

ミュオン選別可能な高感度 ビーム位置モニター開発

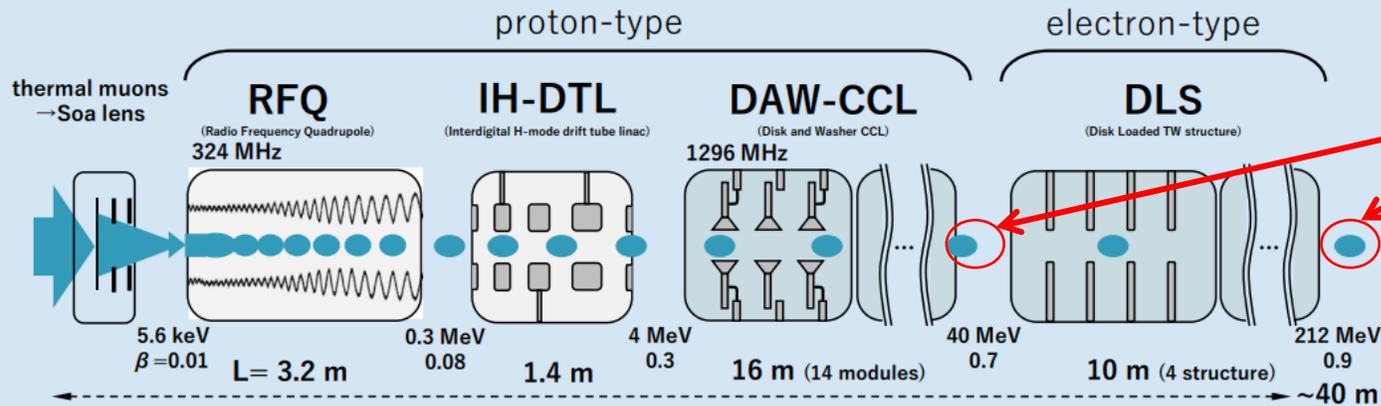
宮原 房史[#]、大谷 将士、三部 勉 (KEK)

ミュオン加速器と位置モニター ($\beta > 0.7$)

Muon Linac Overview

M. Otani

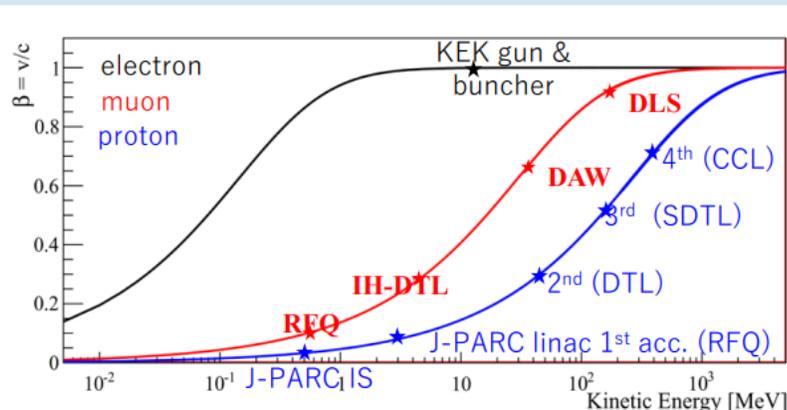
- Based on e- or p-linac technologies to realize compactness and required beam quality.



Disk Loaded TW Structure (DLS) の入口、出口でのビーム位置モニターの開発

要求される条件：

- 非常に低いビーム強度 (1個/パルス～)
- 暗電流とミュオンの区別



Energy [MeV]	212
Intensity [/s]	10^6
Repetition [Hz]	25
Pulse length [nsec]	10
normalized $\epsilon_{t, total}$ [π mm mrad]	1.5
Δp [%]	0.1

測定条件と一般的なビーム診断装置

- 非常に低いビーム強度

Muon Linac : 数個 ~ 10^6 個 / パルス



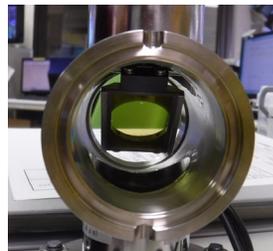
一般的な線形加速器 : ~10 pC ~ 10 nC / パルス
~ 10^8 ~ 10^{11} 個/パルス



