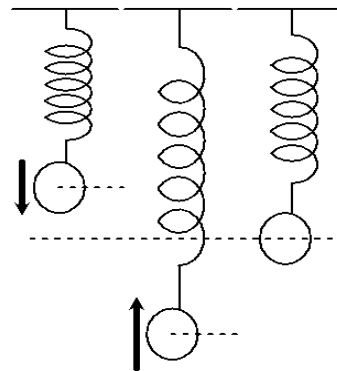
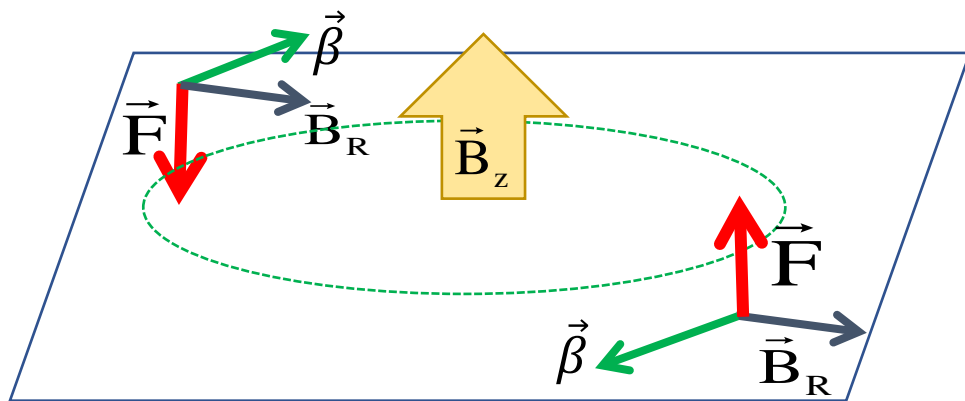
## キック終了時のZ方向ビーム分布



キック終了時に高さ  
方向  $-5\text{cm} < z < 5\text{cm}$   
の領域の弱収束磁場  
中に収めるのが目標



# 弱収束磁場



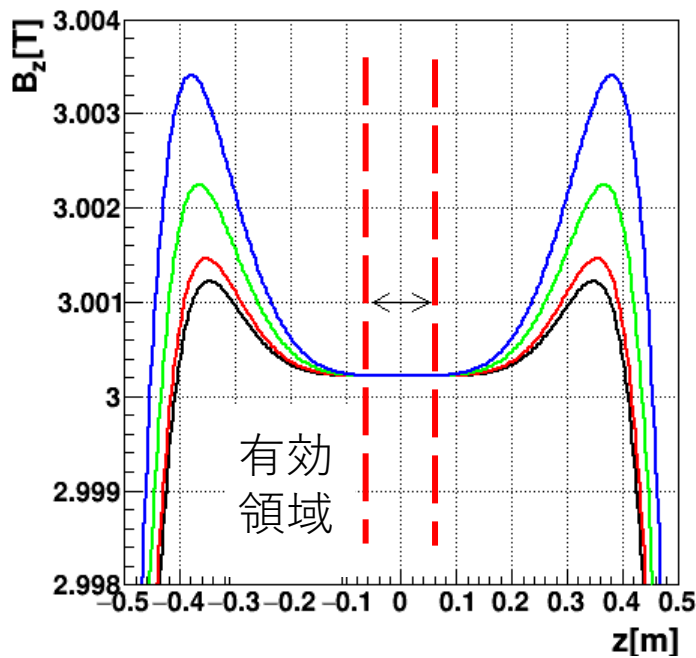
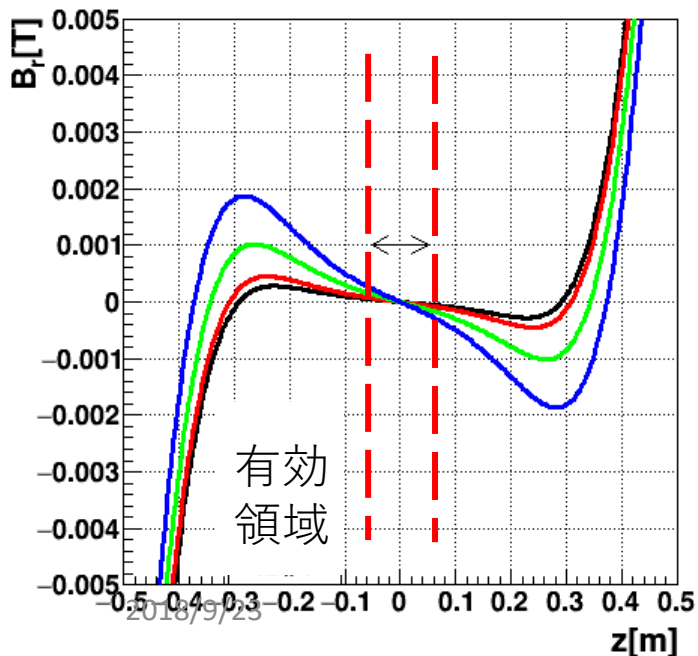
単振動

