

Flavor Physics Workshop
J-PARC muon $g-2$ /EDM実験における
陽電子飛跡を用いたミュオンビーム分布測定
のためのシミュレーション解析

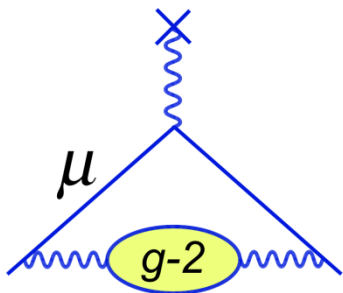
名古屋大学 M1 須江 祐貴

2017. 11. 1

双極子モーメント

異常磁気モーメント $g-2$

- 先行の実験結果と標準理論からの予測値の間には 3.3σ のずれが見えている



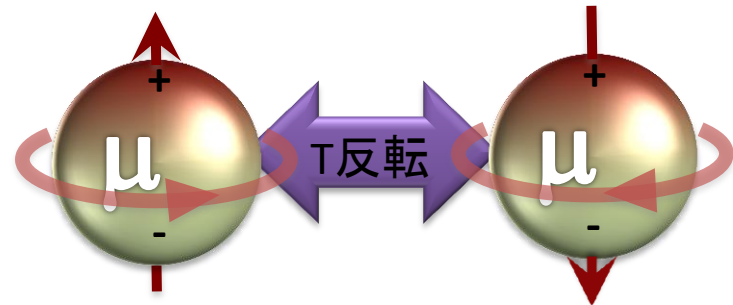
$$\vec{\mu} = g \left(\frac{q}{2m} \right) \vec{s}$$

$$\alpha_{\mu} = \alpha_{\mu}^{QED} + \alpha_{\mu}^{had.} + \alpha_{\mu}^{weak} + \alpha_{\mu}^{BSM}$$

電気双極子モーメントEDM

- 有限のEDMの測定は時間反転対称性の破れの測定につながる

$$\vec{d} = \eta \left(\frac{q}{2mc} \right) \vec{s}$$

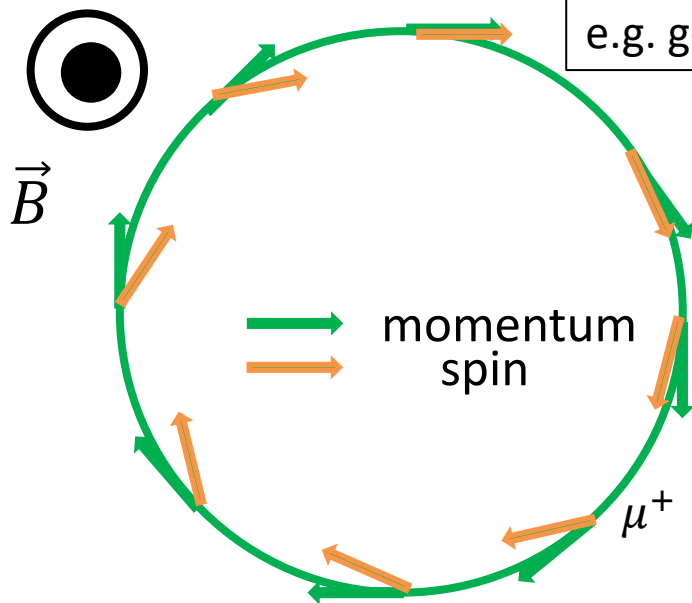


先行の実験とは異なる手法を用いた精密測定

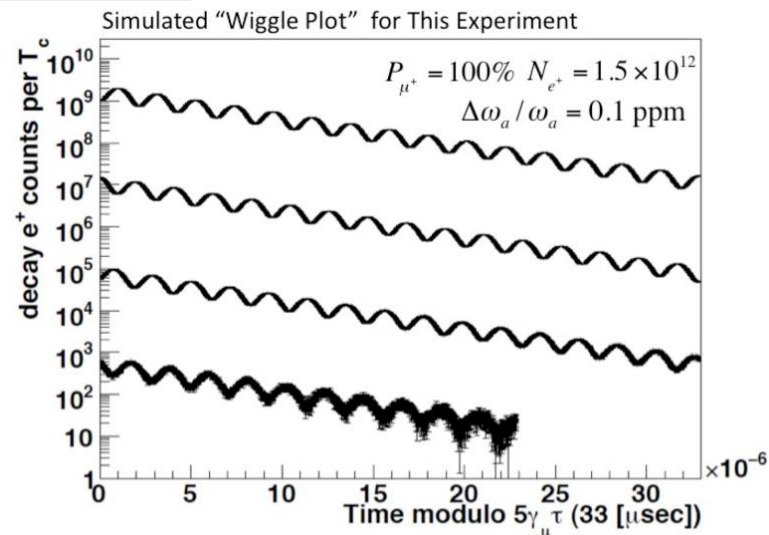
Muon g-2/EDM Experiment @J-PARC

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_\alpha + \vec{\omega}_\eta = -\frac{e}{m} \left[\alpha_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

e.g. g-2による周期の場合



ミューオンの受ける磁場を推定する



振動の周期を精密に測定する

ミューオンスピンの歳差運動周期と磁場から、精密にg-2/EDMを求める

- ✓ g-2 α_μ : 0.54 ppm \rightarrow 0.1 ppm
- ✓ EDM η : $1e-18$ e·cm \rightarrow $1e-21$ e·cm