Stripline BPM



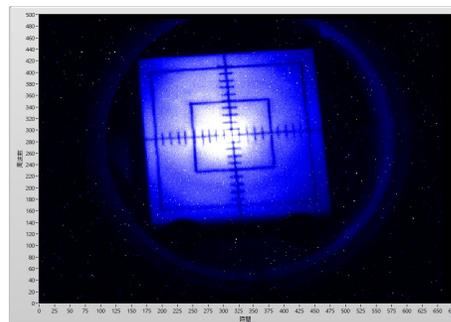
Cavity BPM



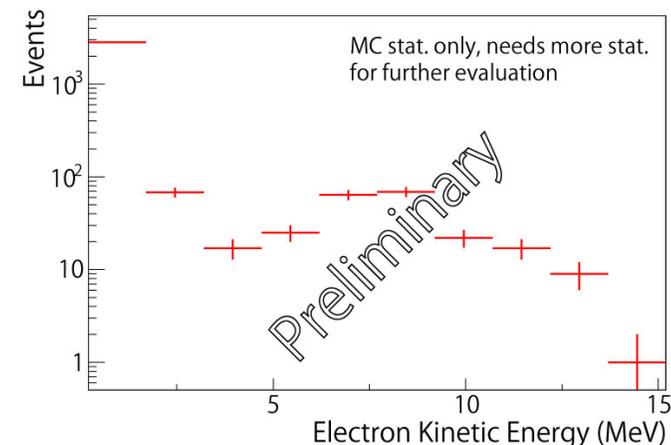
Screen Monitor

- 信号強度が8桁程度低く、ノイズに埋もれてしまう
- 10^6 のダイナミックレンジが必要

- 暗電流とミュオンの区別



S-band加速管出口のスクリーンが案電流で光る様子



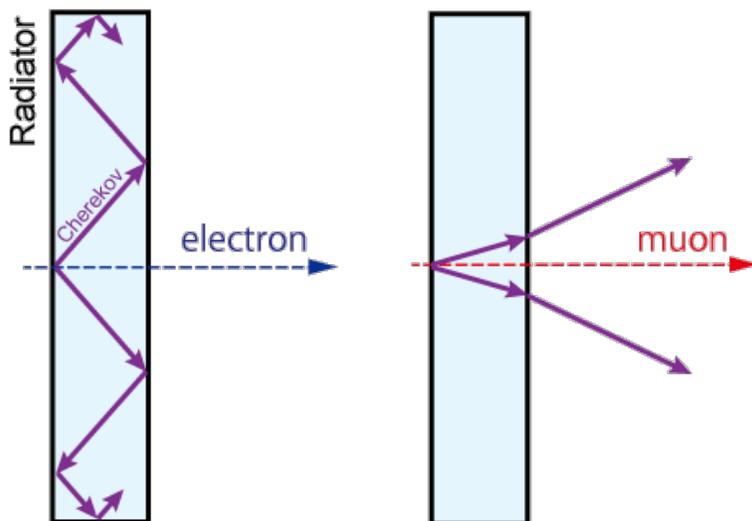
DLS出口の電子（案電流）のエネルギー分布

- 暗電流の抑制は困難
- 電氣的な測定では分離は不可能

➡ チェレンコフ光を用いたモニターを開発

チェレンコフ光を用いた粒子識別

誘電体を通過するミュオンからのチェレンコフ光を利用



Examples of kinetic energy and Cherenkov radiation mediums

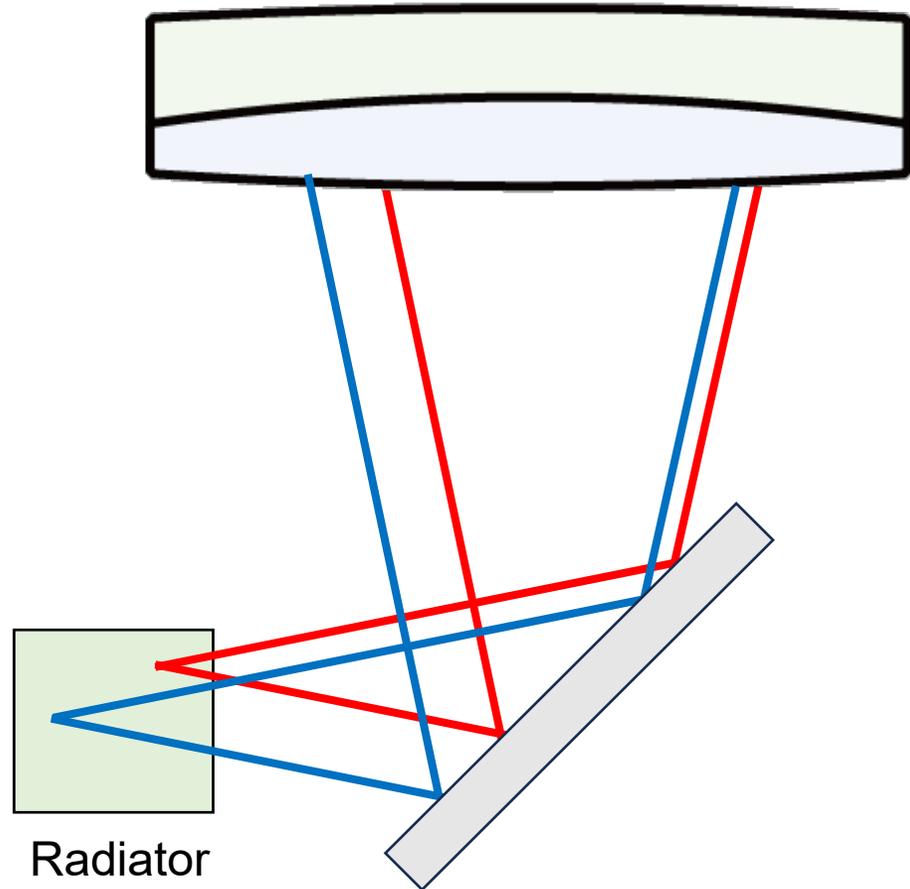
Energy [MeV]	Radiator Refractive Index n	Num. of photon $\lambda=400-800$	$\theta_{\text{Cherenkov}}$ [deg]	$\theta_{\text{Cherenkov}}$ for electron
40	Rad. Resistant Glass $n=1.516$	~ 50 (t=10 mm)	16.6	48.7
212	Silica Aerogel $n=1.08$	~ 40 (t=20 mm) (※)	10.9	22.2

