

低速部ミュオン加速実証試験に 向けた診断ビームラインの開発

名古屋大学 M1 茨木優花

ミューオンの物理

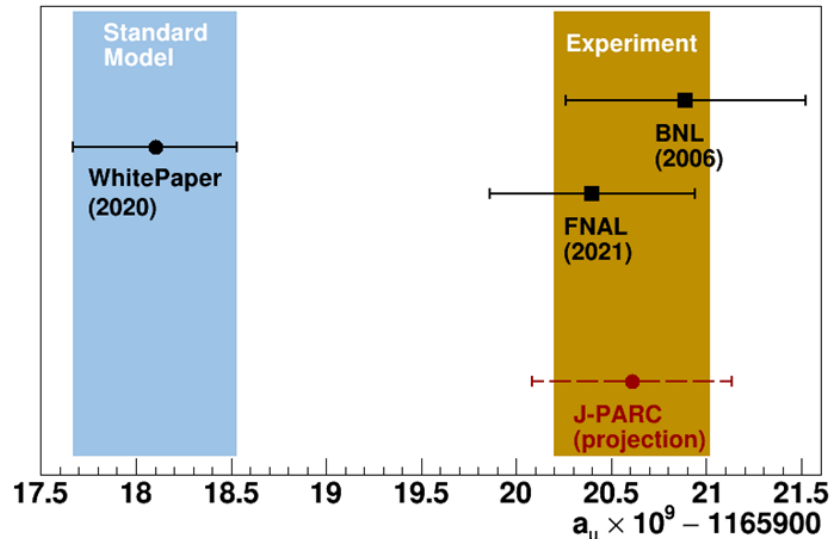
- 電磁場中での $\vec{\mu}$ と \vec{d} の相互作用

$$\mathcal{H} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} - \vec{d} \cdot \vec{E}$$

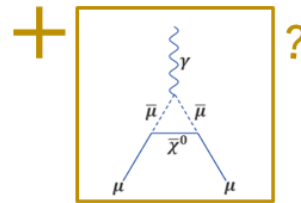
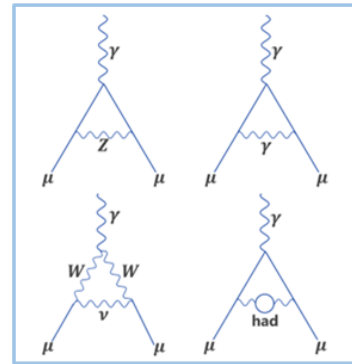
- 異常磁気能率 ($g - 2$)

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

$$\vec{\mu} = g \frac{e}{2m_\mu} \vec{s}$$

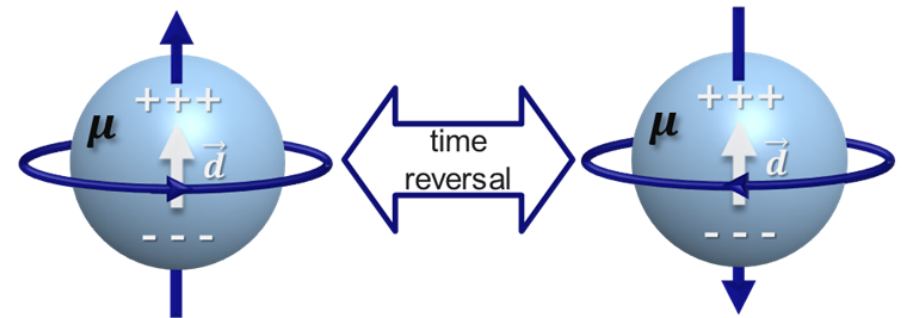


新物理!?



- 電気双極子能率 (EDM)