$$n = -\frac{R_0}{B_{0z}} \frac{\partial B_z}{\partial r}$$

0 < n < 1 で Z 方向と  
径方向を同時に  
収束

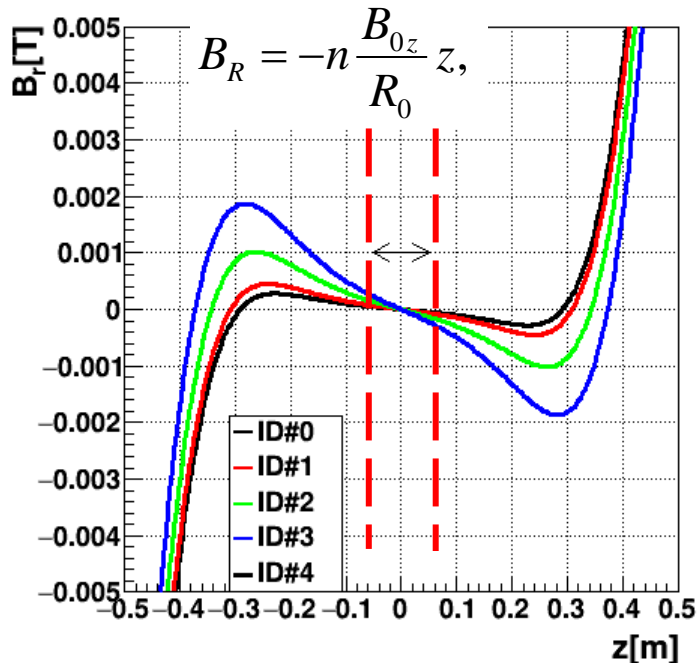
$$B_R = -n \frac{B_{0z}}{R_0} z,$$

$$B_z = B_{0z} \left( 1 - n \frac{r}{R_0} + n \frac{z^2}{2R_0^2} \right)$$

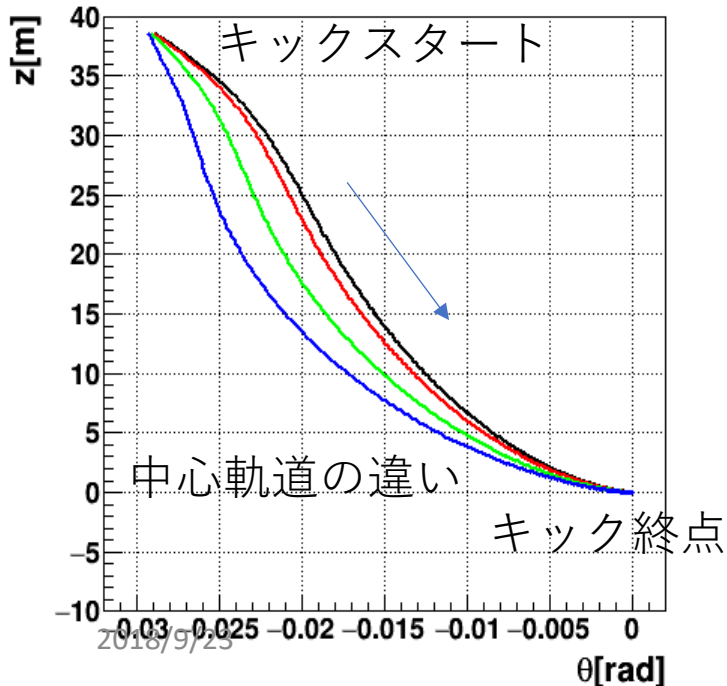


ID#	n-value
1	$0.98 \times 10^{-4}$
2	$1.46 \times 10^{-4}$
3	$2.92 \times 10^{-4}$
4	$4.86 \times 10^{-4}$