※：透過率等は考慮していない

$E=40$ MeV → 電子から放射されたチェレンコフ光は全反射を繰り返し、誘電体から出てこない（形状による）

$E=212$ MeV → 電子から放射されたチェレンコフ光は誘電体前面から出てくるが、ミュオンから放射されたチェレンコフ光と角度が異なるため、分離可能

チェレンコフ光測定 of 難しさ



- **光の放出角度が大きい**

- 大きなレンズが必要

- ビーム近傍ほど放射線が多く
レンズが放射線損傷

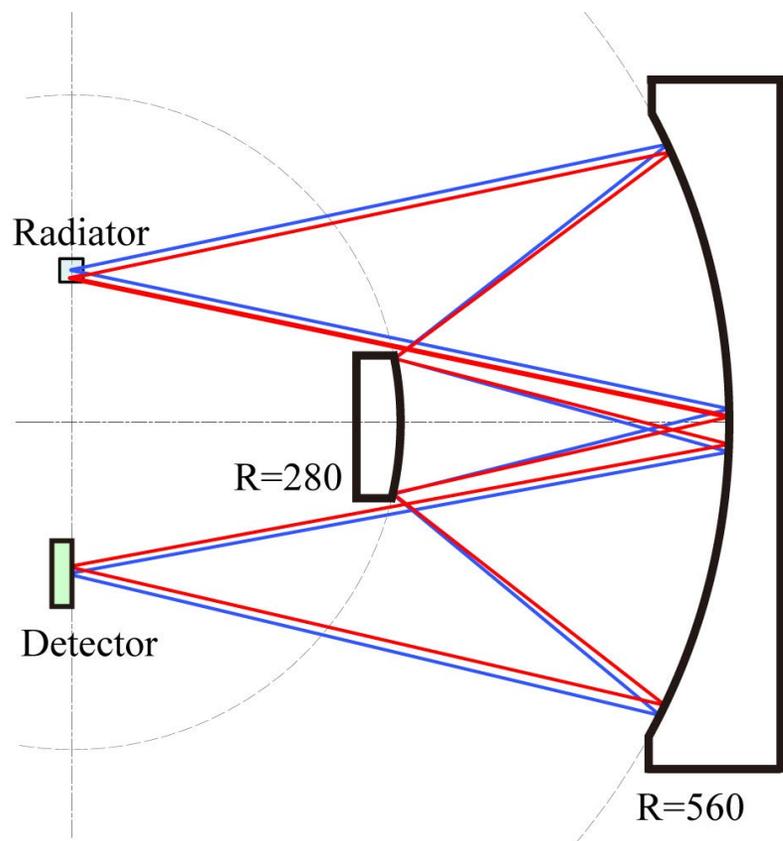
- **発光点の位置が様々**

- 絞り (f値) が小さく被写界深度
が大きな設計が必要

- **広波長帯域**

- 収差の小さい大きなレンズが必要
だが特注かつ放射線に弱い

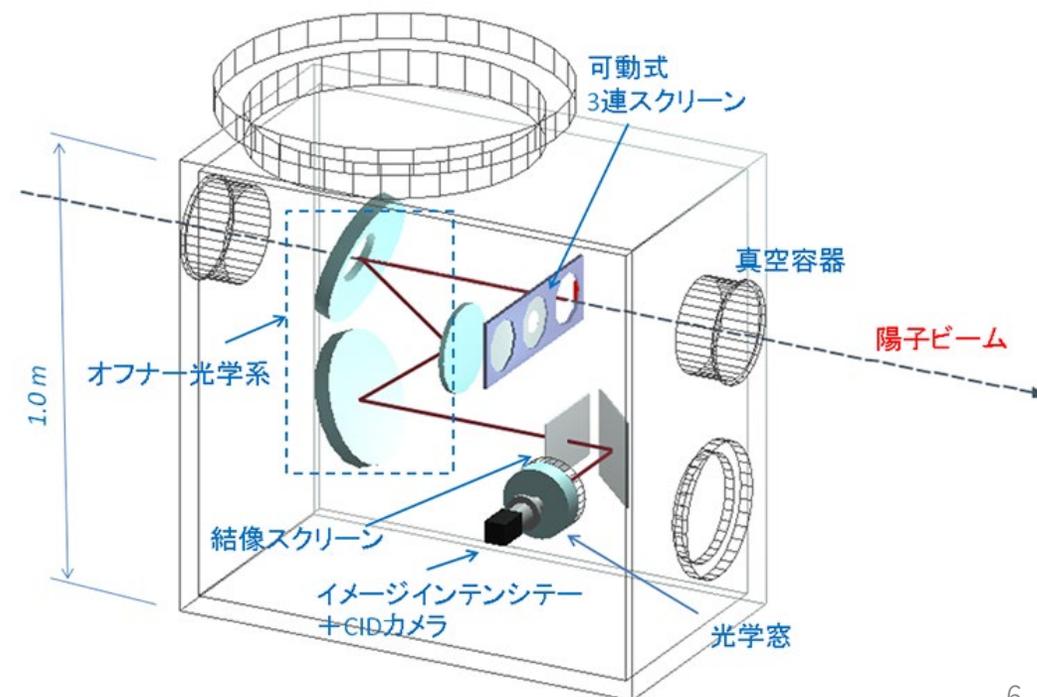
オフナーリレー光学系



- 球面鏡（凹面）とその1/2の径の球面鏡（凸面）で構成
- 倍率 1:1
- 非点収差（焦点距離が光の方向で異なる）以外の収差は補正される
- 色収差なし
- J-PARCの陽子ビーム2次元プロファイルモニタでも利用

