

J-PARC muon g-2/EDM実験のための 3次元らせん入射手法実証実験

28th ICEPP Symposium @志賀レークホテル

2022/02/23

松下凌大^(A), 飯沼裕美^(B), 大澤哲^(C), 小田航大^(B), 齊藤直人^(A,C),
中山久義^(C), 平山穂果^(B), 古川和朗^(C), 三部勉^(A,C), M.A.Rehman^(C)
^{A)}東大理, ^{B)}茨城大理工, ^{C)} KEK



研究背景と目標



ミューオンg-2/EDMとは

- ミューオン：素粒子物理学の標準理論(SM)に出てくる素粒子の1つ(レプトン)
- 磁気双極子モーメント、電気双極子モーメントを通じて電磁場と相互作用

電磁場との相互作用ハミルトニアン

$$H_{\text{int}} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} - \vec{d} \cdot \vec{E}$$

磁気双極子モーメント(MDM)

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

g因子：量子補正を受け2からずれる
ミューオンの異常磁気モーメント(g-2)

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

電気双極子モーメント(EDM)

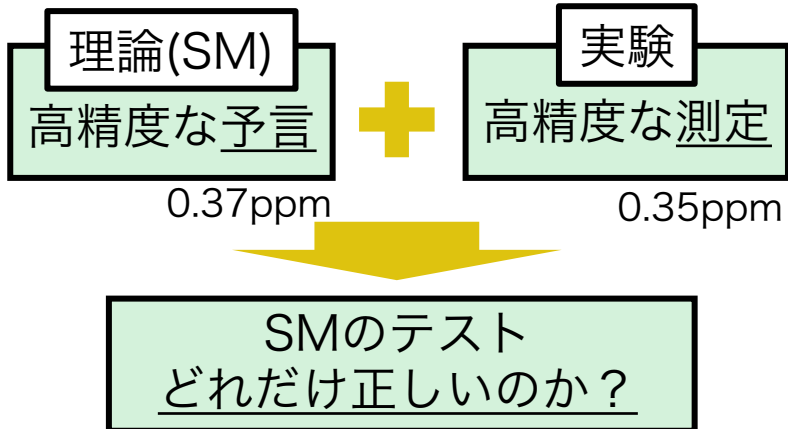
$$\vec{d} = \eta \frac{e}{2m_{\mu}c} \vec{s}$$

η ：EDMの大きさを表す無次元量
T対称性を破る(=CP対称性を破る)量

$$\begin{aligned} \therefore) \quad \vec{s} &\xrightarrow{\text{T変換}} -\vec{s} \\ \vec{E} &\xrightarrow{\text{T変換}} \vec{E} \end{aligned} \quad \vec{s} : \text{スピン}$$

なぜミュオン $g-2$ /EDM を測定するか

ミュオン $g-2$



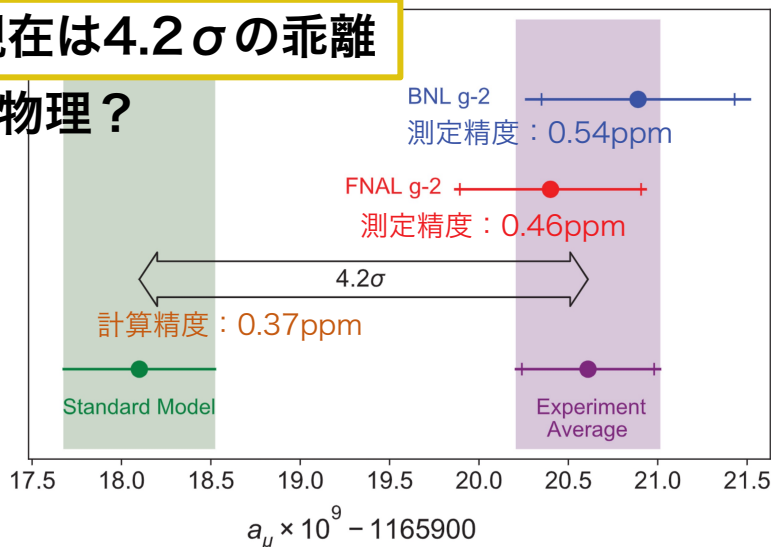
ミュオン EDM

有限のEDMが存在

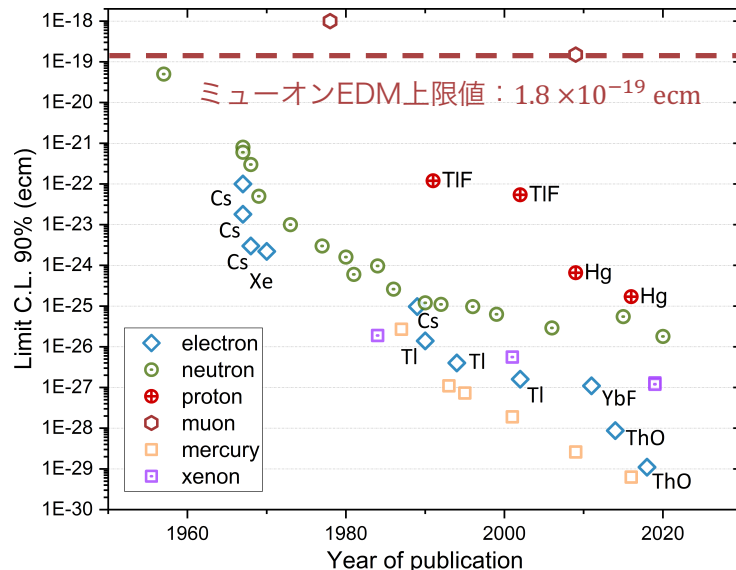
レプトンセクターにおける
CP対称性の破れの証明

現在は 4.2σ の乖離

新物理?



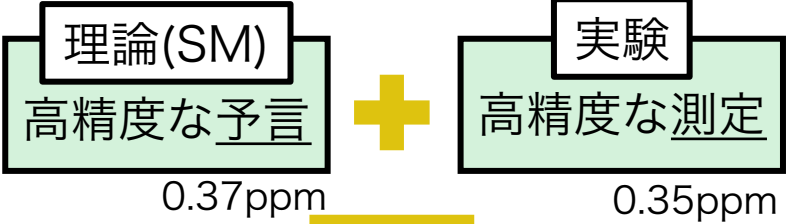
B.Abi *et al.* Phys. Rev. Lett. 126, 141801(2021)



arXiv:2003.00717[hep-ph]

なぜミュオン $g-2$ /EDM を測定するか

ミュオン $g-2$



SMのテスト
どれだけ正しいのか

J-PARC実験の目標
 $g-2 : 0.45\text{ppm}$
 $\text{EDM} : 10^{-21}\text{ecm}$

ミュオン EDM

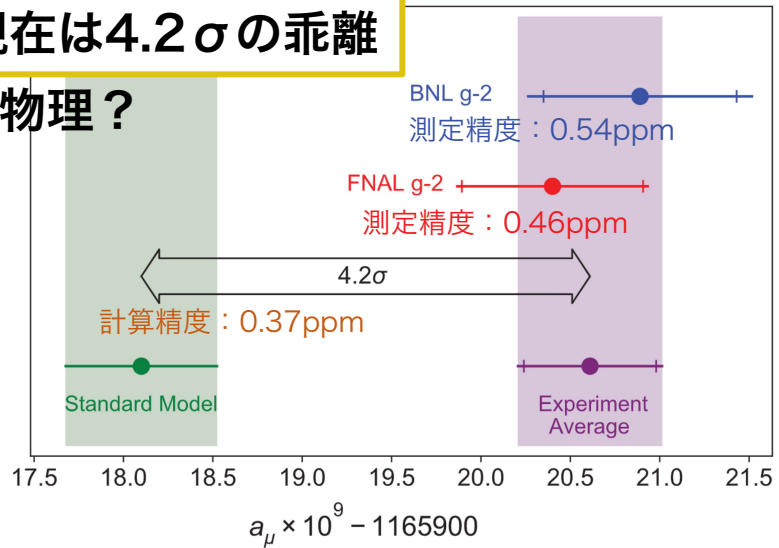
有限のEDMが存在



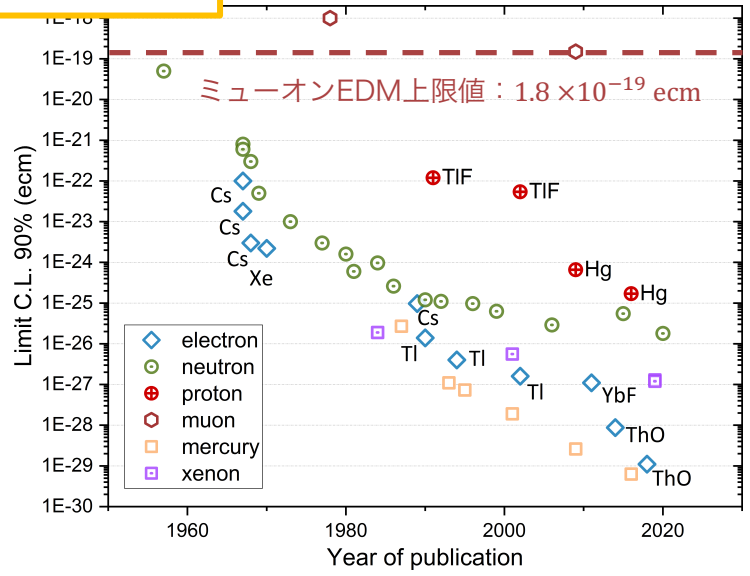
ンセクターにおける
対称性の破れの証明

現在は 4.2σ の乖離

新物理?



B.Abi et al. Phys. Rev. Lett. 126, 141801(2021)

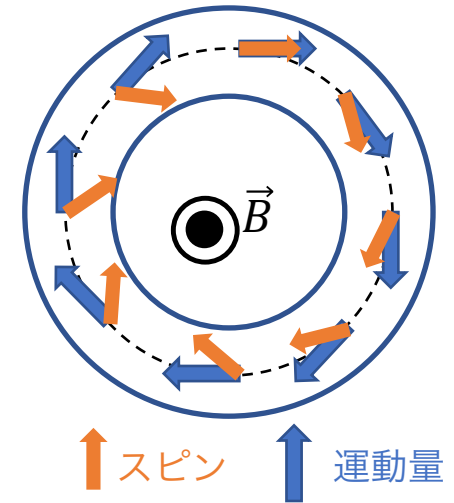


arXiv:2003.00717[hep-ph]

ミュオンg-2/EDM測定手法

- 静磁場中のミュオン

- 運動量ベクトル：サイクロトロン運動で回転
- スピンベクトル：ラーモア歳差運動+トーマス歳差運動で回転



- 運動量ベクトルとスピンベクトルの回転運動の差

- スピン歳差運動の角周波数

$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\frac{\vec{E}}{c} + \vec{\beta} \times \vec{B} \right) \right]$$

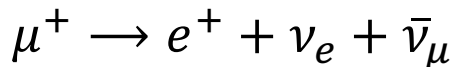
- J-PARC実験

電場を使わない
 $\vec{E} = \vec{0}$

$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

スピン歳差運動周期を測定してg-2/EDMを決定する

- ミュオン崩壊



e^+ は μ^+ スピン方向に放出されやすい

→ e^+ を検出して $\vec{\omega}_a$ を測定

J-PARC muon g-2/EDM 実験

- ミューオン冷却・再加速による低エミッタンスビームを使用

低エミッタンス
ミューオンビーム

コンパクトな
蓄積磁石

この実験の“売り”

検出器で崩壊陽電子の飛跡
を3次元的に再構成可能

ビームエミッタンス： $\sim 1 \pi \text{ mm mrad}$ 局所磁場均一度： $< 1 \text{ ppm}$

表面ミューオン
(28 MeV/c)

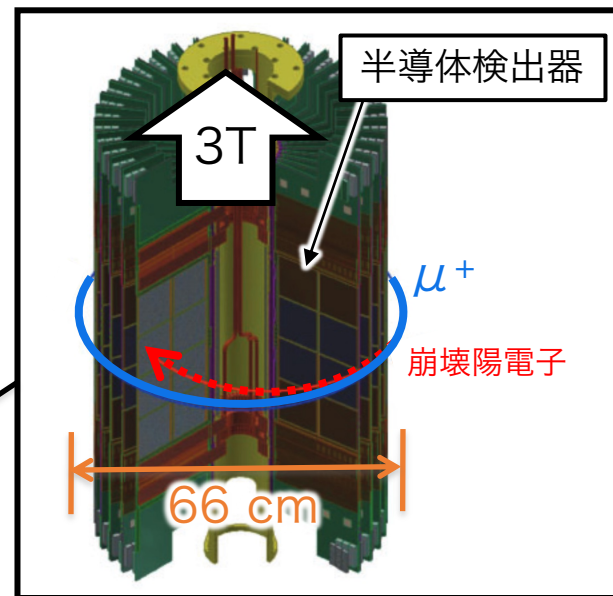
ミューオン再加速
(300 MeV/c)

ミューオン冷却
(2.3 keV/c)

3次元らせん入射

ソレノイド型蓄積磁石
(磁場：3 T)

ビーム蓄積領域：
直径66 cm



先行研究は直径14m

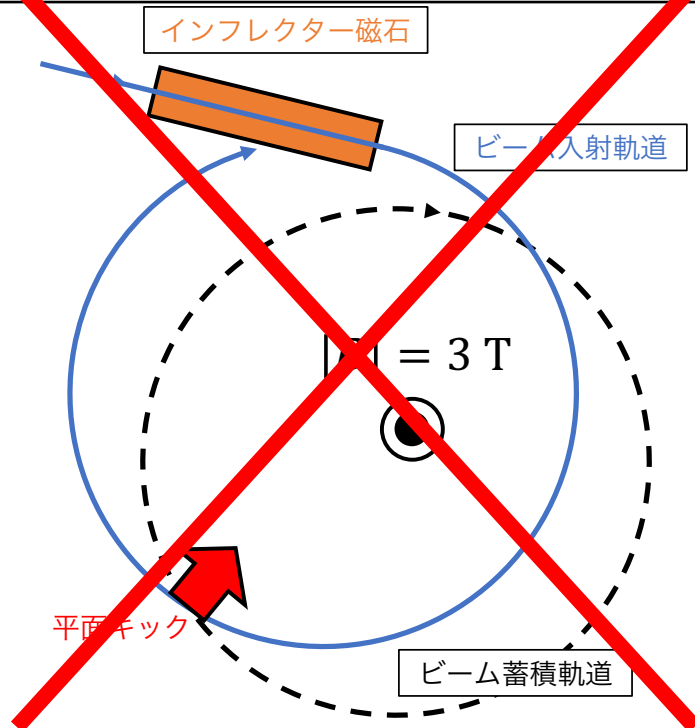
14m

FNAL Muon g-2実験

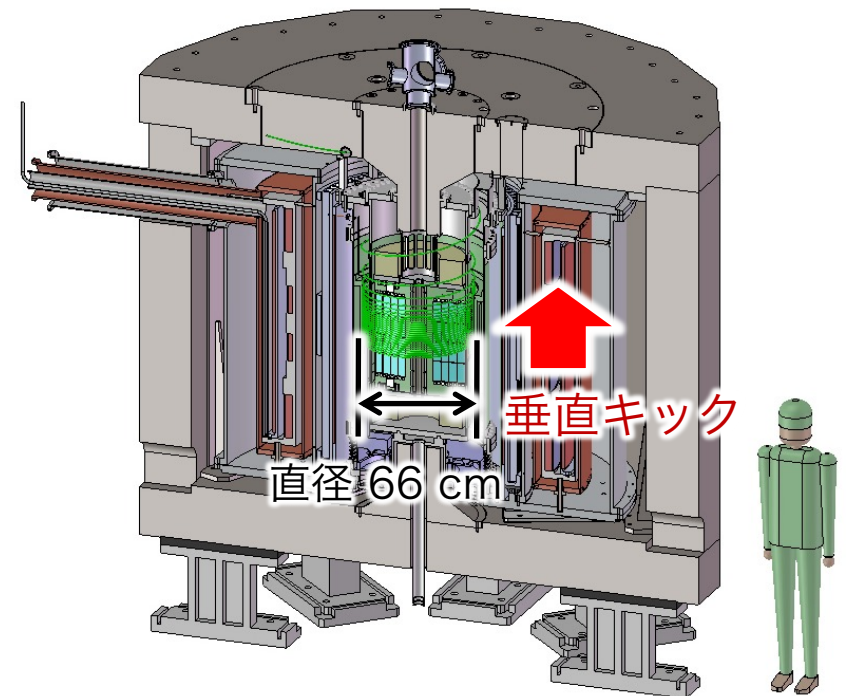
なぜ3次元らせん入射？

- ビーム領域：直径66 cm
 - 磁場：3 T, ビーム運動量：300 MeV/c → サイクロトロン周期：7.4 ns
- “2次元”な入射は技術的に困難
 - 3 Tの磁場をキャンセルするインフレクターの製作 & 7.4 ns以内に233 mradキック
- 3次元的に入射し、らせん運動中に数十ターンかけて垂直にキック・蓄積する