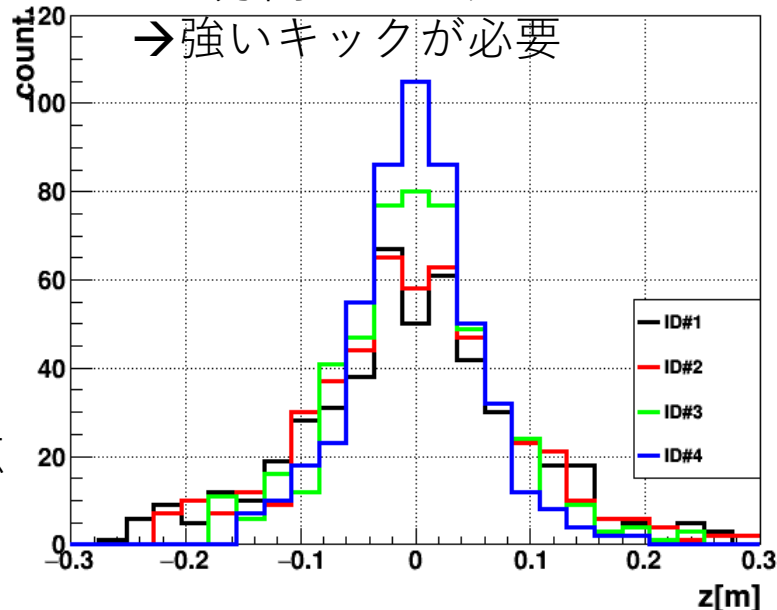
# 弱収束とキッカーのパラメータ調整



ID#	n ( $\times 10^{-4}$ )	Br(z=0) (gauss)	Tkick/2 (nsec)	RMS (cm)
1	0.98	2.825	257.3 / 2	9.6
2	1.46	3.016	252.0 / 2	9.3
3	2.92	3.515	244.7 / 2	8.8
4	4.86	4.071	192.6 / 2	7.0