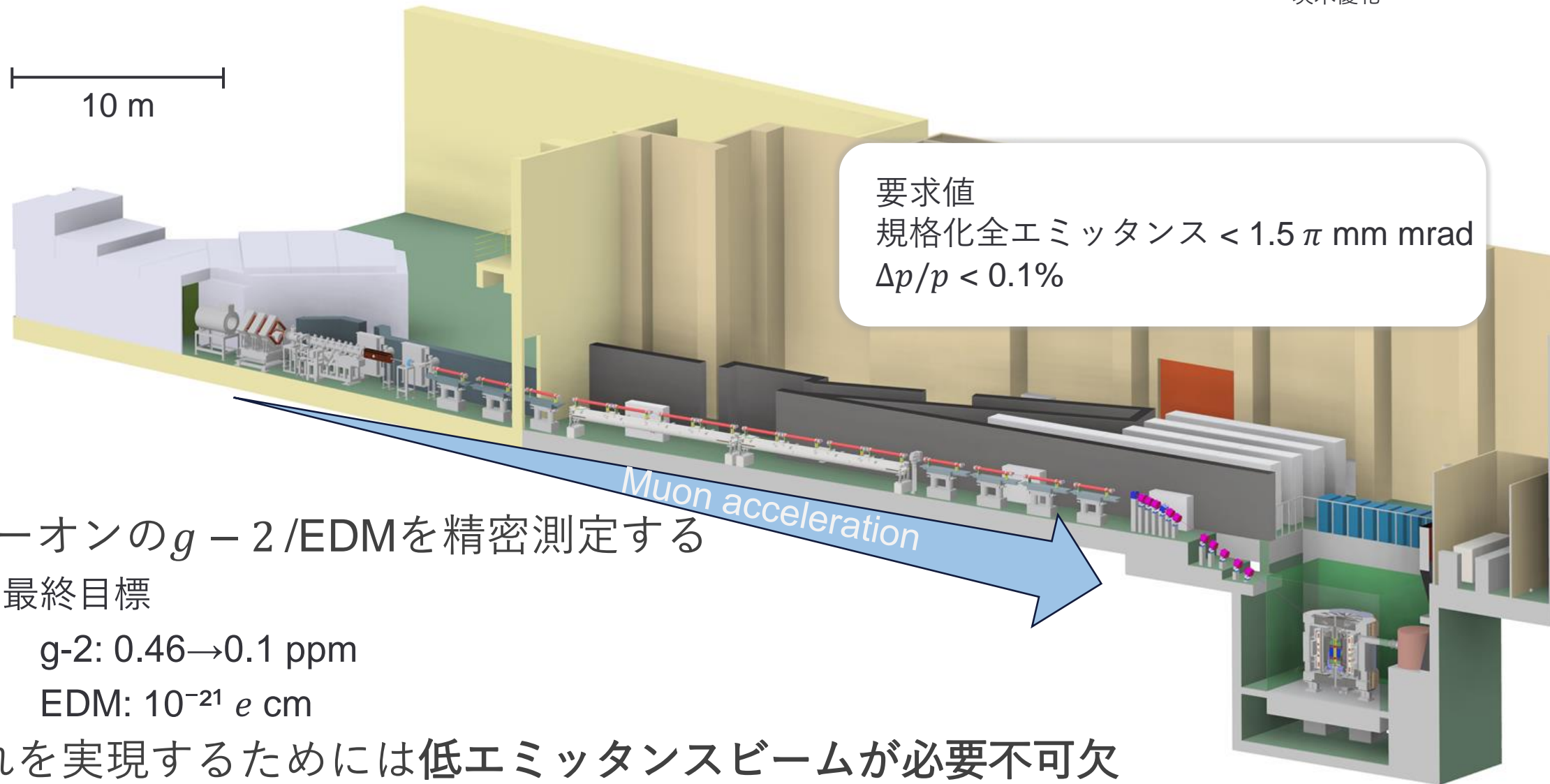
$$\vec{d} = \eta \frac{e}{2m_\mu c} \vec{s}$$



CP violation!?

新手法で $g - 2$ と EDM を測定する

J-PARC ミューオン $g - 2$ / EDM 実験



要求値
規格化全エミッタンス $< 1.5 \pi \text{ mm mrad}$
 $\Delta p/p < 0.1\%$

- ミューオンの $g - 2$ / EDM を精密測定する

最終目標

$g-2$: $0.46 \rightarrow 0.1 \text{ ppm}$

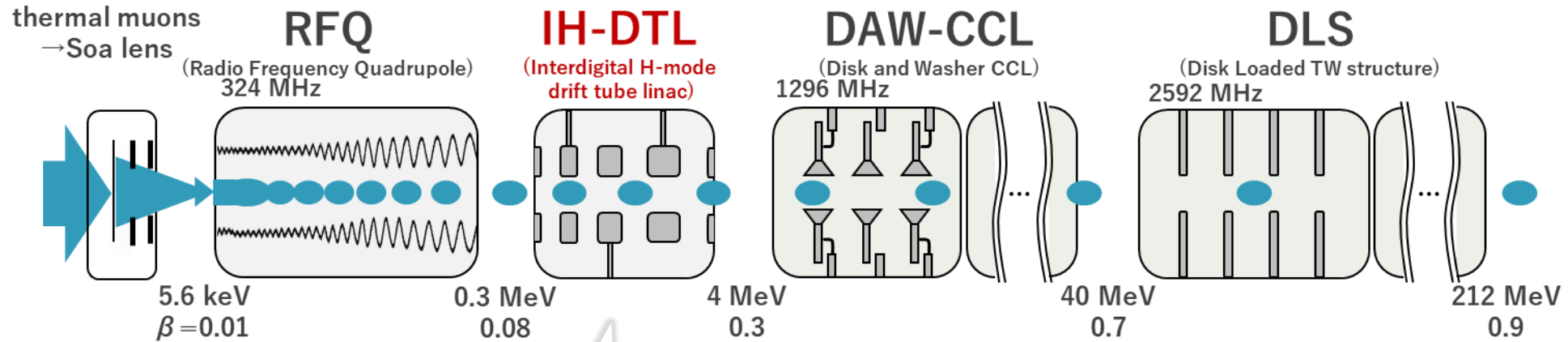
EDM: $10^{-21} e \text{ cm}$

🔑 これを実現するためには低エミッタンスビームが必要不可欠

ミューオン専用の線形加速器を開発している

IH-DTL (Inter-digital H-mode Drift Tube Linac)

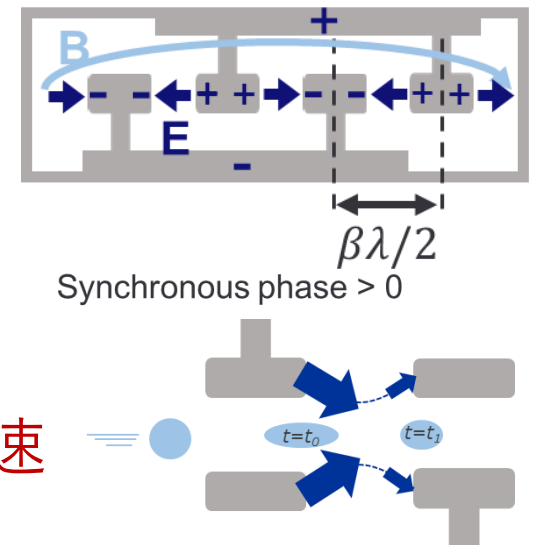
- ミューオン専用加速器は全4段から構成される
 - ミューオンの速度に合わせて空洞を変化させている