J-PARC g-2/EDM experiment

3 GeV 陽子ビーム

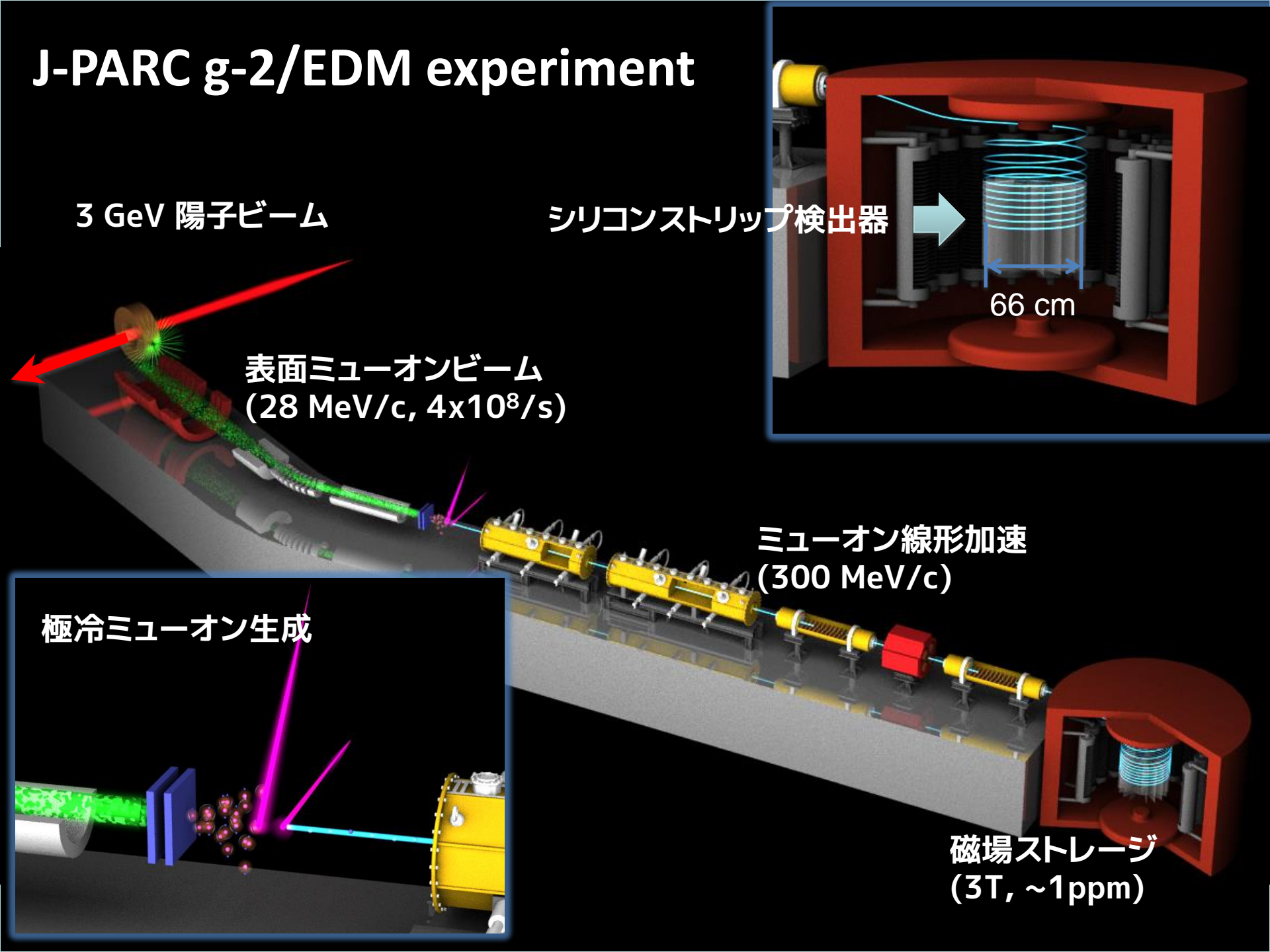
シリコンストリップ検出器

表面ミュオンビーム
(28 MeV/c, $4 \times 10^8/s$)

ミュオン線形加速
(300 MeV/c)

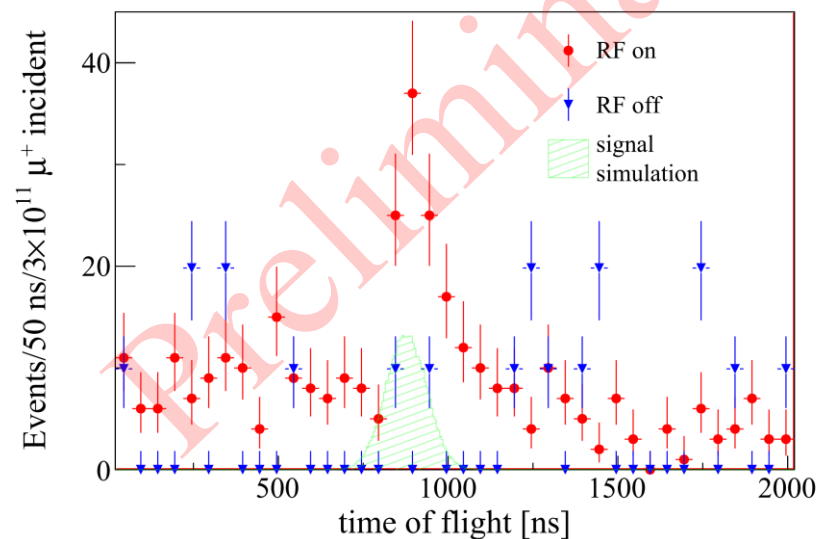
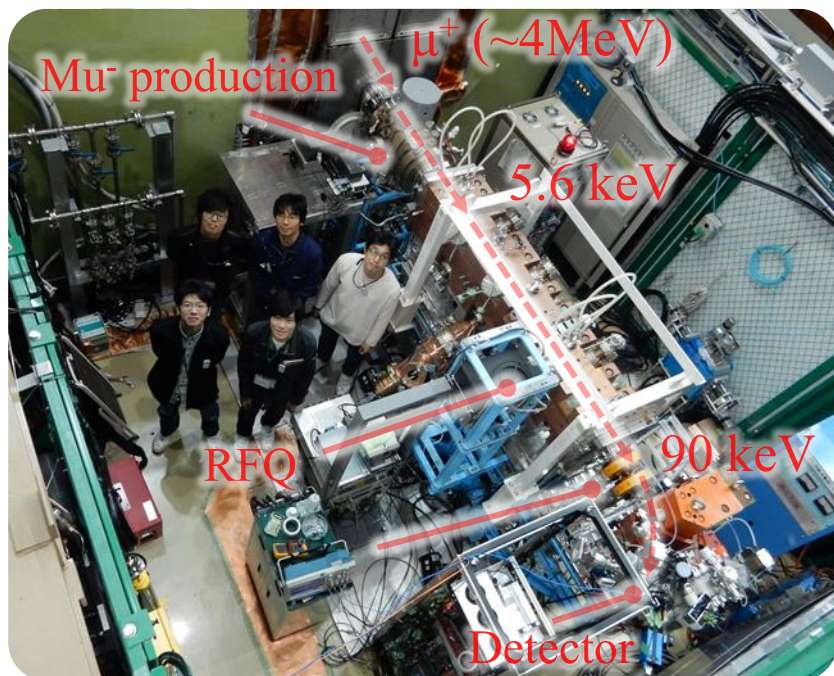
極冷ミュオン生成

磁場ストレージ
(3T, ~ 1 ppm)



ミュオン線形加速器

Muon acceleration beam test @ J-PARC (Oct. 24th – 30th, 2017)



世界初のミュオンRF線形加速に成功!