n値が大  
 → z方向ビームサイズ小  
 → 強いキックが必要

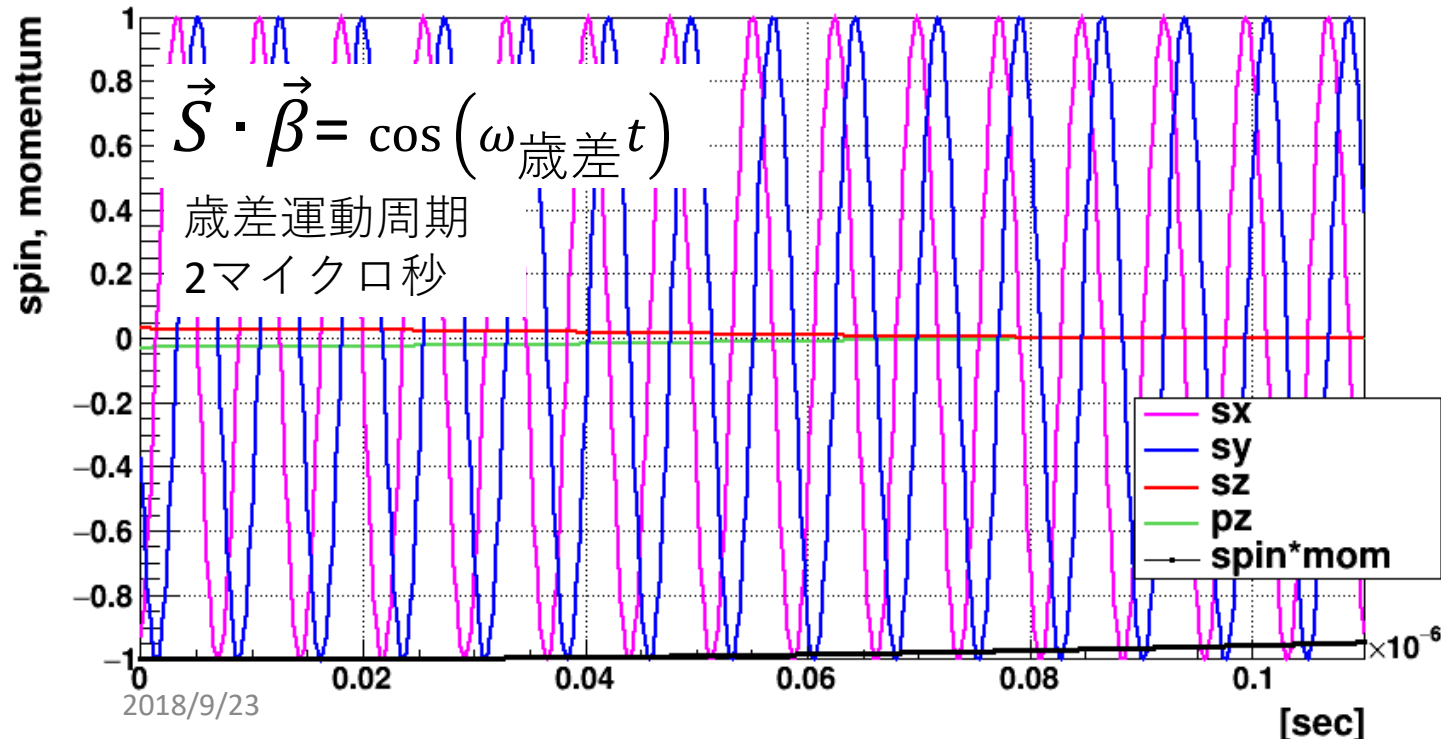


n値の決定は弱収束磁場によるベータatron振動とスピン歳差運動の周波数が干渉しないように調整を行う。

# 歳差運動の評価に必須の入射中のスピントラッキング

$$\frac{d}{dt} \vec{S} = \vec{\omega}_s \times \vec{S} \quad (\text{電場ゼロの場合})$$

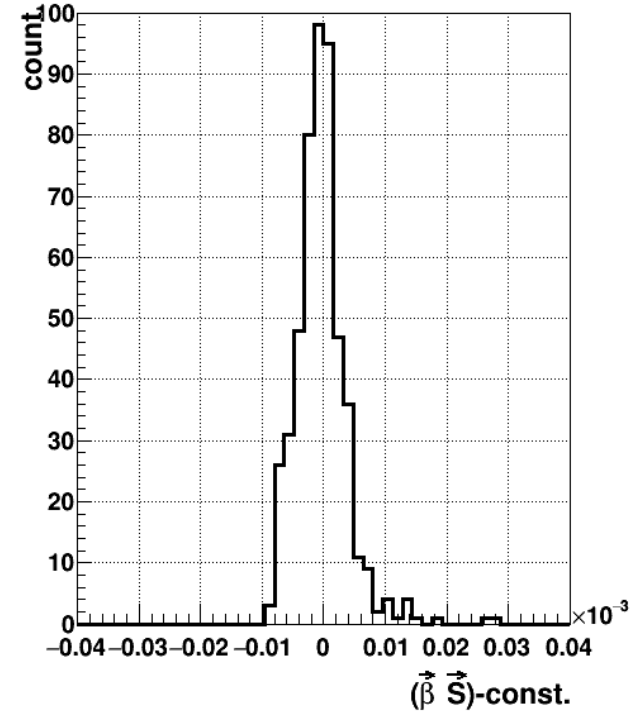
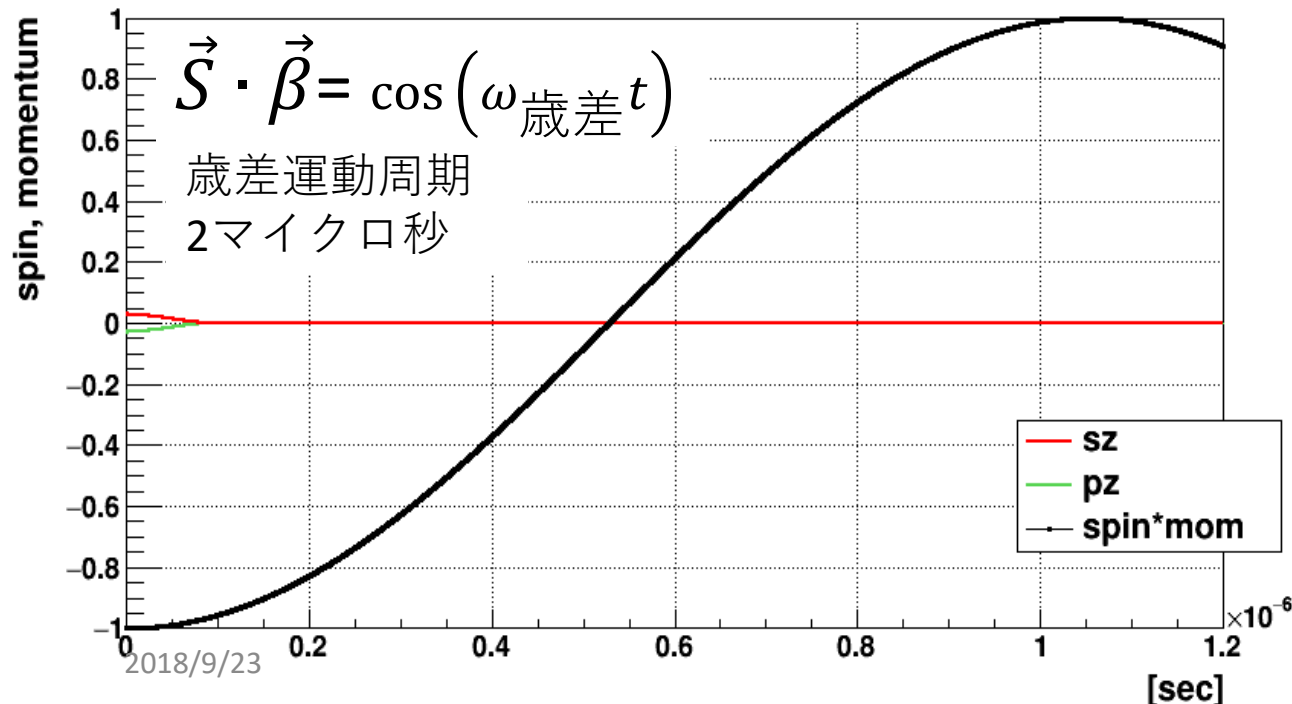
$$\vec{\omega}_s = \frac{e}{m} \left\{ \left( \frac{g-2}{2} + \frac{1}{\gamma} \right) \vec{B} - \frac{g-2}{2} \frac{\gamma}{\gamma+1} \vec{\beta} (\vec{\beta} \cdot \vec{B}) \right\}$$



# 歳差運動の評価に必須の入射中のスピントラッキング

$$\frac{d}{dt} \vec{S} = \vec{\omega}_s \times \vec{S} \quad (\text{電場ゼロの場合})$$