• 低速部の加速

- 高加速効率、短距離加速が必要不可欠
- π モード加速
→ Alvarez-DTLの半周期で加速を行なう
- Alternating Phase Focusing (APF) 方式を採用
= 高周波電場のみを用いた収束方法

APF方式IH-DTLを低速部のミューオン加速
に使用している



低速部ミュオン加速実証試験に向けて

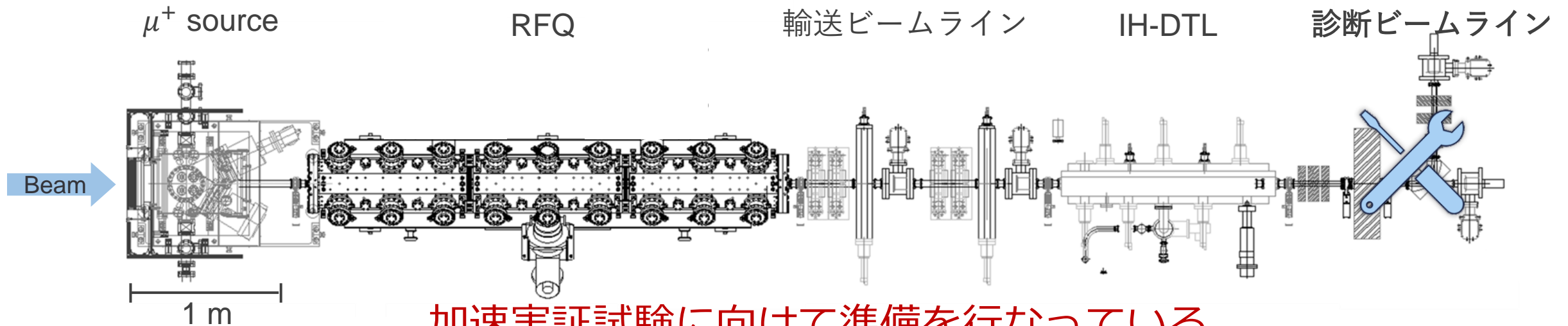
[加速実証試験の目的]

- ミュオンを4 MeVまで加速できることを実証する
- 設計通り低エミッタンスでビームを加速できていることを実証する






[What to do]