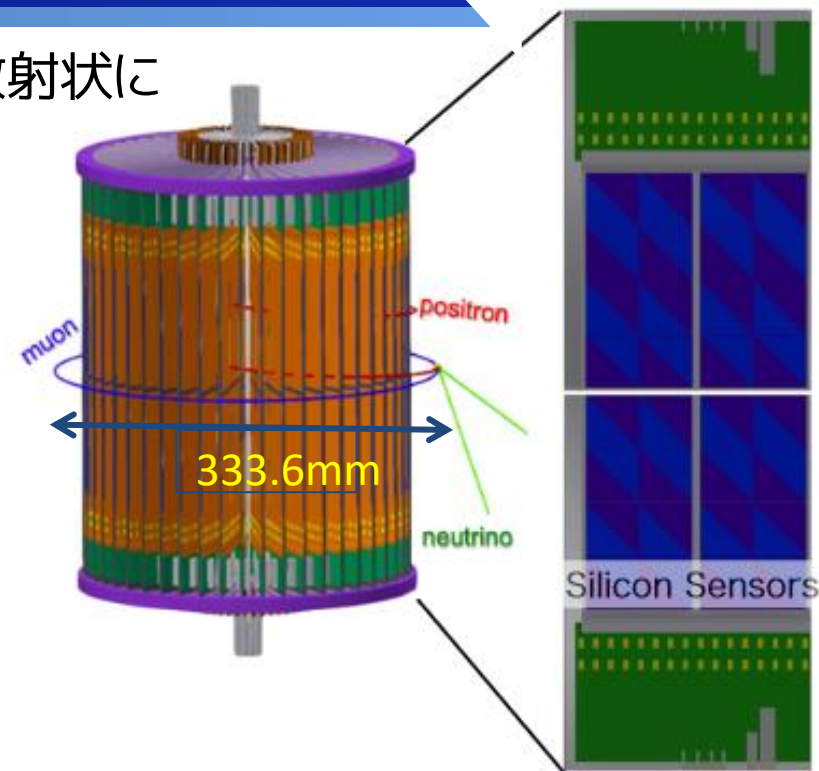
シリコンストリップ検出器

48枚のシリコンストリップ検出器(ベーン)を放射状に配置した検出器で陽電子軌道を検出

陽電子飛跡の時間情報と運動量を取得する

本研究

得られた陽電子の飛跡情報からミュオンビームの分布を間接的に測定する



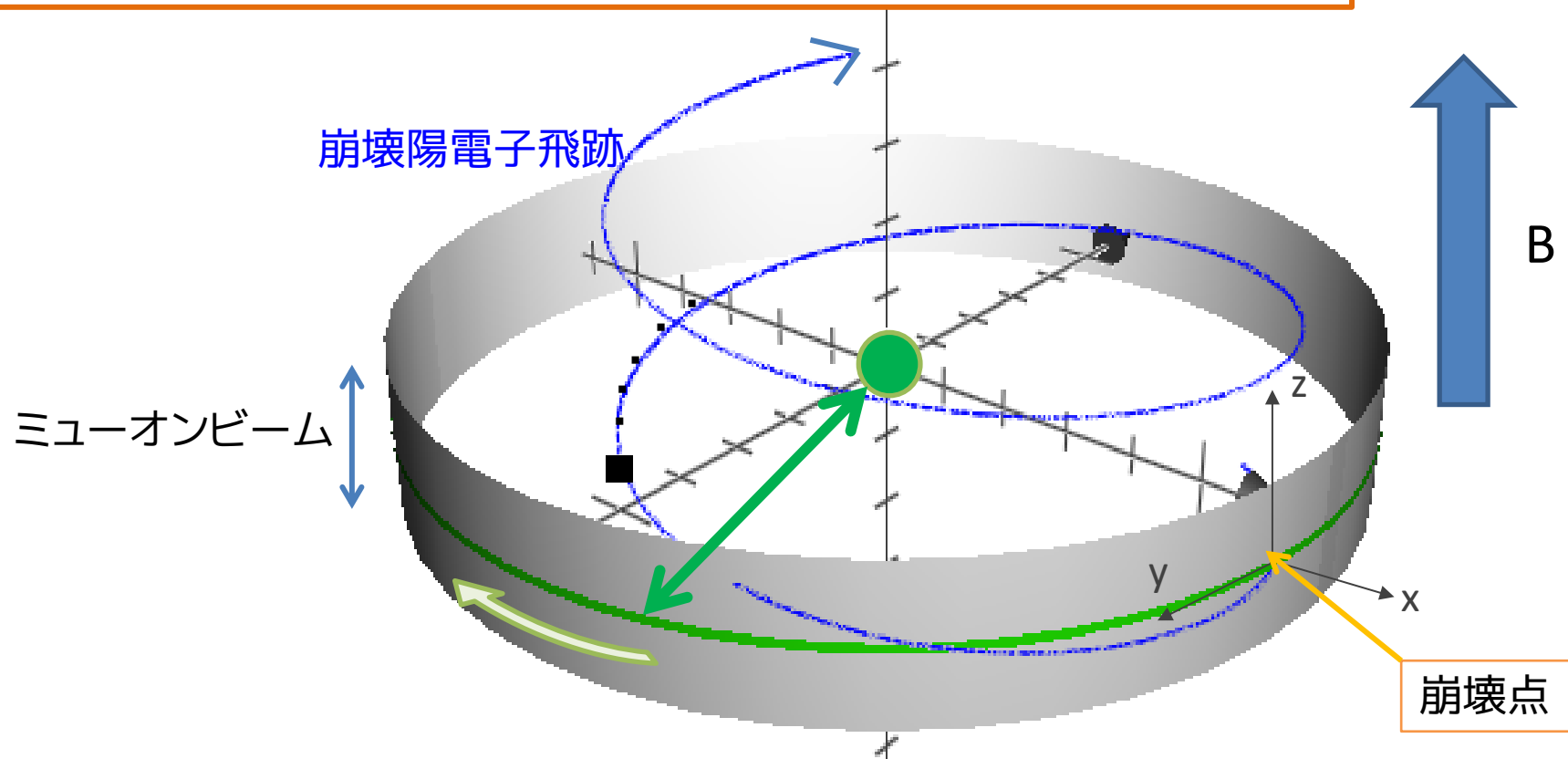
・ ミューオンの受ける磁場を確認

- ・ 0.1 ppmを達成するためにはミュオンにかかる磁場の精度が重要
- ・ ストレージ内での磁場は数ミリのずれで1 ppm変わってしまう
 - g-2/EDM測定に必要不可欠
- ・ ミューオンビームの最終的なプロファイルの確認
- ・ 崩壊点再構成による正確な崩壊時間の取得

ミュオン分布測定

広がりのないビームにおいて決定したいパラメータは

- 軌道中心 : 必ずしも検出器の中心とは一致しない
- 軌道高さ Z
- 半径 : 磁場強度に依存する



データフロー

検出器のヒット情報

→ **Geant4 シミュレーション**

- ベーン48枚→24枚
- 1ミュオンずつ入射
- 磁場は3Tで均一



飛跡の抽出

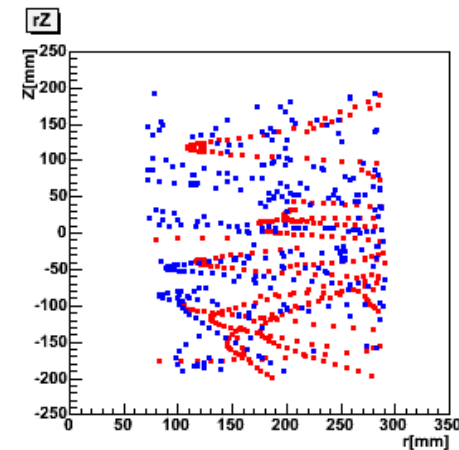
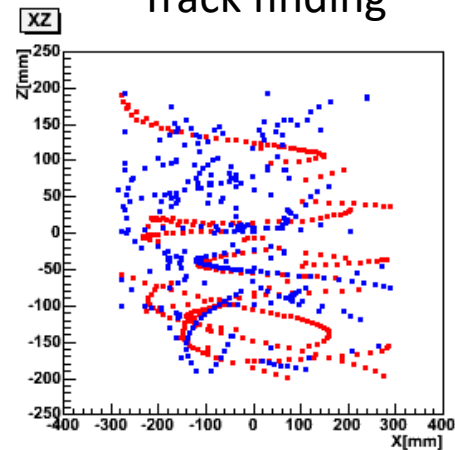