$$\vec{\omega}_s = \frac{e}{m} \left\{ \left( \frac{g-2}{2} + \frac{1}{\gamma} \right) \vec{B} - \frac{g-2}{2} \frac{\gamma}{\gamma+1} \vec{\beta} (\vec{\beta} \cdot \vec{B}) \right\}$$



キック終了時における  $(\vec{\beta} \cdot \vec{S})$  の分布は数  $\mu\text{rad}$  程度なので問題はない。

# まとめと今後

- 標準理論を越えた物理探索のため、J-PARC MLF ミューオンビームを用いた新g-2/EDM実験準備が進行中
- ミューオンスピン歳差運動精密測定の実現（電場なしで精密磁場中にビーム蓄積）を実現するために小型蓄積リングを採用
- 直径70cm未満の医療用MRI磁石の技術を応用した蓄積磁石に入射するために3次元螺旋軌道入射を新規開発、本公演で概要を紹介した。
- 入射領域中のビーム形状の制御→入射時のX-Y結合の最適化
- 蓄積領域内の弱収束磁場の強さ(n値)→キック後のビームサイズを制御

## 今後は

- 弱収束磁場によるベータatron振動、歳差運動周期の相関を調べて最適なn値を決める。
- 転送行列Mを満足する輸送ライン(LINAC出口から蓄積磁石入射口まで)の詳細設計を行う。

2018/9/23

