

低エミッタンスミュオンビーム測定のための チェレンコフ放射型プロフィールモニターの開発

Development of a Cherenkov Radiation-Based Profile Monitor
for Low-Emittance Muon Beam Measurements

中川鈴彩*,¹, 宮原房史^{1,2}, 大谷将士^{1,2}, 橋本義徳²

¹総合研究大学院大学, ²高エネルギー加速器研究機構

目次

概要

- ・ ミュオン線形加速器
- ・ 粒子選別
- ・ ビームプロファイルモニターの設計

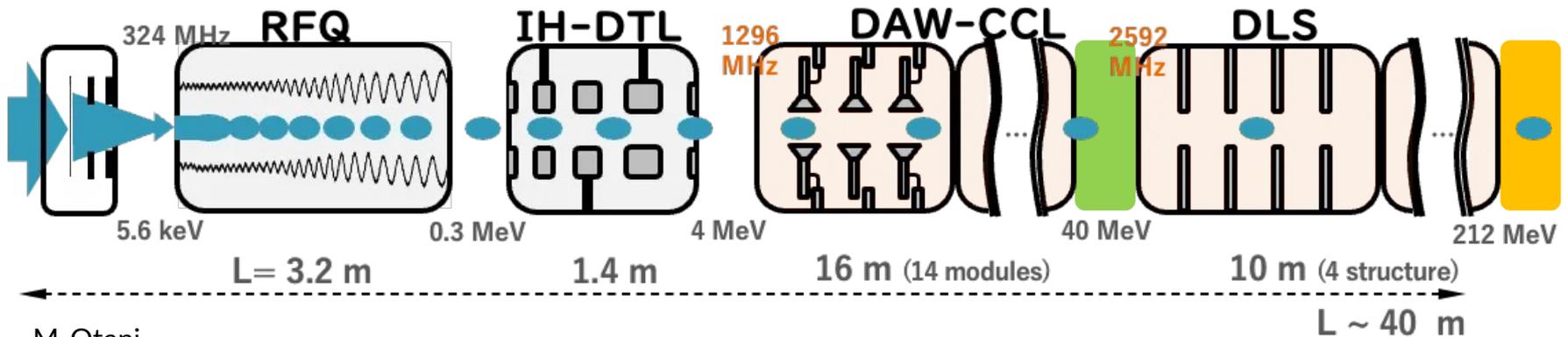
40 MeV部

光学シミュレーションによる性能評価

212 MeV部

ビーム試験に向けた検討

まとめと今後の課題



ミュオン線形加速器

概要

J-PARC muon g-2/EDM実験に向けて開発されている加速器

エネルギー25 meVまで冷却したミュオンを90 keVまで加速することに成功した^[1]

ビームモニターに要求される条件

- 非常に低い電荷量 $\sim 10^{-2}$ fCでの測定ができること
1パルス当たりの40個以下のミュオン
- **ミュオン**と**暗電流**を**分離**できること