飛跡フィット → **MC情報**



ミュオン分布測定

Track finding

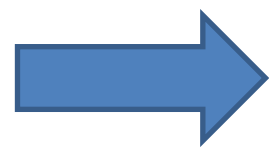
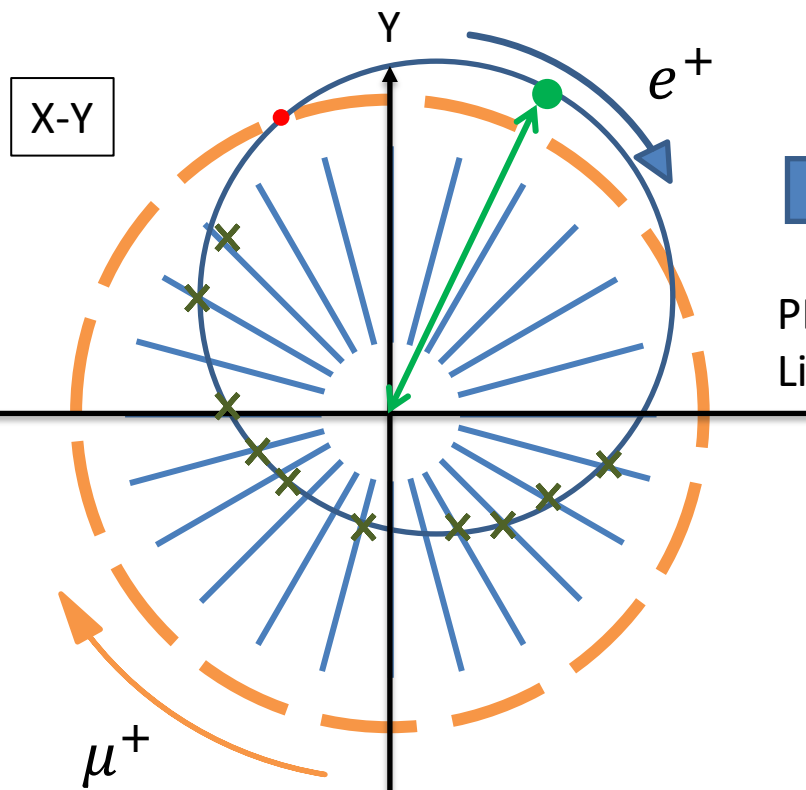


Track fitting

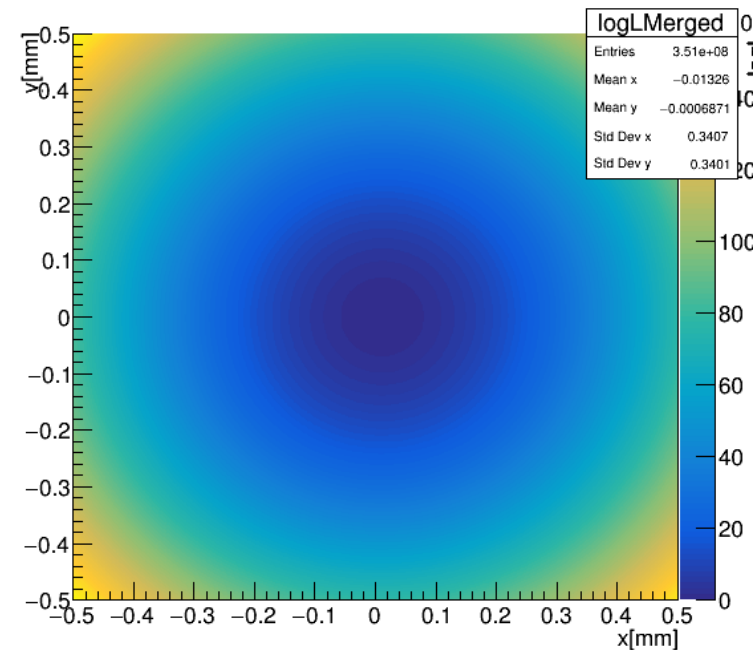
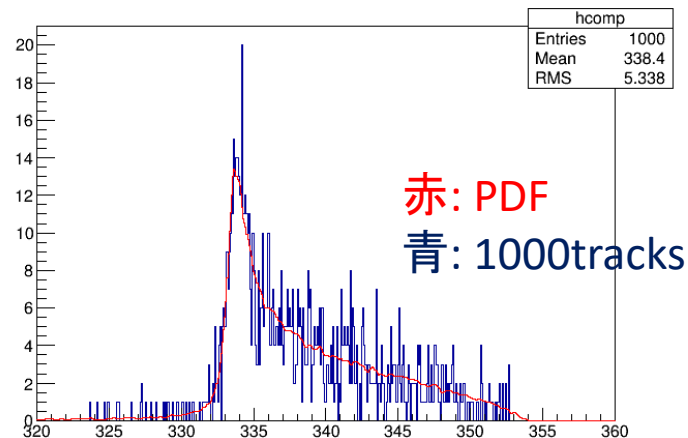
測定手法: 中心(X,Y)