水平にキックしインフレクターを避ける



数十ターンかけて垂直にキック

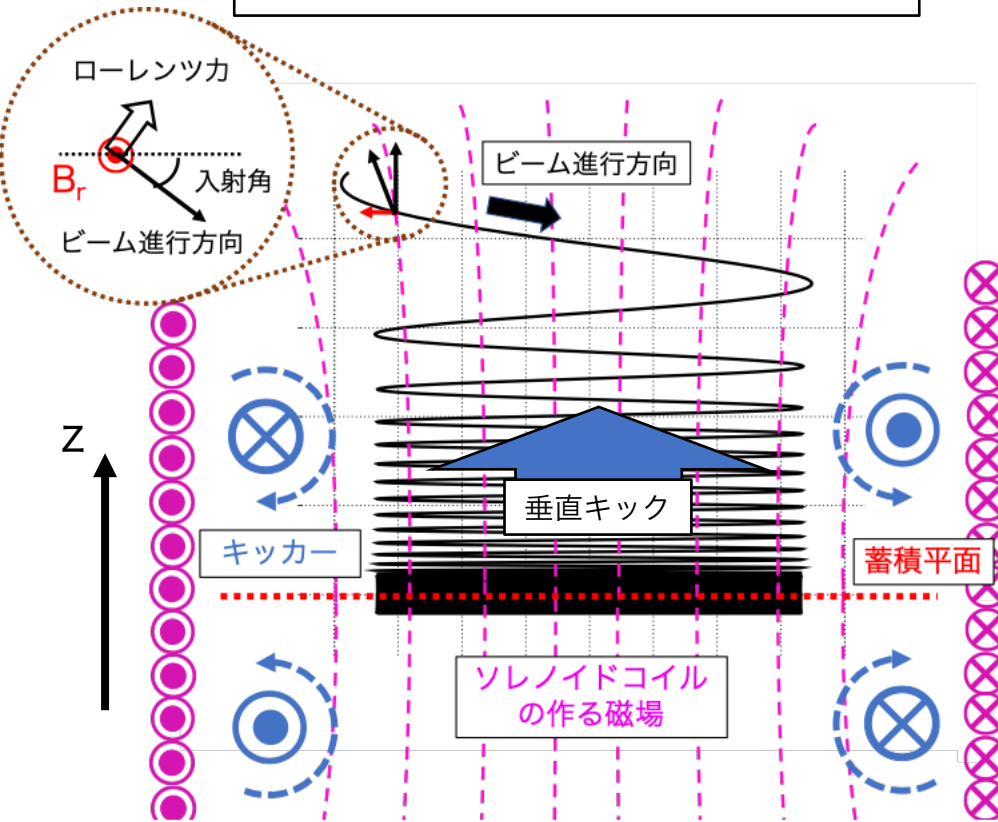


3次元らせん入射とは



- フリンジ磁場、キッカー磁場、弱収束磁場を使って入射・蓄積

ソレノイド磁石内でのビーム軌道



①入射直後：

ソレノイド磁石のフリンジ磁場
("ふち"磁場)を利用

- 径方向成分の磁場で入射角を減少させる

②入射途中：

キッカーのパルス磁場を利用

- キッカーパルス磁場の径方向成分で
ビームを垂直キック

③蓄積平面：

弱収束磁場を利用

- 弱収束磁場で単振動(ベータトロン振動)
させながらビームを蓄積

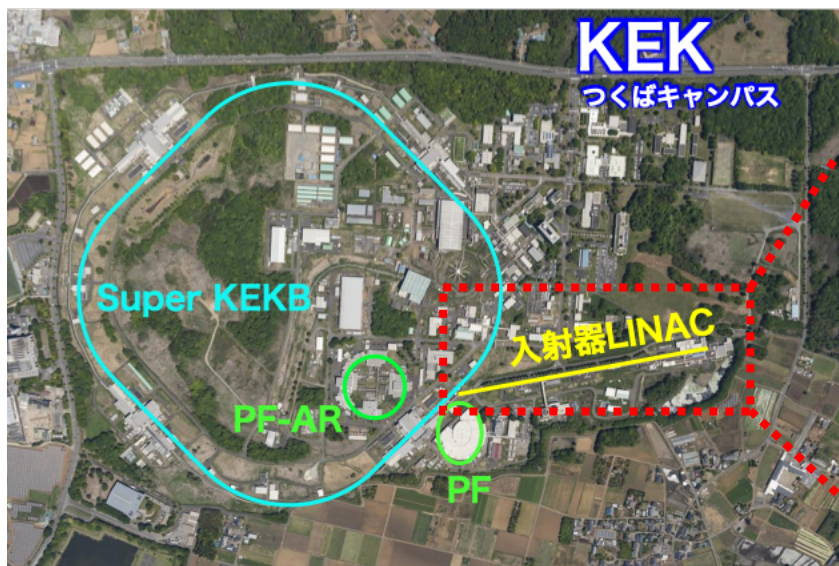
3次元らせん入射実証実験

- 「3次元らせん入射」は世界初の手法
- 電子ビームを使ったビームラインをKEKに構築

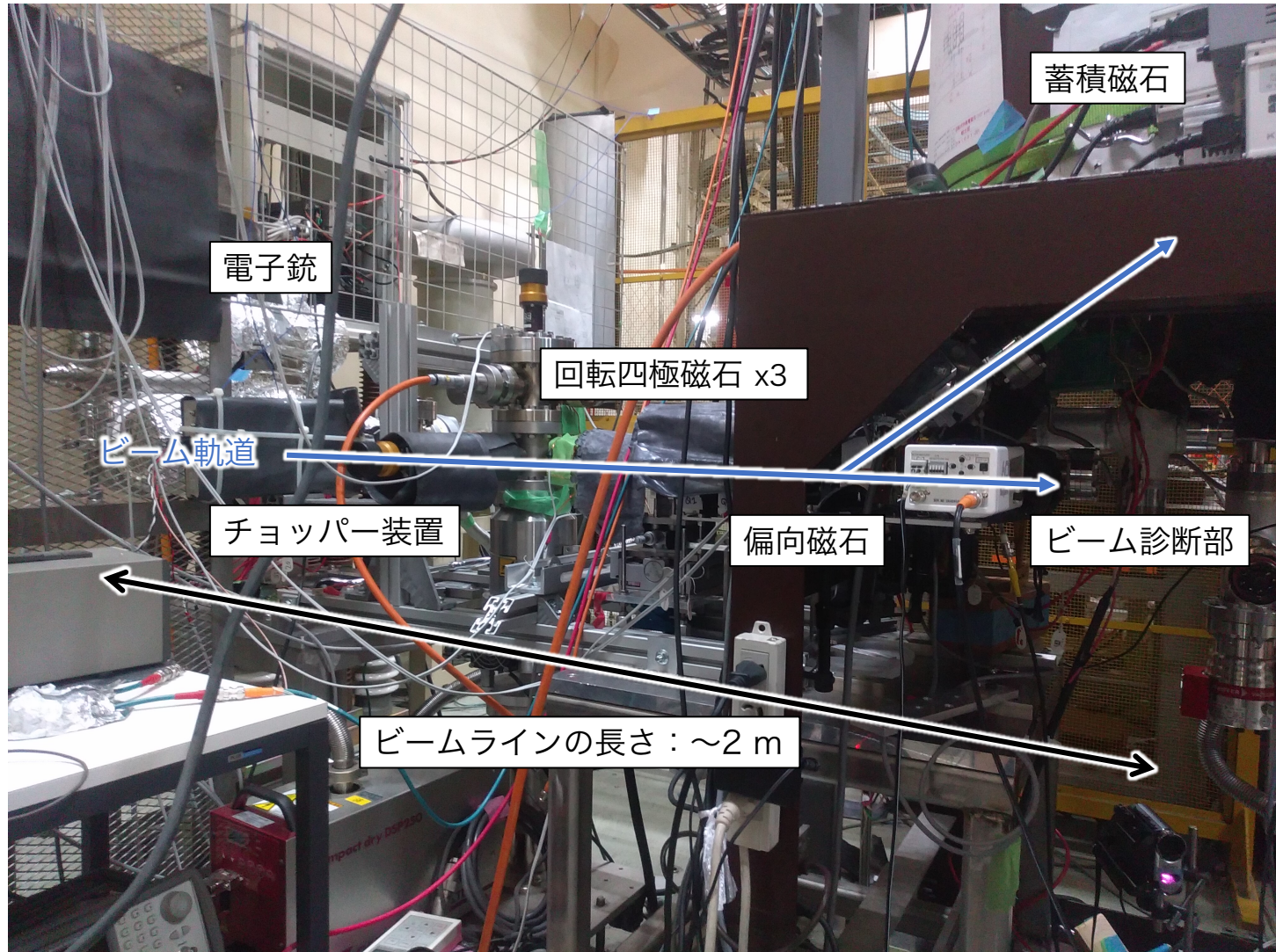
実証実験の目的

3次元らせん入射手法の実証・確立

- なぜ電子ビーム？
 - ミューオンに比べて生成が簡単
 - 他の粒子に崩壊しないため、ビーム軌道のみに着目可能



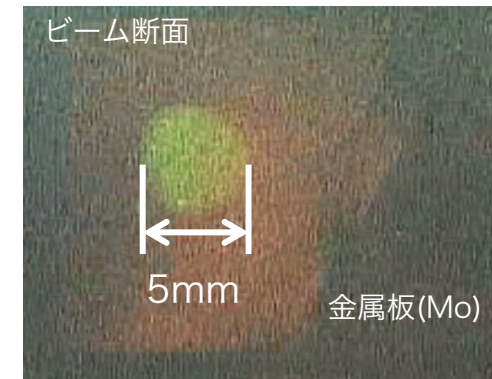
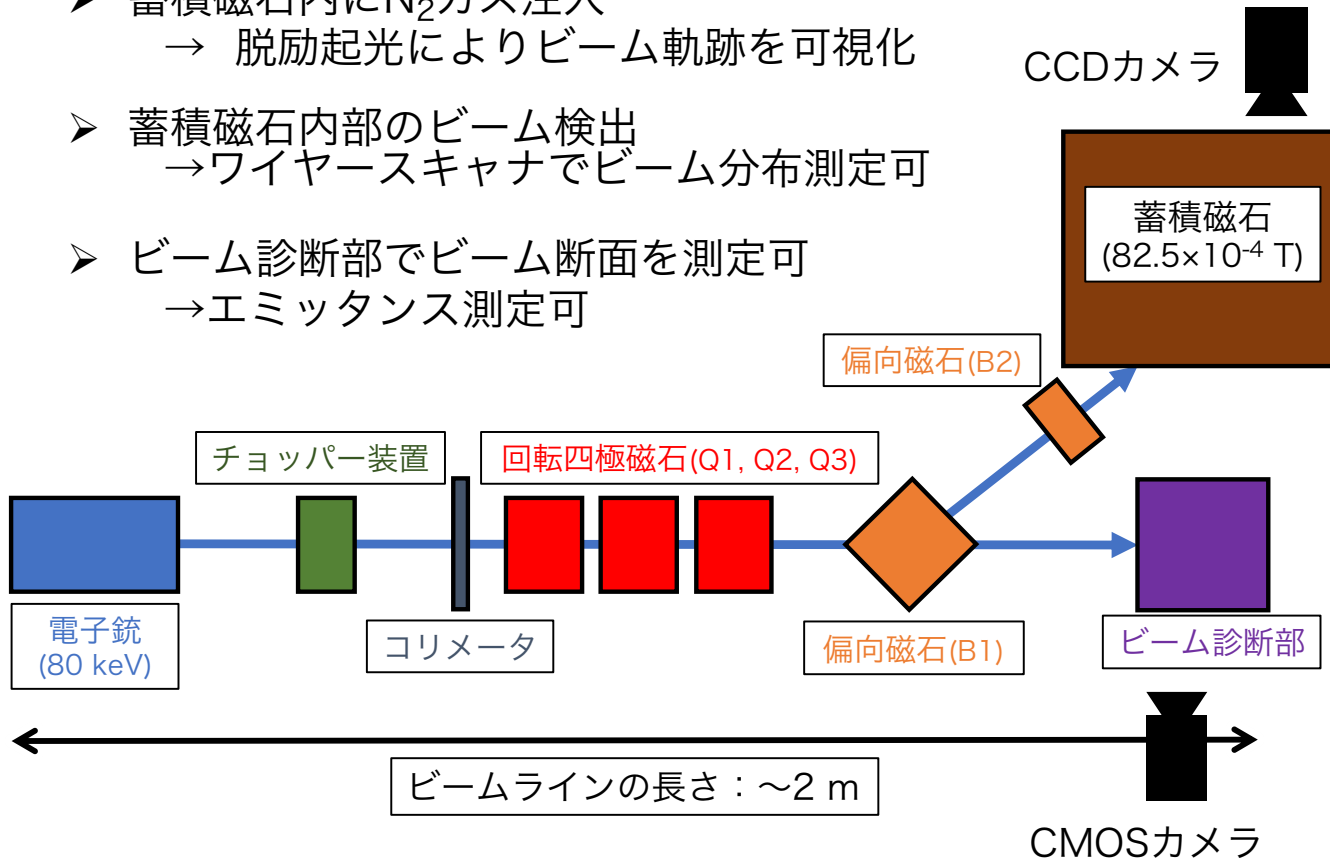
3次元らせん入射実証実験セットアップ



3次元らせん入射実証実験セットアップ

● KEKに実証実験のためのビームラインを構築

- DCビーム電流量： $60\mu\text{A}$
- 蓄積磁石内に N_2 ガス注入
→ 脱励起光によりビーム軌跡を可視化
- 蓄積磁石内部のビーム検出
→ ワイヤスキャナでビーム分布測定可
- ビーム診断部でビーム断面を測定可
→ エミッタンス測定可



実証実験達成への3ステップ

- 3次元らせん入射実証の達成までの3ステップ

ステップ1：ビームXY結合の制御

- 入射後のビーム広がり抑制のため、ビームのXY結合を調整



ステップ2：パルスビーム生成・検出 & キッカー装置の準備

- 時間構造のあるキック磁場との同期のためパルスビームが必要
- 蓄積磁石中のどこにビームがいるのか
- キッカー装置の準備



ステップ3：弱収束磁場/キッカーパラメータの調整

- ステップ1、ステップ2で開発した手法、装置を用いてビーム蓄積実証実験
- 蓄積効率を高めるように各種パラメータを調整

実証実験達成への3ステップ

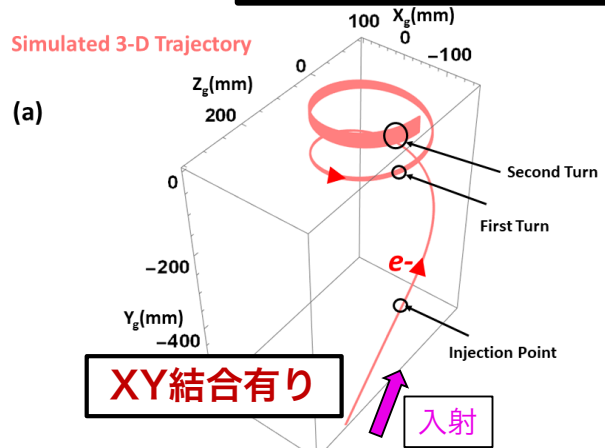
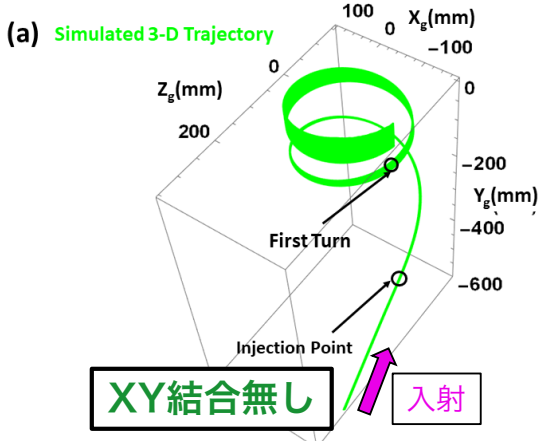
- 3次元らせん入射実証の達成までの3ステップ

達成

ステップ1：ビームXY結合の制御

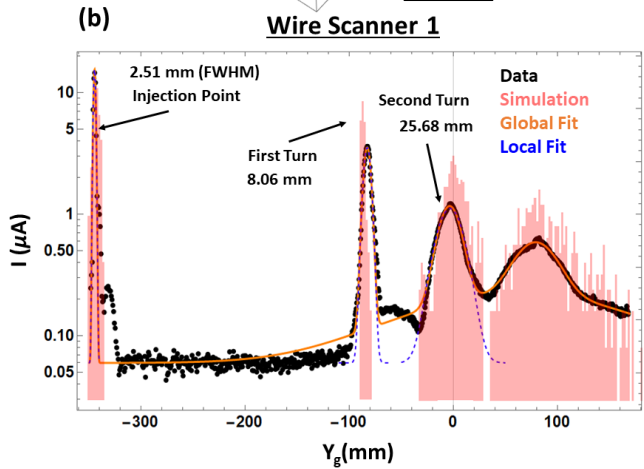
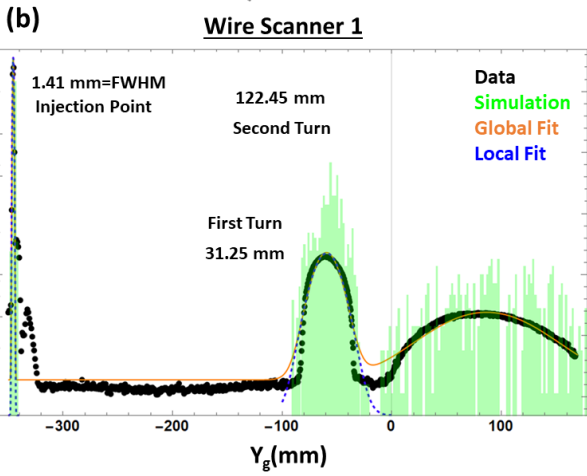
- 四極磁石によるXY結合調整でビーム広がりを抑制

M.A.Rehman(総研大博士論文, 2020)



ステップ2：パ

- 時間構造の
- 蓄積磁石中の
- キッカー装



ステップ3：弱

- ステップ1、
- 蓄積効率を高

実証実験達成への3ステップ

- 3次元らせん入射実証の達成までの3ステップ

全体にわたってお世話になってます
飯沼さん(茨城大)、大澤さん(KEK)、
中山さん(KEK)、古川さん(KEK)、
高富さん(KEK)

ステップ1：ビームXY結合の制御

- 入射後のビーム広がり抑制のため、ビームのXY結合を調整

達成

Rehmanさん(KEK)、染谷さん(KEK)、
平山さん(茨城大)

ステップ2：パルスビーム生成・検出 & キッカー装置の準備

- 時間構造のあるキック磁場との同期のためパルスビームが必要
- 蓄積磁石中のどこにビームがいるのか
- キッカー装置の準備

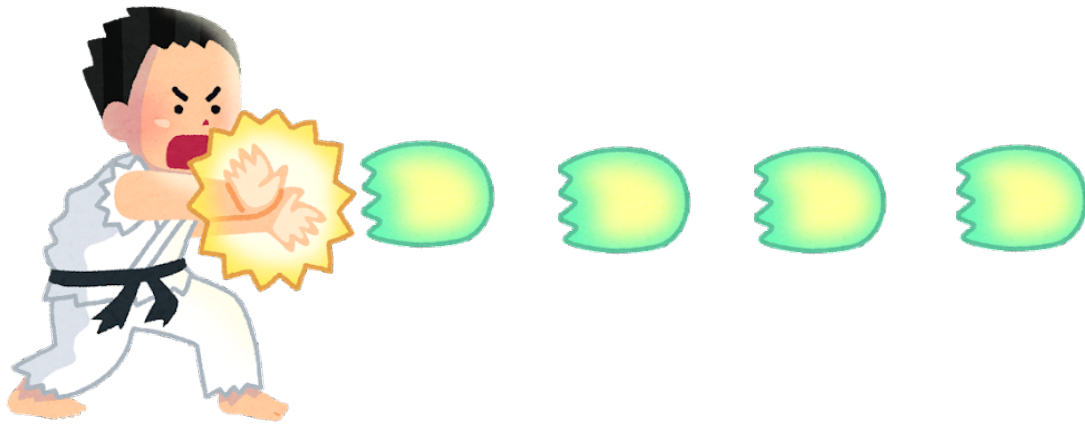
小田さん(茨城大)

本研究

ステップ3：弱収束磁場/キッカーパラメータの調整

- ステップ1、ステップ2で開発した手法、装置を用いてビーム蓄積実証実験
- 蓄積効率を高めるように各種パラメータを調整

パルスビームの生成



パルスビーム生成の目的

- 提案している3次元らせん入射では、パルス磁場でキックしてビームを蓄積する
- キッカー作動時間以下のパルス幅(精度10ns)のビームが必要
- ビーム入射タイミングとキッカー作動タイミングを同期させる必要

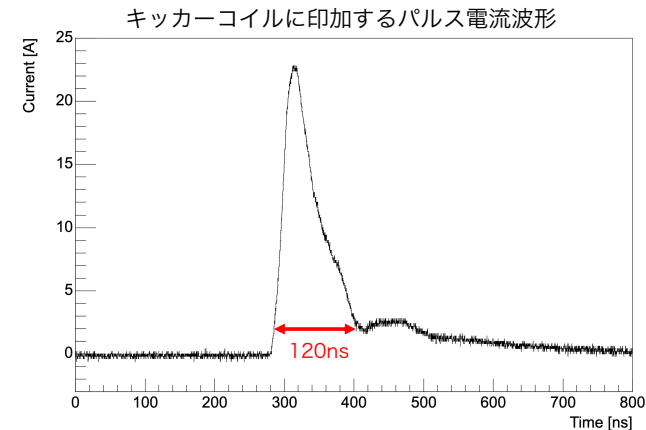


時間構造(繰り返し周波数、パルス幅)が
既知のパルスビームが必要

- パルスビームに対する要求

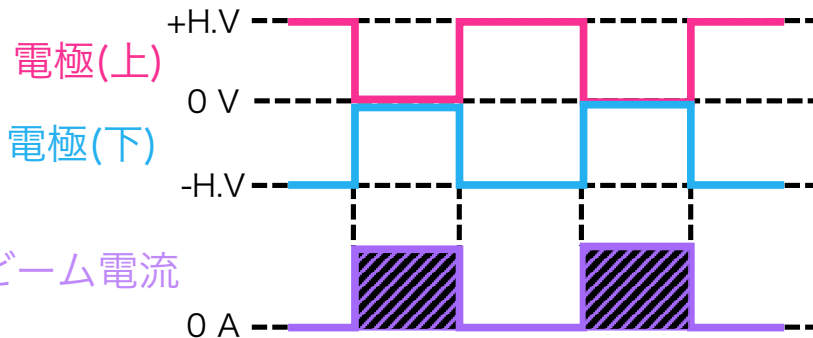
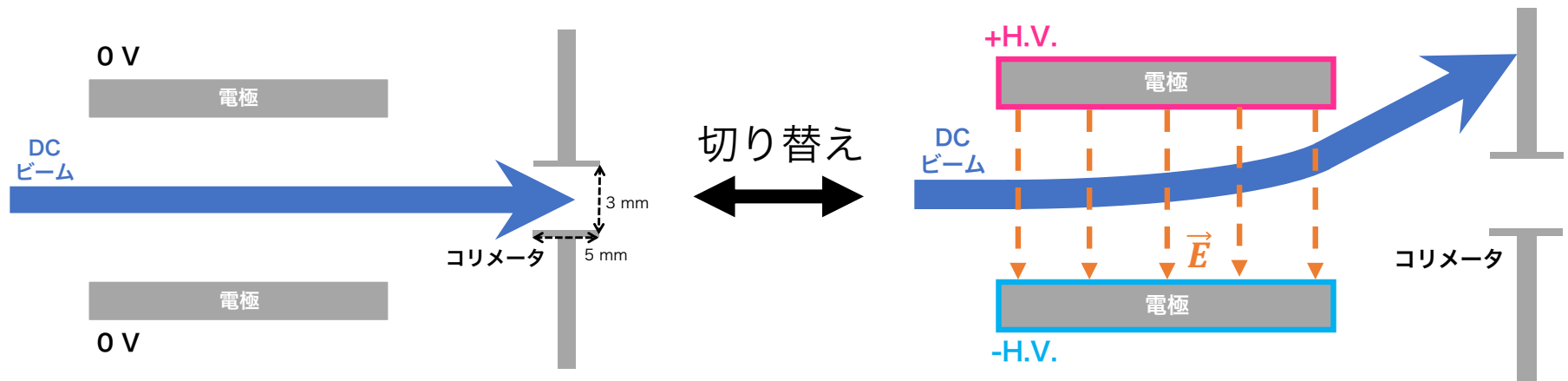
- パルス幅：120nsからDCビームまで切り替え可能であること
 - DCビーム入射軌道を“目で見て”ビーム調整
→ パルスビーム運転ができるように
- 繰り返し周波数：< 50Hzで運転ができること
 - キッカー電源からの制約