検出器の候補：

- イメージインテンシファイア
- 大型の CMOS または Scientific CMOS



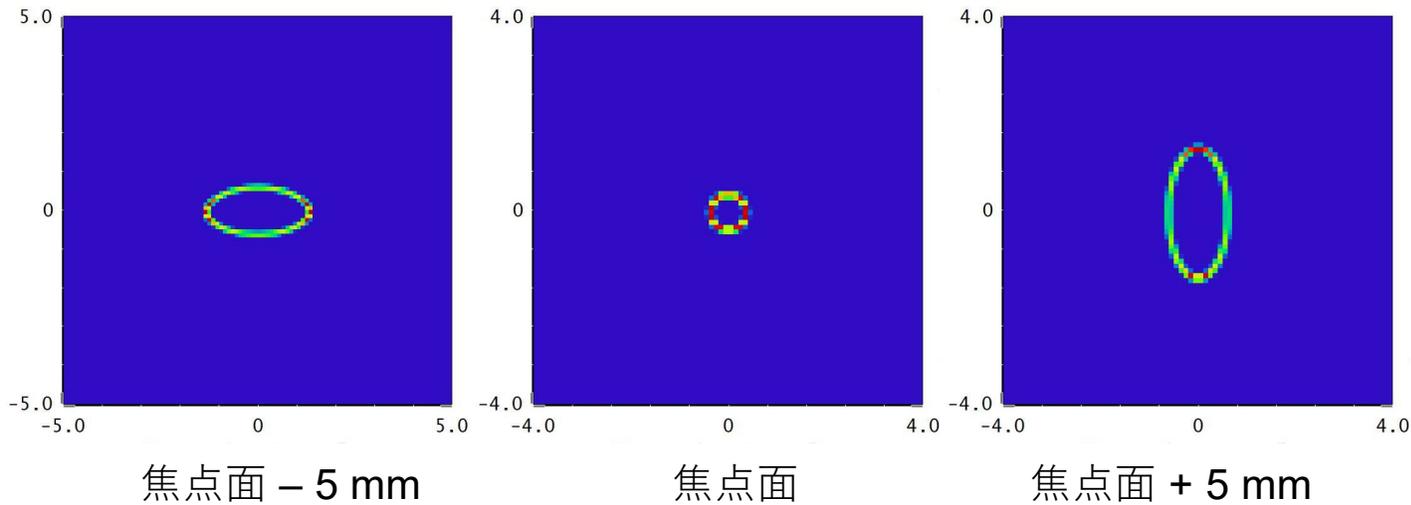
J-PARC OTRビームプロファイルモニター

レイトレーシングを用いた評価

3次元レイトレーシング（Zemax OpticStudio）を用いてチェレンコフ光に対する応答を調査

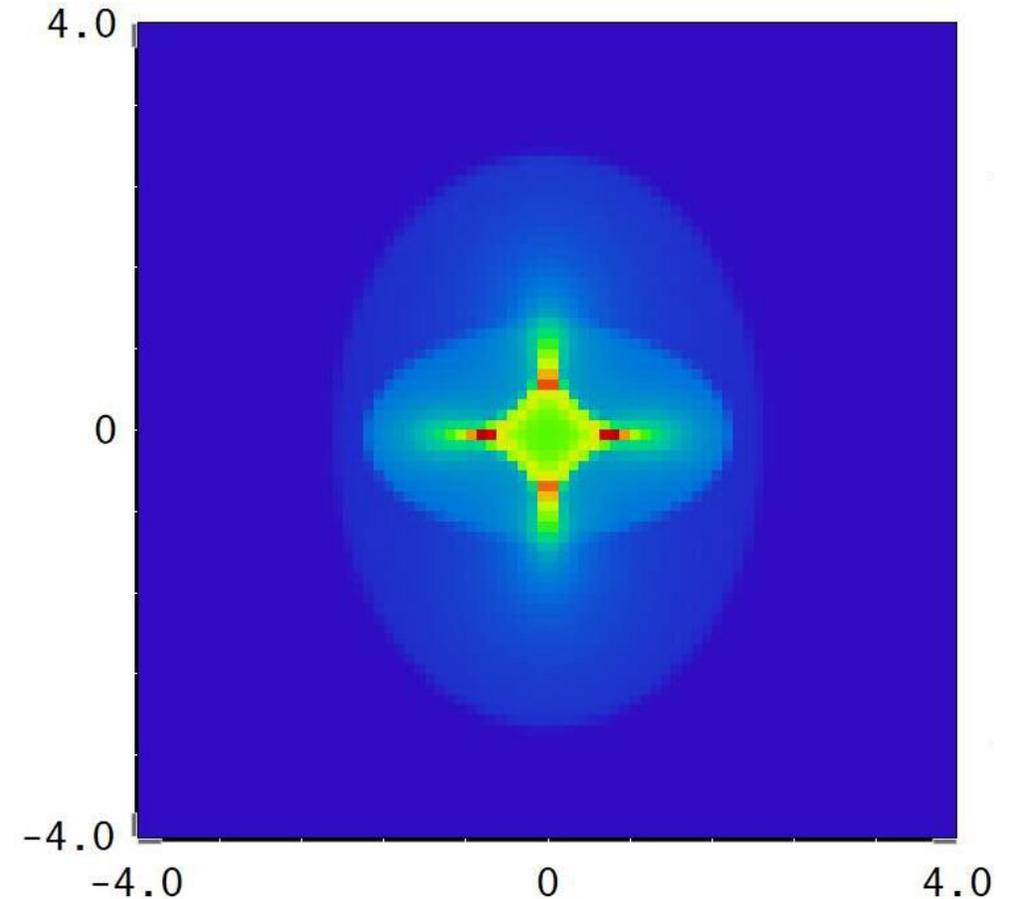
- Radiator: $n=1.08$, $L=20$ mm
- Single Muon light Source: $\Delta L=0.1$ mm, $\Delta\phi=1$ deg
- Muon beam $\sigma_x=\sigma_y=0.9$ mm, $n=1000$
- Detector resolution: 0.1×0.1 mm²
- Mirror: $r=560$, $r=280$ mm
- Kinetic Energy 212 MeV
- $\lambda=550$ nm （ミラーのみの系では結果に影響しない）