既存のビームモニターでは
測定が困難

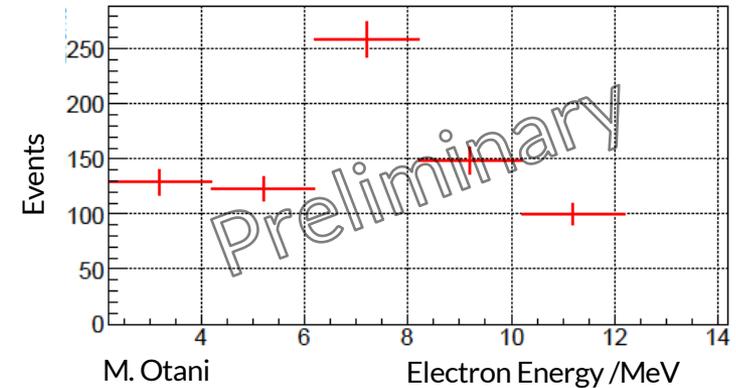


チェレンコフ放射を利用したビームモニターを開発

粒子選別

暗電流

- 加速管内面で電界放出により発生
- 運動エネルギー: $< \sim 14$ MeV
- 電氣的な測定ではミュオンと電子の信号を分離できない



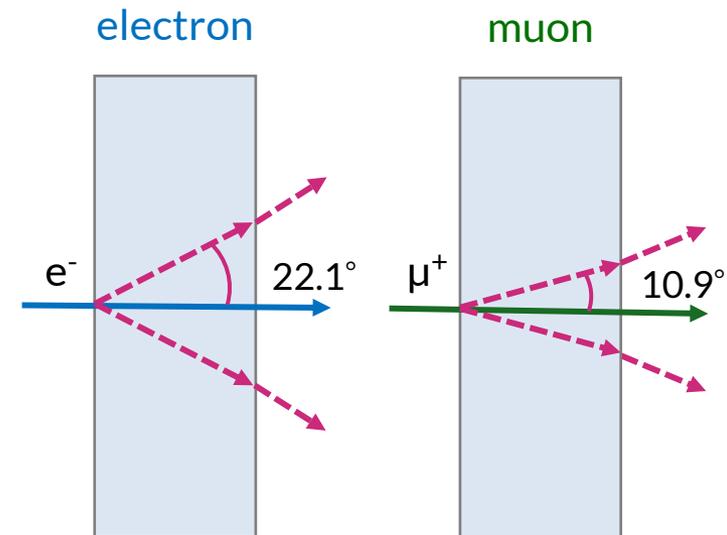
DLS下流の暗電流のエネルギー分布

チェレンコフ光

- チェレンコフ光の放出角($n=1.08$)
 - ミュオン(212 MeV): 10.9 [deg]
 - 電子(14 MeV): 22.1 [deg]

電子由来のチェレンコフ光は放射角が大きい

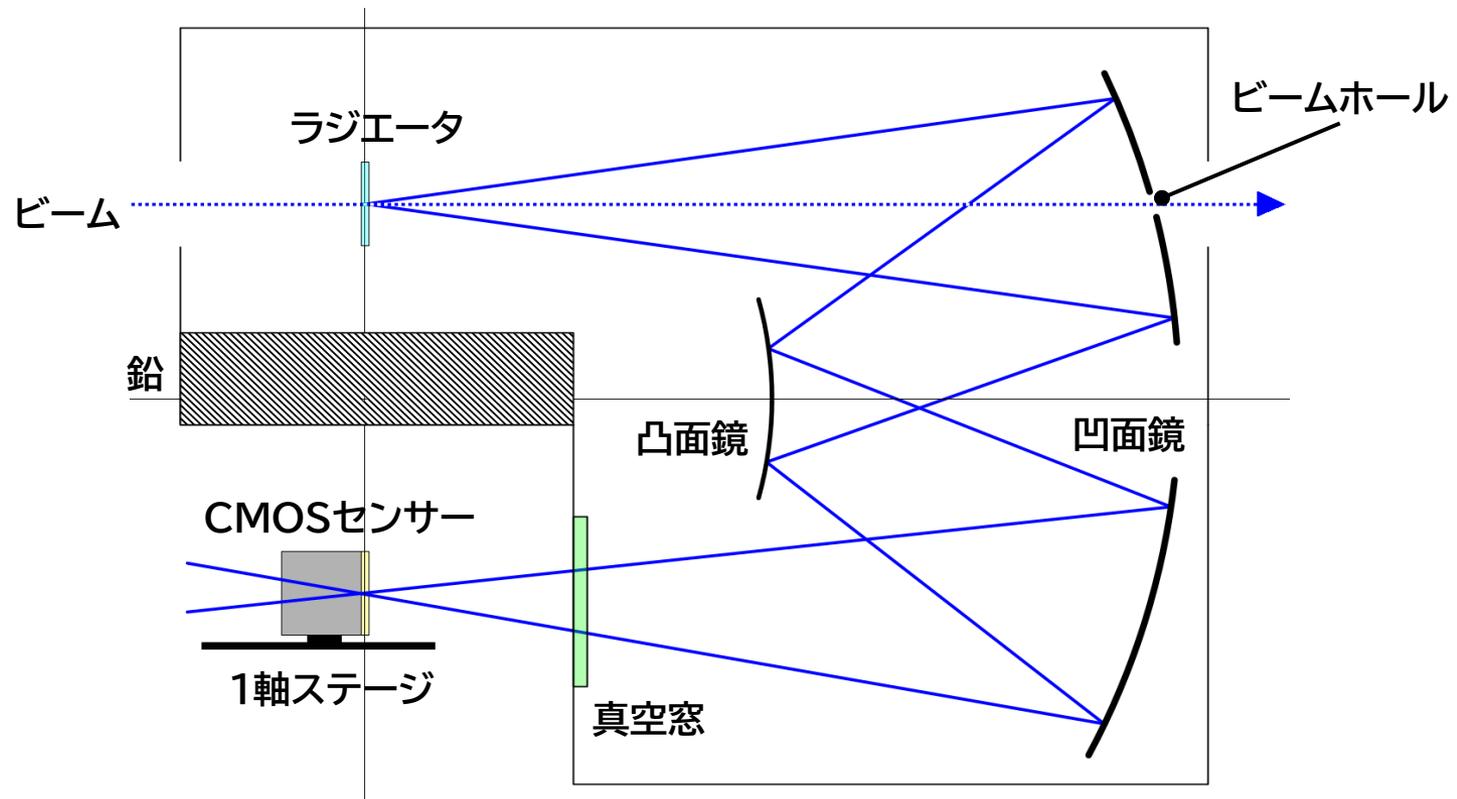
➡ ミュオン由来のみ集光するように光学系を工夫



ビームプロファイルモニターの設計

40MeV部, 212MeV部共通

- 開口角が大きいいため光学レンズを組み合わせた集光は困難
→ 1:1のオフナーリレー光学系
- ラジエータに入射したミュオンから放出されたチェレンコフ光を集光
- ミュオンはビームホールを通過