本番実験：25Hz



パルスビーム生成の原理

- パルス電場でDCビームを偏向し下流のコリメータで間引く



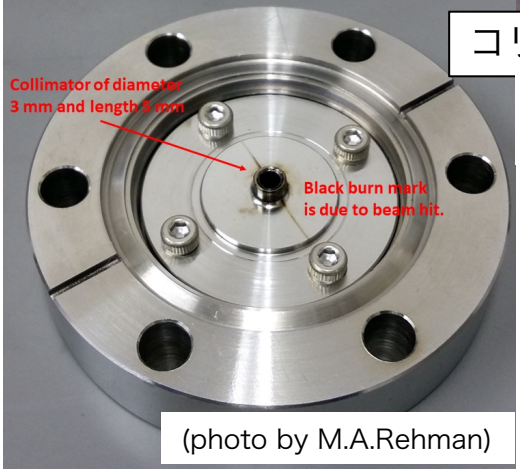
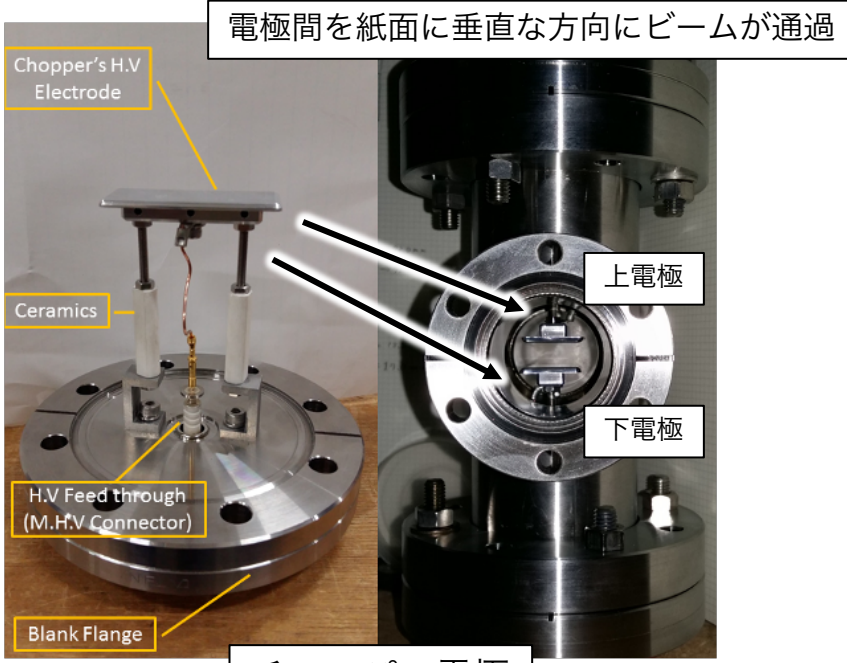
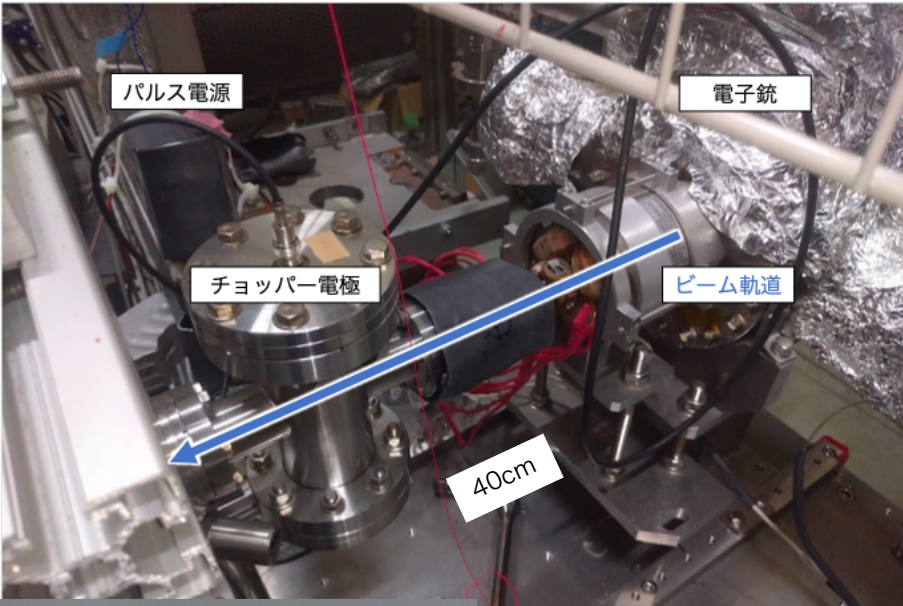
パルス電場のパルス幅、繰り返し周波数を調整



パルス幅、繰り返し周波数可変のパルスビームを生成可能

チョッパー装置セットアップ

- パルス電源と電極1対を用いて構築



- 生成可能パルスビームはパルス電源の性能に依存

パルス電源の仕様

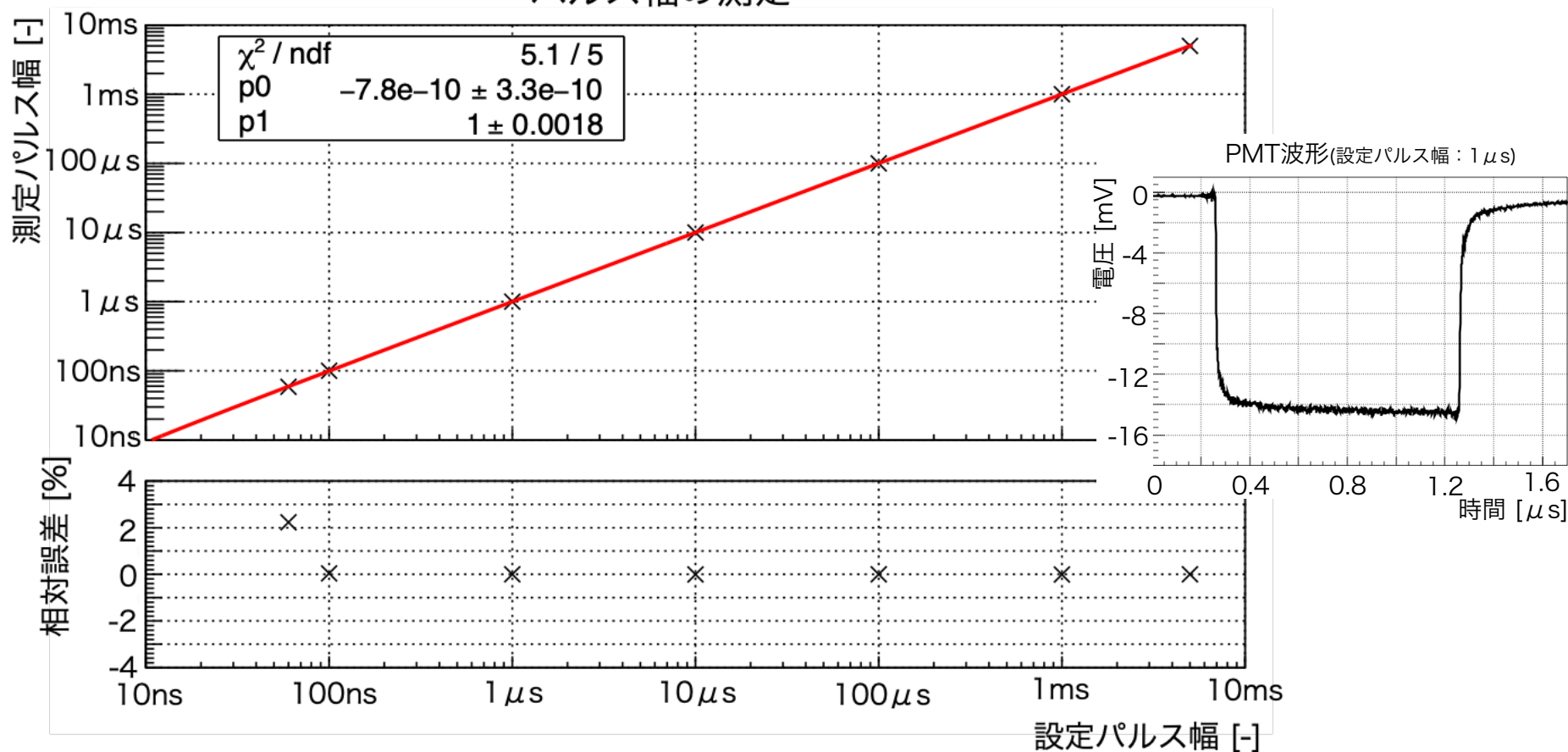
パルス幅：60ns – DC
繰り返し周波数：< 20kHz

ビームパルス幅の測定

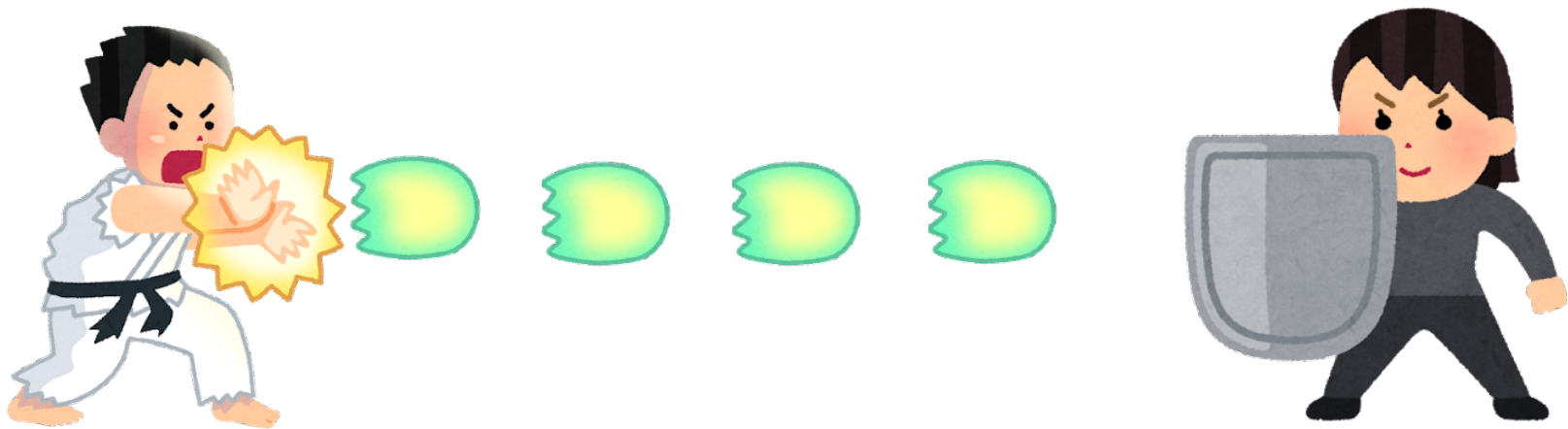
- パルスビームを金属板に当て遷移放射光をPMTで測定
 - PMT波形のパルス幅(ビームパルス幅)の、設定値に対する相対的なズレは4%以内

要求精度(10ns)以内であることを確認

パルス幅の測定



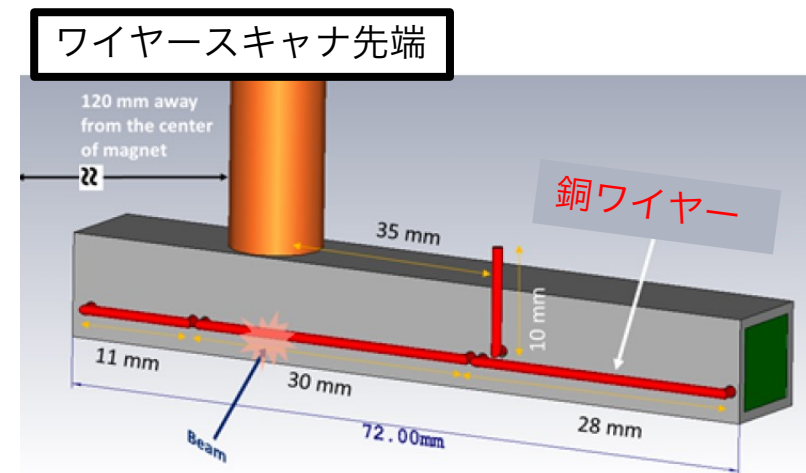
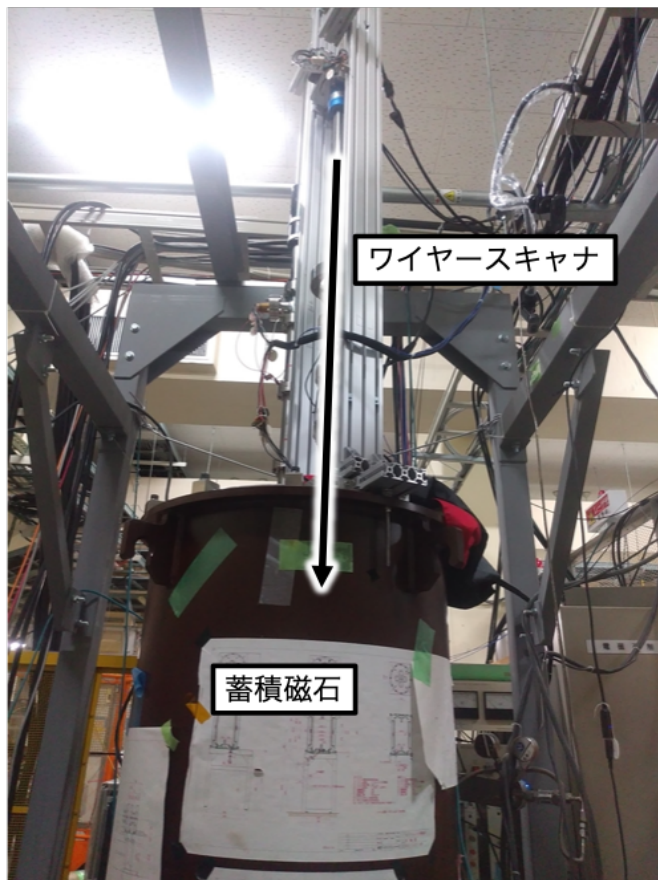
DC/パルスビームの検出



検出器作成の目的

実証実験のための要求
パルス幅 : $< 120\text{ns}$
 $f_{\text{rep.}} : < 50\text{Hz}$

- これまでの検出器はDCビーム用の設計
 - 浮遊容量によって短パルスへの応答不可 (パルス幅 $100\ \mu\text{s}$ あたりが測定限界)
 - 電荷量/1バンチが少なすぎて測定不可 (3 pC/bunch @パルス幅100 ns)



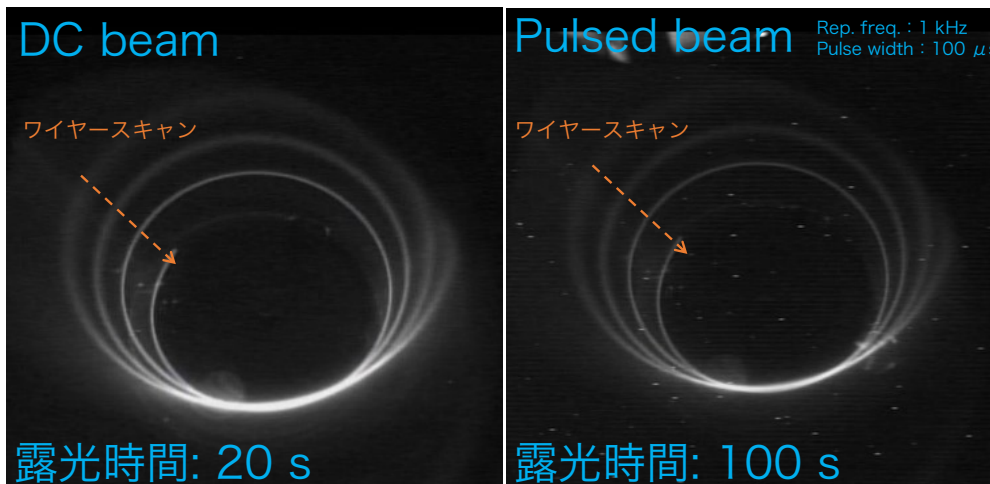
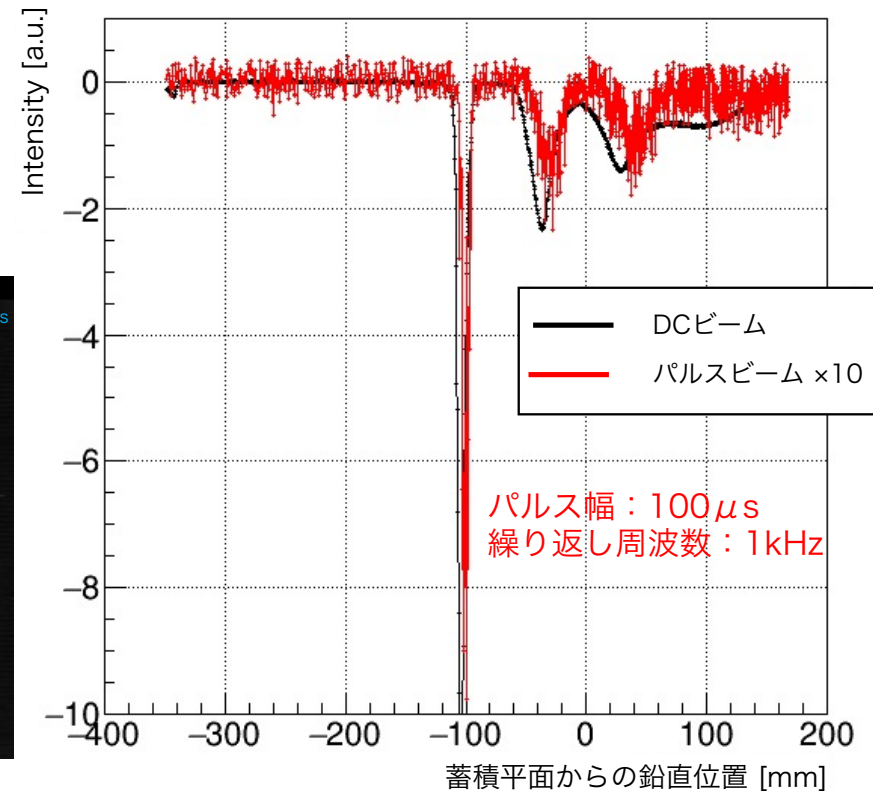
M.A.Rehman (総研大博士論文, 2020)

検出器作成の目的

実証実験のための要求
パルス幅 : < 120ns
f_rep. : < 50Hz

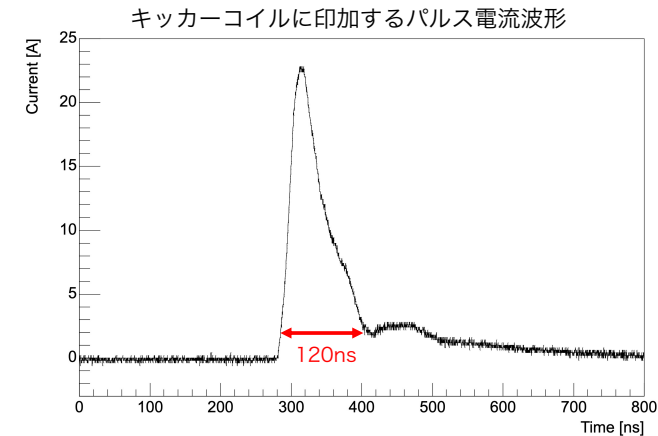
- これまでの検出器はDCビーム用の設計
 - 浮遊容量によって短パルスへの応答不可 (パルス幅100 μ sあたりが測定限界)
 - 電荷量/1バンチが少なすぎて測定不可 (3 pC/bunch @パルス幅100 ns)
- 新たな測定原理で、nsオーダーの
パルスビームを検出するための装置
が必要

ワイヤースキャン結果



パルスビーム検出に対する要求

- ビーム蓄積実証実験に使用するパルスビーム
 - パルス幅： $< 120\text{ns}$
 - 繰り返し周波数： $< 50\text{Hz}$
 - 1バンチあたりの電荷量： 3pC (@DCビーム電流量)



