

ミュオン線形加速器における スピンドYNAMIXシミュレーション

第17回日本加速器学会年会

2020/09/04 ビームダイナミクス/電子加速器 FROT02

@ オンライン

安田浩昌^{A)}、飯沼裕美^{B)}、大谷将士^{C)}、河村成肇^{C)}、北村遼^{D)}、近藤恭弘^{D)}、
齊藤直人^{E)}、佐藤優太郎^{B)}、須江祐貴^{F)}、竹内佑甫^{G)}、中沢雄河^{B)}、
三部勉^{C)}、山崎高幸^{C)}、森下卓俊^{D)}、四塚麻衣^{F)}

東大理^{A)}、茨大理工^{B)}、高工研^{C)}、原研^{D)}、J-PARCセンター^{E)}、名大理^{F)}、九大理^{G)}

1. 導入

- ミューオンの異常磁気能率($g-2$)と電気双極子能率(EDM)
- ミューオン線形加速器概要
- スピンドYNAMIKSによるミューオン $g-2$ 測定への影響

2. 手法

- スピンドYNAMIKSシミュレーション手法

3. 結果

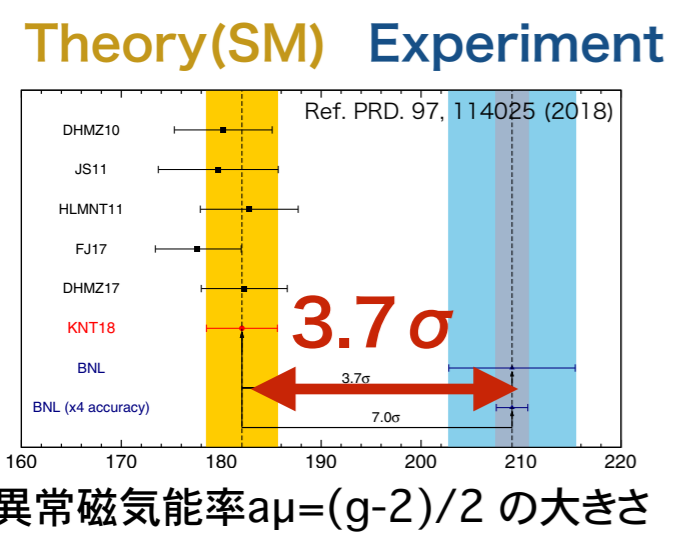
- 各加速空洞の減偏極率
- 各加速空洞のスピン方向-運動量相関とスピン方向広がり

4. まとめと今後の展望

- 素粒子ミュオン
- 第二世代の荷電レプトン粒子
- 電子の200倍の質量を持つ
- 中間子(π , K など) の崩壊によって得られる
- 異常磁気能率($g-2$)と電気双極子能率(EDM)

	電子	ミュオン	タウオン
荷電レプトン	e	μ	τ
電荷 e , スピン $1/2$			
質量[MeV]	0.511	105.6	1777
		約200倍	

異常磁気能率 $g-2$



2000年頃にBNLで測定
標準模型では説明できない
3 σ を超える乖離が存在

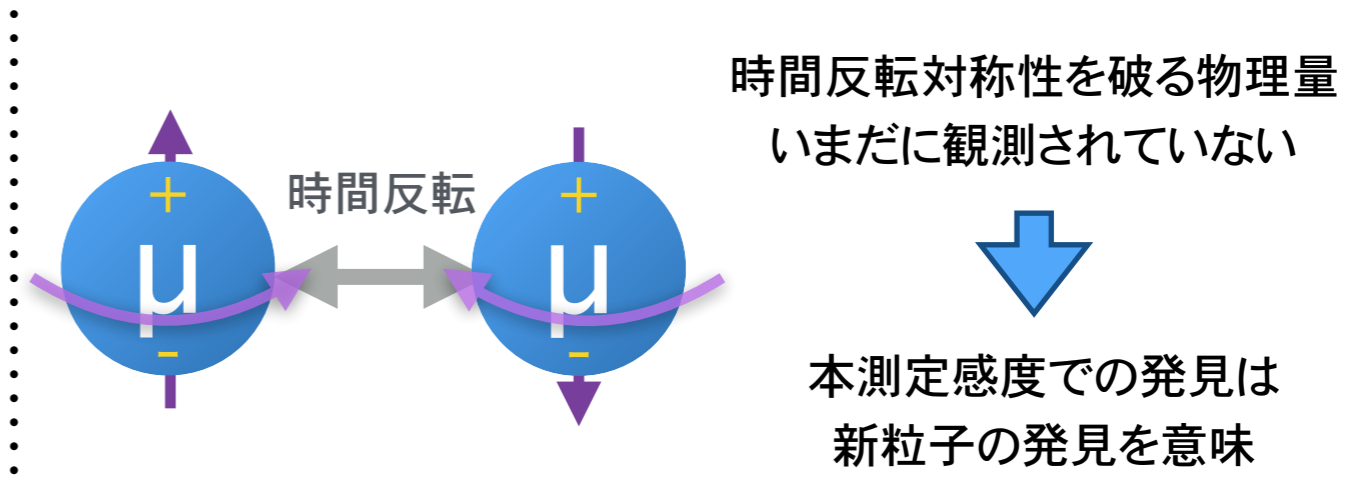
↓

新粒子の存在を示唆

ミュオン $g-2$ 測定精度

540 ppb (先行実験(BNL)) → 460 ppb → 100 ppb (本実験(J-PARC))

電気双極子能率 EDM



ミュオン EDM 測定感度

$1.8 \times 10^{-19} \text{ e}\cdot\text{cm}$ (先行実験(BNL)) → $1.0 \times 10^{-21} \text{ e}\cdot\text{cm}$ (本実験(J-PARC))