XY平面上で陽電子軌道の最も遠い点と仮定した中心との距離を求める

この距離分布のPDFをもとに likelihoodで中心を決定する



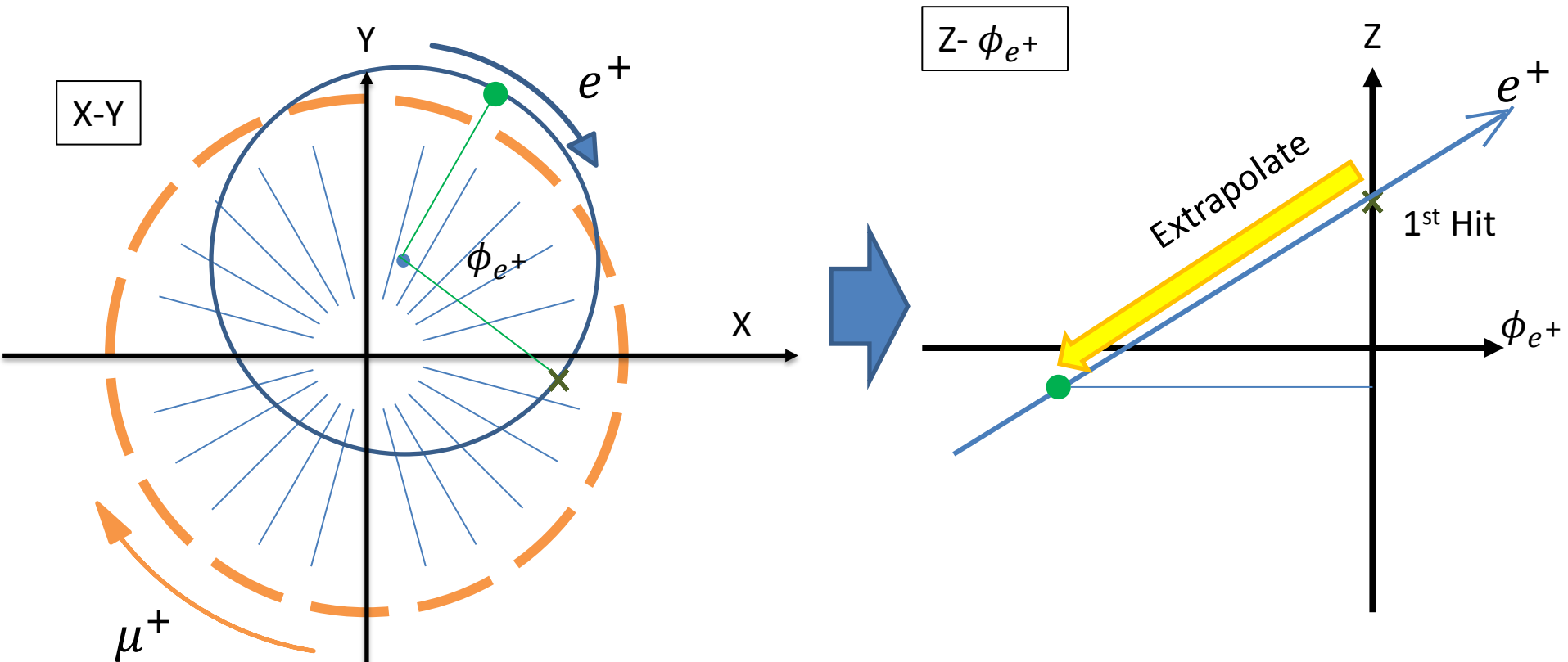
PDFを用いて
Likelihood Fit



測定手法:Z

陽電子軌道上を外挿してZの分布を求める

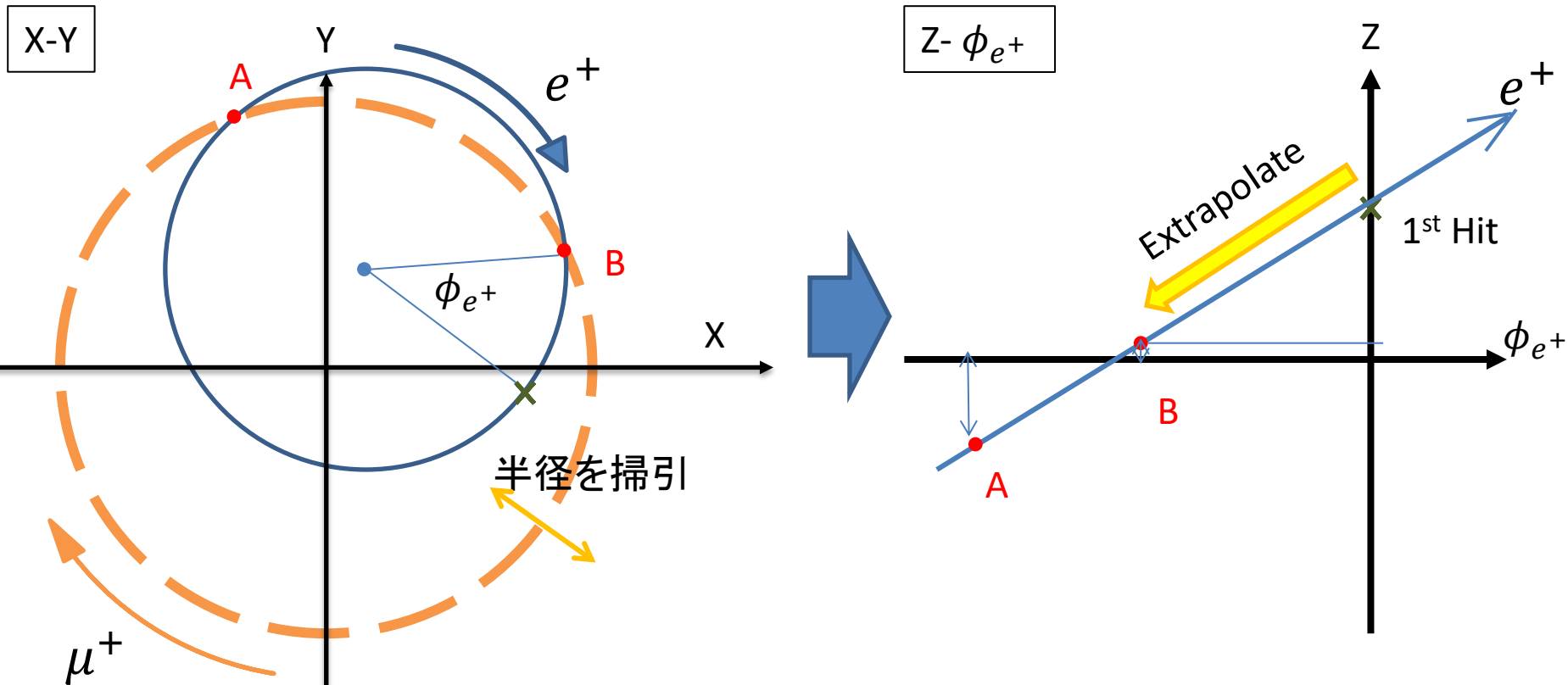
→ 上下放出比が同じならば正しいミュオン軌道位置でピークを作る



測定手法:半径

軌道半径

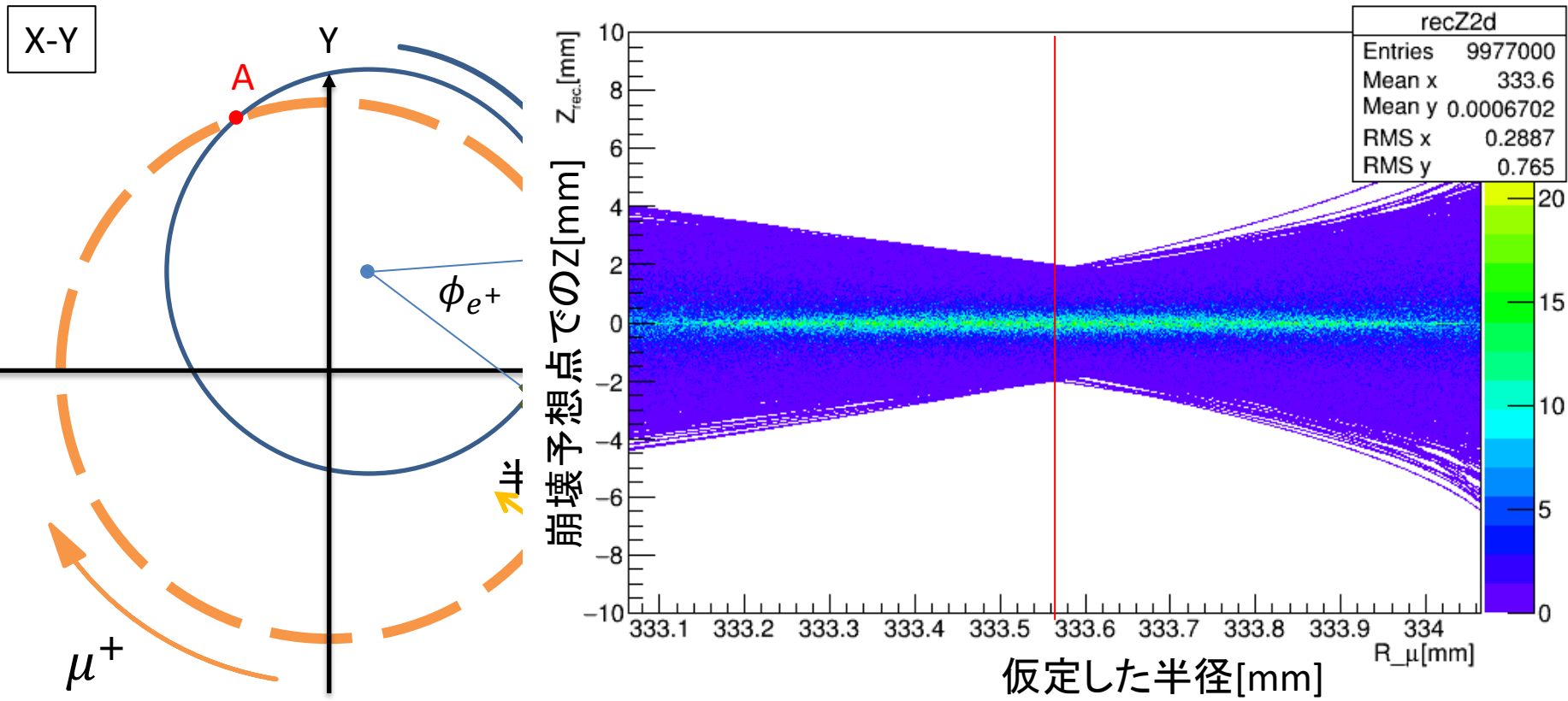
- 仮定した半径を掃引して崩壊点候補でのZを外挿する