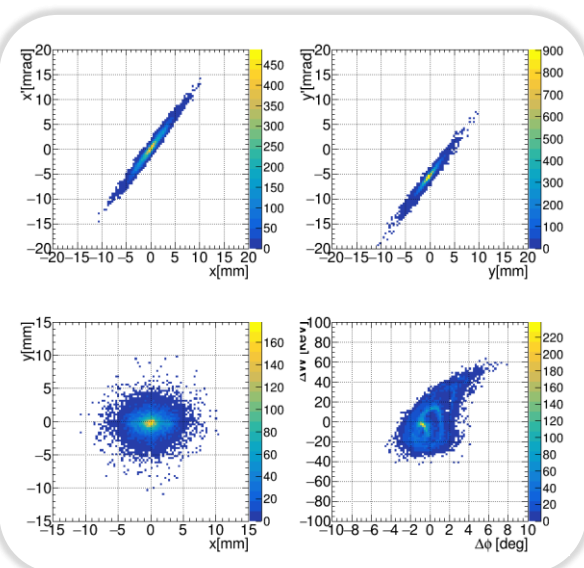
- 診断ビームラインの設計
- IH-DTL実機の大電力試験

@J-PARC MLF H2 area
In 2025

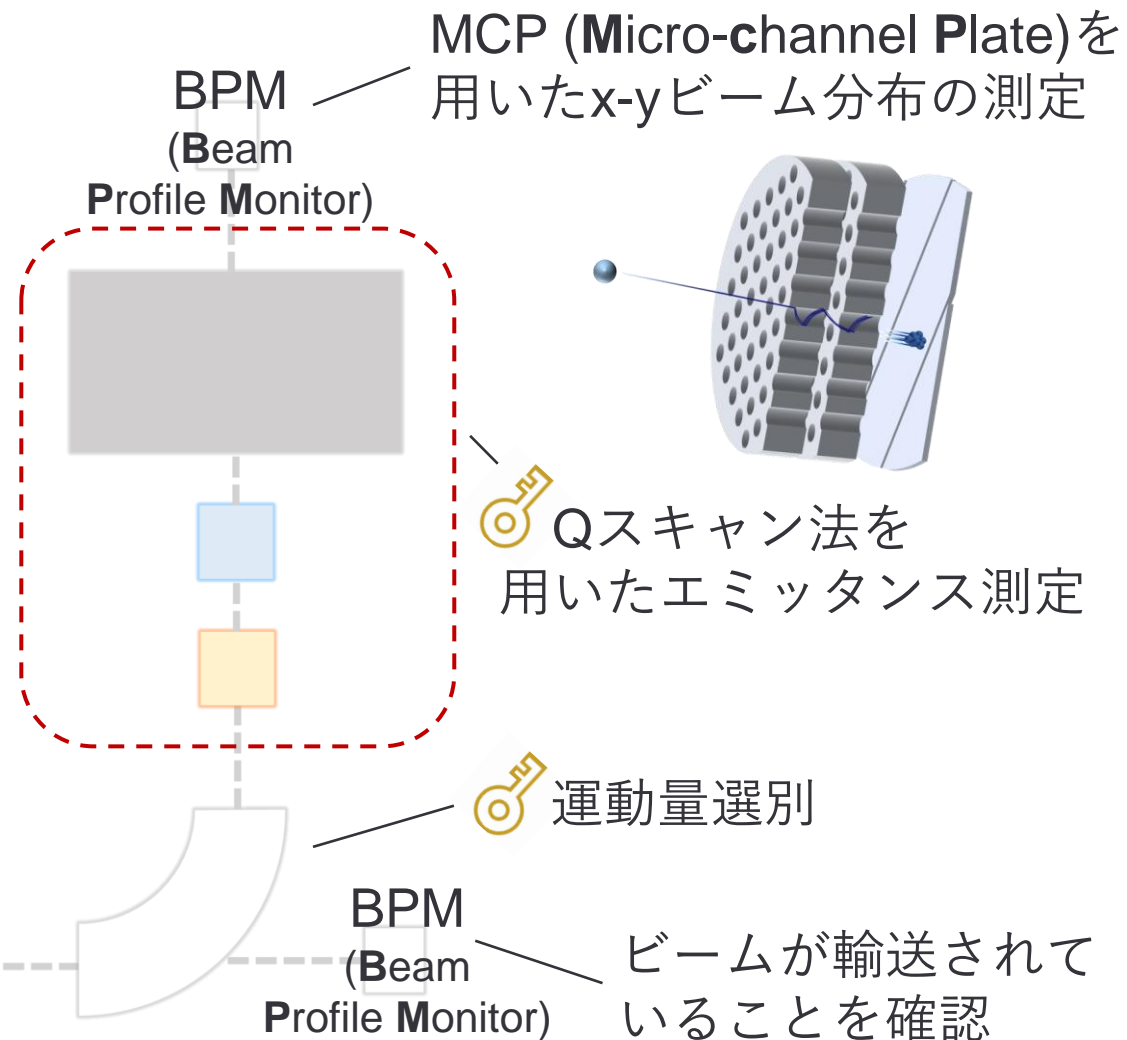


診断ビームラインの構成

-  : 軌道補正用磁石
 -  : 四極磁石(x)
 -  : 四極磁石(y)
 -  : 偏向磁石
 -  : バンチャー → 縦方向収束
- 横方向収束



IH-DTL
出口

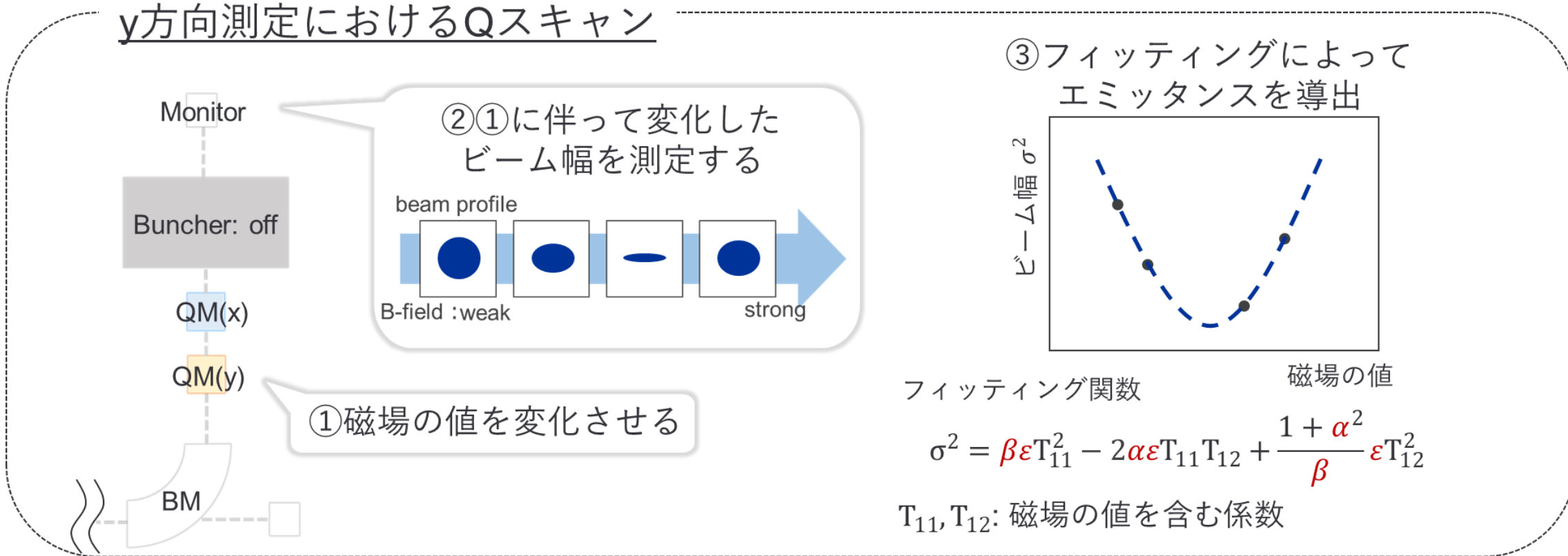


加速実証にはこのような診断ビームラインが必要不可欠である

ビーム診断方法

- エミッタンス測定に**Qスキャン法**を用いる
- ビームサイズと光学系からエミッタンスとツイスパラメーター(α, β)を計算する

y方向測定におけるQスキャン



以下の式を用いて評価をする

$$\sigma_{\text{meas.}}^2 = \sigma_{\text{sim.}}^2$$

$$\sigma_{\text{meas.}}^2 = \sigma_{\text{sim.}}^2 + \sigma_{\text{monitor resolution}}^2$$