20年に渡る未解決問題に終止符

時間反転対称性を破る事象の観測を目指す

■ ミュオン g-2 の測定手法

■ 蓄積ミュオンビームの崩壊によって放出される陽電子数を検出

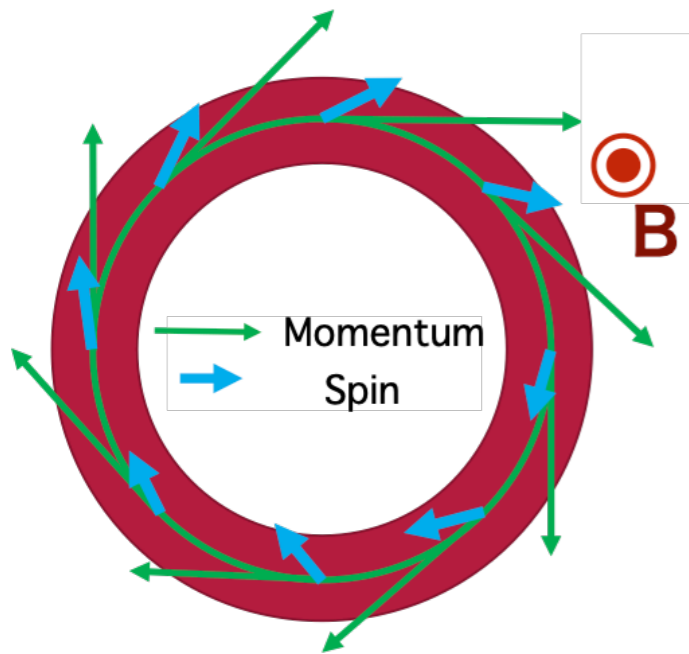
1. ミュオンビームを均一磁場中に蓄積

磁場中における
スピン方向の振動

ミュオン g-2

$$\omega_a = -\frac{eB}{2m_\mu}(g_\mu - 2)$$

スピン方向を測定することで g-2 が測定可能



2. スピン方向に陽電子が放出

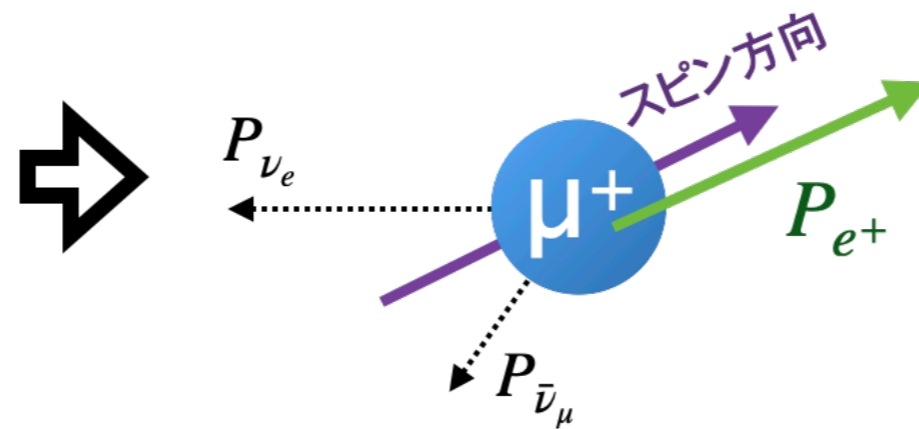
ミュオンは陽電子とニュートリノに崩壊



弱い相互作用の対称性から、
スピン方向に陽電子が放出しやすい



陽電子の放出方向を測定することで
スピン方向が測定可能



3. 陽電子の検出数の時間変化

検出陽電子数時間依存性 N(t)

$$N(t) = \frac{N_{e^+}}{\gamma\tau} e^{-t/\gamma\tau} [1 - PA \cos(\omega_a t + \phi)]$$