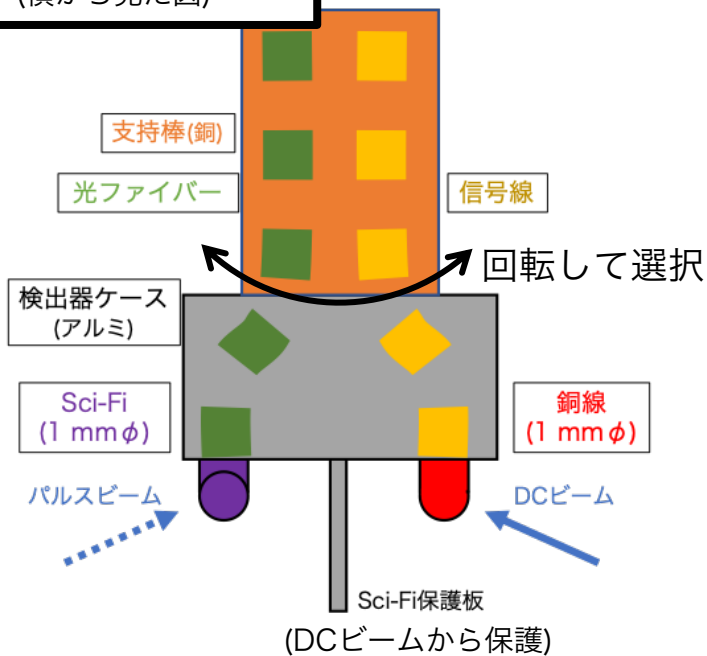
→ 数十nsオーダーのパルスビームが測定できるようにしたい

- キッカーコイルによるノイズ対策のため、電気信号以外で信号を取り出したい

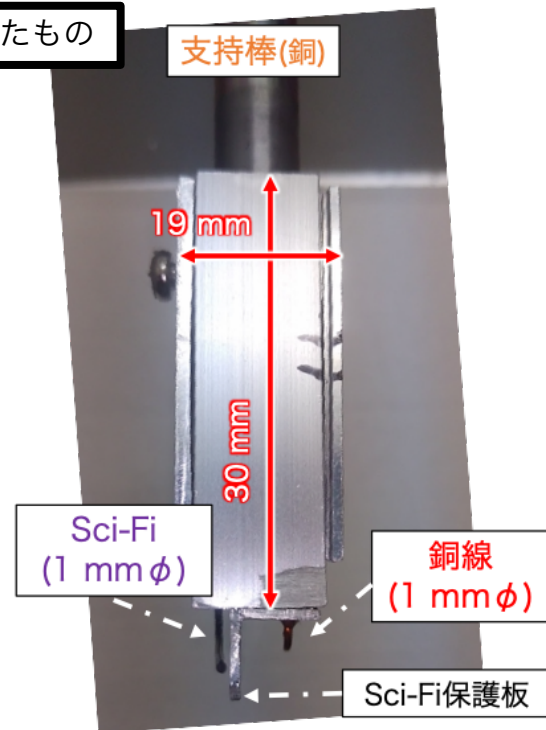
検出器の構造

- DCビームの時とパルスビームの時で軌道のずれがあるのか？
 - 同じ位置でDC/パルスビームを検出できるように、1つの検出器でどちらも対応できるようにした
- DC/パルスビームの検出には、銅線/Sci-Fiを使用
- 支持棒を中心に180°回転させることで、どちらか選択できるようにした

検出器先端部分の概念図
(横から見た図)



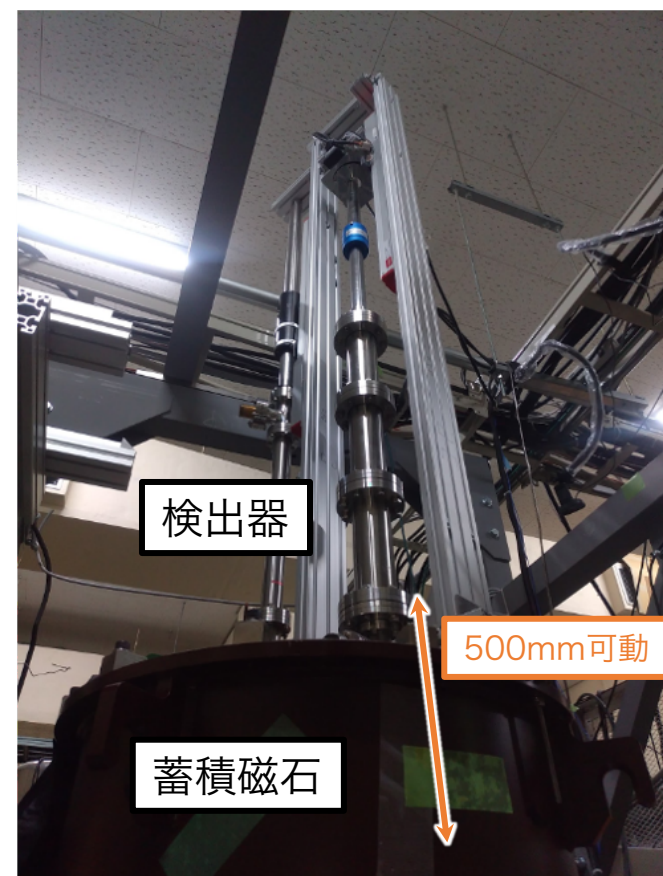
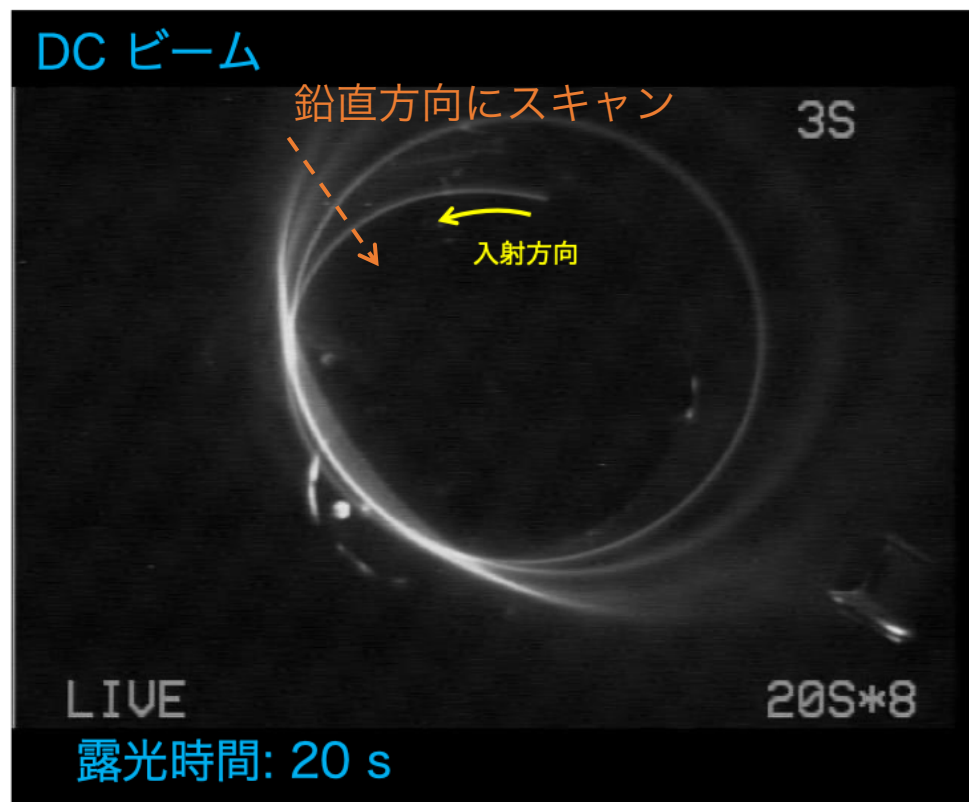
実際に作製したもの



DC/パルスビーム測定

● 測定条件

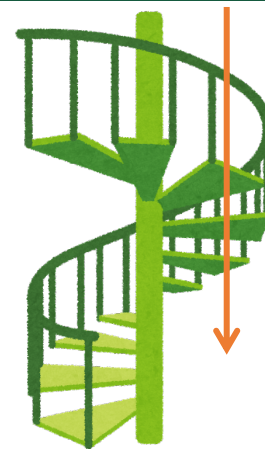
- パルスビームはパルス幅：100ns、繰り返し周波数：50Hz
- DC/パルスビームを同じ条件下で入射し測定



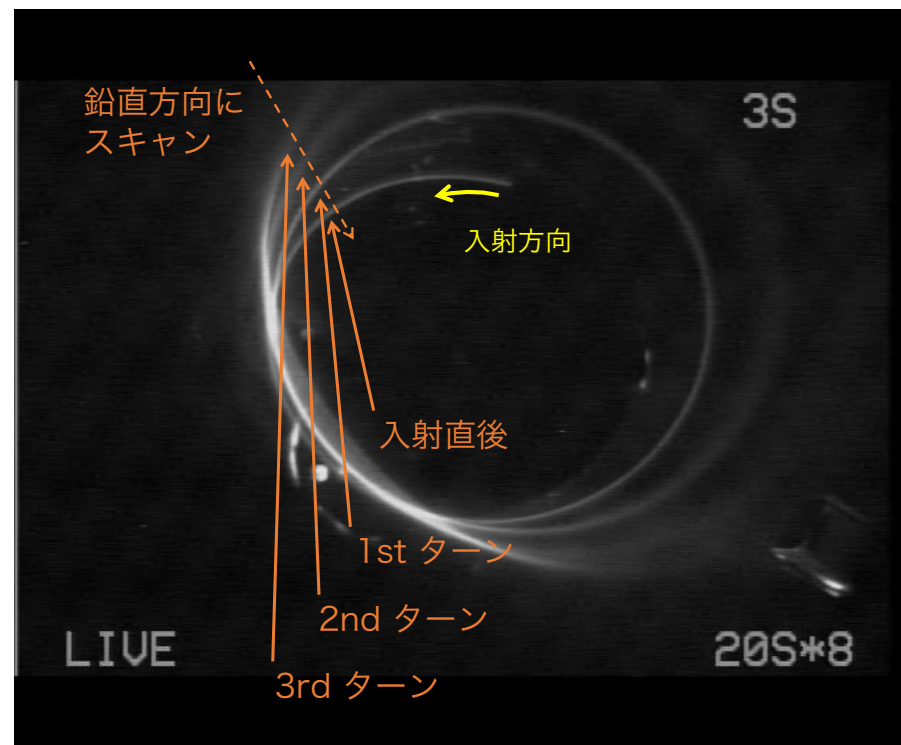
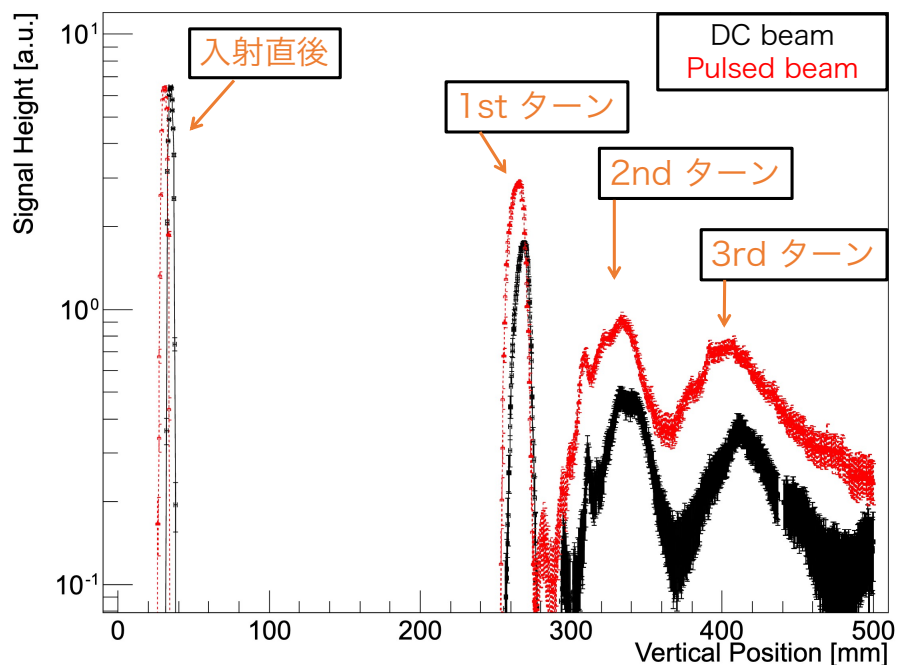
DC/パルスビーム測定結果

- DC/パルスビーム共に検出できた
- 各ピークは入射ビームの各ターンに相当する
- DC/パルスビーム軌道に大きな差異がないことがわかった

数mm程度のずれがあるが、原因を検討中



Wire Scanner Measurement



まとめ

- 本研究の目的

3次元ラセン入射実証実験のための、パルスビーム生成・検出手法の開発

- ✓ パルスビーム生成

チョッパ装置を構築しパルスビームを生成

ビーム蓄積実証実験で使用するための要求を満たしていることを確認

要求
パルス幅(精度10ns) : < 120ns
繰り返し周波数 : < 50Hz

生成可能
パルス幅可変 : 60ns - DC
繰り返し周波数可変 : < 20kHz

- ✓ パルスビーム検出

銅線/Sci-Fiを使った検出器によりDC/パルスビームの検出に成功

ビーム蓄積実証実験で使用するパルスビームが検出可能になった

より精度の良い測定のために、測定系の改良をおこなう

今後の展望

- 3次元らせん入射実証実験達成までの道のり

先行研究で達成

ステップ1：ビームXY結合の制御

- 入射後のビーム広がり抑制のため、ビームのXY結合を調整

ステップ2：パルスビーム生成・検出 & キッカー装置の準備

- キッカーとのタイミング合わせでパルスビームが必要

本研究で達成

進行中

ステップ3：弱収束磁場/キッカーパラメータの調整

- ステップ1、ステップ2で開発した手法、装置を用いてビーム蓄積実証実験
- 蓄積効率を高めるように各種パラメータを調整

今後の展望

- 3次元らせん入射実証実験達成までの道のり

先行研究で達成

ステップ1：ビームXY結合の制御

- 入射後のビーム広がり抑制のため、ビームのXY結合を調整

キッカー装置の準備
必要

進行中

蓄積磁石内に
仮設置した
キッカーコイル

の調整
についてビーム蓄積実証実験

今後の展望

- 3次元らせん入射実証実験達成までの道のり

先行研究で達成

ステップ1：ビームXY結合の制御

- 入射後のビーム広がり抑制のため、ビームのXY結合を調整

ステップ2：パルスビーム生成・検出 & キッカー装置の準備

- キッカーとのタイミング合わせでパルスビームが必要

本研究で達成

進行中

次のステップ

パルスビームとキッカー装置を使ったビーム蓄積実証実験

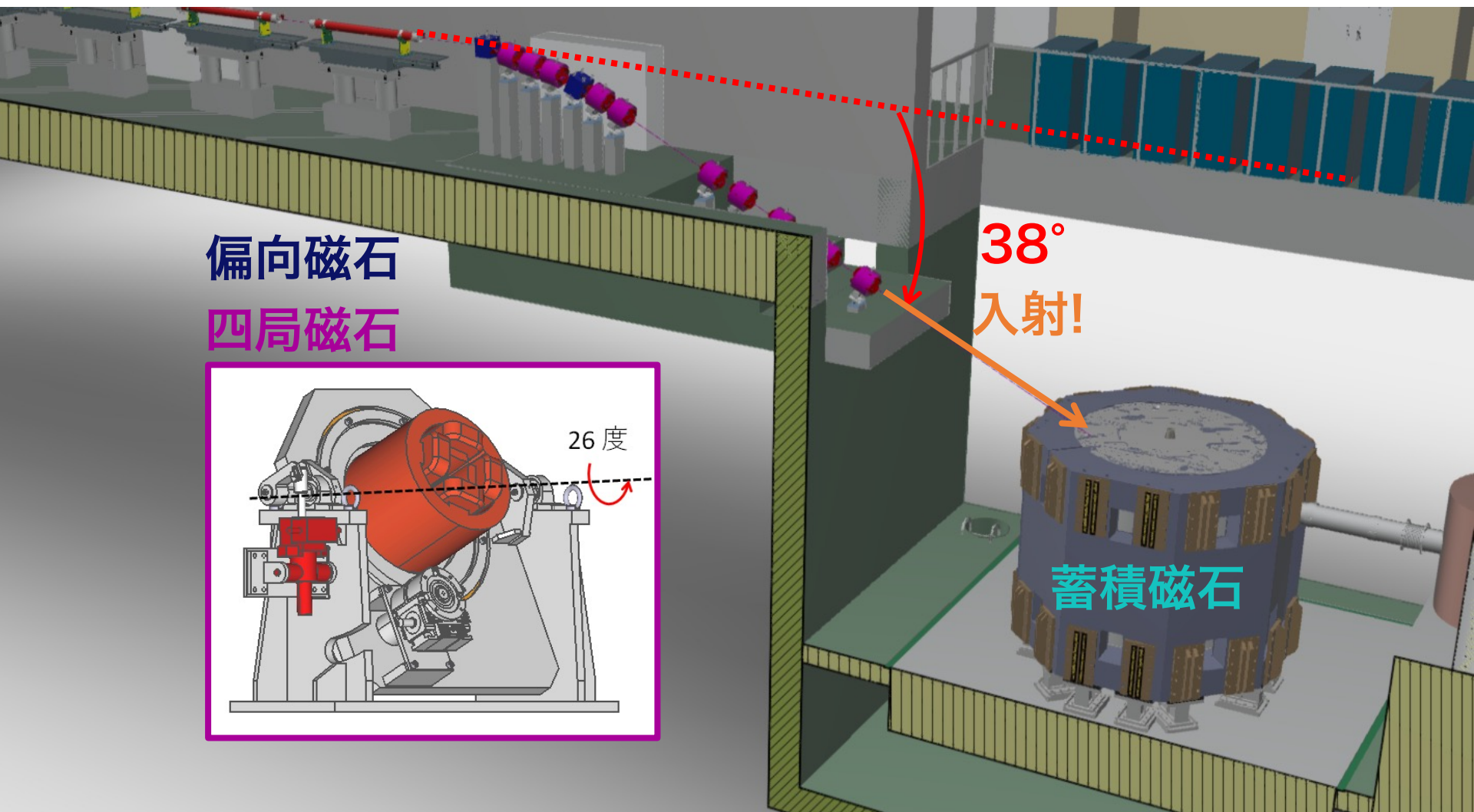
- ステップ1の準備が完了したまま、装置を用いてビーム蓄積実証実験
- 蓄積効率