ミュオン1個に対する応答



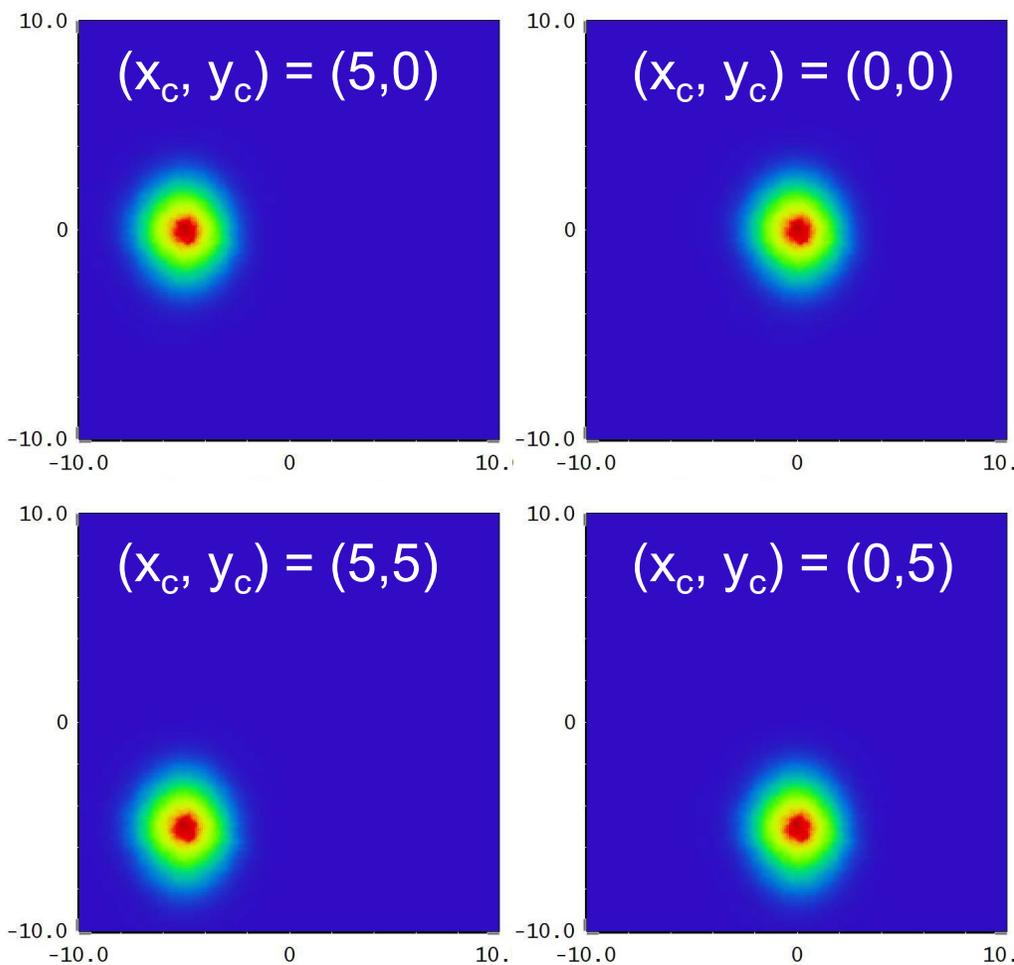
点光源に対する応答

- 発光点の位置の違いによる焦点距離の変化
- 非点収差による円環の歪み

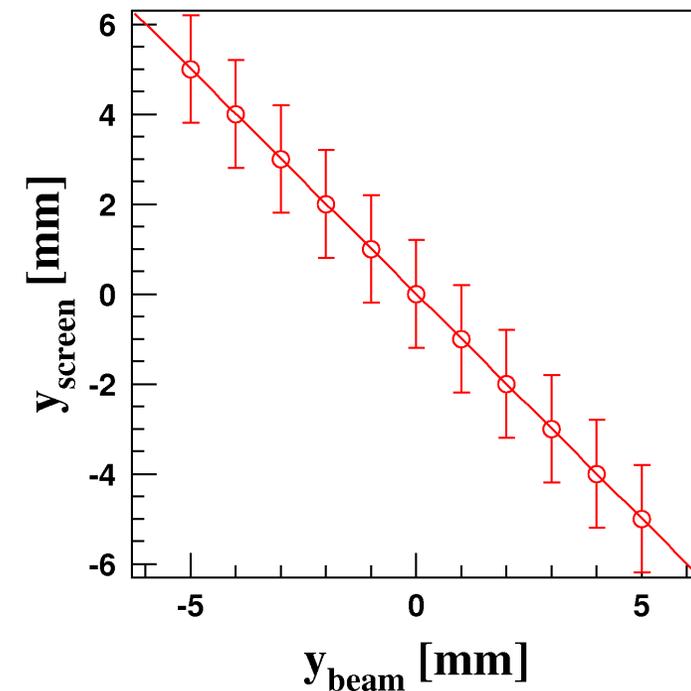
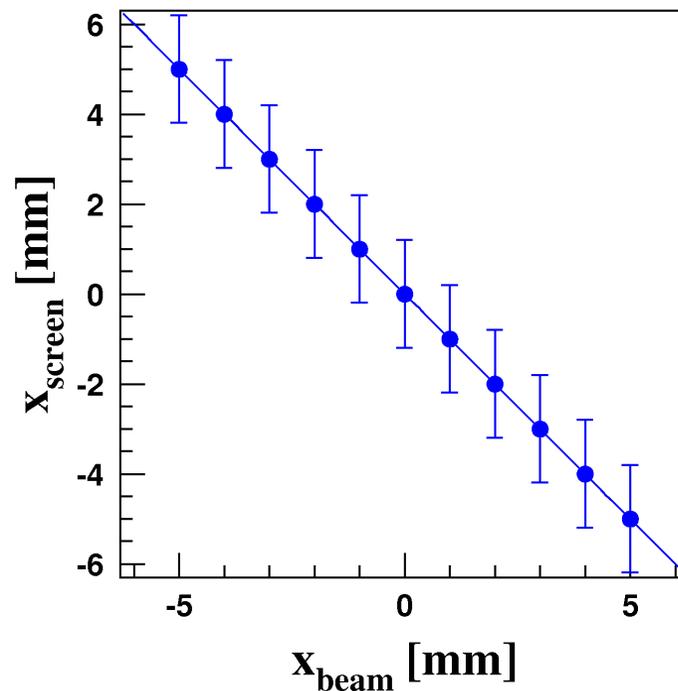