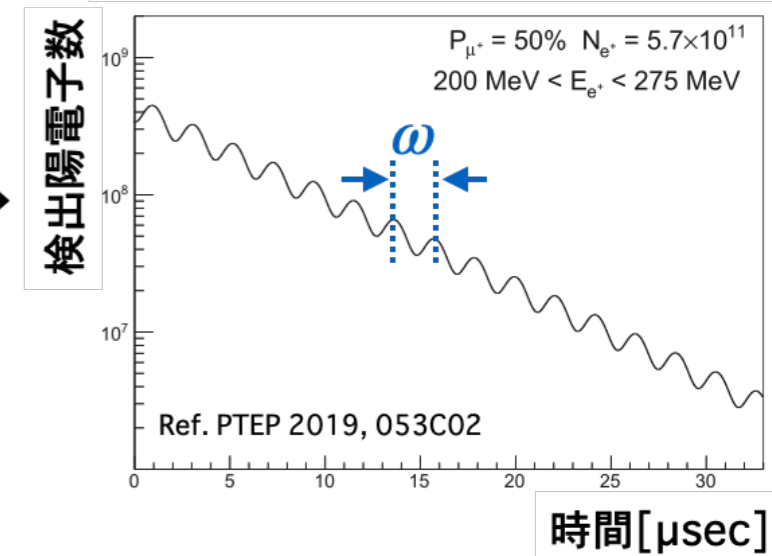
ミュオン崩壊

スピン回転の振動

検出陽電子数の時間変化

= ミュオン崩壊 + スピンの回転振動

期待される検出陽電子数の時間変化

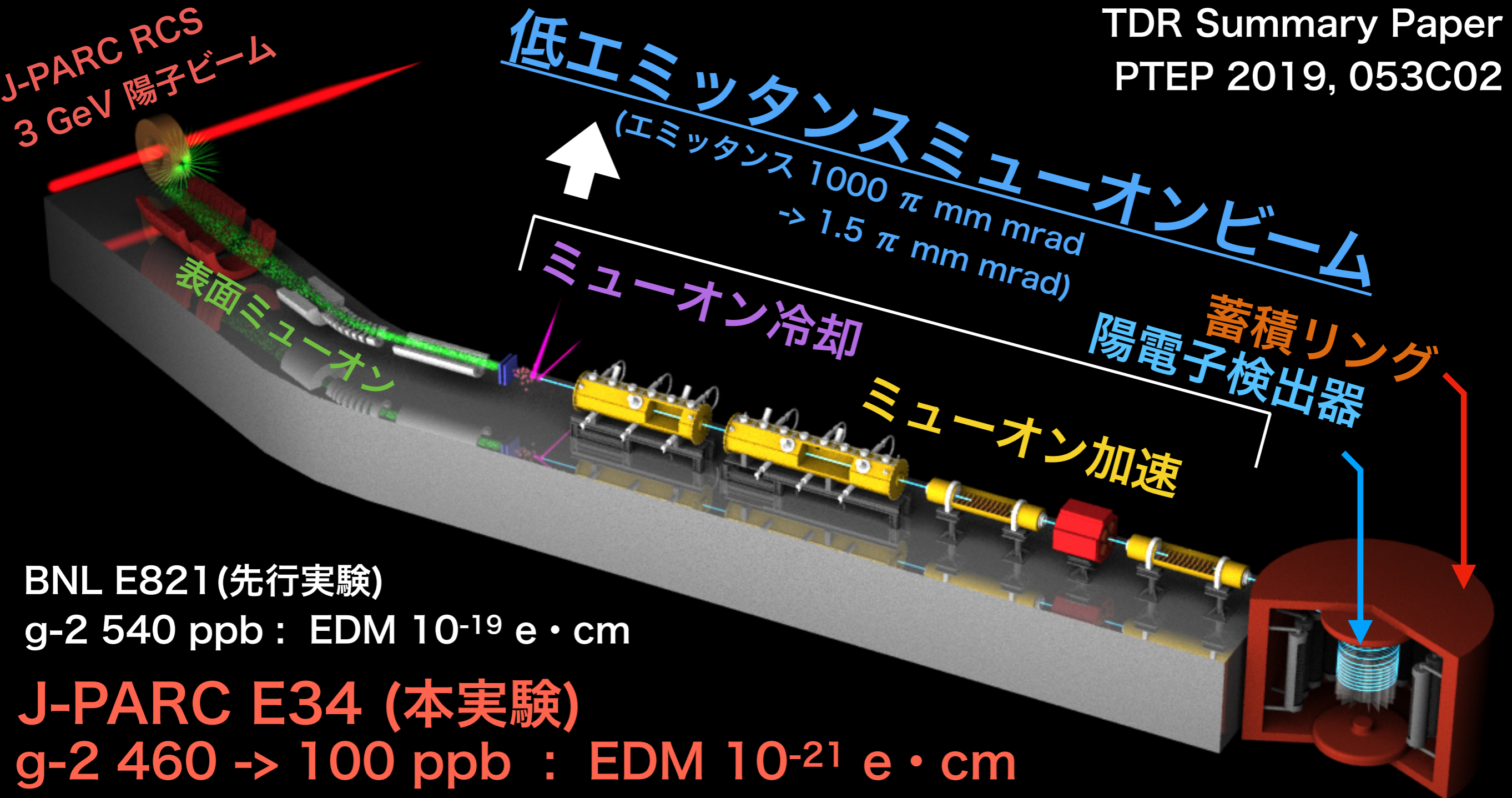


ミュオン g-2 測定 = ミュオン崩壊による陽電子数の時間変化を測定

J-PARC muon g-2/EDM 実験 5

低エミッタンスミュオンビームにより先行実験の主要な系統誤差を排除
従来とは異なる手法での標準模型の検証

TDR Summary Paper
PTEP 2019, 053C02



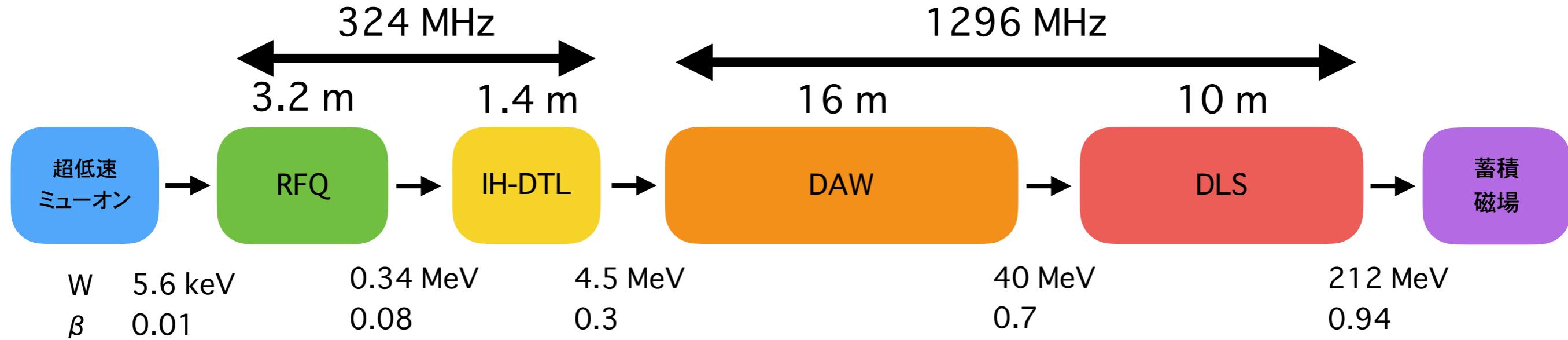
BNL E821 (先行実験)
g-2 540 ppb : EDM 10^{-19} e · cm

J-PARC E34 (本実験)
g-2 460 → 100 ppb : EDM 10^{-21} e · cm

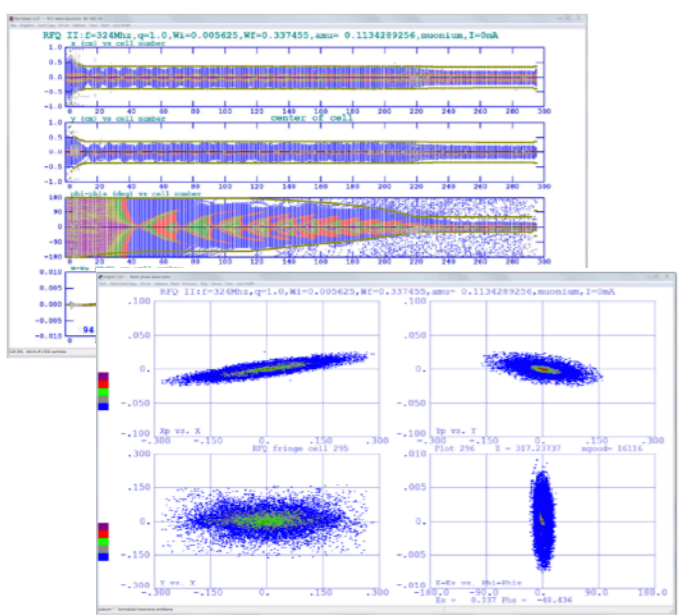
■ ミュオン線形加速器概要

- β の変化に合わせて、4つの加速空洞を利用
- 各空洞に合わせたシミュレーションツールを使用

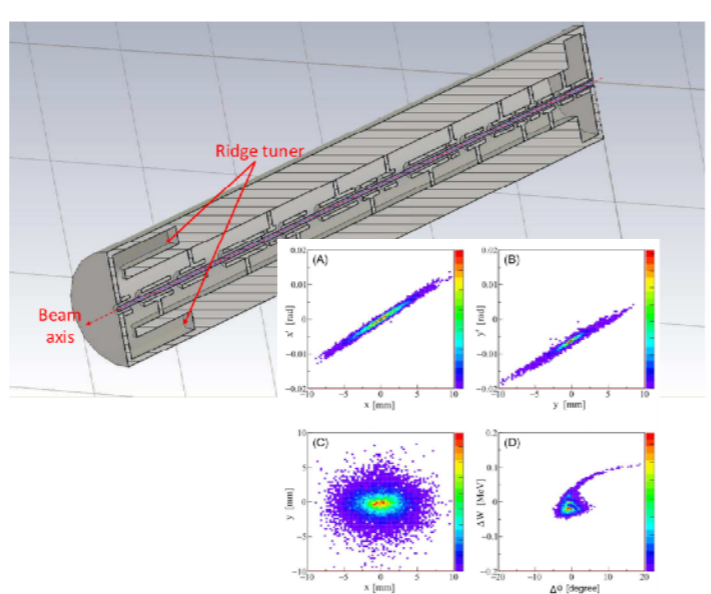
■ 本シミュレーションのために、全てをGeneral Particle Tracer(GPT)に移行