ビーム ライン 設計

Trace3Dを用いて大まかなレイアウトを設計する。

- エリア内に配置できる大きさか？
- ビーム損失を少なく輸送できるか？

再設計

評価

GPTを用いてビーム診断精度評価する。

- Qスキャンをビーム損失なく行なえるか？
- 精度よくエミッタンスを導出できるか？

磁石 設計

必要な磁場を出せる電磁石の詳細設計を行なう。

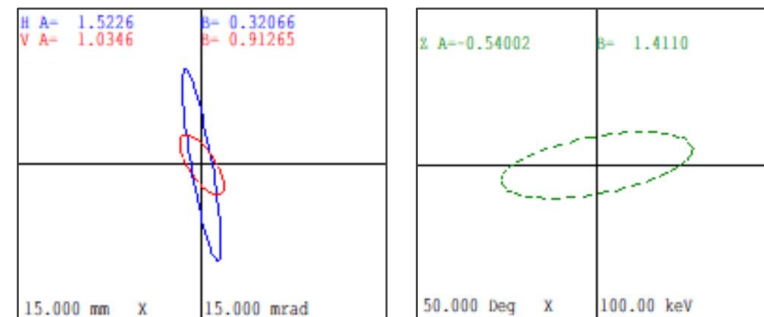
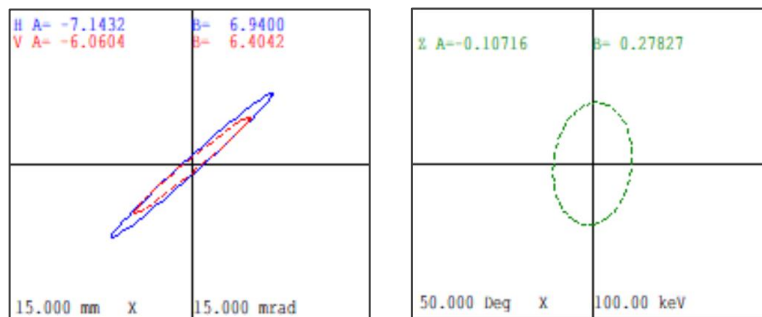
- その磁場の安定性を見積もり、再度ビーム診断の評価を行なう。

*GPT: 粒子トラッキングソフトウェア

*Trace3D: 行列計算によるビーム軌道計算ソフトウェア

診断ビームラインの設計

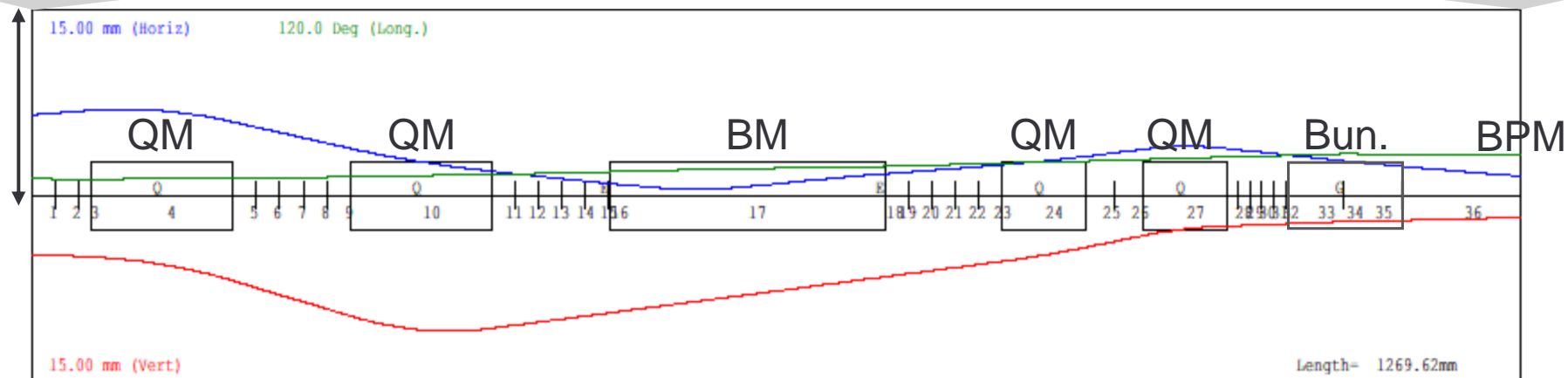
- 四極磁石(QM)とバンチャー(Bun.)の位置や収束力を検討した
 - パイプによるビーム損失を減らした: 輸送効率 98%
 - 偏向磁石の手前のx方向のビーム広がりを小さくするようにした
 - 偏向磁石の後のビーム広がりが小さくするようにした