単一粒子 (20mmの媒質突き抜け) に対する応答

ミュオンビームに対する応答



ミュオンビーム中心 (x_c, y_c) と観測される形状



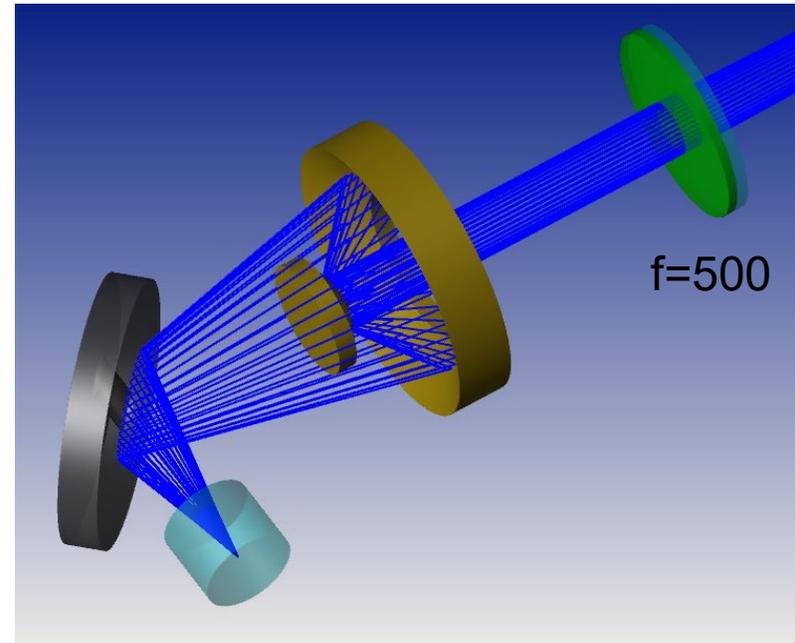
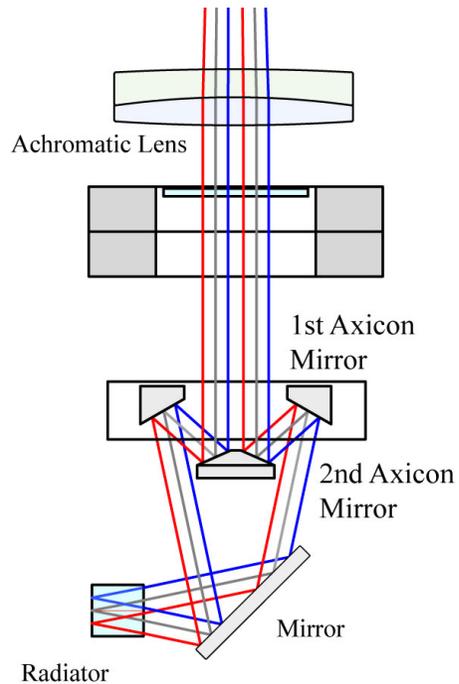
ビーム位置と分布の重心。エラーバーは分布の幅 (Std Dev) を表す。