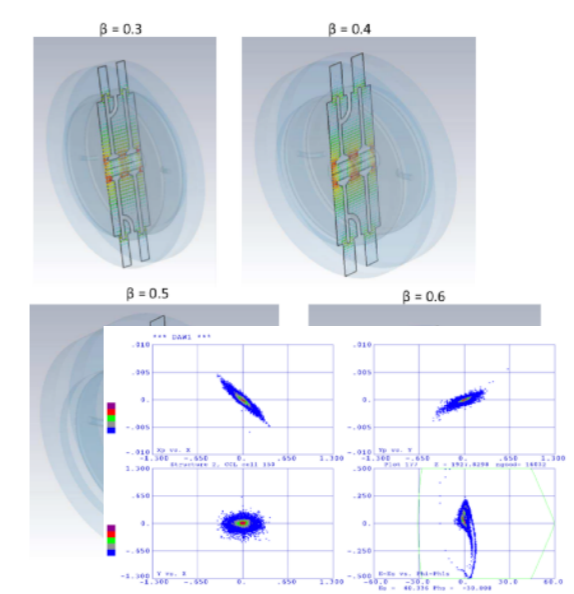
RFQ : PARMTEQM->GPT



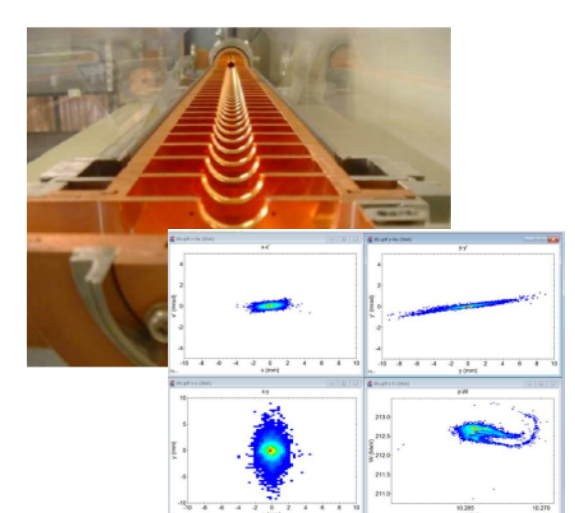
IH-DTL : CST + GPT



DAW : Parmila->GPT



DLS : GPT



■これまでの開発状況

第12回年会(2015) ミューオン線形加速器の基本設計

第13回年会(2016) ビームダイナミクスの設計完了

第14回年会(2017) 加速試験用の 負Mu の観測

第15回年会(2018) プロトタイプRFQによる世界初のミューオンRF加速実証

第16回年会(2019) バンチ幅モニターの開発と実証試験

本年会関連講演 IH-DTL空洞の大電力試験に向けた準備状況 (中沢) FRO003

DAWのcold model試験およびカプラー設計 (竹内) FRO004

ビームダイナミクスの測定準備、実機加速空洞に向けた開発が進行中

■本研究の目的

ミューオンg-2測定では、ビームダイナミクスに加え
スピンドイナミクスの理解も重要



現加速器設計において、スピンドイナミクスシミュレーションを行い、
ミューオンg-2測定へ影響する項目について評価

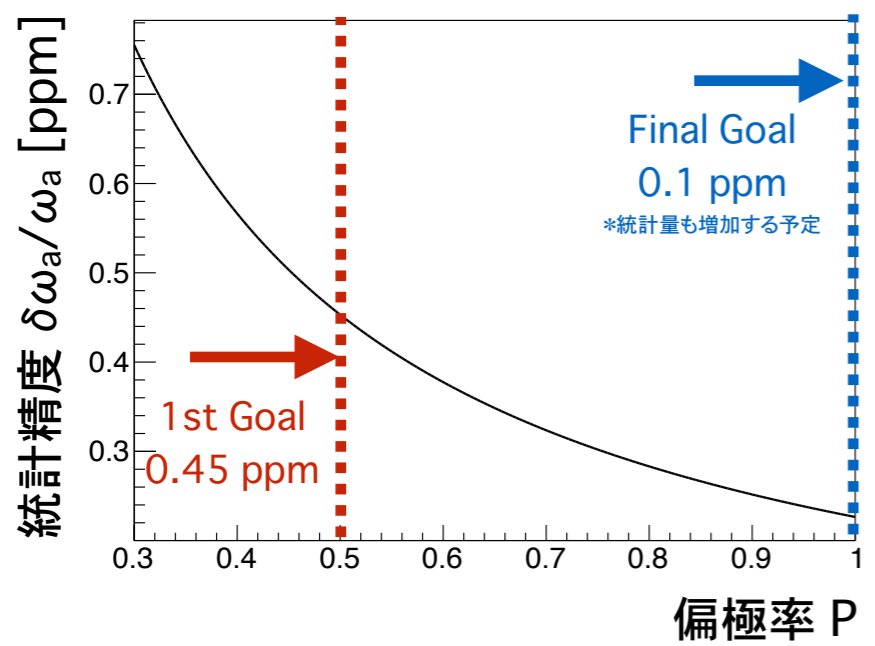
■ ミューオンg-2測定に影響を与えるスピンドYNAMIXの項目

1. 加速器による減偏極

ミューオンg-2の統計誤差

$$\frac{\delta\omega_a}{\omega_a} \sim \frac{\sqrt{2}}{\omega_a \gamma \tau A P \sqrt{N}}$$

N : データサンプル数
 γ : ローレンツ因子
 τ : ミューオン寿命
 A : Analyzing power
 P : 平均偏極率



偏極率の低下 → 統計誤差の悪化

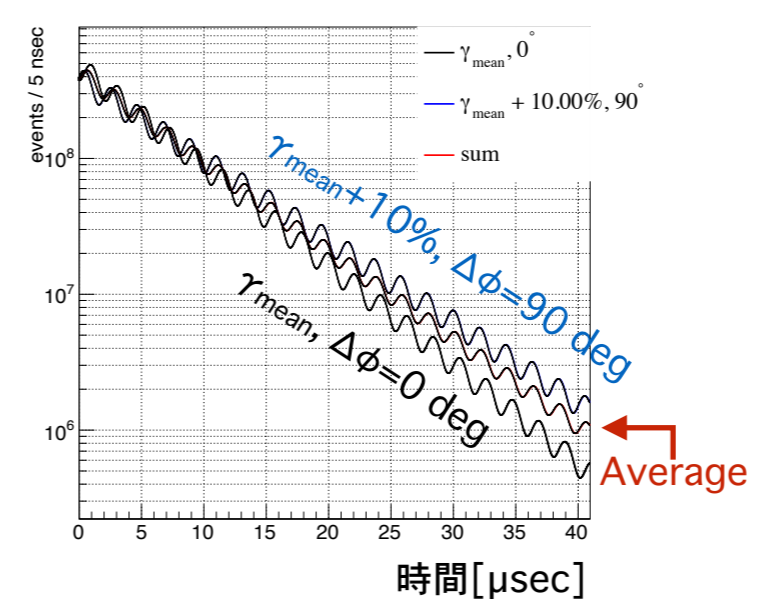
2. スピン方向と運動量の相関

検出陽電子数時間依存性 $N(t)$

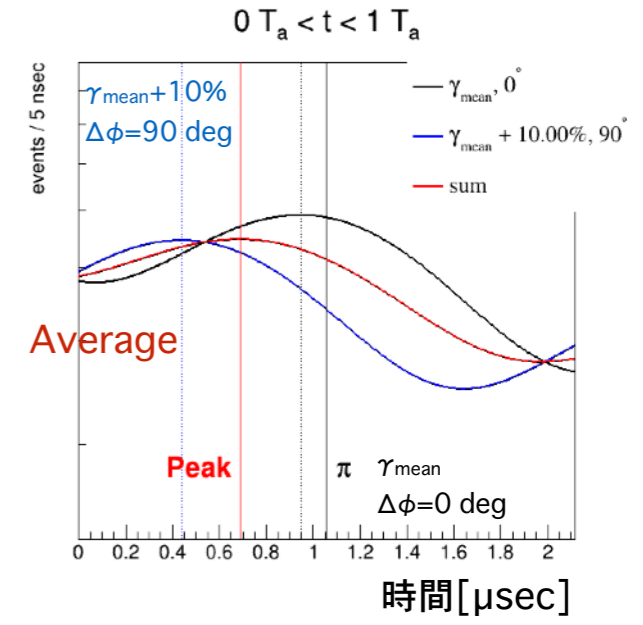
$$N(t) = \frac{N_{e^+}}{\gamma\tau} e^{-t/\gamma\tau} [1 - PA \cos(\omega_a t + \phi)]$$