- 正しい崩壊点であれば真の半径の位置でZが一致する



測定手法:半径

軌道半径

- 仮定した半径を掃引して崩壊点候補でのZを外挿する
- 正しい崩壊点であれば真の半径の位置でZが一致する



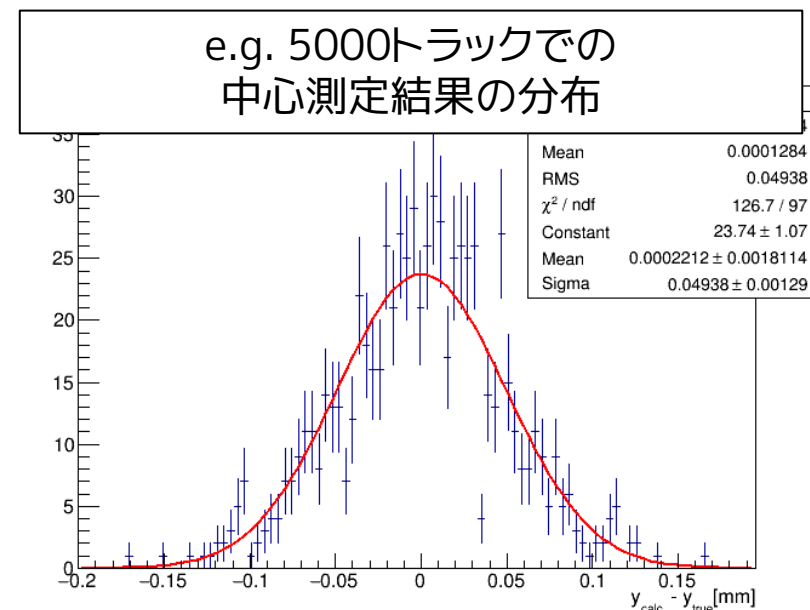
測定分解能の評価

M.C.でこれらの測定方法を実施し、分解能を評価。

- 中心(X,Y) : 0.11 mm @ 1000 tracks
- Z : 0.26 mm @ 1000 tracks
- 半径 : 0.10 mm @ 1000 tracks

1バンチあたり40000 $\mu+$ の崩壊が期待される

→十分に測定が可能!