- 重心は線形な応答
- 1:1の光学系なので傾き -1

単純に重心を求めるだけでビーム位置の評価が可能

円錐鏡を用いたエネルギー測定

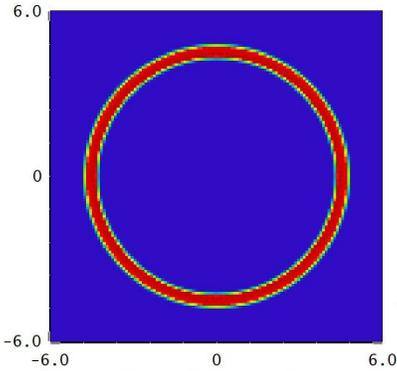
$\beta < 1$ なのでチェレンコフ角に応じて焦点距離が変わる光学系を用意することで、直線部でもエネルギー測定が可能



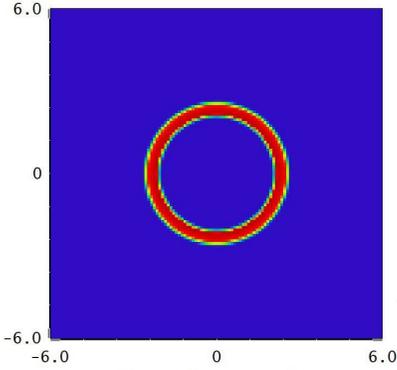
- 212 MeVのミュオンのチェレンコフ光が平行光となる様に角度を決めた円錐鏡を2個設置（1個でも可能であるが、1個の場合はビーム径が大きくなる）
- アクロマティックレンズで検出器に集光
- 発光点が光軸から外れると大きなコマ収差が発生 → 中心を通ったビームを使う