ビームパイプ
半径: 15 mm

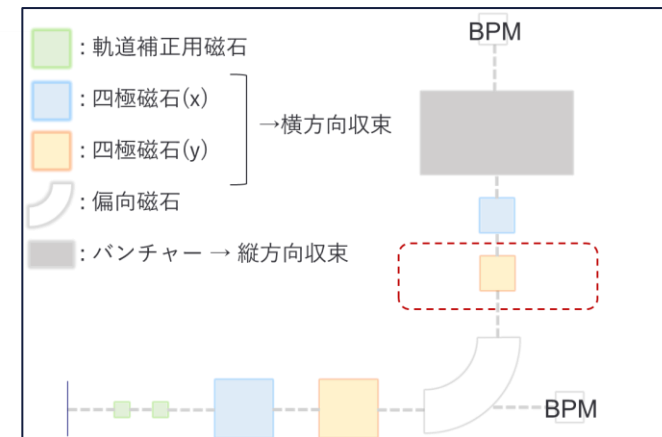
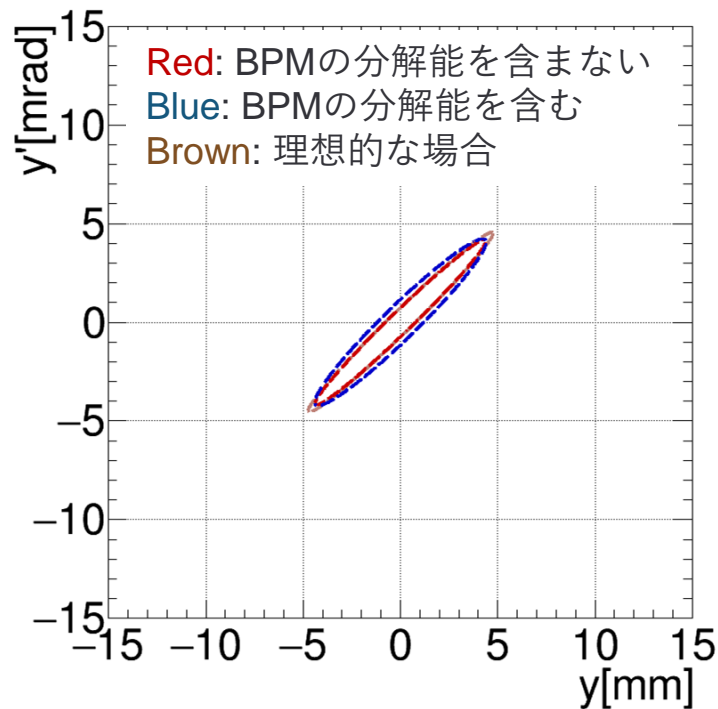
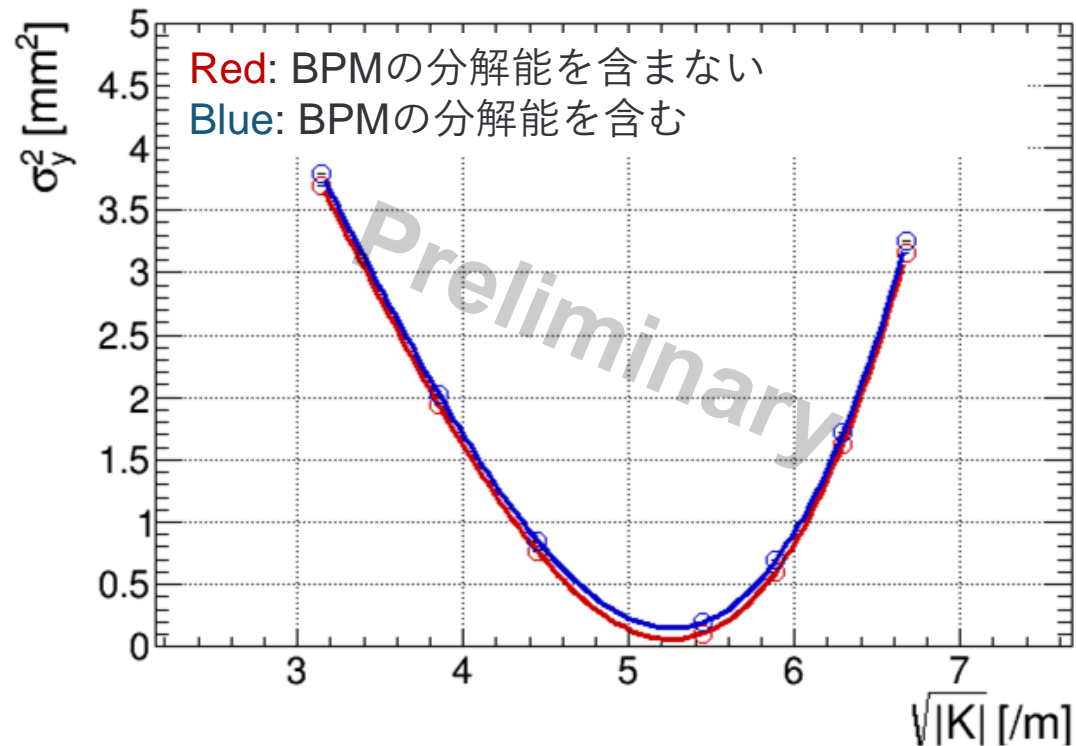
エンベロープ:

X, y, z



この光学系でモニターまでビームを輸送できる

ビーム診断精度の評価(y方向)