蓄積磁場中のスピン回転
蓄積磁場中の回転 入射時のスピン方向

運動量と位相が異なる二つの信号と平均



各振動周期のピーク位置の変化



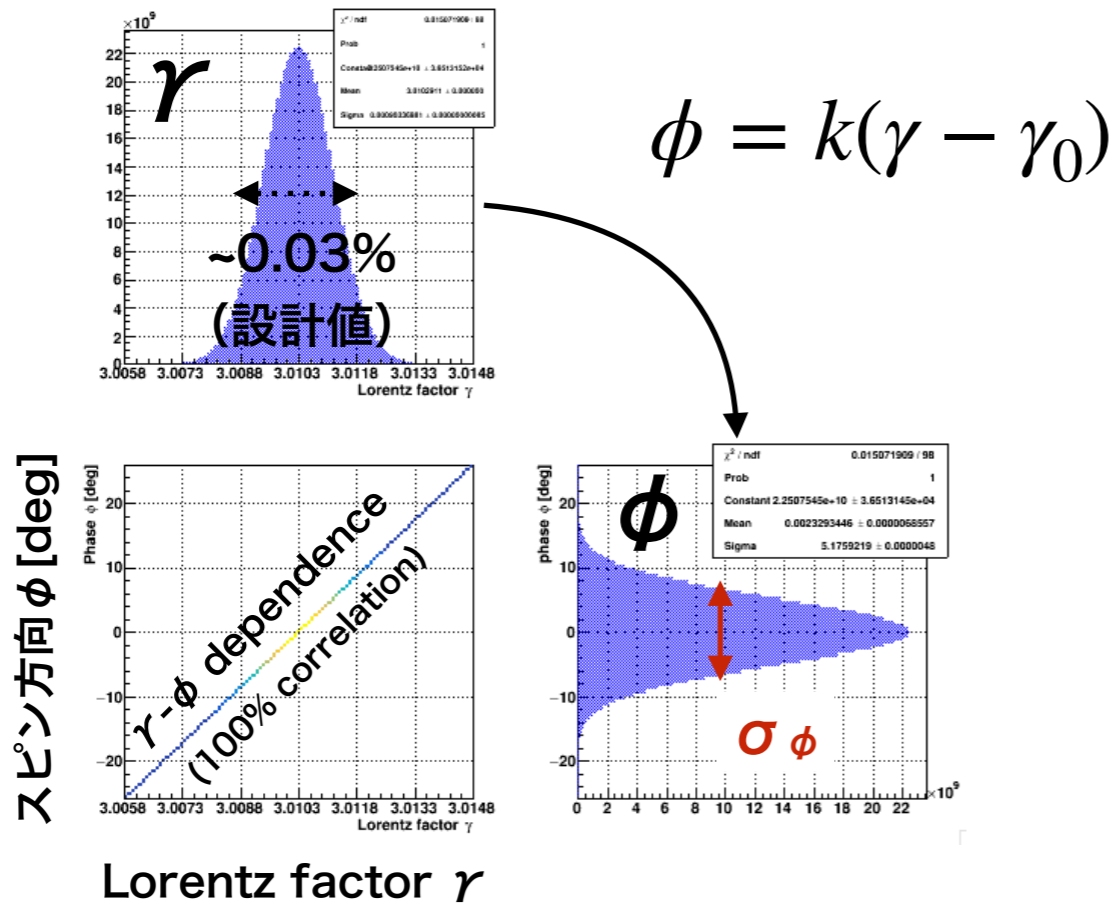
スピン方向と運動量の相関 → 系統誤差要因

本研究では「減偏極率」と「スピン方向と運動量の相関」を評価

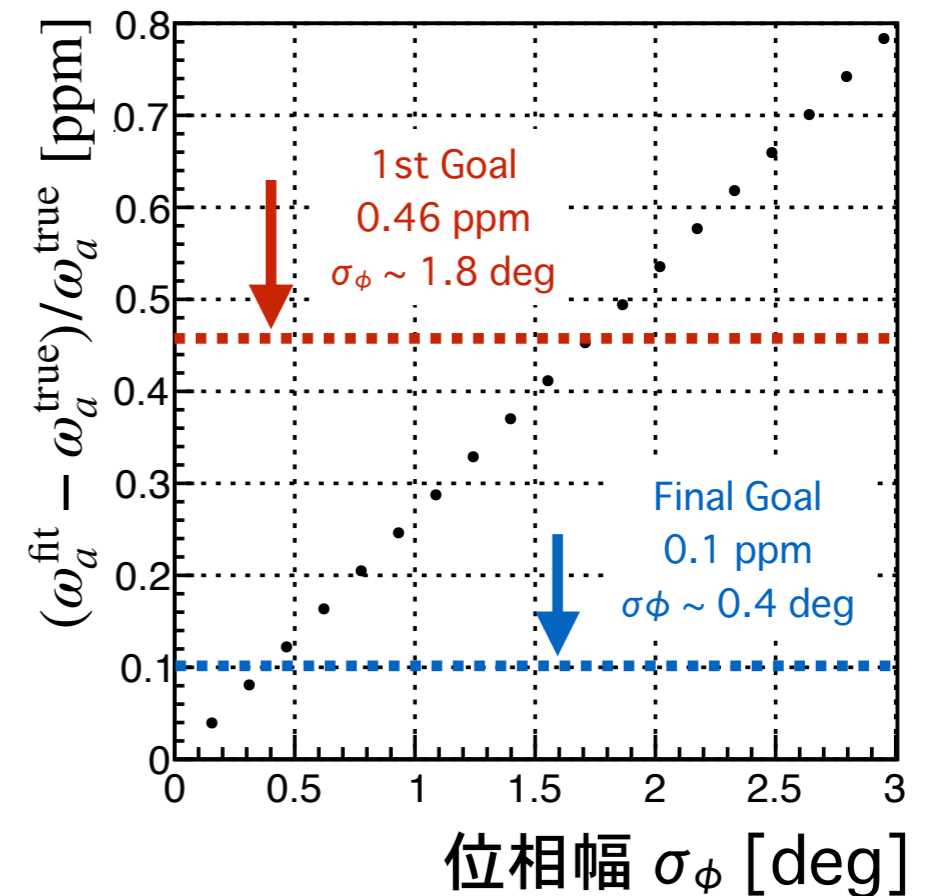
■ スピン方向と運動量相関の要求値

- スピン方向と運動量が100%正に相関していると仮定
- 相関の大きさをスピン方向の広がり σ_ϕ として評価

仮定した運動量-スピン方向相関



相関の大きさによる系統誤差の変化



スピン方向 ϕ と運動量の相関の要求値

相関が100%の場合に、スピン方向の広がり $\sigma_\phi < 0.4$ deg

■ 計算ステップにおける電磁場情報からスピンドYNAMICSを計算

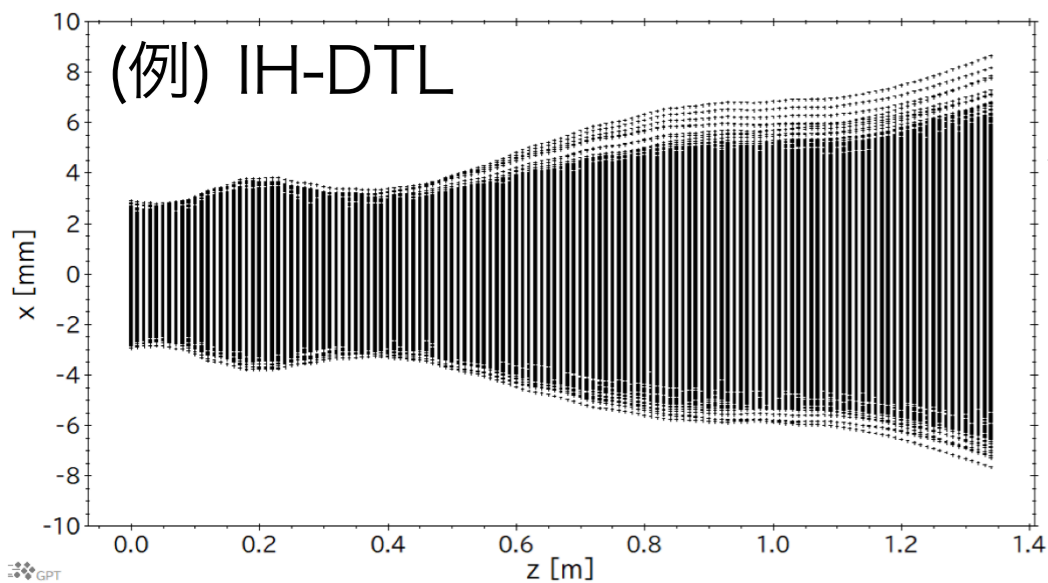
-> Runge-Kutta法を用いているGPT によるシミュレーションが有用

■ Beam dynamics

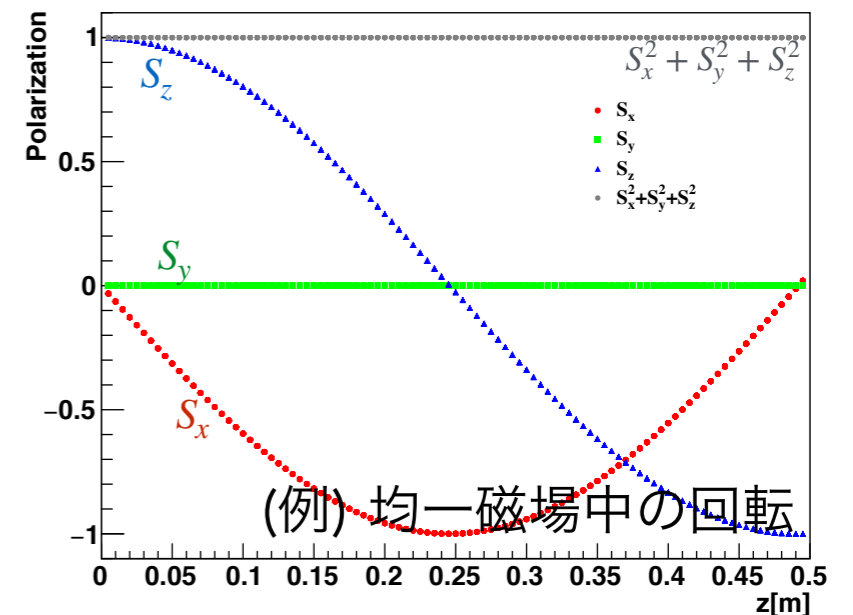
■ Spin dynamics

GPT (General Particle Tracer)

Self-made code



各計算ステップでの
粒子・電磁場情報を取得
(x, p, B, E etc...)