光学系の分解能評価

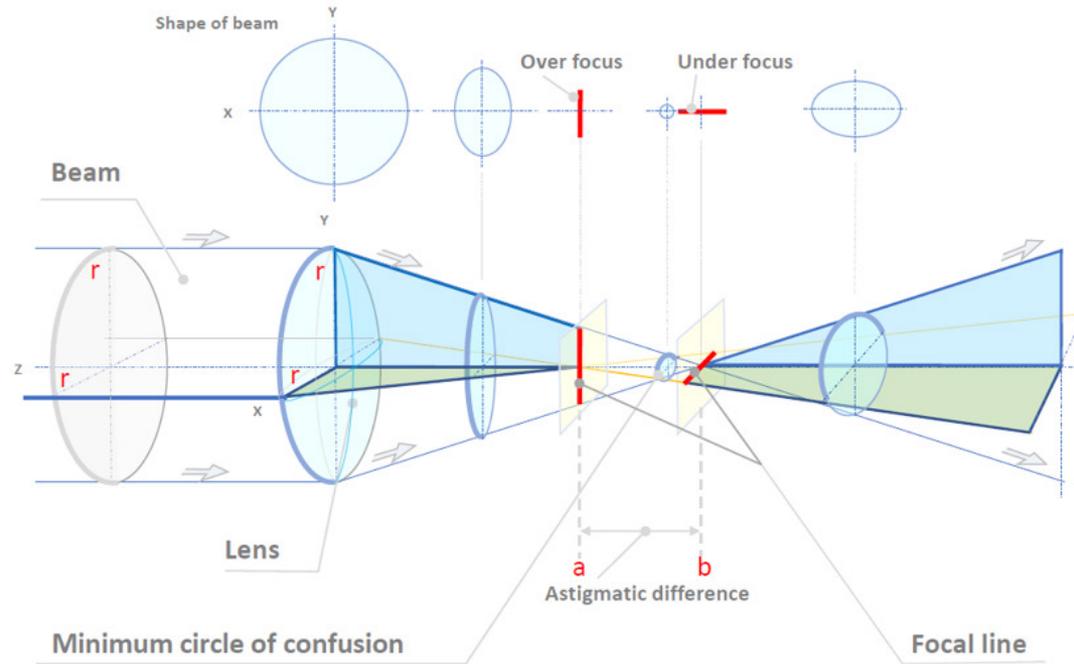
オフナーリレー光学系の収差による分解能の悪化を評価

- 色収差: 鏡のみで構成される光学系のため影響なし
- 非点収差

光軸外の1点を光源とする光が、レンズや鏡に対して同心円方向と直径方向で焦点距離がずれる収差



非点収差による広がりが最小となる検出器面の位置を調査



Astigmatism

レンズの非点収差

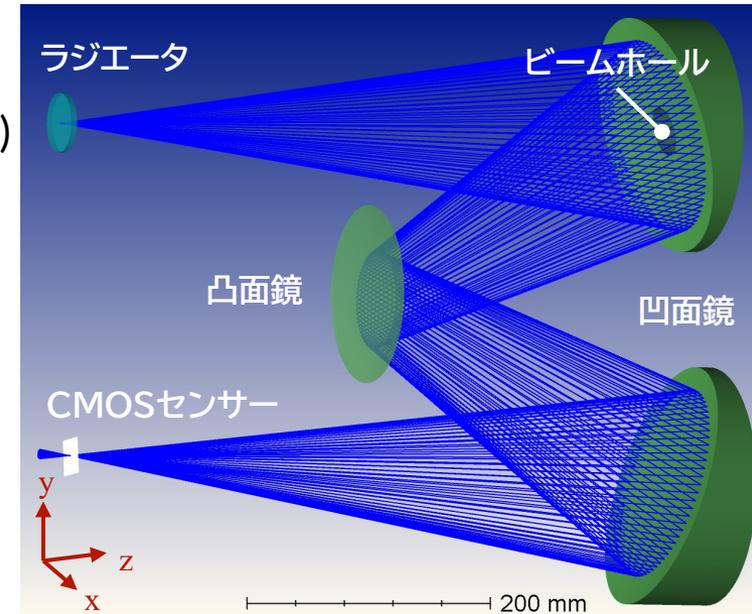
レイトレーシングを用いた評価(Zemax)