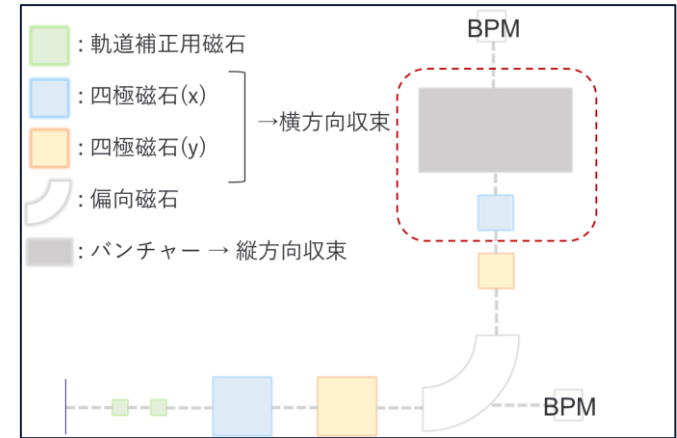
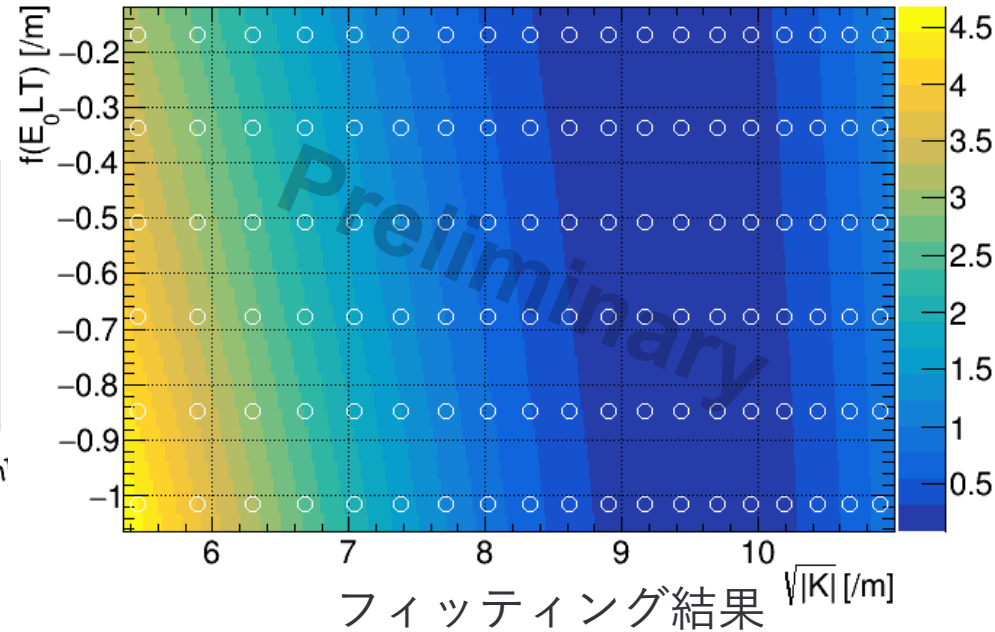
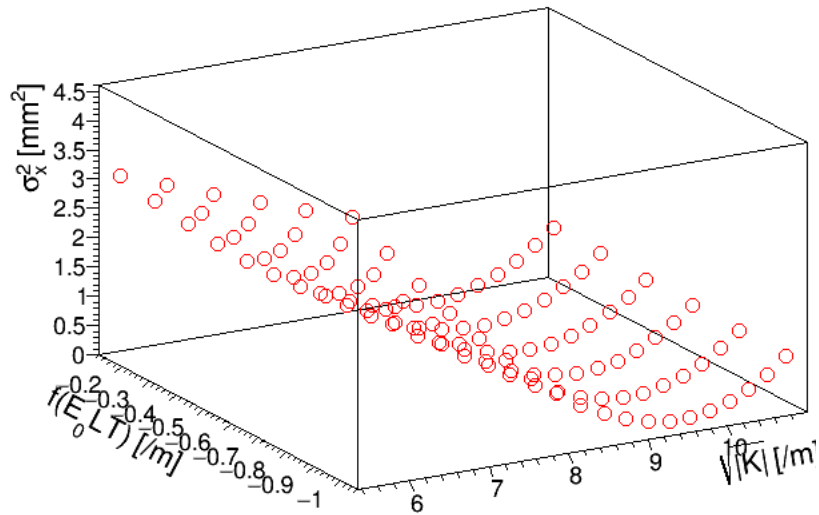


	Emittance
Ideal case	0.706
Q-scan	0.648(-8%)
Q-scan	1.016(+44%)

- BPMの分解能は0.3 mmとして評価をした

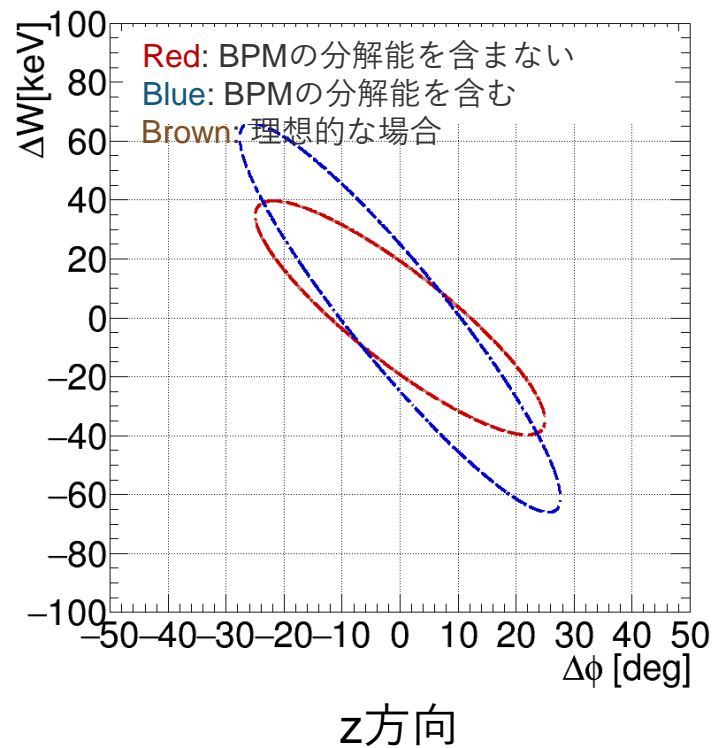
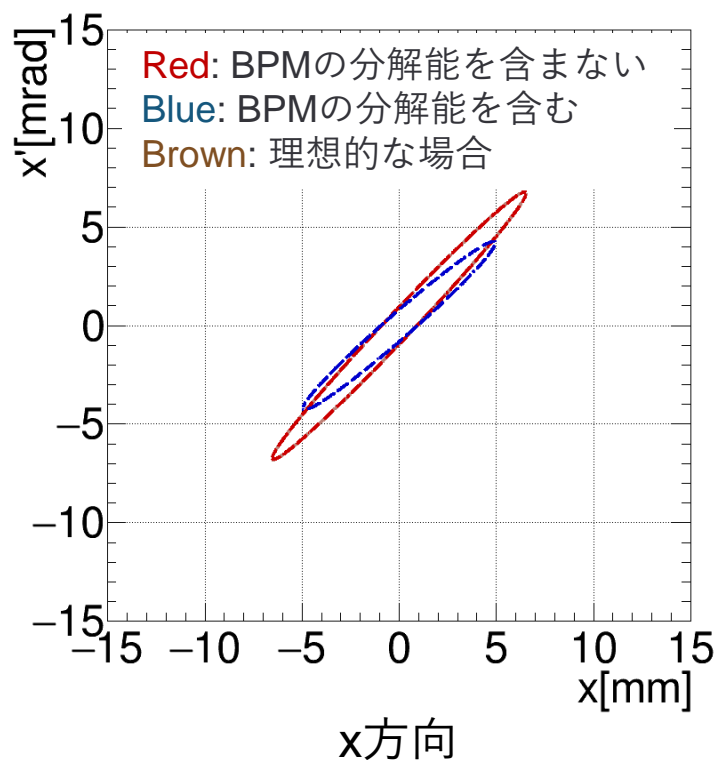
8%のずれでy方向のビーム診断ができる