- GPTではユーザー関数によって計算ステップにアクセス可能
- RFQ, DAWのシミュレーションをGPTのシミュレーションへ移行した

- Runge-Kutta法を用いて計算
- スピン運動を記述する基本方程式のT-BMT方程式に基づいて計算

ソフトウェア(GPT)をベースにした手法でシミュレーションを実行

■ 各加速器空洞での減偏極率を調査

■ 粒子分布：超低速ミュオン

■ 各加速空洞の初期スピン： $P_z = 1$ (z方向に100%偏極)

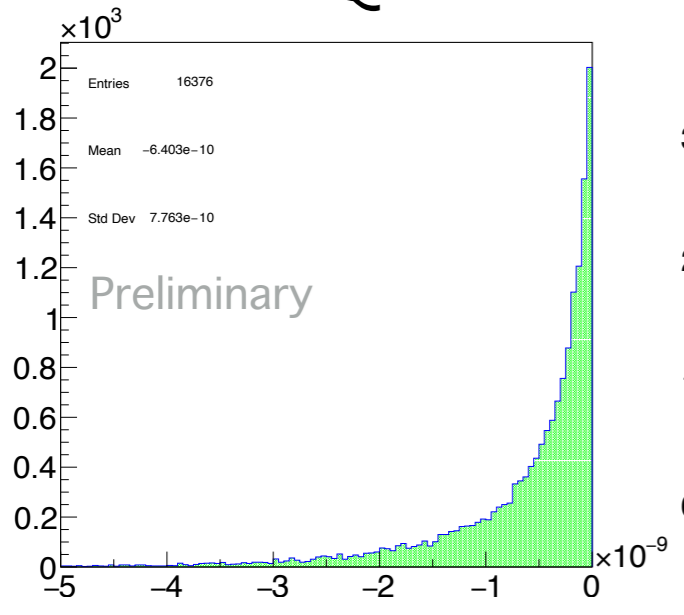
■ それぞれの加速空洞固有の減偏極について確認

■ 減偏極によるミュオンg-2統計数の減少は十分に小さい

	RFQ	IH-DTL	DAW	DLS
減偏極率 $ \Delta P_z $	6×10^{-10}	1.4×10^{-5}	4.2×10^{-5}	4.4×10^{-6}