ミュオンのエネルギーと円環サイズ

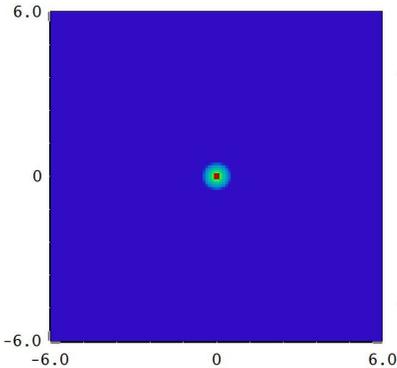
E=208 MeV



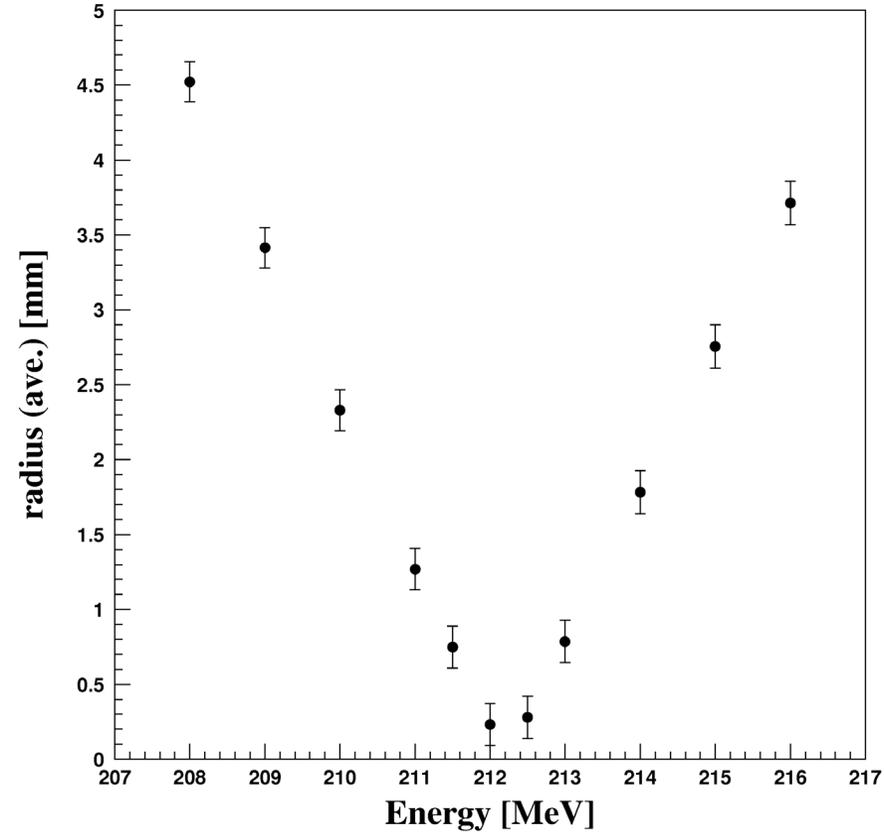
E=210 MeV



E=212 MeV



ミュオンのエネルギーと測定される像



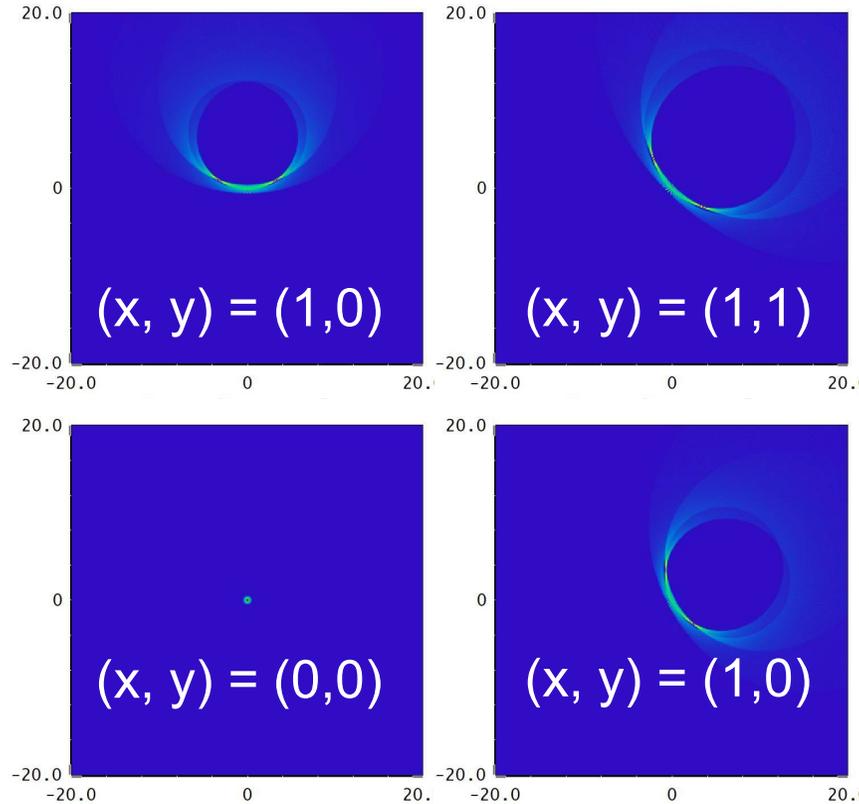
ミュオンの運動エネルギーと測定される円環の半径。

- エネルギーに対してほぼ線形な応答
- ミュオン蓄積磁石に最適なエネルギーの維持、再現に利用可能
(螺旋ミラーの角度やレンズの焦点距離と検出器の設置誤差などで最小値が設計とズレが生じても問題ない)

直線部でもエネルギーの推定が可能

コマ収差 / ビームに対する応答 (円錐鏡)

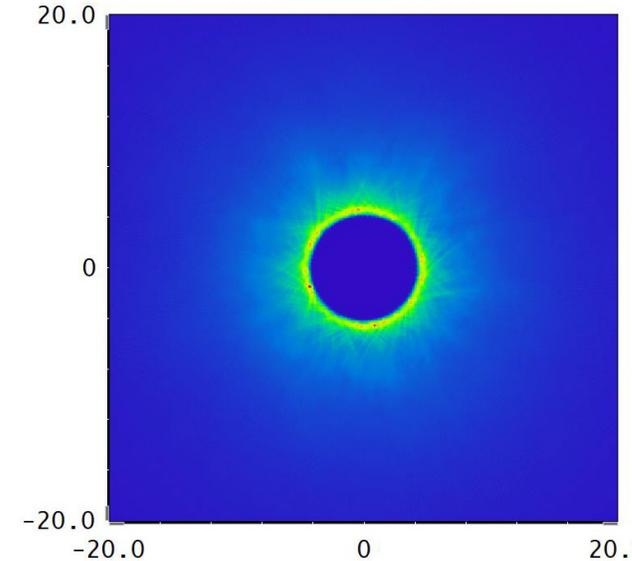
コマ収差



ミュオン (単粒子) の入射位置と観測される像

**像全体を観測するには大きな
検出器が必要**

ビームに対する応答



208 MeV のミュオンビーム
($\sigma_x = \sigma_y = 0.9$ mm) で観測される像

中心部にきれいな円形のボイド



**エネルギーの推定だけであれば全体を
観測可能な大きさの検出器は必要ない**

まとめと今後の課題

ミュオン線形加速器でミュオンを暗電流と分離してビーム位置測定可能なモニタの開発を行っている。

ミュオン選別：シリカエアロゲル ($E=212$ MeV)、耐放射線ガラス ($E=40$ MeV)

ビーム位置測定：オフナーリレー光学系を用いて像の重心から評価可能

エネルギー測定：円錐鏡を使った光学系で評価可能

今後の課題

- 最適な光学系設計：分解能、球面鏡のサイズ、視野、誘電体の厚さ、検出器等
- 光学系の試験、誤差評価：分解能評価、ミラー、光学素子、検出器のアライメント
- 検出器のシールド設計：加速管からの放射線をシールド
- エアロゲルの屈折率の不均一性の影響評価
- エアロゲルの放射線耐性、アウトガス対策

謝辞：KEKの三橋利行氏、橋本義徳氏から多くのアドバイスをいただきました。