40 MeV部の設計

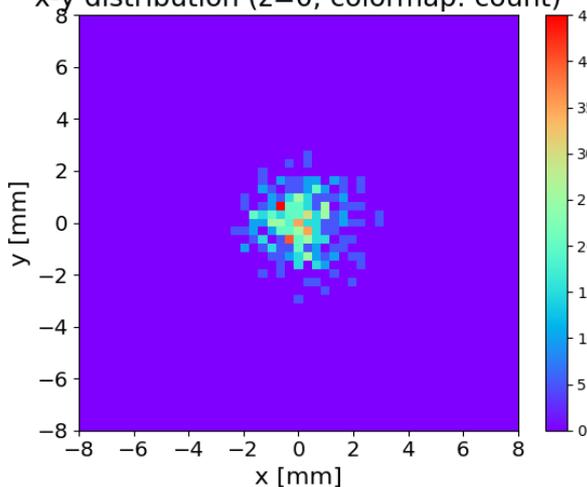
- ラジエータ: 厚み 5 mm, 屈折率 1.46 (2.8 photons/ μ)
- 球面半径: 凹面鏡 560 mm, 凸面鏡 280 mm

チェレンコフ放射

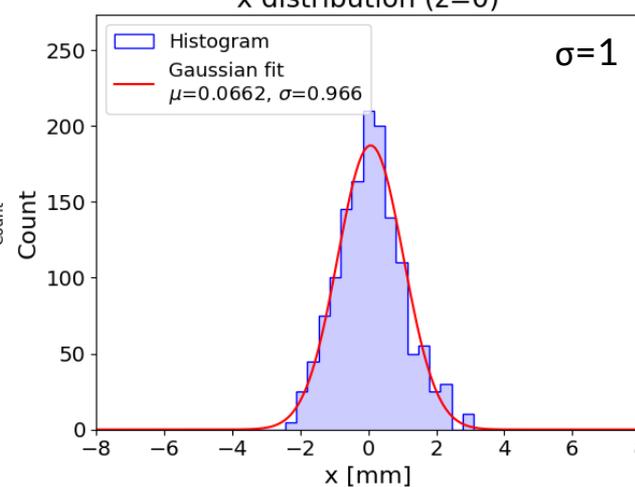
- ラジエータ内0.5 mmおきに発光点を分布
- ひとつの発光点から円錐状に360本光線を出す
- ミュオンビーム: $n=1000$



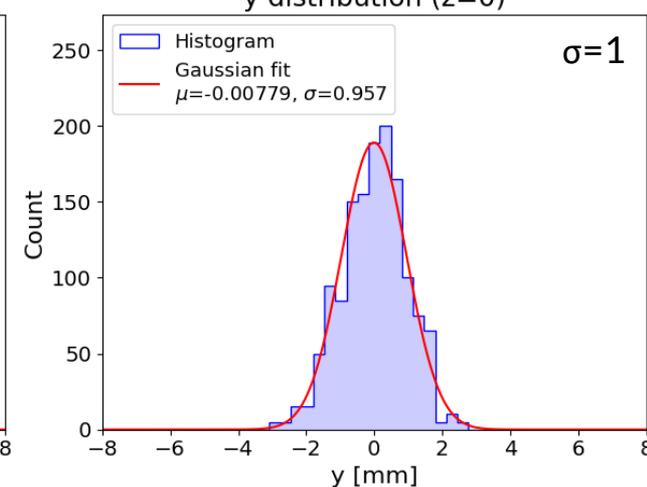
x-y distribution (z=0, colormap: count)



x distribution (z=0)



y distribution (z=0)