ビームが蓄積できたかどうか？を確認

調整手法を本番実験にフィードバック

蓄積効率を最大にするようにパラメータ(キッカー、弱収束磁場)を調整

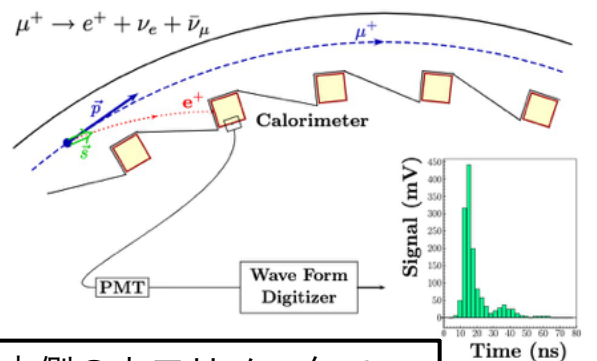
今後の展望



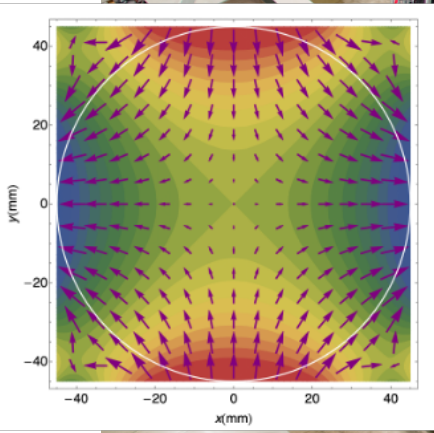
Backup

先行実験：FNAL muon g-2

<https://vms.fnal.gov/asset/detail?recid=1950114>

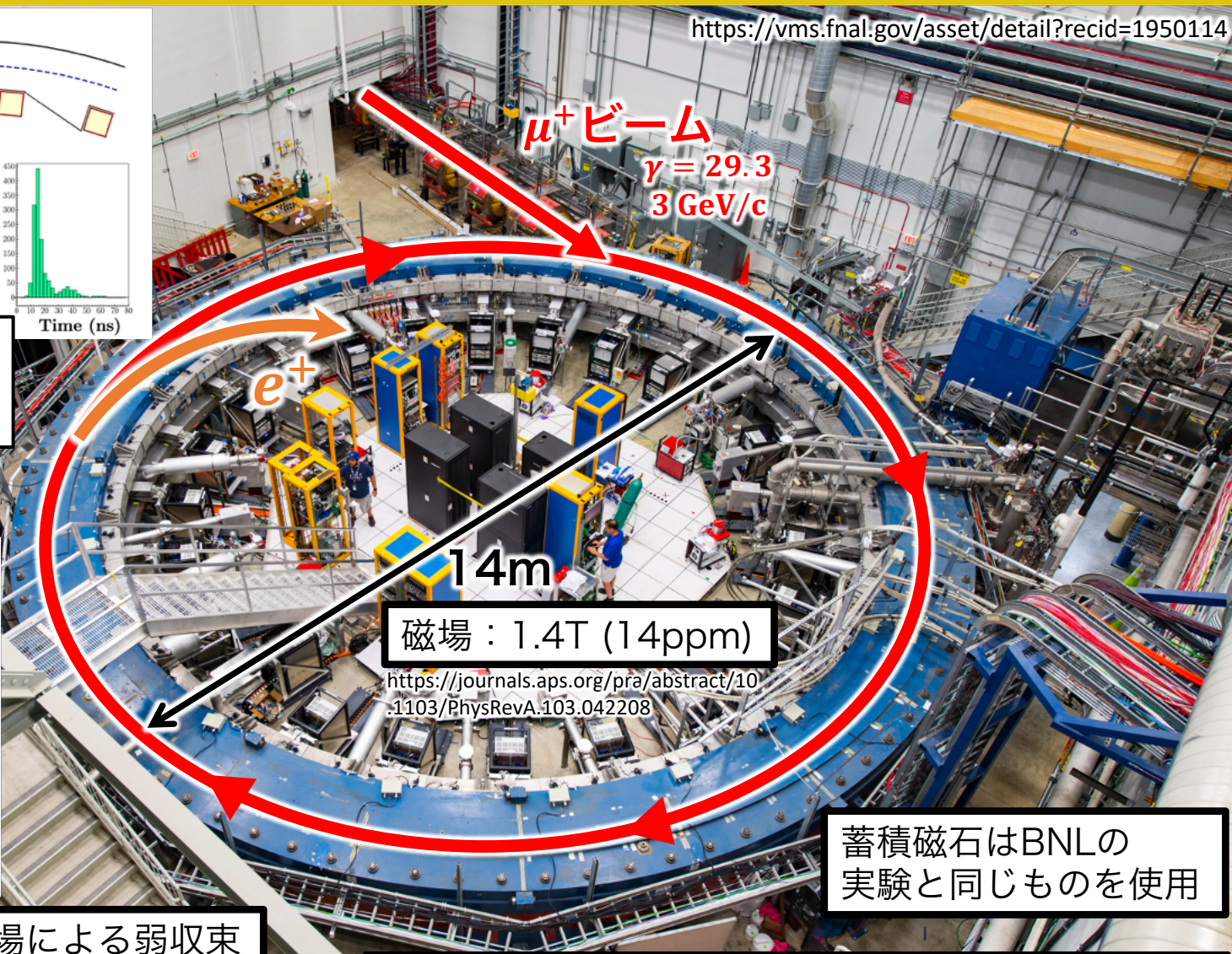


内側のカロリメータで崩壊陽電子のエネルギーと到達時間を測定



ビーム蓄積：静電四極場による弱収束

<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.044002>



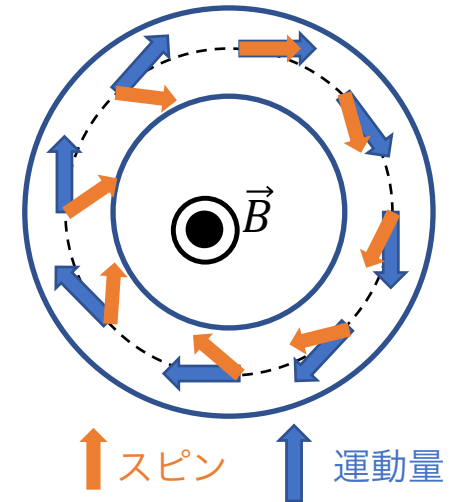
蓄積磁石はBNLの実験と同じものを使用

Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL)

ミューオンg-2/EDM測定手法

- 静磁場中のミューオン

- 運動量ベクトル：サイクロトロン運動で回転
- スピンベクトル：ラーモア歳差運動+トーマス歳差運動で回転



- 運動量ベクトルとスピンベクトルの回転運動の差

- スピン歳差運動の角周波数

$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\frac{\vec{E}}{c} + \vec{\beta} \times \vec{B} \right) \right]$$

スピン歳差運動周期を測定してg-2/EDMを決定する

- 先行実験(BNL, FNAL)

$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m_\mu} a_\mu \vec{B}$$

条件

$$a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} = 0$$

($\gamma = 29.3$)

$\eta = 0$ と仮定

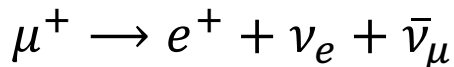
- J-PARC実験

$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

条件

$$\vec{E} = \vec{0}$$

- ミューオン崩壊



e^+ は μ^+ スピン方向に放出されやすい

→ e^+ を検出して $\vec{\omega}_a$ を測定

ミューオンg-2/EDM測定原理

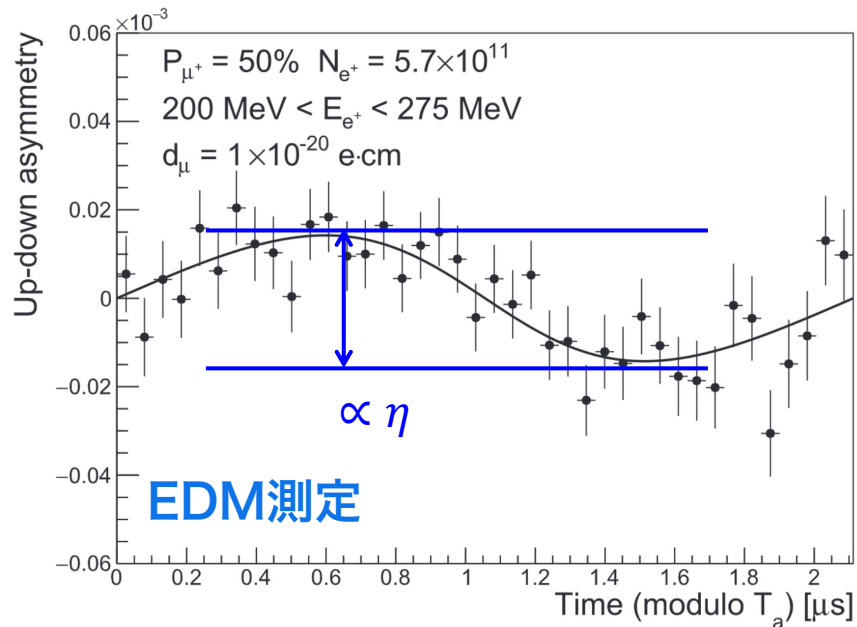
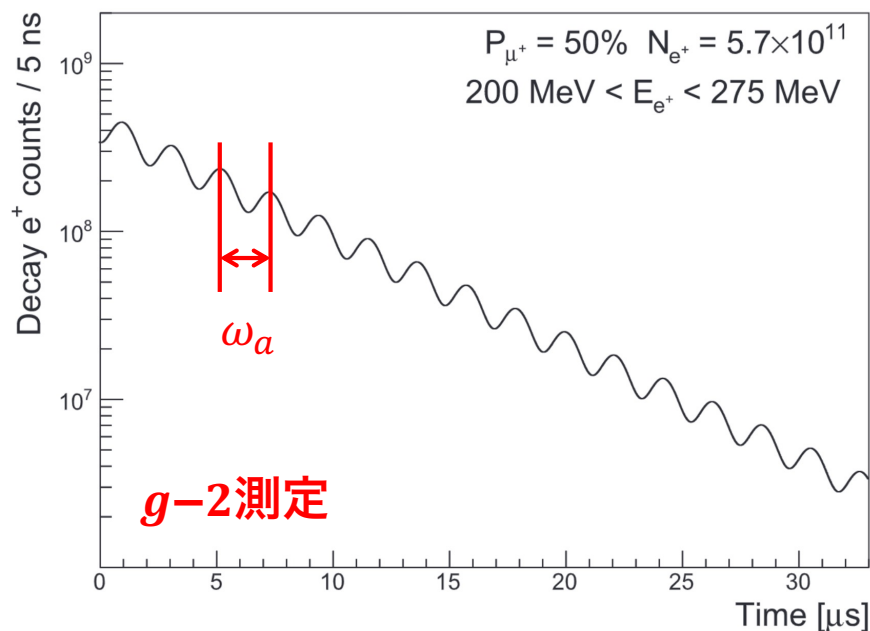
- スピン歳差運動

➢ 条件：電場を使わない ($\vec{E} = \vec{0}$)

$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

回転軸： \vec{B}

回転軸： $\vec{\beta} \times \vec{B}$

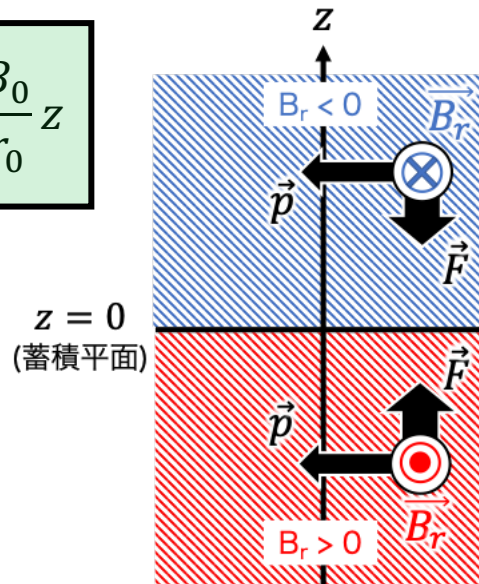


弱収束磁場とは

- 蓄積磁石の設計において、蓄積平面を中心に±5cm以内の領域は、磁場が以下の式を満たすように調整(弱収束磁場)
- 弱収束磁場によって、ビームは単振動しながら蓄積

径方向磁場

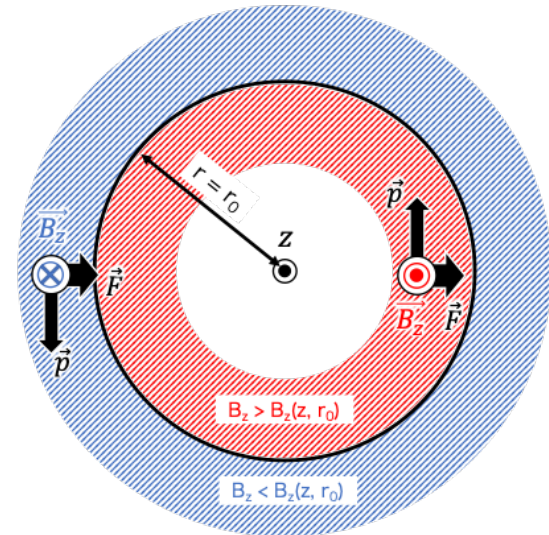
$$B_r(z) = -n \frac{B_0}{r_0} z$$



磁場勾配によって蓄積平面方向の力が働く

ソレノイド軸方向磁場

$$B_z(z, r) = B_0 \left[1 - n \frac{r - r_0}{r_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{z}{r_0} \right)^2 \right]$$



磁場勾配によってr = r_0方向の力が働く

n : field index
0 < n < 1

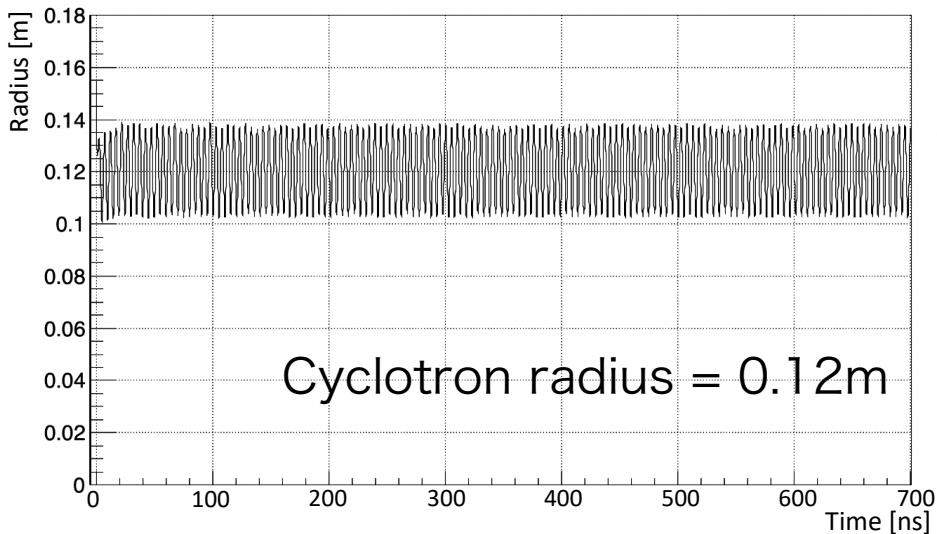
J-PARC実験

$n = 1.5 \times 10^{-4}$, $B_0 = 3 \text{ T}$, $r_0 = 0.33 \text{ m}$ (サイクロトロン半径)

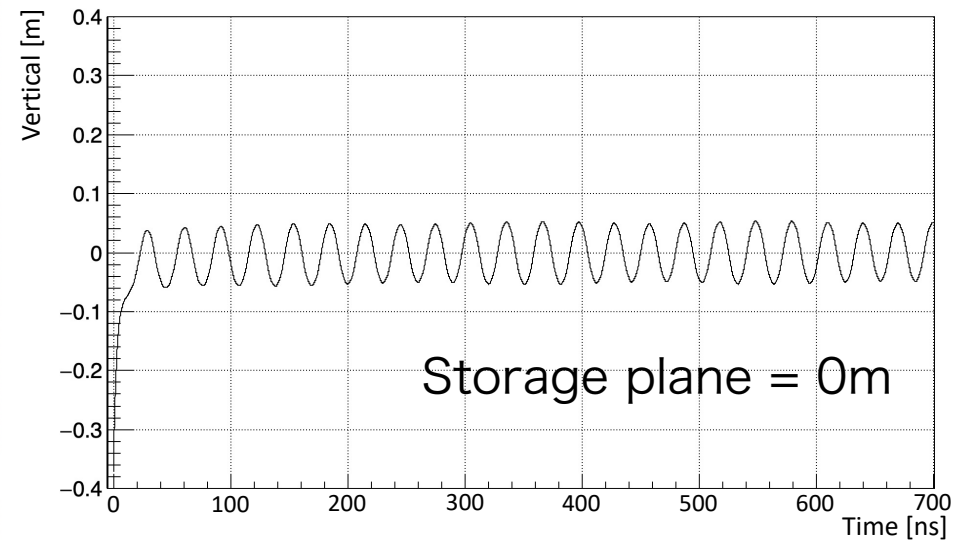
Betatron oscillation

- 蓄積されたビームの横方向運動
- 弱収束磁場により単振動

Time vs Radius



Time vs Vertical



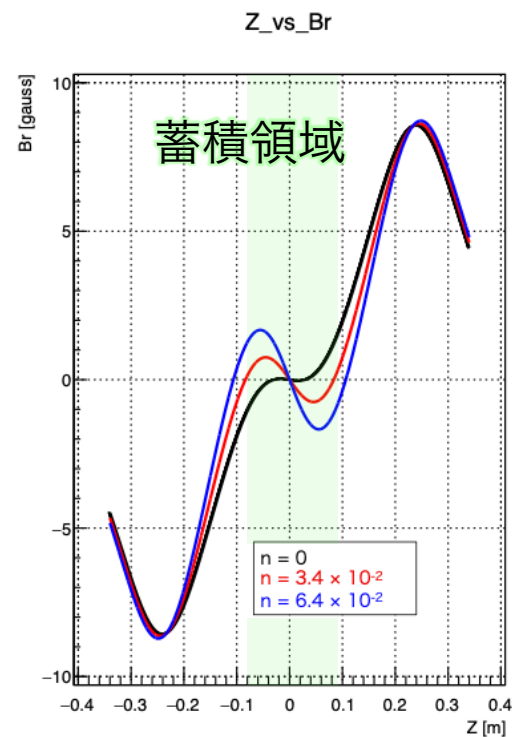
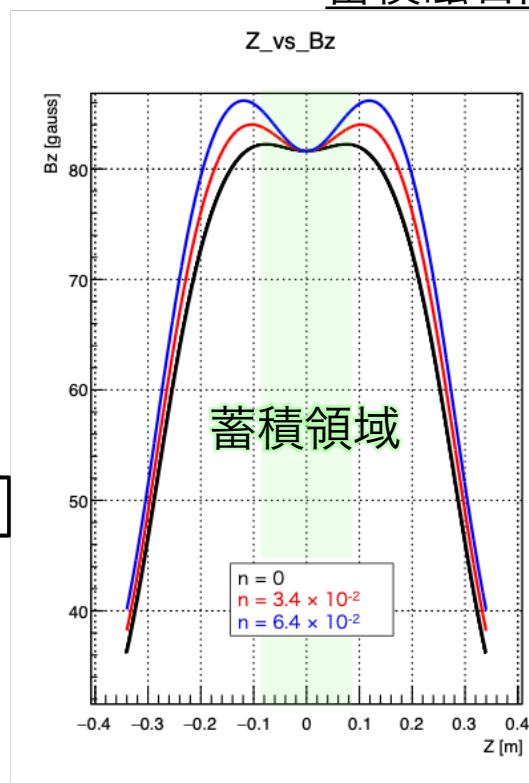
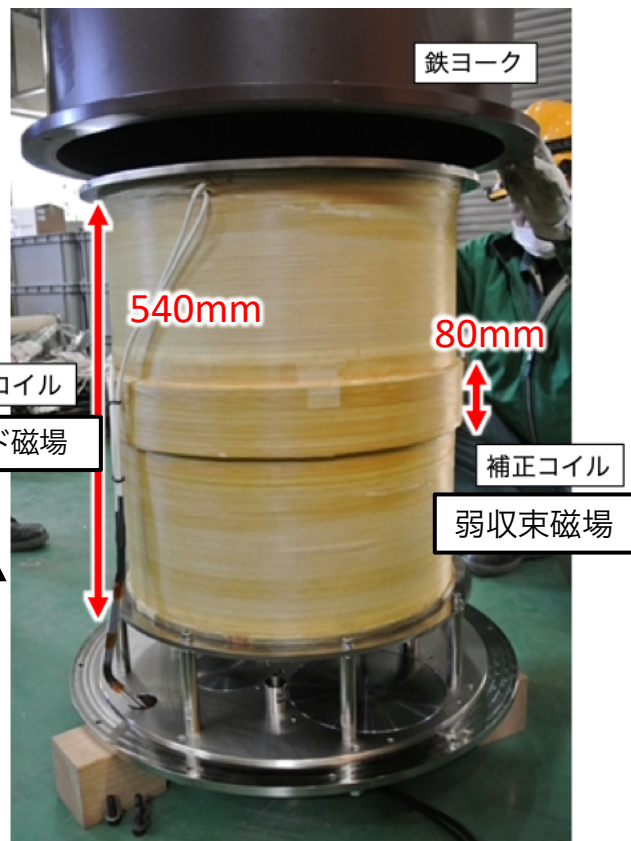
蓄積磁石 @実証実験

- 本番実験の1/3にスケールダウン

- 蓄積領域：直径24cm (本番：66cm)
- 蓄積磁石： $82.5 \times 10^{-4} \text{ T}$
- 弱収束磁場： $n = 3.4 \times 10^{-2}$ (可変)