ビーム診断精度の評価(x, z方向)



- 偏向磁石でxとzに相関が生まれる。
- バンチャーの収束力を変化させるとx方向のビーム幅も変化する。
→バンチャーと四極磁石の収束力を同時に変化させる。

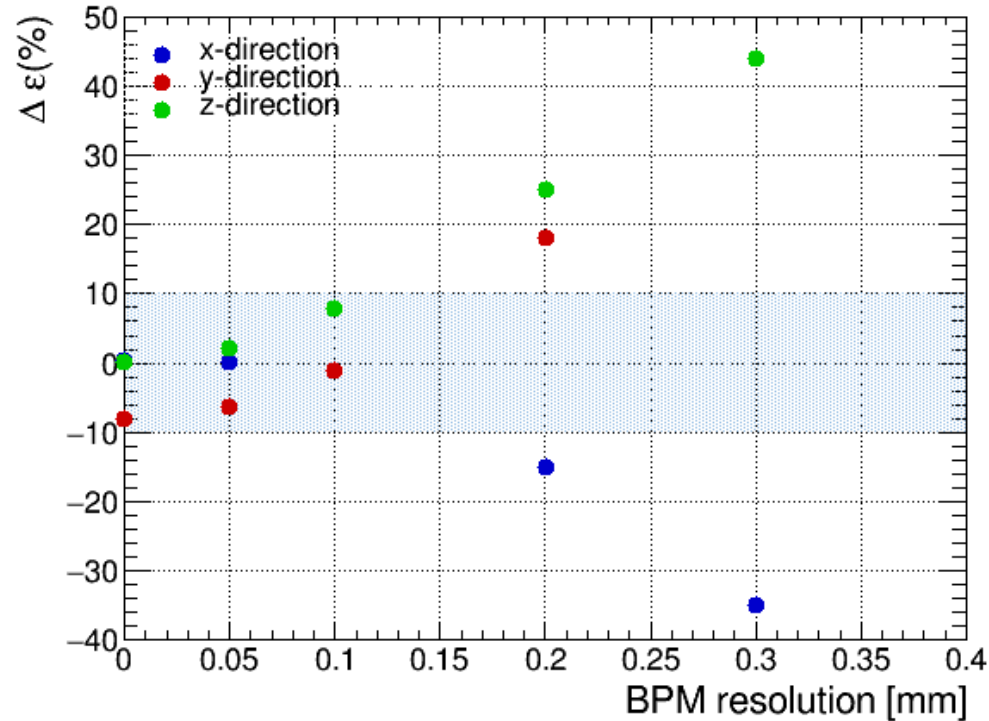
ビーム診断精度の評価(x, z方向)(cont'd)



Emittance(x)	
Ideal case	1.235
Q-buncher-scan	1.239(+0.3%)
Q-buncher-scan	0.805(-35%)
Emittance(z)	
Ideal case	0.0961
Q-buncher-scan	0.963(+0.2%)
Q-buncher-scan	0.138(+44%)

四極磁石とバンチャーを併用することで、x方向のビーム幅の測定のみでxとz方向の両方のビーム診断が可能となった。

モニターの分解能の要求



$$\sigma_{\text{meas.}}^2 = \sigma_{\text{sim.}}^2 + \sigma_{\text{monitor resolution}}^2$$

- IH-DTLでの加速によるエミッタンス変化の許容範囲: $\Delta 10\%$
- BPMの分解能が0.1 mm以下にできれば問題なく診断可能であるが
BPMの分解能は0.3 mmなので分解能の系統誤差を適切に評価する必要がある

- 低速部ミュオン加速実証試験に向けた診断ビームラインの設計を行なった。
 - ビームエネルギーとビーム品質を測定できる。
 - 四極磁石とバンチャーの収束力を同時に変化させることにより、 x , z 方向のビーム診断が x 方向のビーム幅測定のみで可能となった。
 - x , z 方向の診断されたエミッタンスの理想的な場合からのずれは1%以内である。
 - y 方向の診断されたエミッタンスの理想的な場合からのずれは8%である。
 - ビームモニターの分解能の系統誤差を適切に評価する必要がある。