まとめと今後の課題

J-PARC で Muon $g-2$ /EDM の精密測定実験が進行中

- 先行の実験とは異なるコンセプトで精密測定を行う

開発中の陽電子検出器を用いたミュオン分布測定

- 振動のない理想的なミュオンに対しての測定方法を確立
- 分解能を評価 → 1000陽電子軌道でサブミリ精度

本研究の今後

- ミュオンの分布に振動や広がりがある場合での測定を可能にし、分解能を評価していく

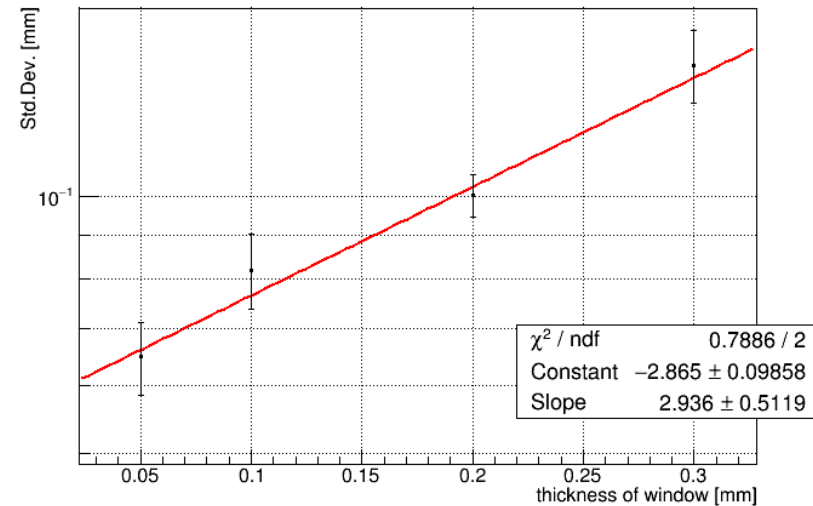
Buck up



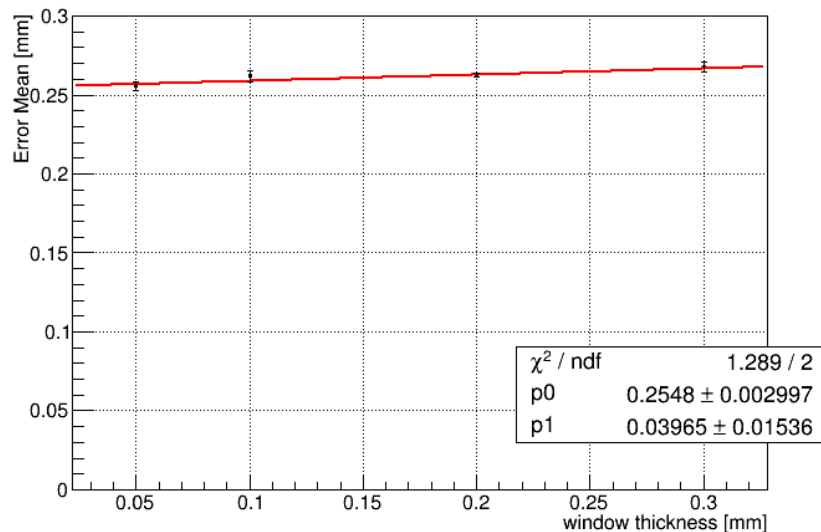
真空窓厚からの寄与

- 検出器とミュオンビーム領域の間に挟まれているポリイミド窓の厚さを変更することによる分解能の変化を評価

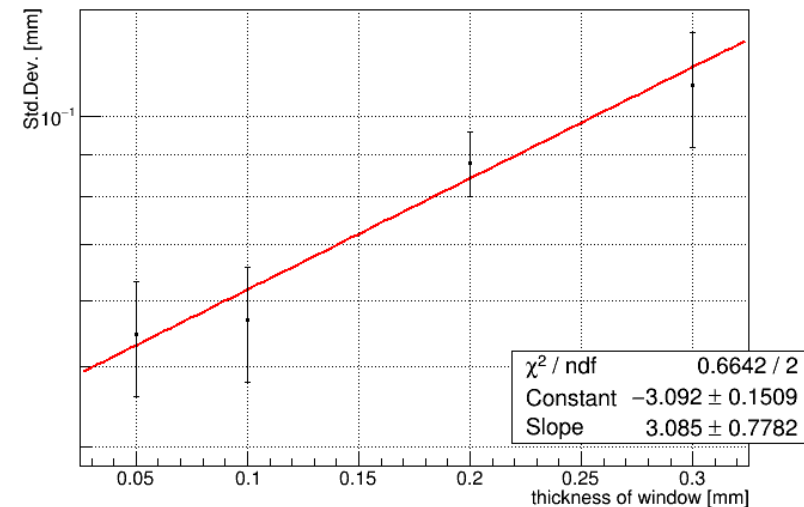
R Std.Dev. vs. window Thisckness



Z Error 1000events lilelihoodFit(using gaussian mean error)



Center Std.Dev. vs. window Thisckness

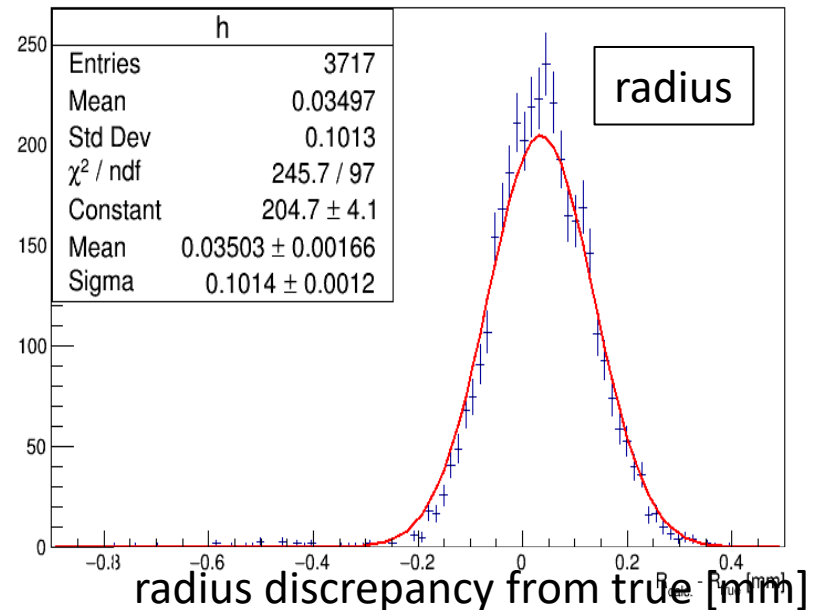
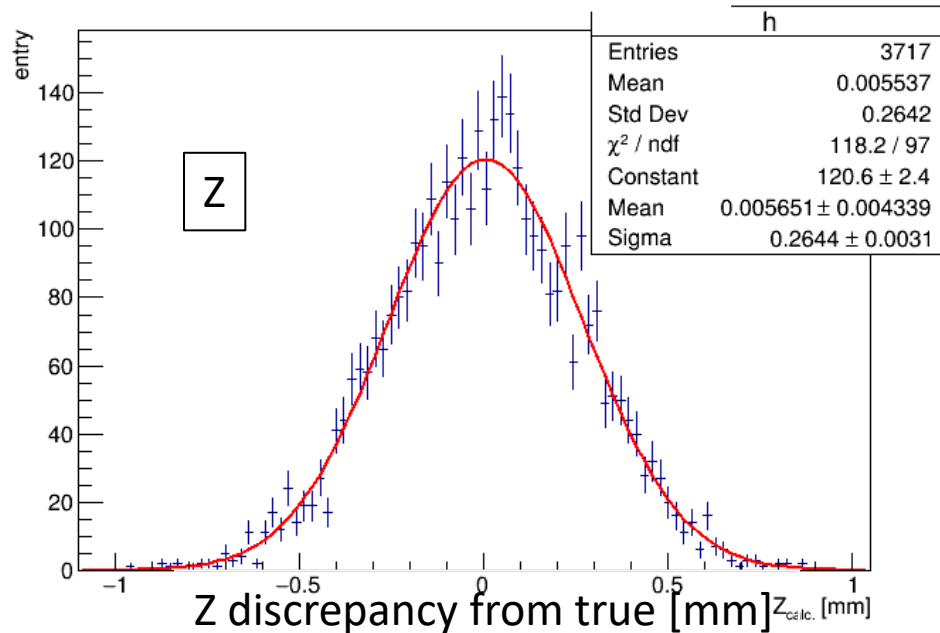
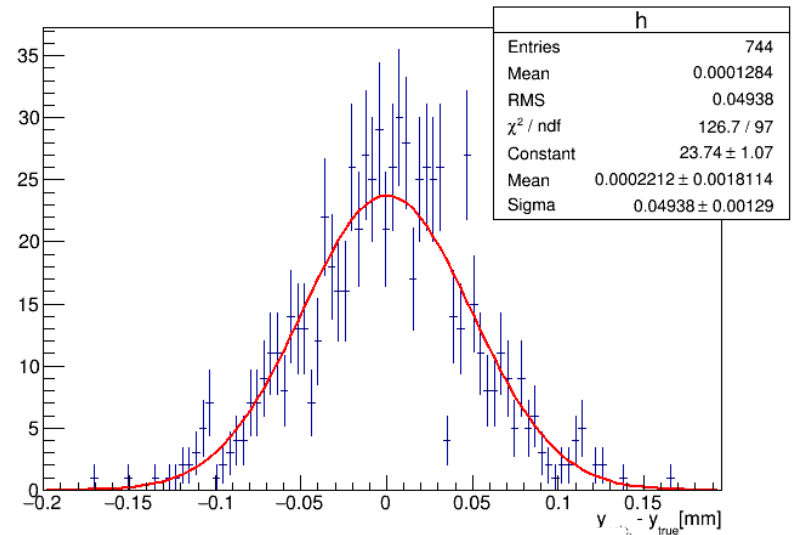


$$\begin{aligned}
 & \vec{\omega} = \vec{\omega}_\alpha + \vec{\omega}_\eta \\
 = & -\frac{e}{m} \left[\alpha_\mu \vec{B} - \left(\alpha_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right]
 \end{aligned}$$