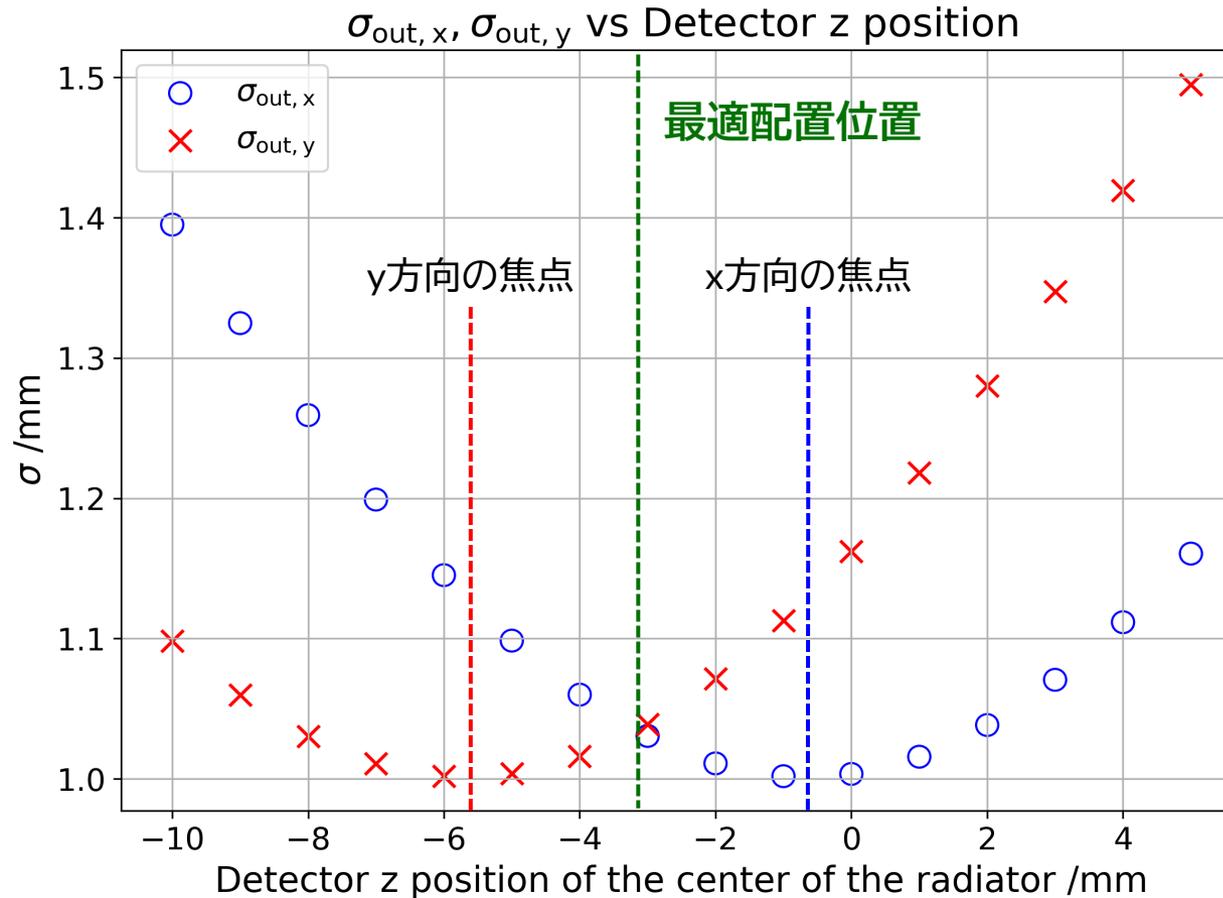


ミュオンビーム分布

非点収差による広がりが最小となる焦点

CMOSセンサーの位置に対する応答

- x, y方向の焦点を求め平均を取り、-3.2 mmを採用



センサー位置とビームサイズ

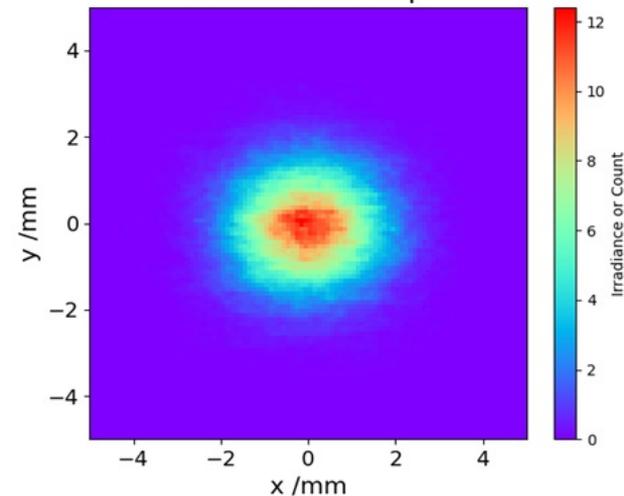
非点収差による広がりが最小となる焦点

CMOSセンサーの位置に対する応答

- 検出面を移動させてシミュレーション
→非点収差による広がりを確認

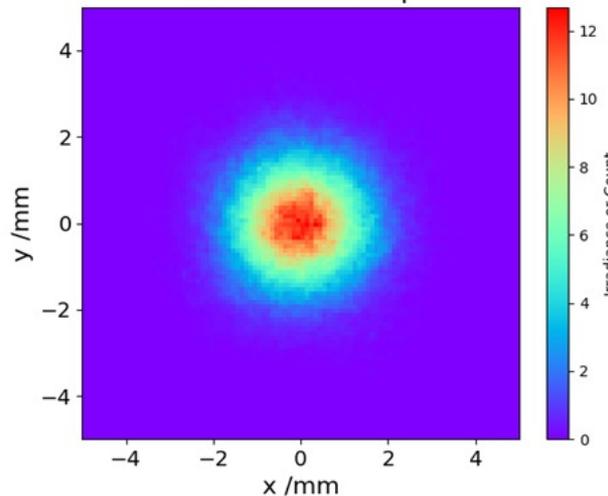
y方向の焦点

Detector 2D map



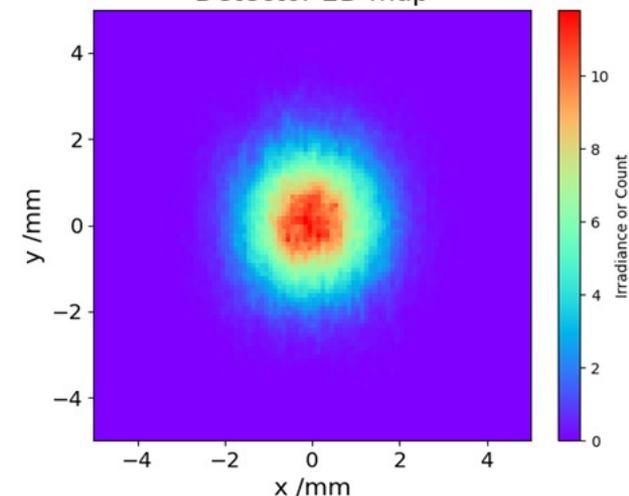
最適配置位置

Detector 2D map



x方向の焦点

Detector 2D map



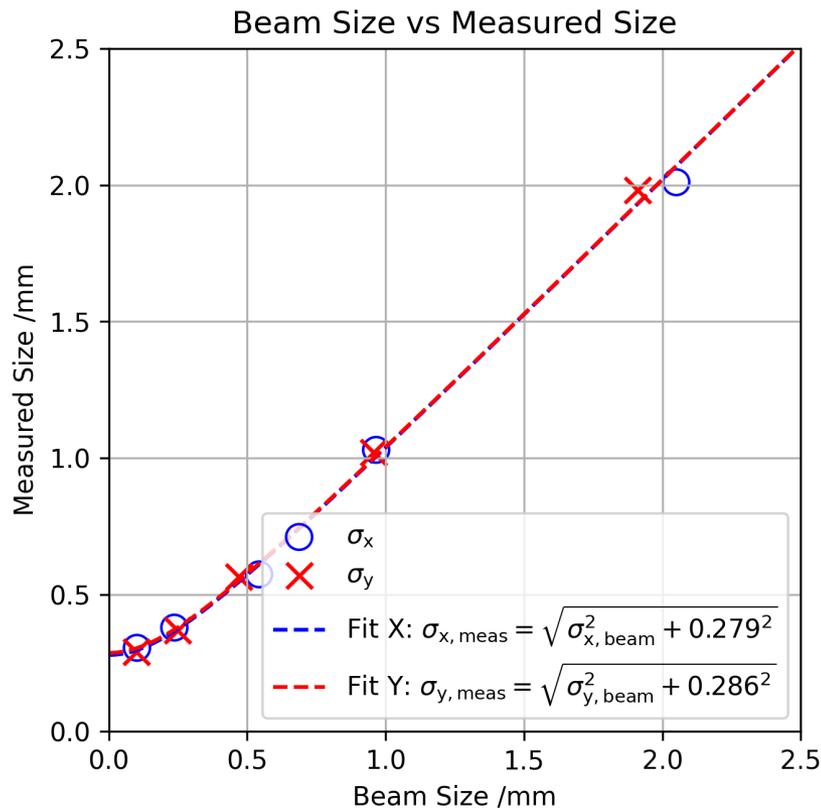
センサー位置とビーム形状

非点収差による広がりが最小となる焦点