蓄積しやすくするために、
本番の100倍

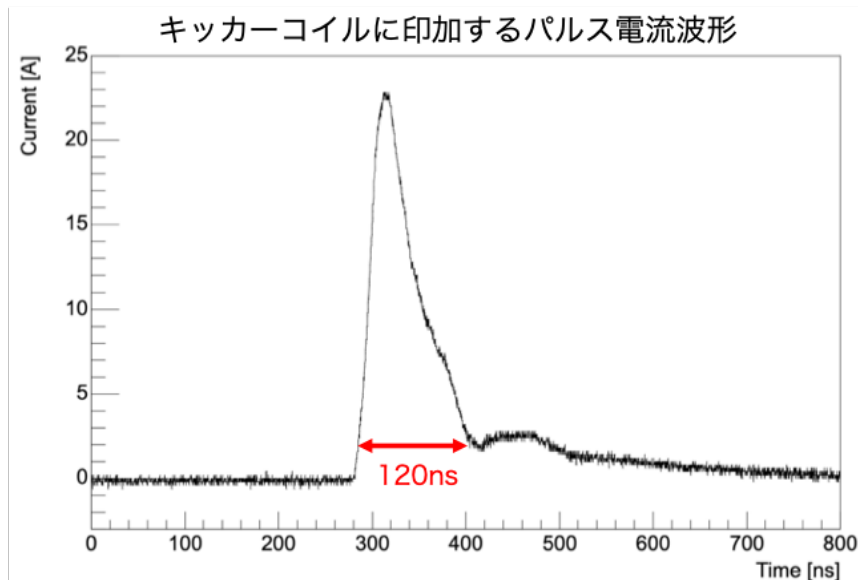
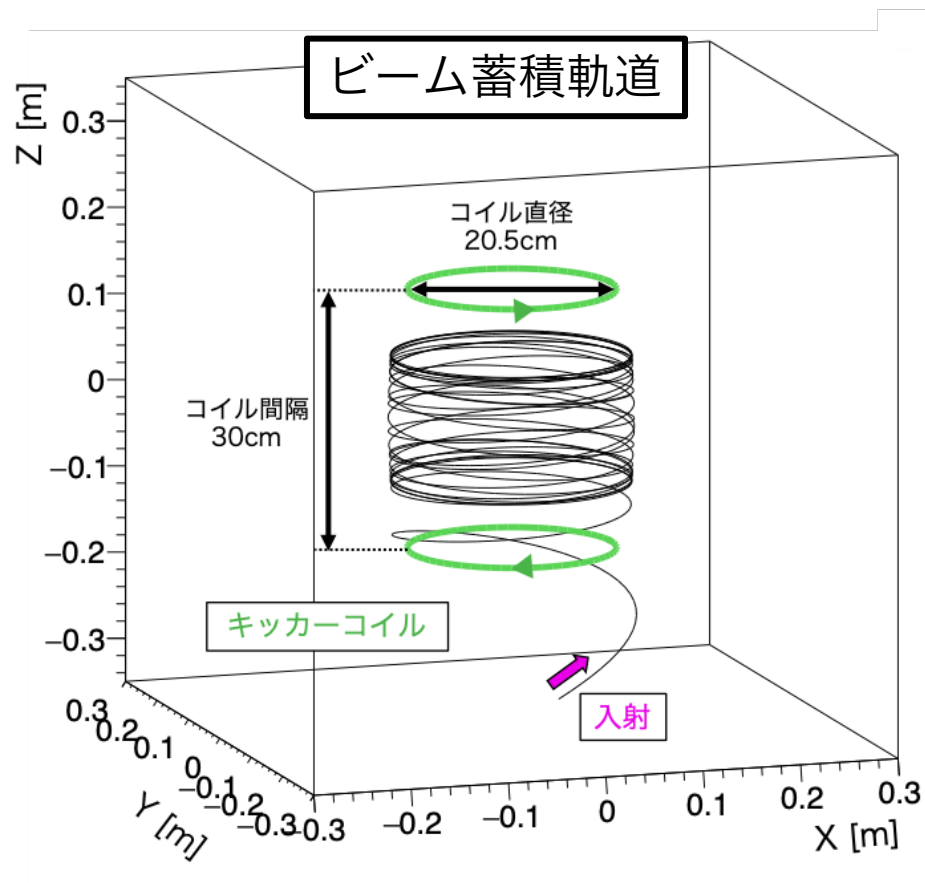
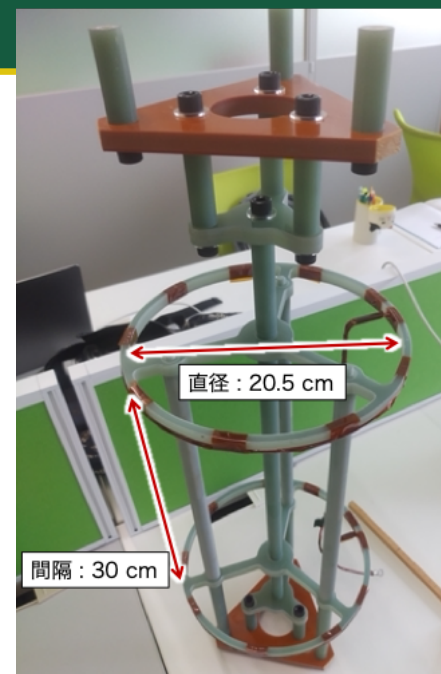
蓄積磁石内部の磁場分布



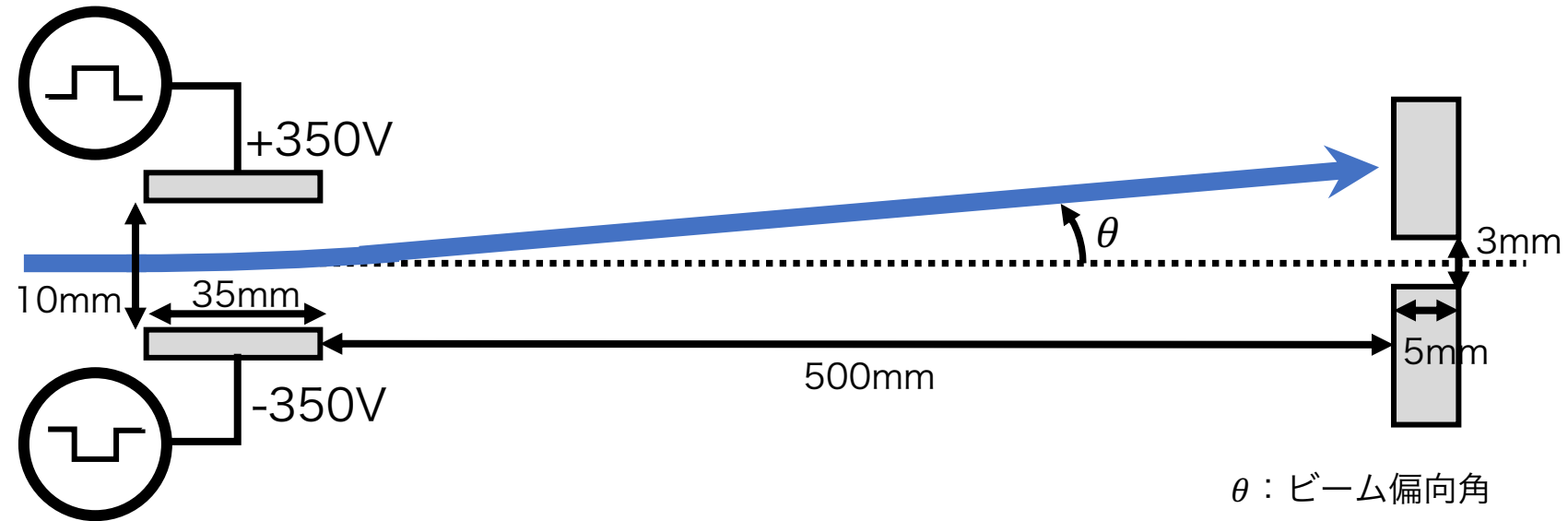
蓄積平面：Z=0

3次元らせん入射 @実証実験

- 実証実験では下から入射 (本番は上から)
- 上下のコイル ($1.3\mu\text{H}$)に、持続時間120ns程度のパルス電流(数十Aピーク)を流してビームをキック



電場による偏向角



$$\theta = \frac{Vl}{(\gamma mc^2 \beta^2) d}$$

- $V = 128\text{V} \rightarrow \theta = 3\text{ mrad}$: ビーム中心はコリメータ通過不可
- ビームハローも考慮し $V = 700\text{V} \rightarrow \theta = 16\text{ mrad}$ とした

θ : ビーム偏向角

V : 電極間の電位差

l : 電極の長さ(ビーム進行方向)

d : 電極間の距離

m : 電子質量

c : 光速

γ, β : ローレンツファクター

電子ビーム加速エネルギー : 80keV
 $\rightarrow \gamma = 1.157, \beta = 0.502$

電極に印加するパルス波形の測定(1/3)

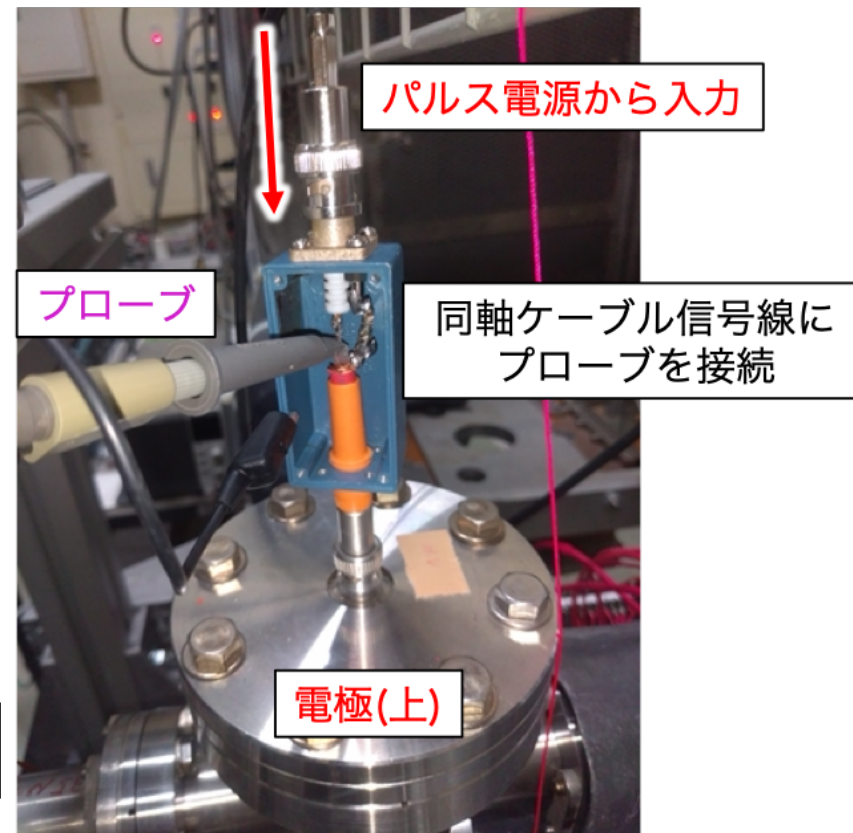
- 電極に印加されているパルス波形を測定
- パルス波形の幅を測定し、設定値とのずれを確かめる

測定セットアップ

- 電極 - パルス電源間を接続する同軸ケーブル信号線に、プローブを接続
- プローブをオシロスコープに接続し、パルス波形を測定
- 測定パルス幅(FWHM) : 60ns - 5ms
- 電極印加電圧 : +350V

ビーム偏向角から決定

運転する範囲より広い範囲



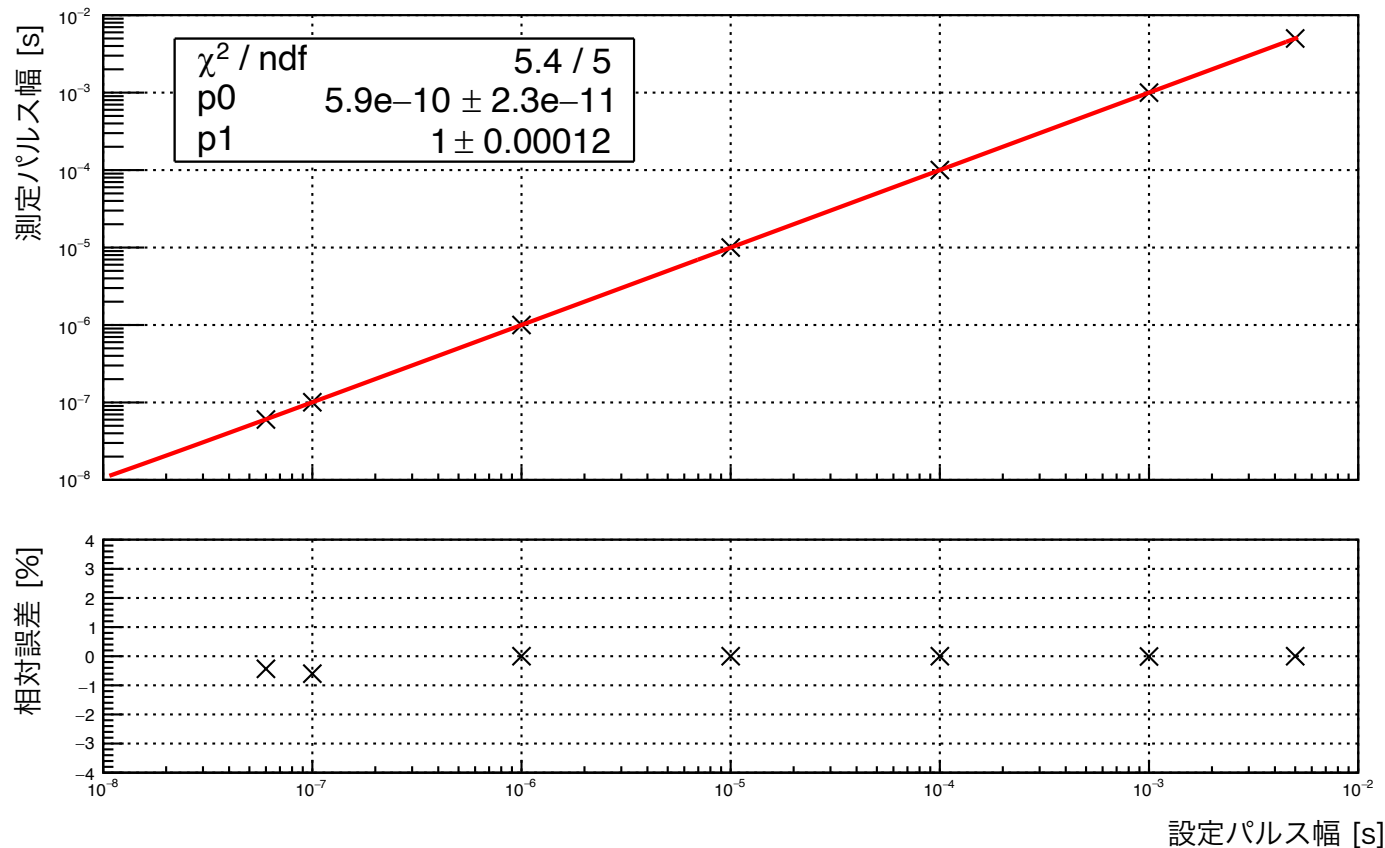
電極に印加するパルス波形の測定

● 測定結果

- パルス幅測定値の、設定値に対する相対誤差は1%以内に収まっている

要求精度(10ns)以内であることがわかった

パルス幅の測定(電極波形)

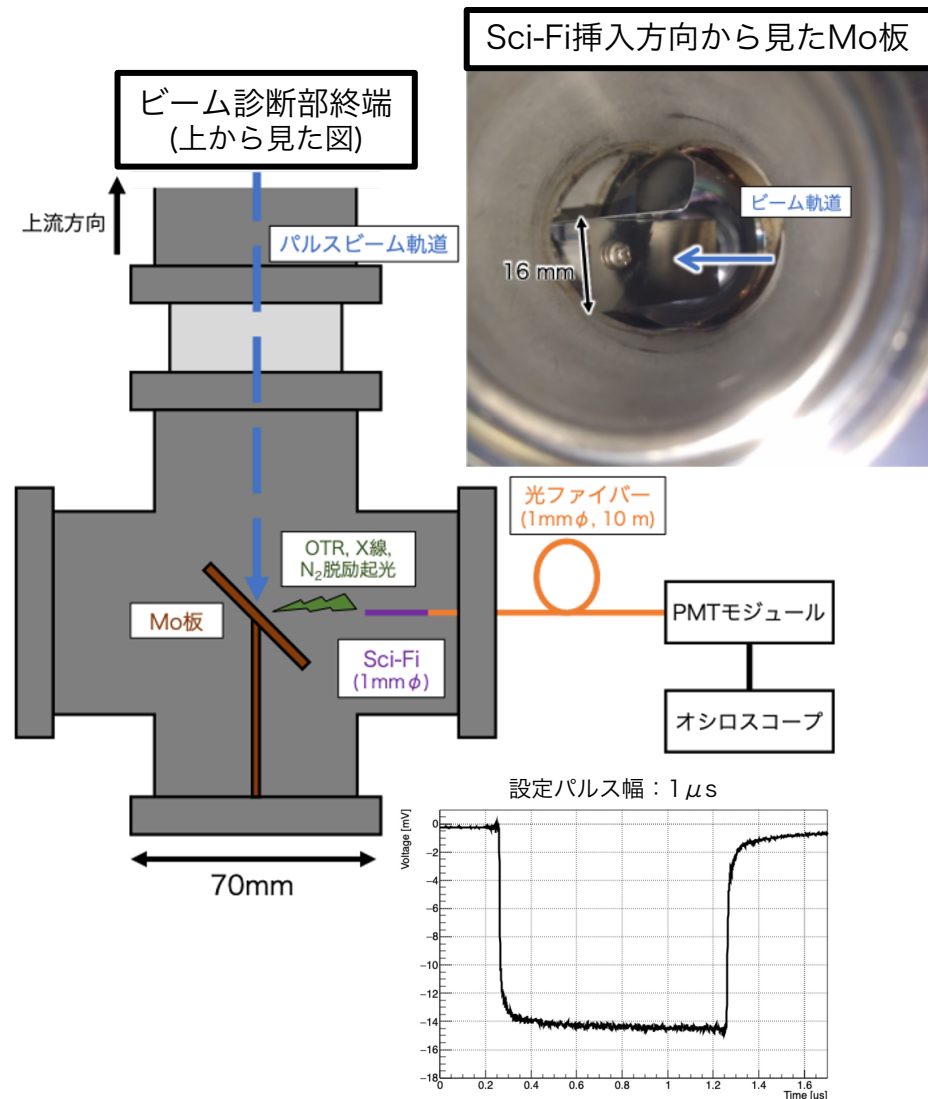


ビームパルス幅の測定

- 生成したパルスビームのパルス幅を測定し、設定値とのずれを確かめた

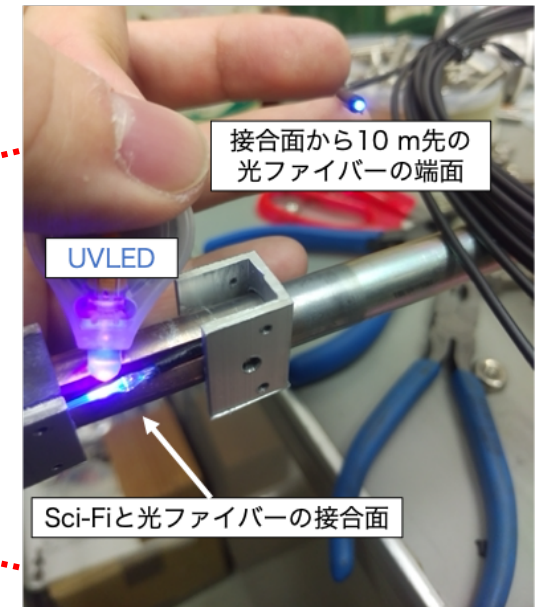
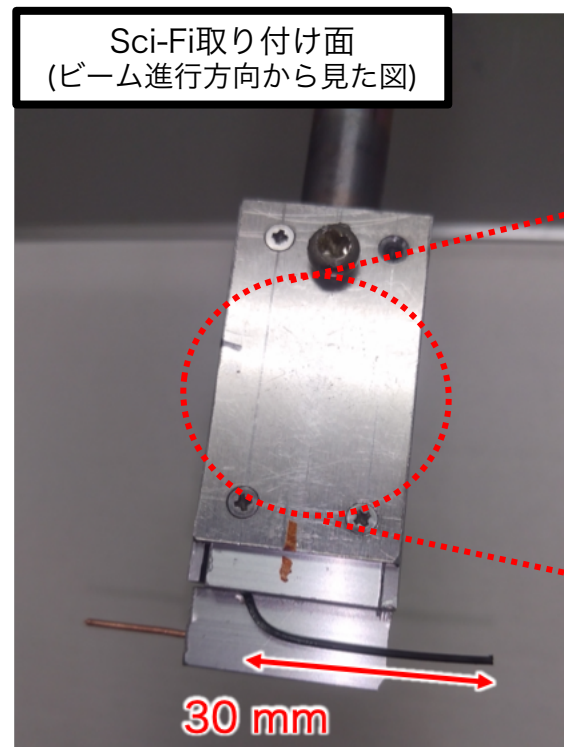
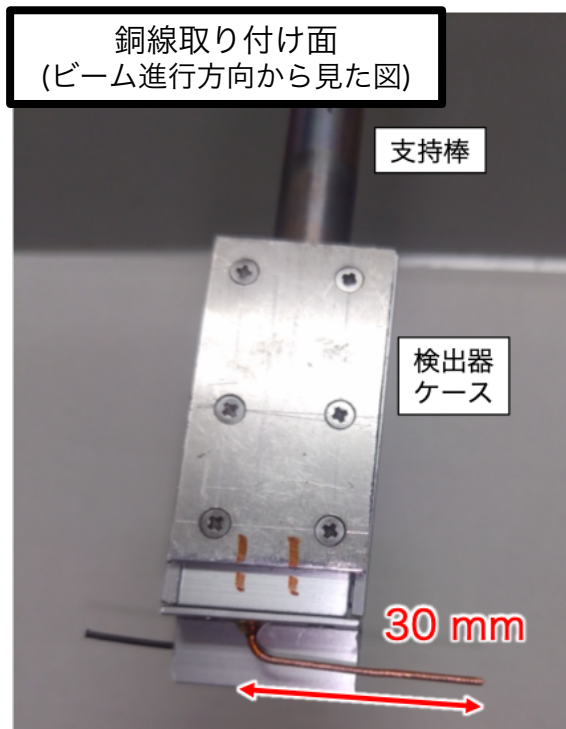
測定セットアップ