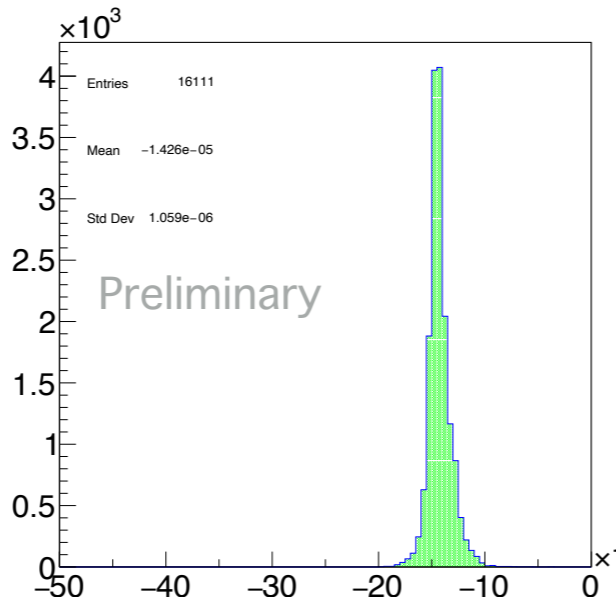
各加速空洞での偏極率の変化 $\Delta P_z = (P_z - 1)$

RFQ



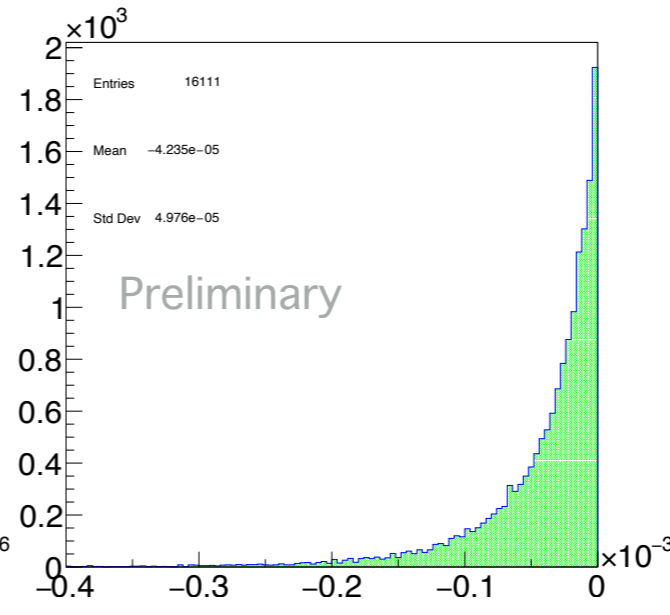
偏極率の変化 $\Delta P_z = (P_z - 1)$

IH-DTL



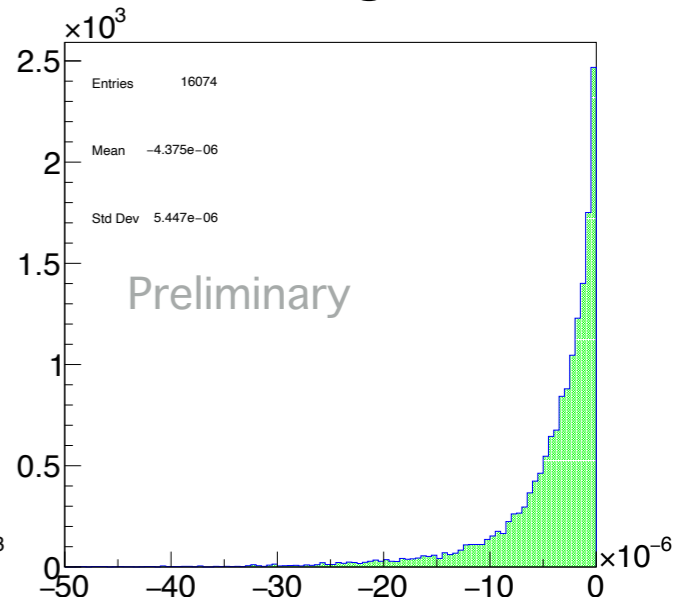
偏極率の変化 $\Delta P_z = (P_z - 1)$

DAW



偏極率の変化 $\Delta P_z = (P_z - 1)$

DLS



偏極率の変化 $\Delta P_z = (P_z - 1)$

各加速空洞でのスピン位相分散

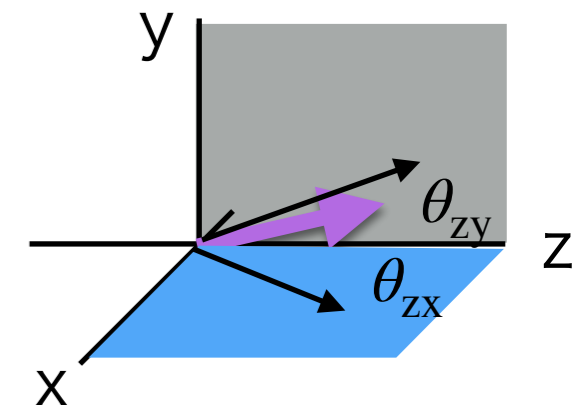
12

■ 各加速空洞出口でのスピン方向と運動量相関の有無を確認

■ スピン方向と運動量の相関は、IH-DTL(ZY平面)でのみ見えている

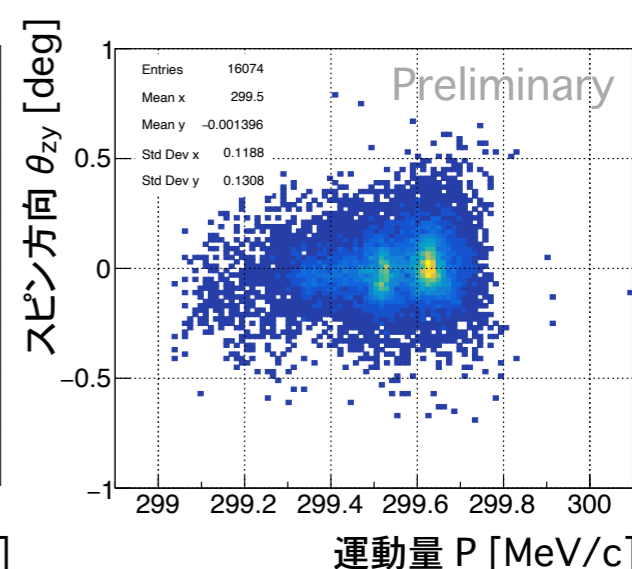
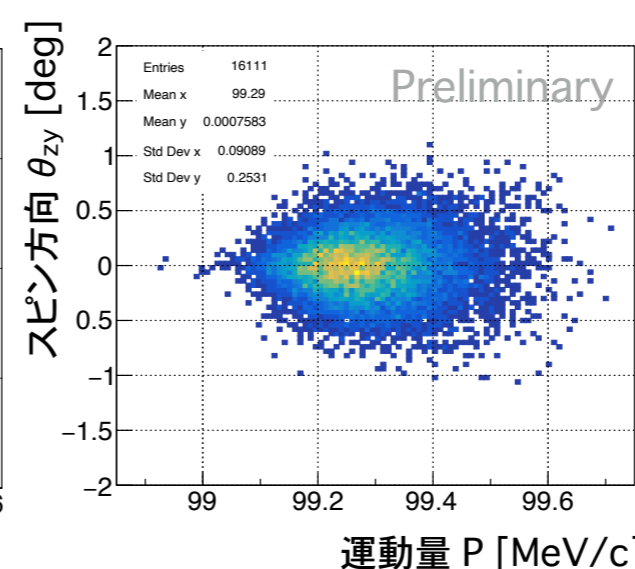
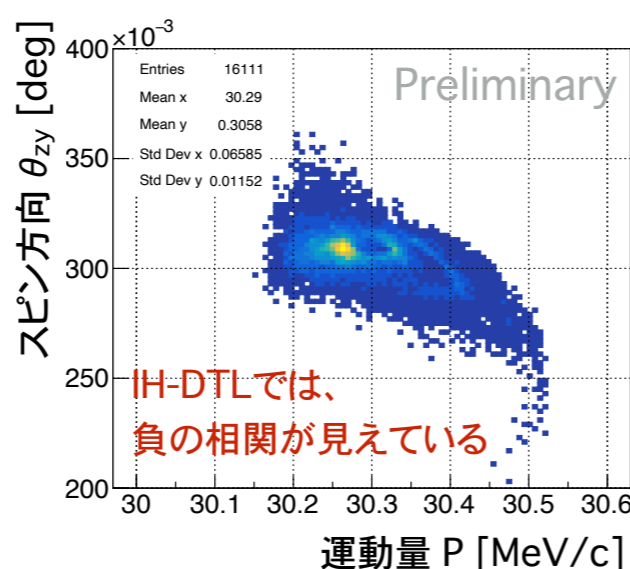
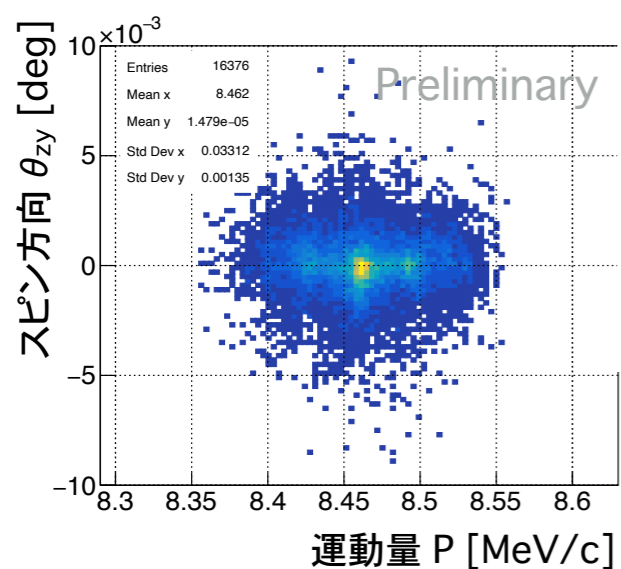
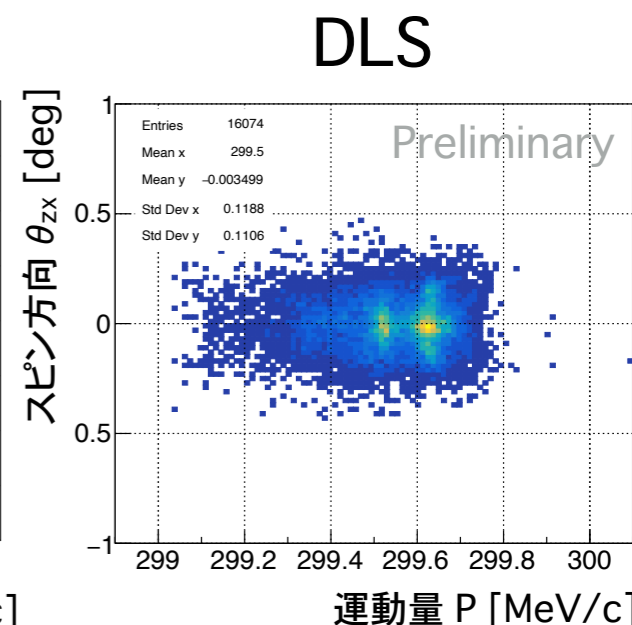
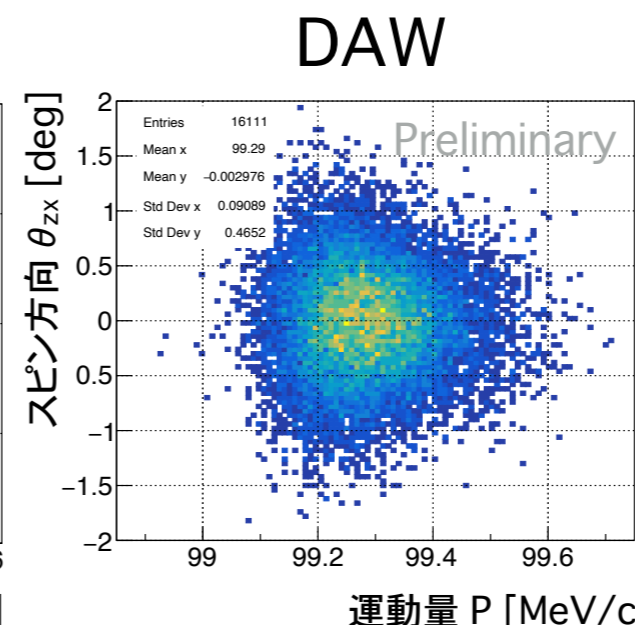
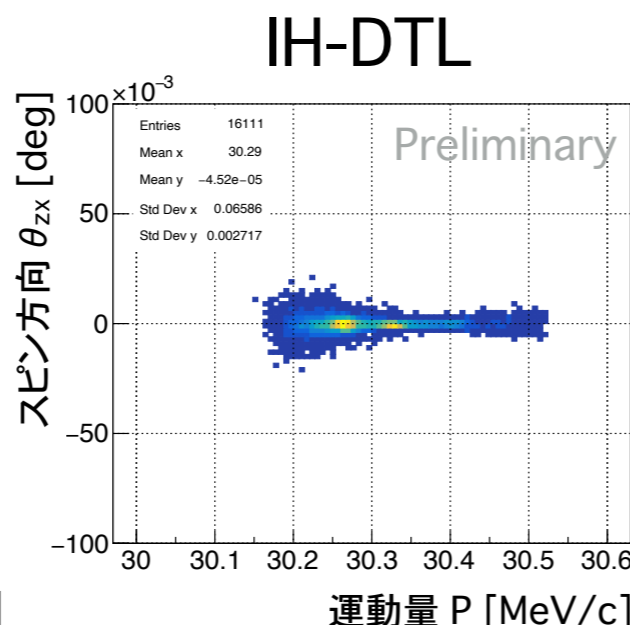
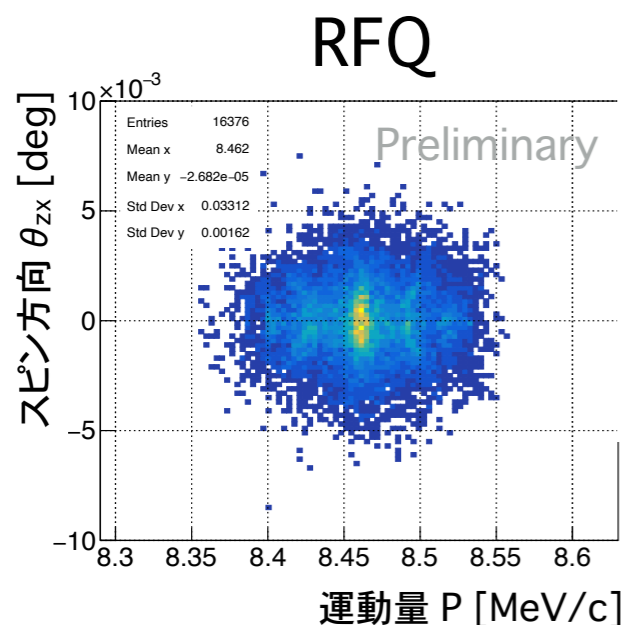
■ IH-DTLの加速電場(TEモード)による横磁場の影響