CMOSセンサーの位置に対する応答

- ビームサイズと最適配置位置の検出面でのサイズの相関をプロット

$$\sigma_{meas} = \sqrt{\sigma_{beam}^2 + \sigma_{resolution}^2}$$



$$\sigma_{x,res} = 0.28 \text{ mm}$$

$$\sigma_{y,res} = 0.29 \text{ mm}$$



想定されるミュオンビーム $\sigma=1.0 \text{ mm}$ を
十分な精度で測定可能

今後、ミラーの製作精度や
アライメント誤差等の評価を行う

ビームサイズと測定した分布のサイズ

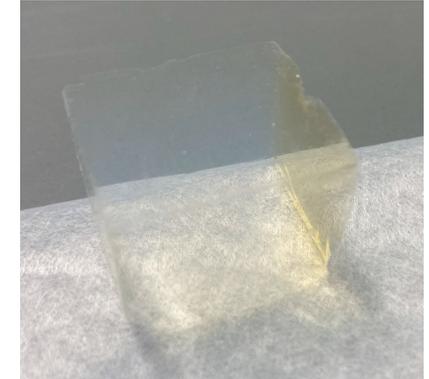
エアロゲルの放射線耐性 @東北大RARIS

光学特性

透過率の変化 → 特定の位置で透過率が低下した場合、その位置の光の強度が弱くなり、分布を正しく再現できない

屈折率の変化 → 光学系の焦点距離が変化し、分布が広がる

電子ビームにより着色したシリカエアロゲル(右側が上流部)