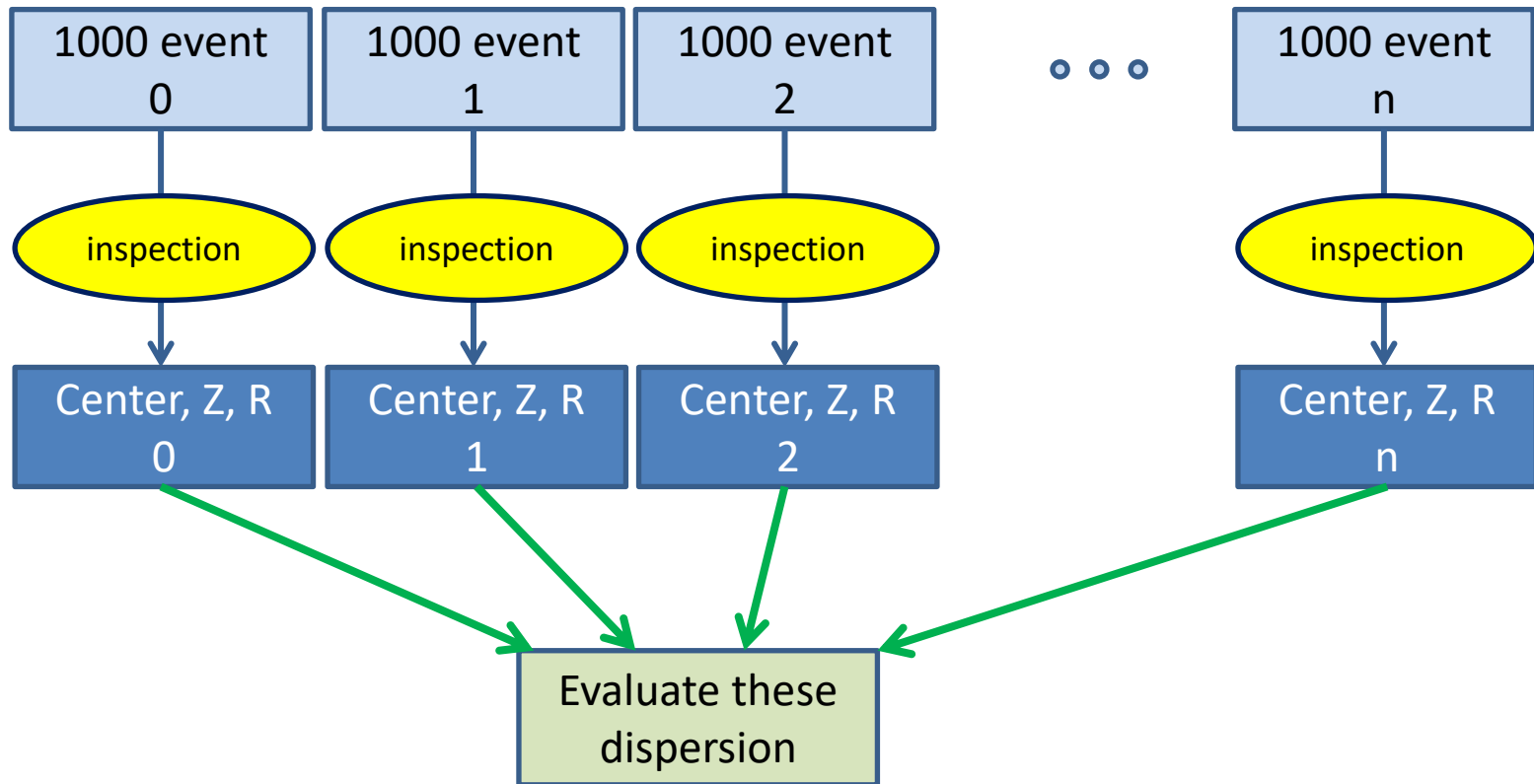
BNL E821 :マジック運動量を用いて $\gamma=29.3$ で打ち消す
 J-PARC E34 : ゼロ電場によって $E \rightarrow 0$ から項を消す

Evaluation of resolution

seek center 5000 events Y



Evaluation of the resolution



Regards this Std.Dev. as a resolution of the inspection method @1000events. or 5000events

Table of Freq.

BNL E821

J-PARC

TABLE VIII. Important frequencies and periods in the $(g - 2)$ storage ring for $n = 0.137$.

Physical frequency	Variable	Expression	Frequency	Period	Freq.	Period
Anomalous precession	f_a	$\frac{e}{2\pi m} a_\mu B$	0.23 MHz	4.37 μ s	0.47 MHz	2.11 μ s
Cyclotron	f_c	$\frac{v}{2\pi R_0}$	6.71 MHz	149 ns	135 MHz	7.39 ns
Horizontal betatron	f_x	$\sqrt{1 - n} f_c$	6.23 MHz	160 ns	135 MHz	7.39 ns
Vertical betatron	f_y	$\sqrt{n} f_c$	2.48 MHz	402 ns	1.66 MHz	603 ns
Horizontal CBO	f_{CBO}	$f_c - f_x$	0.48 MHz	2.10 μ s	10.2 kHz	98.5 μ s
Vertical waist	f_{VW}	$f_c - 2f_y$	1.74 MHz	0.57 μ s	132 MHz	7.57 ns

$$n = 1.5\text{E-}4$$

QED contribution	11 658 471.808 (0.015) $\times 10^{-10}$	Kinoshita & Nio, Aoyama et al
EW contribution	15.4 (0.2) $\times 10^{-10}$	Czarnecki et al
Hadronic contribution		
LO hadronic	694.9 (4.3) $\times 10^{-10}$	HLMNT11
NLO hadronic	-9.8 (0.1) $\times 10^{-10}$	HLMNT11
light-by-light	10.5 (2.6) $\times 10^{-10}$	Prades, de Rafael & Vainshtein
Theory TOTAL	11 659 182.8 (4.9) $\times 10^{-10}$	
Experiment	11 659 208.9 (6.3) $\times 10^{-10}$	world avg
Exp – Theory	26.1 (8.0) $\times 10^{-10}$	3.3 σ discrepancy

(Numbers taken from HLMNT11, arXiv:1105.3149)

Beam dynamics

In case of actual beam,

- Center
 - Horizontal Coherent Betatron Oscillation $\sim 10\text{kHz}$ ($98.5\ \mu\text{sec.}$)
- Z
 - Vertical Betatron Oscillation $\sim 2.27\text{MHz}$ ($440\ \text{nsec.}$)

Ref. $a_\mu \sim 0.47\text{MHz}$ ($2.11\ \mu\text{sec}$), Cyclotron $\sim 135\text{Hz}$ ($7.39\ \text{nsec}$)

These oscillation are longer than detector time resolution $\sim 5\text{nsec}$.