- ビーム診断部終端で測定
- パルスビームをMo板に当て、放出される遷移放射光(OTR)やX線などを、シンチレーションファイバー(Sci-Fi)を使って検出
- Sci-Fiからの光信号を光ファイバーでPMTモジュールまで伝送
- オシロでPMT波形を測定
- 測定時の設定パルス幅：60ns – 5ms



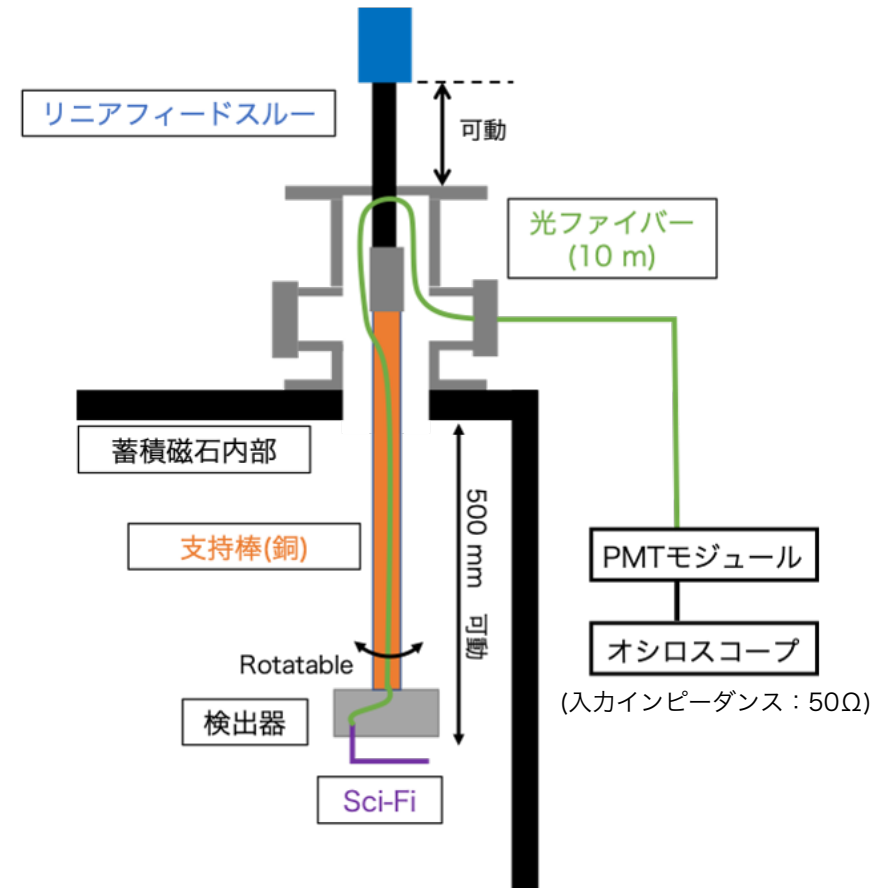
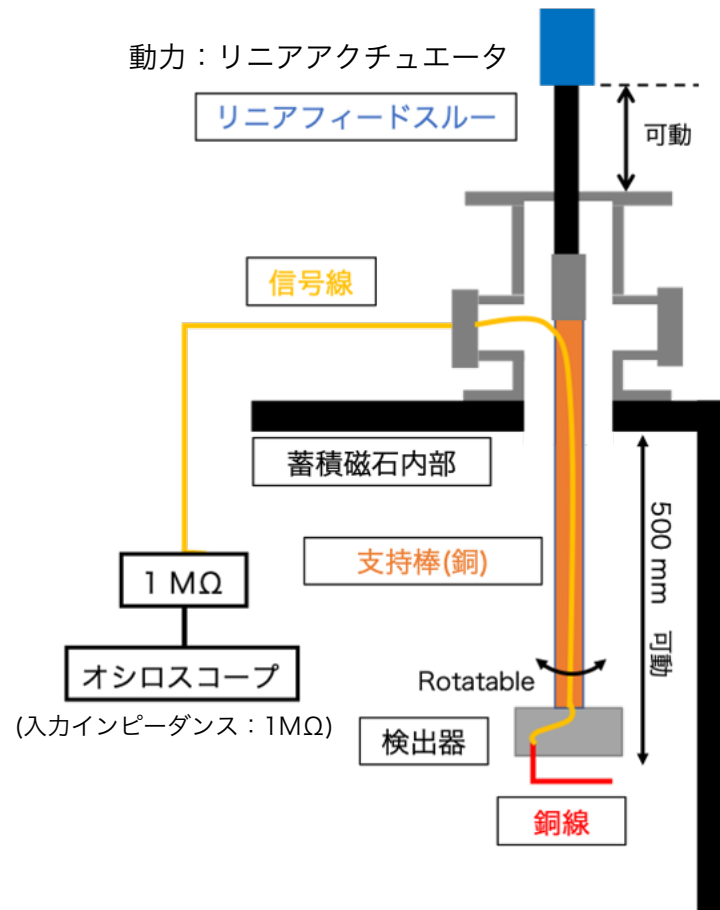
検出器の構造

- 検出器ケース中で、銅線/Sci-Fiと信号線/光ファイバーを接続
- Sci-Fi表面には電子ビームによるチャージアップ防止のため、導電性塗料を塗布しケースと導通させた



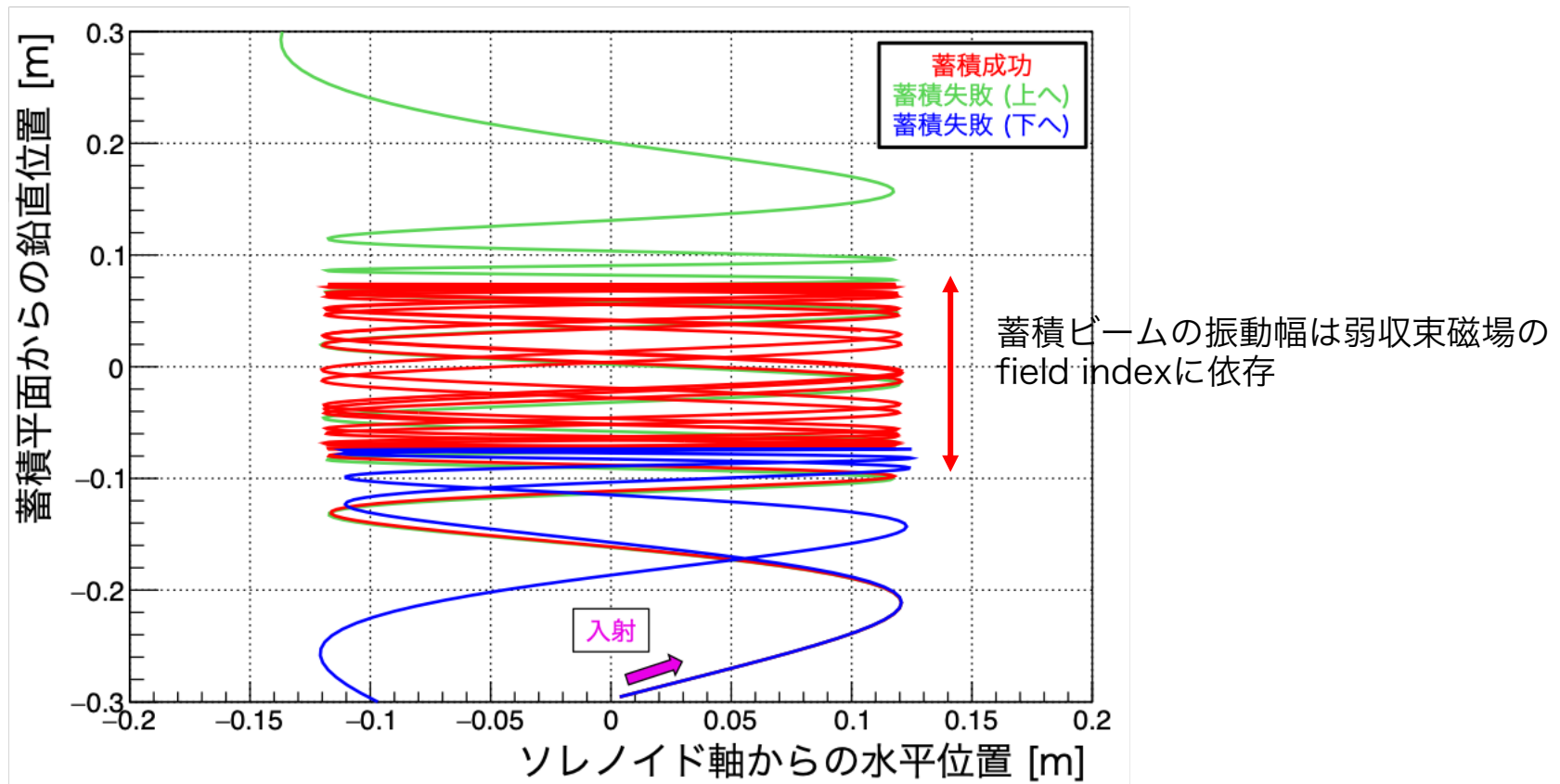
検出器の構造(2/2)

- 銅線からの信号線は、支持棒中を通してオシロスコープへ
- Sci-Fiからの光信号は、Sci-Fiに接続した光ファイバーを伝送してPMTモジュールへ



キック後のビーム軌道

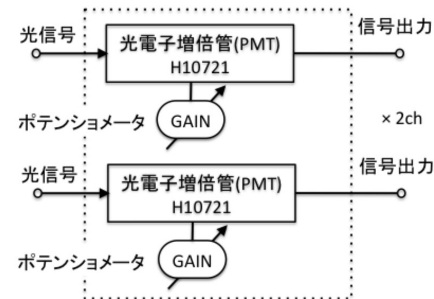
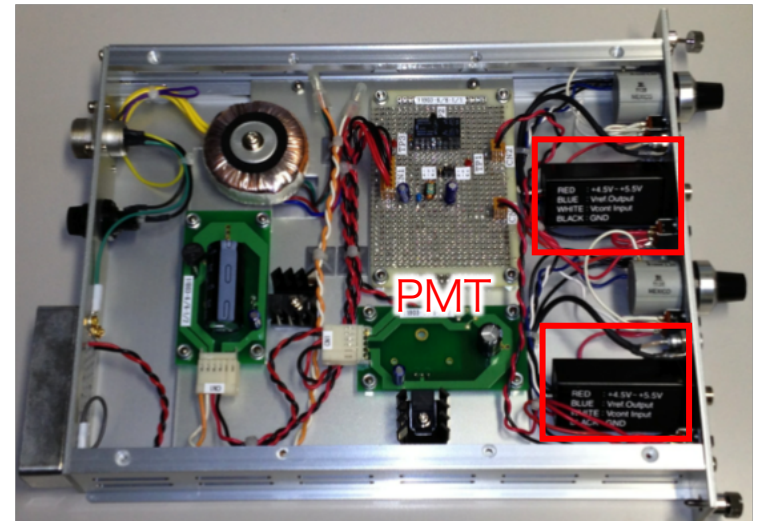
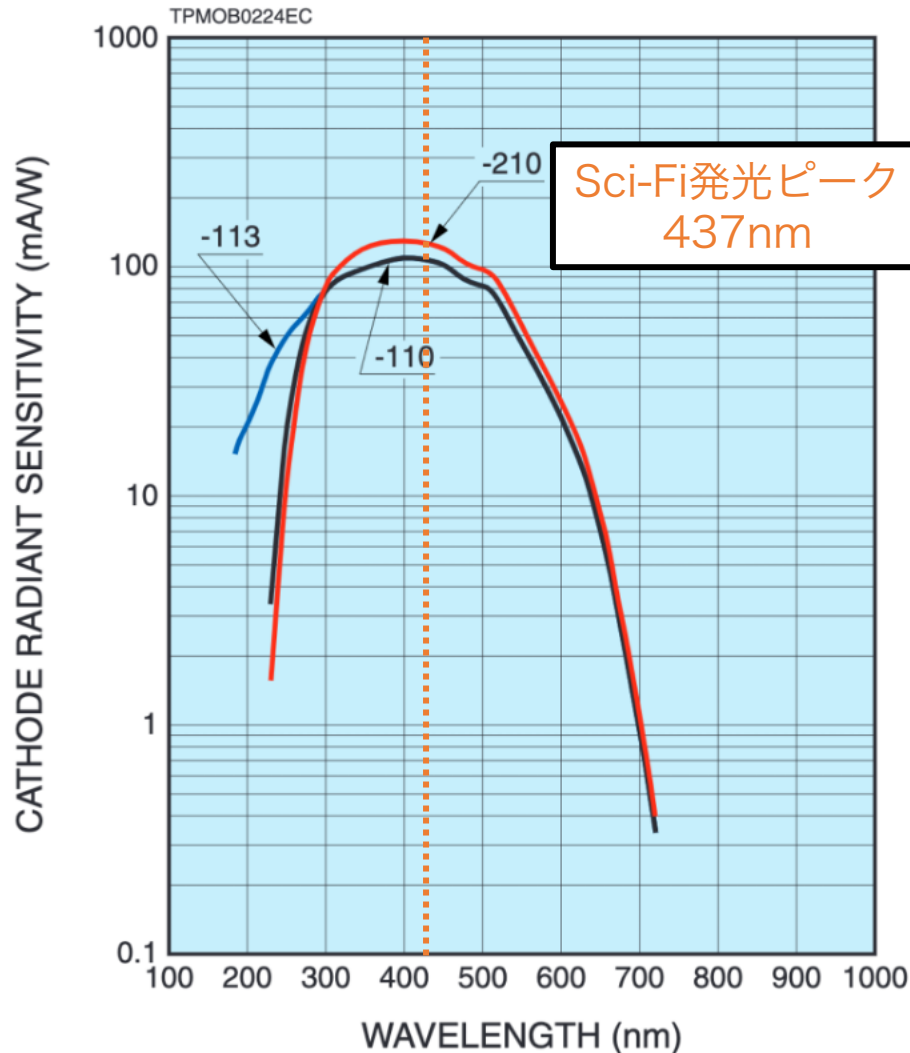
- 3次元ビーム軌道(キック後)の鉛直vs水平面への射影



PMTモジュール

- 矢野喜治さん(KEK)より、光ファイバーを使ったビームロスモニターで使用しているNIMモジュールを借用

内蔵PMT：浜松ホトニクス製H10721-110



矢野喜治(総研大博士論文, 2013)

ピーク位置から算出したピッチ角

- ピッチ角：ビーム進行方向と水平面のなす角
- サイクロトロン半径：12cm
- ピーク位置

ピーク位置 [mm]				
測定点	入射直後	1st turn	2nd turn	3rd turn
DC	34.8+/-0.4	268.5+/-0.5	337.6+/-0.6	413.2+/-0.6
パルス	30.5+/-0.5	264.6+/-0.5	331.1+/-0.4	403.7+/-0.5

- 各測定点間の平均ピッチ角

平均ピッチ角(mrad)			
	0 -> 1st turn	1st turn -> 2nd turn	2nd turn -> 3rd turn
DC	310	92	100
パルス	310	88	96

- DC/パルスビーム軌道間の鉛直位置のずれは許容範囲内
 - 入射直前の偏向磁石(0.2mradの精度で調整可)で補正できる

ピーク位置のずれに対する考察

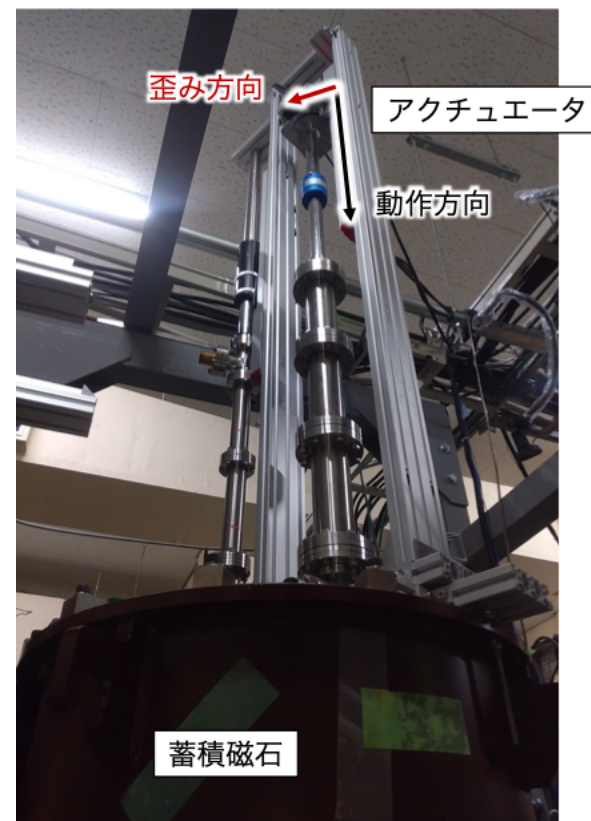
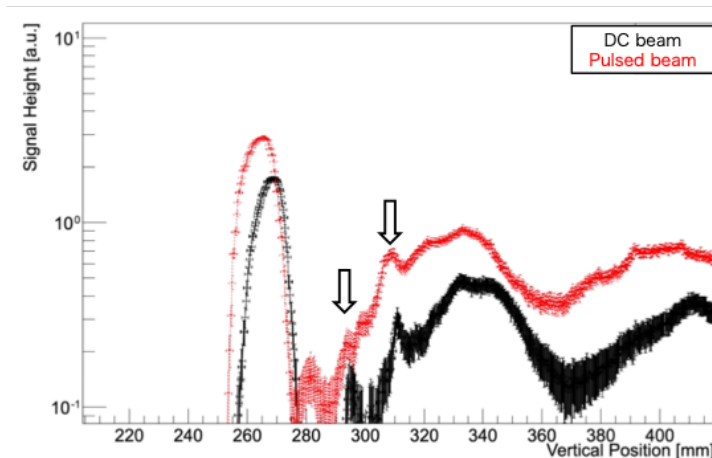
● 考えられる原因その1：アクチュエータ動作の再現性

- 測定データに不連続な領域が存在
- 検出器の動力：アクチュエータを保持するためのフレームは蓄積磁石の上部に設置
- 蓄積磁石上部の蓋に歪みがあることが判明
- 歪みによって予期せぬ方向に力がかかり、アクチュエータの可動を妨げている可能性がある

● 問題切り分けのために

- 各測定点でアクチュエータを止めて測定
- アクチュエータの動作確認

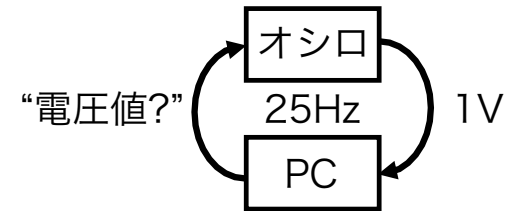
● 歪みを補正する治具も製作中



ピーク位置のずれに対する考察

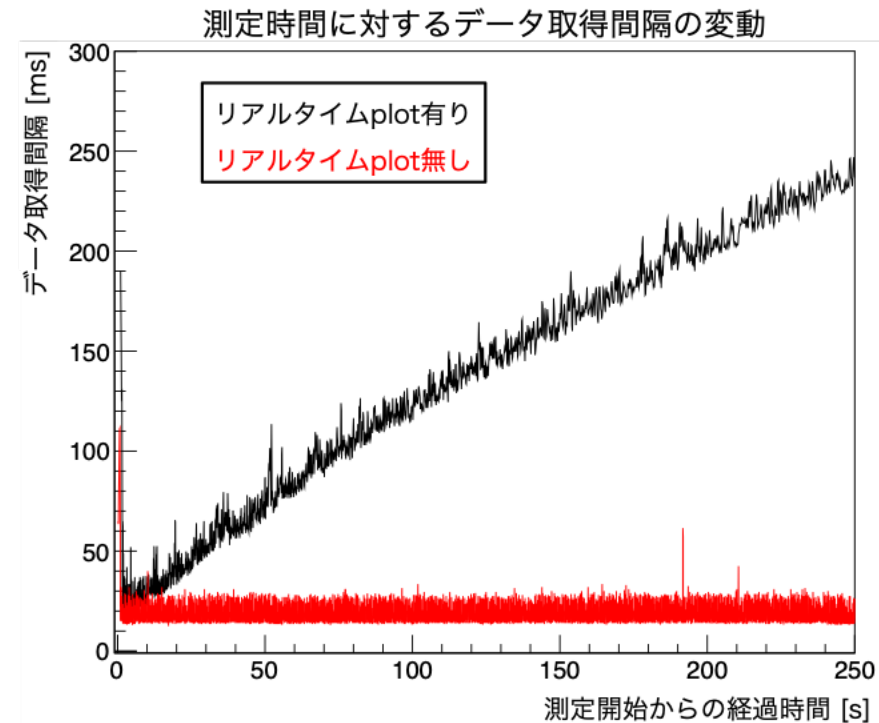
● 考えられる原因その2：サンプリングレートの時間依存性

- オシロスコープの値をPCによって読み出しデータ取得
- 先行研究により開発されたソフトウェアを使用
- 測定開始からの時間に比例して、サンプリングレートが落ちることが判明