参考資料

• カラーセンター

KEK電子陽電子入射器の偏向部に設置したシリカエアロゲル

→放射線によって着色した

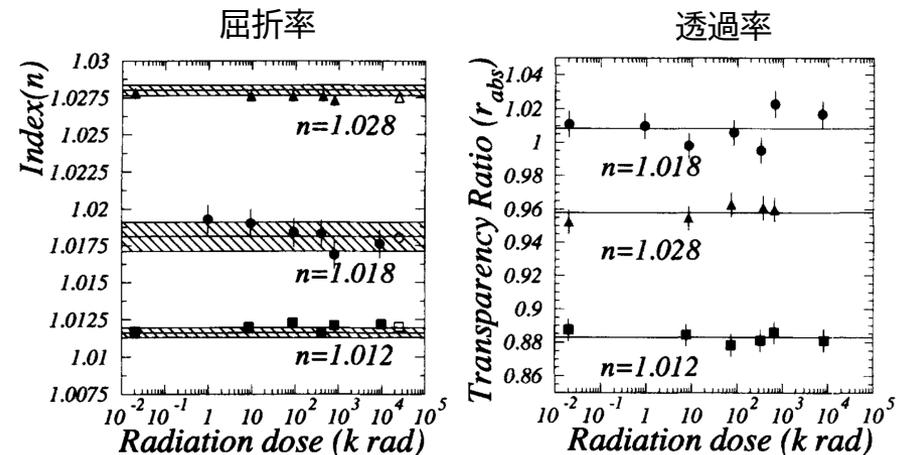
• ^{60}Co を用いたシリカエアロゲルへの γ 線照射した文献^[3]

→光学特性に影響を与えなかった

• 電子ビームを直接照射した報告はない

[3] S.K. Sahu *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 382 (1996) 441–446.

屈折率の異なる3つのシリカエアロゲルに γ 線を9.8 Mradまで照射したときの屈折率・透過率変化



測定手法

透過率

照射時間を変えた複数の試料に関してスペクトメータを用いて照射前後の波長ごとの透過率を測定して確認

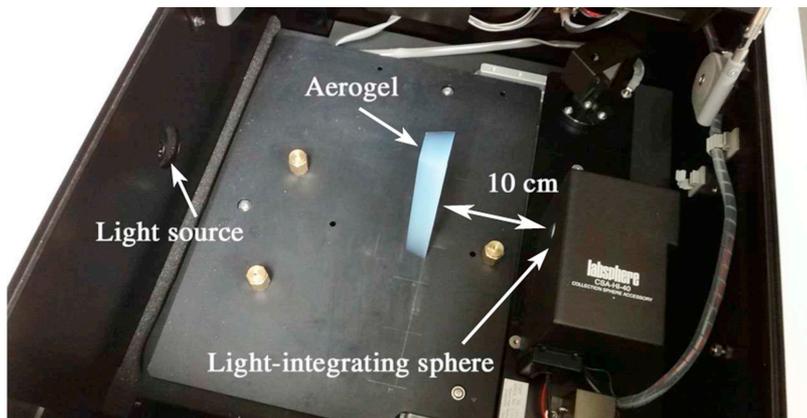
屈折率

最小偏角法

$$n = \frac{\sin \frac{\delta_m + \alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

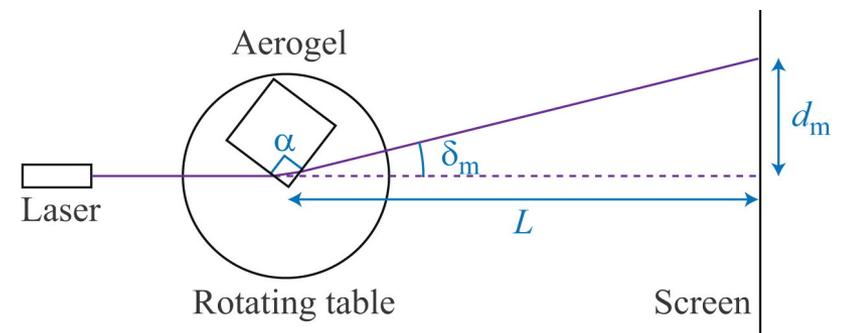
α : 光の入射面と出射面のなす角
 δ_m : 入射角と出射角のなす角度
 入射角と出射角が等しい場合に最小

透過率



[4] M. Tabata, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, 795 (2015) 206-212.