■ 一方で、他の空洞では顕著な相関は見られない



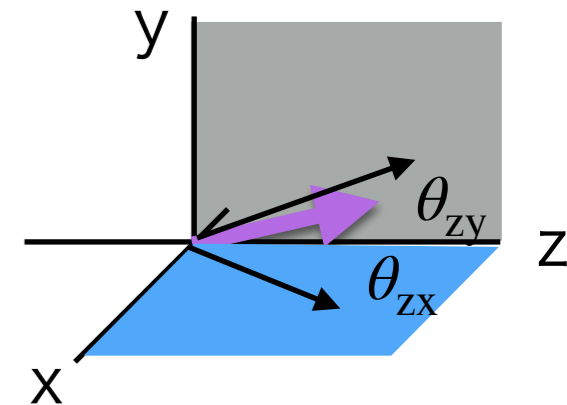
ZX平面のスピン回転

ZY平面のスピン回転

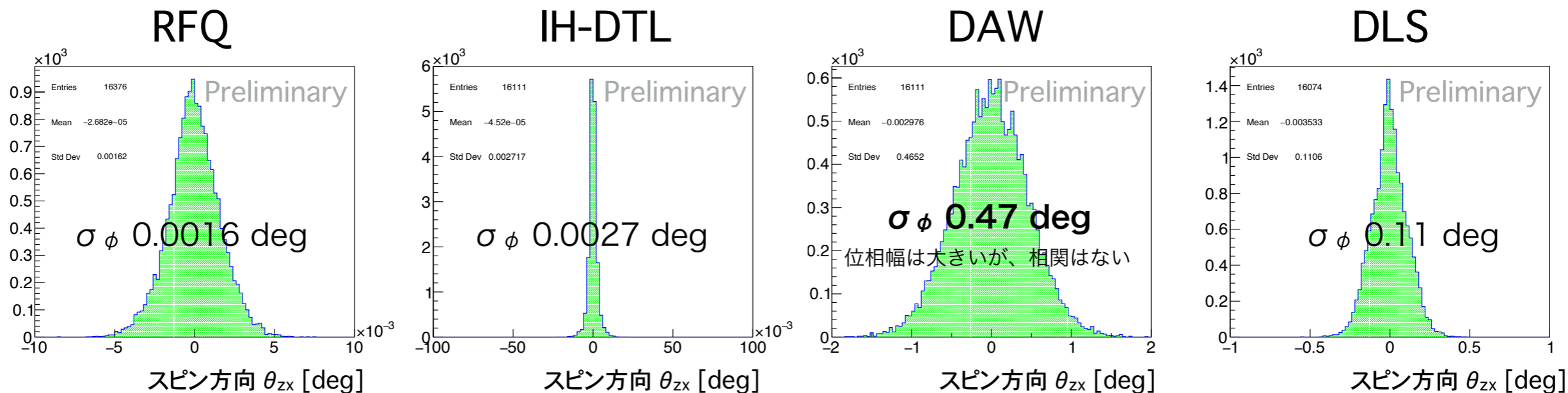


各加速空洞でのスピン位相分散

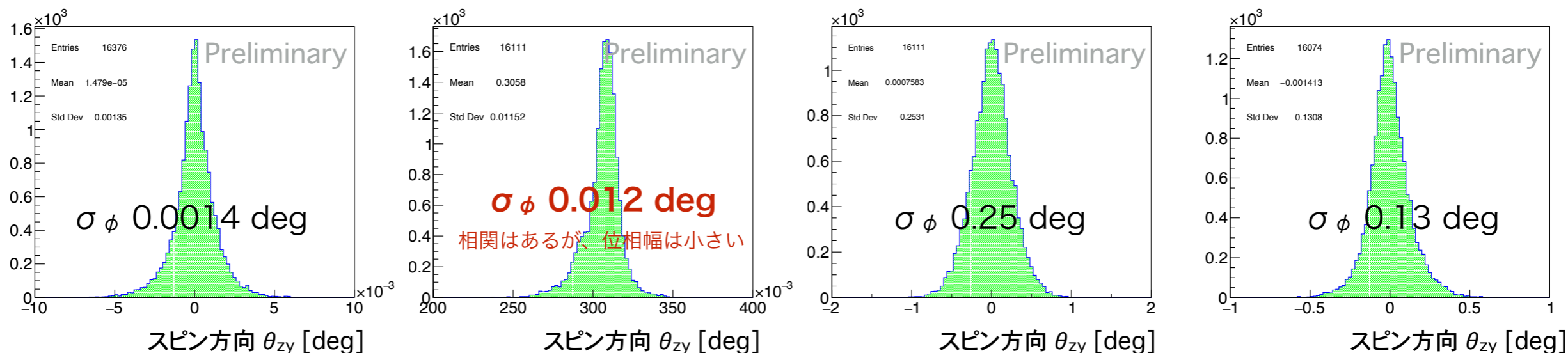
- 各加速器空洞でのスピン方向の広がりを評価
 - muon g-2実験で要求される位相分散(100%相関と仮定) : 0.4 deg (StD)
 - 負の相関が見えているIH-DTL(ZY平面) : $\sigma_\phi \sim 0.012$ deg
 - 相関が見えるIHでのスピン方向の広がりには十分に小さい
 - 最も大きいスピン方向の広がり : DAWで $\sigma_\phi \sim 0.47$ deg
 - 相関は見られないため、ミュオンg-2測定への影響ないと考える



ZX平面のスピン回転



ZY平面のスピン回転



- J-PARC muon g-2/EDM 実験では、先行実験よりも高精度な測定により、新粒子の探索を目指す。
- スピンダイナミクスの評価項目として、減偏極率とスピン方向と運動量相関を調査
 - スピン方向と運動量相関：100%相関を仮定して、 $\sigma_\phi < 0.4 \text{ deg}$
- ソフトウェア(GPT)を拡張する手法によってシミュレーションを実行
- スピンダイナミクスシミュレーションの結果として、
 - 減偏極率は本実験に全く影響しないほど小さい
 - IH-DTL後では負の相関が見えるが、本実験へのスピン方向幅 σ_ϕ 要求以下の値
- 今後の展望
 - 製作誤差など、非対称な電磁場分布が生じた際のスピンダイナミクスについて調査
 - 上流部も含む実験全体のスピンダイナミクスシミュレーションを行う