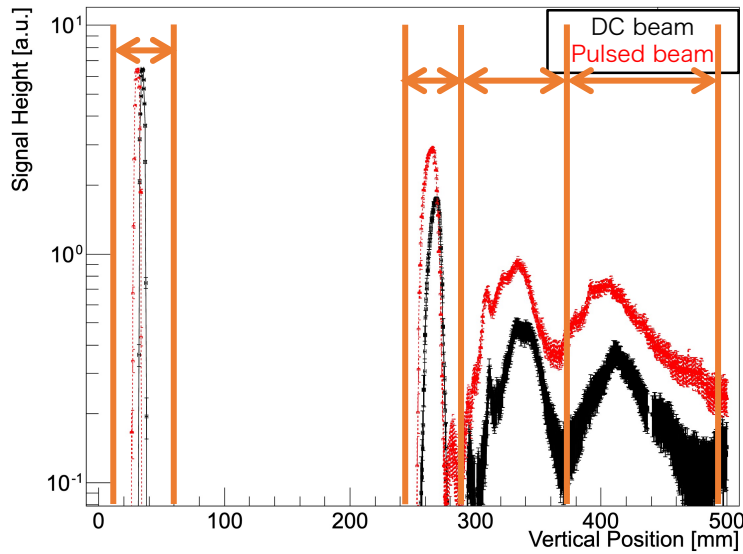
● 原因

- ソフトウェアの「リアルタイムplot機能」の処理速度
- PCの処理速度が低下することで、真に検出器の位置での値を読み出していない可能性
- 「リアルタイムplot」無しでの測定を予定



各ピークの積分値についての考察

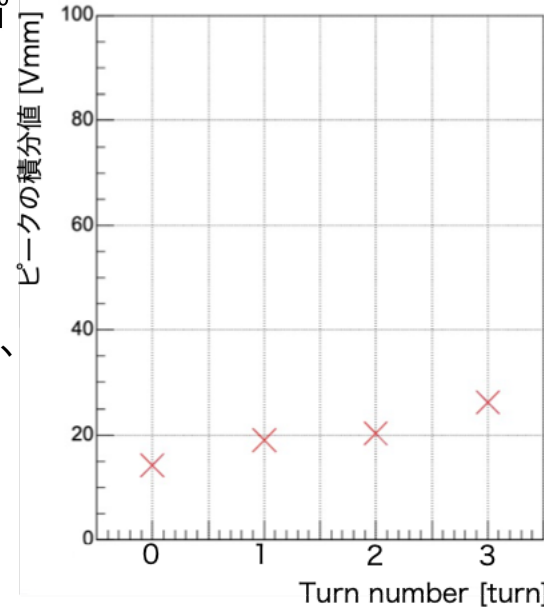
Wire Scanner Measurement



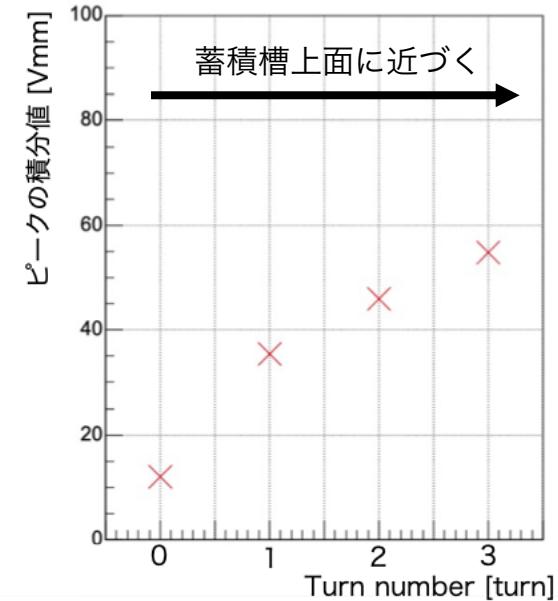
各ピークごとに積分

- 積分値：検出したビーム電荷量に相当
- らせん軌道の途中でビームは失われないので、積分値は一定となるはずだが、一定ではない

DC beam peak Integral



Pulse beam peak Integral



- 特にパルスビーム測定
 - 蓄積槽上面に近づくにつれ値が増加
 - Sci-Fiが、蓄積槽上面に衝突したパルスビームによるOTR、X線を見てる？
- 複数回測定し再現性の確認を予定

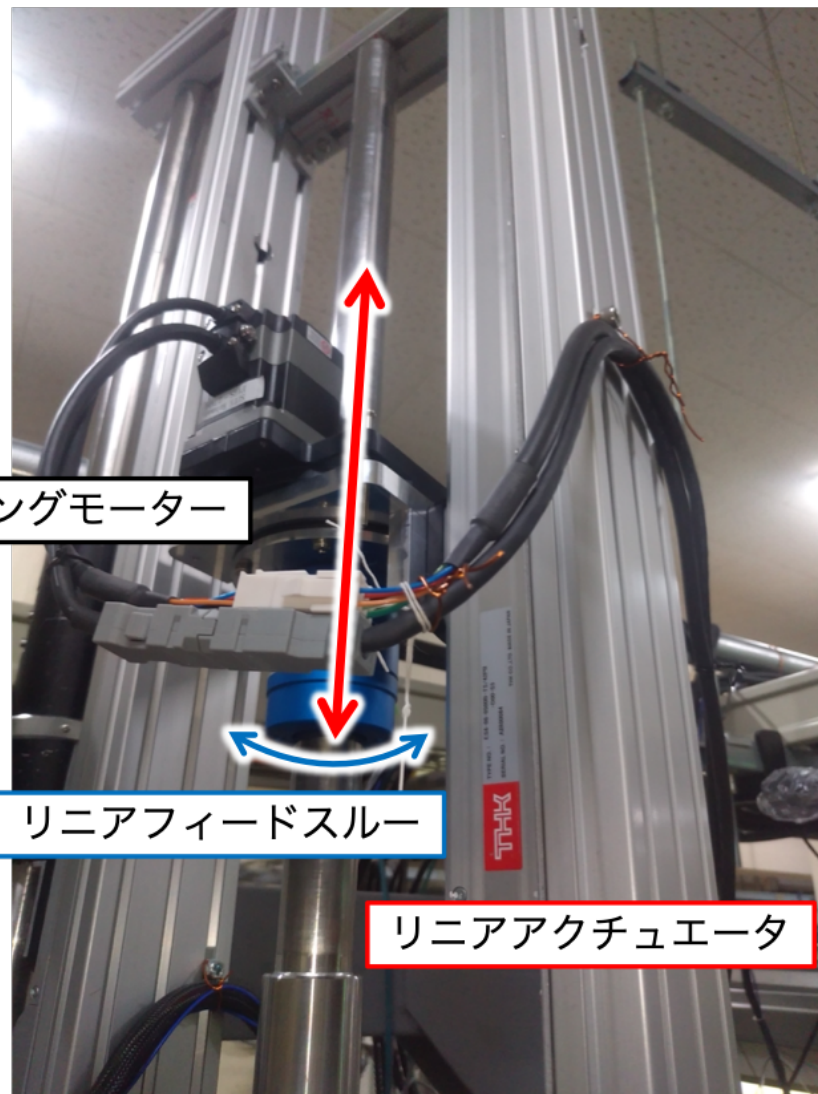
検出器の動力

- 鉛直方向：リニアアクチュエータ
- 回転方向：ステッピングモーター

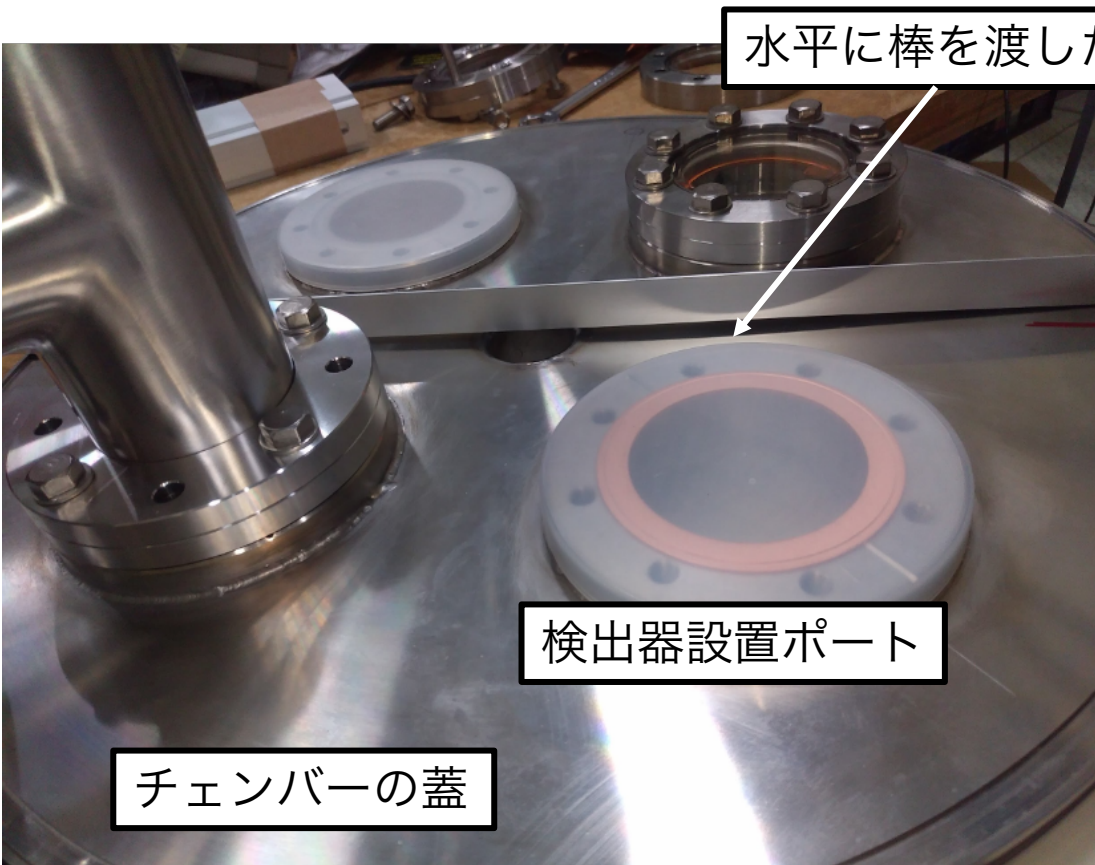
ステッピングモーター

リニアフィードスルー

リニアアクチュエータ



蓄積チェンバー蓋の歪み

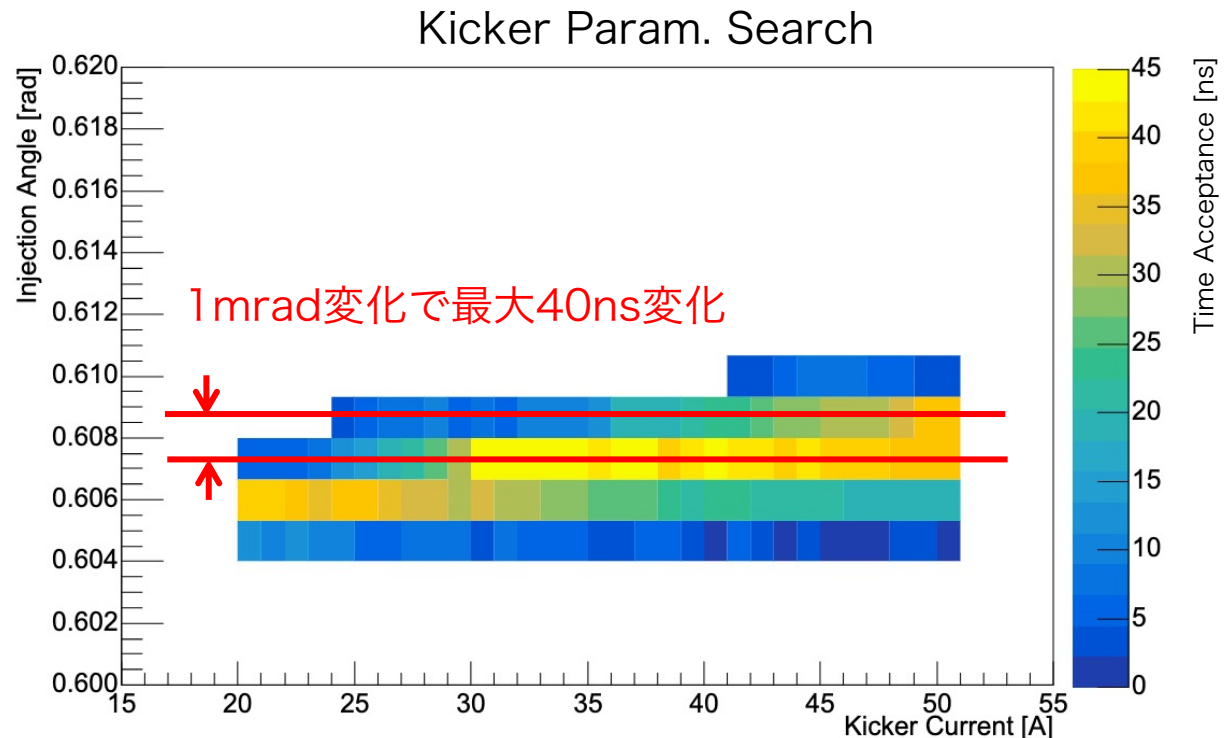


- 中心部が凹むように歪んでいる
- 測定の結果(KEK高富さん)、中心方向に16mradの傾き(ポートも)
- 傾きを補正するフランジを製作中

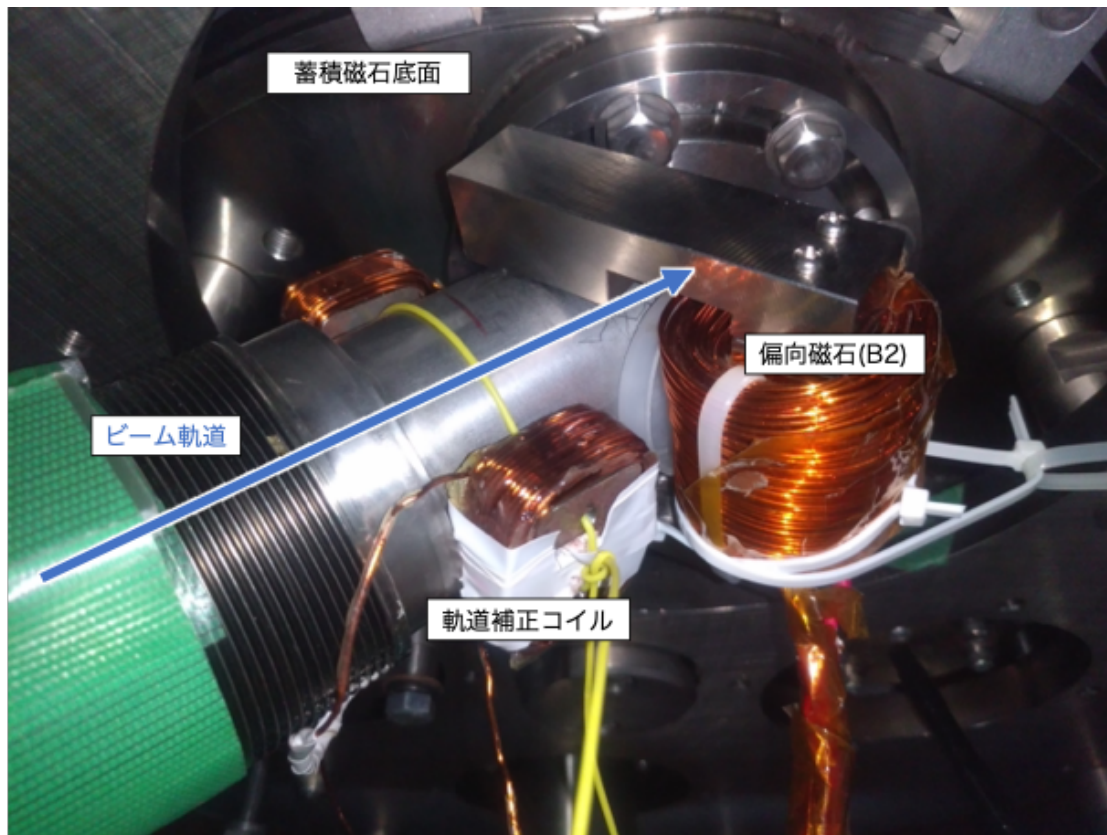
入射角の調整精度

- 蓄積可能なビームのパルス幅に対してのアクセプタンスを計算
- ビーム粒子は設計軌道上にいと仮定
- パラメータは、入射角とキッカーコイルに印加する電流

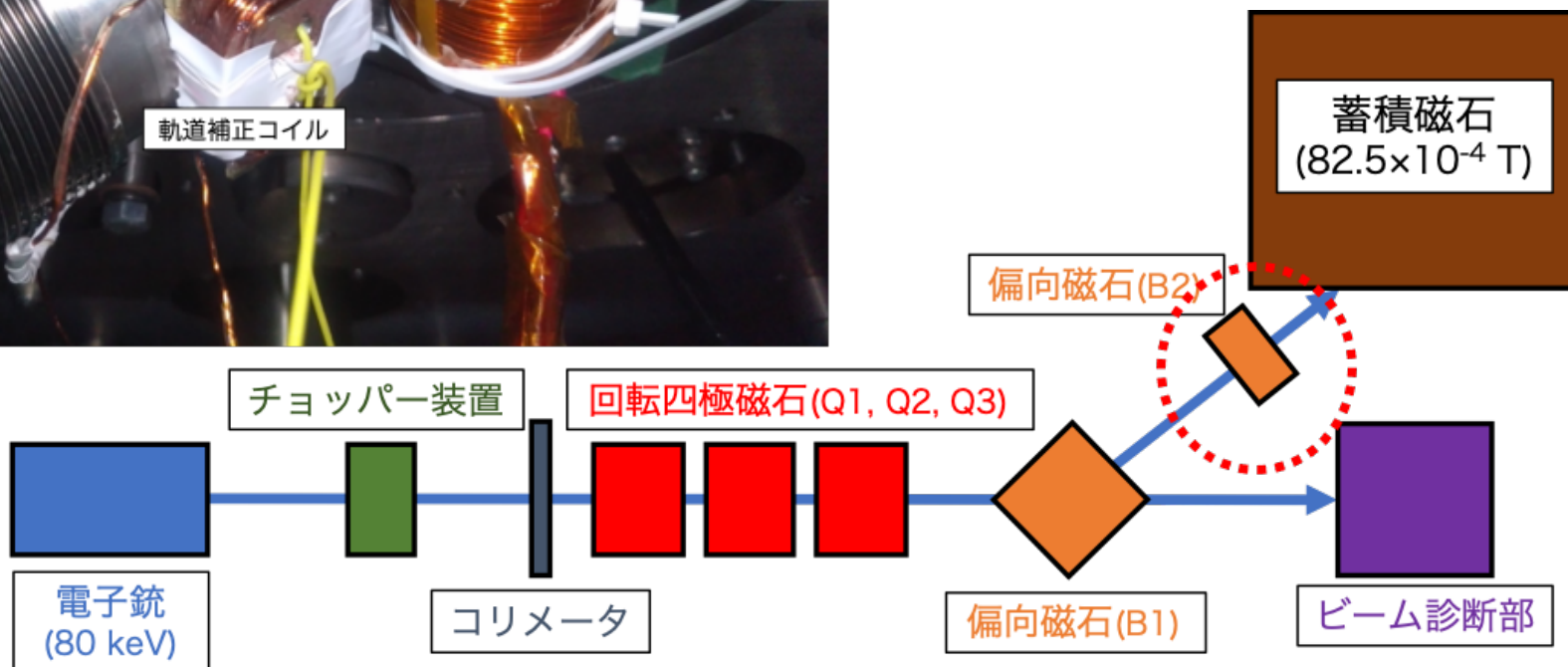
- 入射角が1 mrad変化するとアクセプタンスが10nsオーダーで変化する
- 入射角の制御は1 mrad以下で行う必要がある



偏向磁石(B2)



- 入射角調整のため、蓄積磁石への入射口直前に設置
- 0.2mradの精度で入射角調整可能



各種パラメータの調整

- 調整可能なパラメータ
 - 弱収束磁場の傾斜度(n値)
 - ビーム入射角
 - キッカーに印加する電流値のピーク
 - キッカー作動タイミング
- ビーム蓄積するにはどのような“思想”で調節するか？
 - 鉛直方向の運動量を0に近づけるように調整