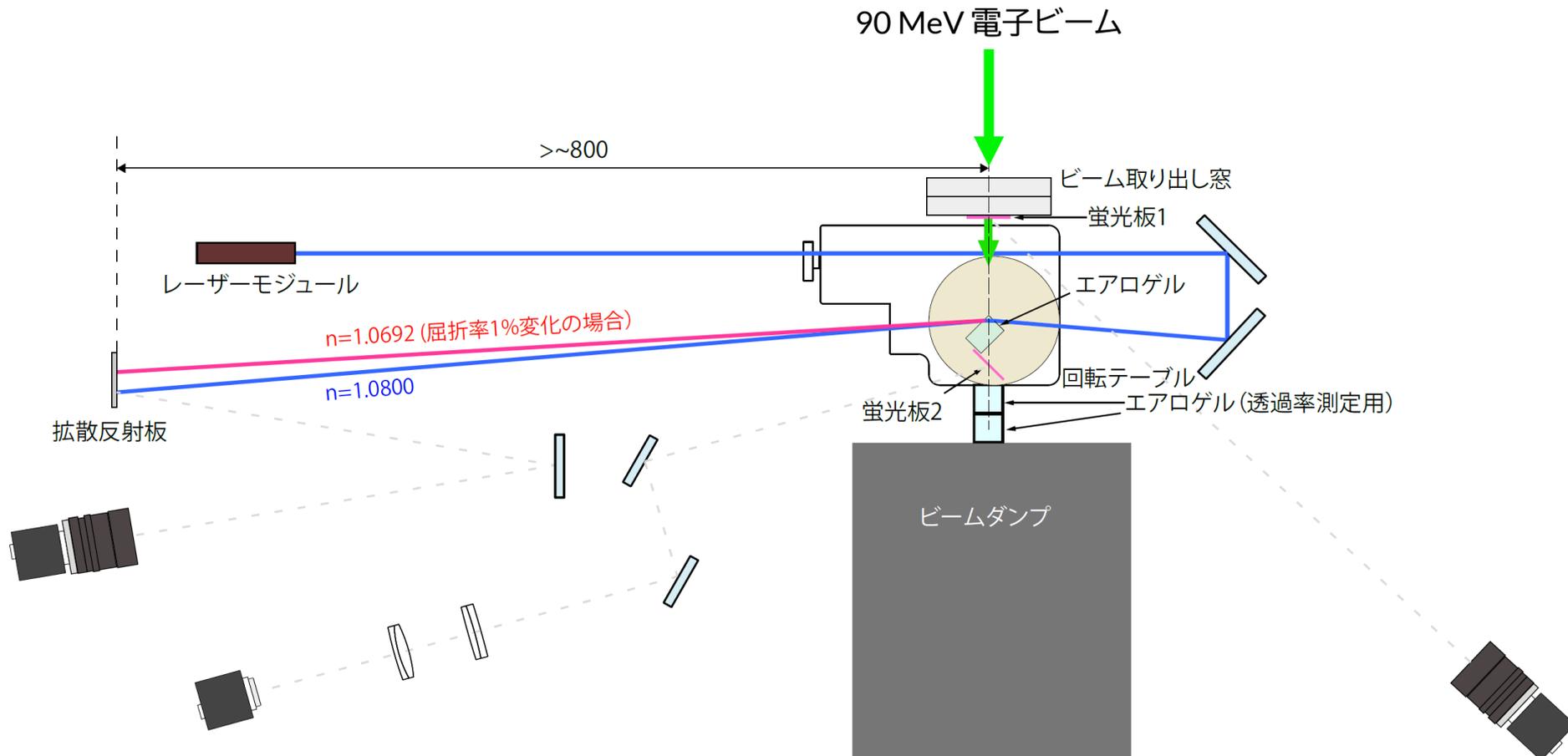
屈折率



[5] M. Tabata, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, 668 (2012) 64.

セットアップ

- 本年度後期に試験を実施予定(実験は採択済)



まとめと今後の課題

ビームプロファイルモニター

- ミュオンと暗電流を分離するためにチェレンコフ放射を利用し、ミュオン由来の光のみ集光
- レイトレーシングによる分解能評価
 - ➔ 想定されるミュオンビーム $\sigma=1.0$ mmを十分な精度で測定可能

ビーム試験計画

- エアロゲルの放射線耐性試験を予定
- 電子ビームを照射し、屈折率・透過率変化を測定

今後の課題

- 球面鏡の設置角度、位置の誤差の影響評価と要求精度の決定
- ビームの入射角度の影響評価
- 試作機の製作と光学系の試験

謝辞

光学系のアイデア、設計に関してKEK三橋氏に多くの情報、助言をいただきました。
本研究は東レ科学技術研究助成、住友電工グループ社会貢献基金2024年度学術・研究助成、カシオ科学振興財団2024年度研究助成、JSPS科研費JP25H00401の助成を受けたものです。