

cERL入射器ビーム評価

2013.7.17

ERL検討会

本田洋介

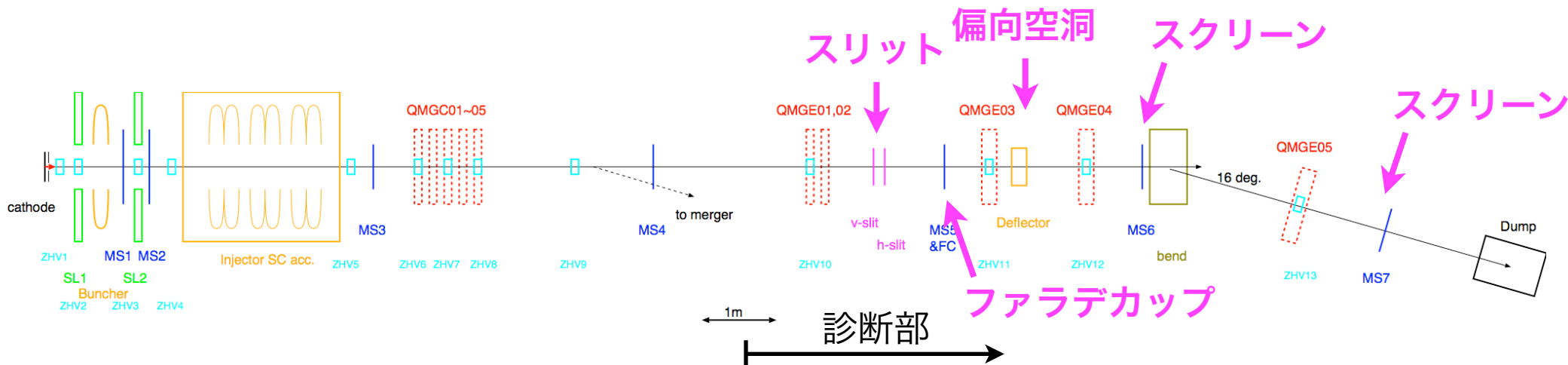
- cERL入射器の運転(Phase-1)が終了した。予定されていたほぼ全てについて進める事が出来た。
 - ビームの輸送を確立し、放射線発生装置の承認
 - 機器の整備、動作試験
 - ビーム性能の評価、調整。できれば高バンチ電荷(7.7pC/b)での評価。
- 診断ラインにおけるビーム評価についてまとめる。
 - 系統的な測定ができるようになったのは、最終週。いろいろと調べ尽くされていない点はある。
- 計算との比較はまだ、、、

診断ラインのレイアウト

- 入射器の5MeVビームの性能測定を目的として、診断部をつくった。
- 周回部に向かう軌道と独立に、mergerを直進し、調整用ダンプへ。
- 基本的に、好き放題破壊的にビームを測定する想定。
 - 低平均電流でビームは全損失、チェンバーは凸凹だらけ
- 測定対象のビームは、入射部の設計から与えられる →
 - 測定するビームパラメータ：装置
 - エミッタンス：スリットスキャン
 - バンチ長：偏向空洞
 - エネルギー拡がり：ベンド下流
 - その他
 - ビーム電流：ファラデカップ
 - エネルギー：ステアリング(あるいはベンド)
 - プロファイル：スクリーンモニタ
 - ビーム位置：QマグネットBBA

設計によるパラメータ merger出口(7.7pC/bunch)

parameter		
γ	10.84	全エネルギー 5.54MeV
σ_γ	0.0184	エネルギー拡がり 10.2keV
$\epsilon_{n,x}$	0.28 μm	規格化エミッタンス (水平)
$\epsilon_{n,y}$	0.21 μm	規格化エミッタンス (垂直)
σ_x	0.33 mm	RMS ビームサイズ (水平)
σ_y	0.20 mm	RMS ビームサイズ (垂直)
σ_z	0.64 mm	RMS バンチ長
σ_t	2.13 ps	RMS バンチ長
β_x	5.61 m	Twiss parameter
β_y	1.58 m	Twiss parameter
α_x	0.071	Twiss parameter
α_y	1.622	Twiss parameter



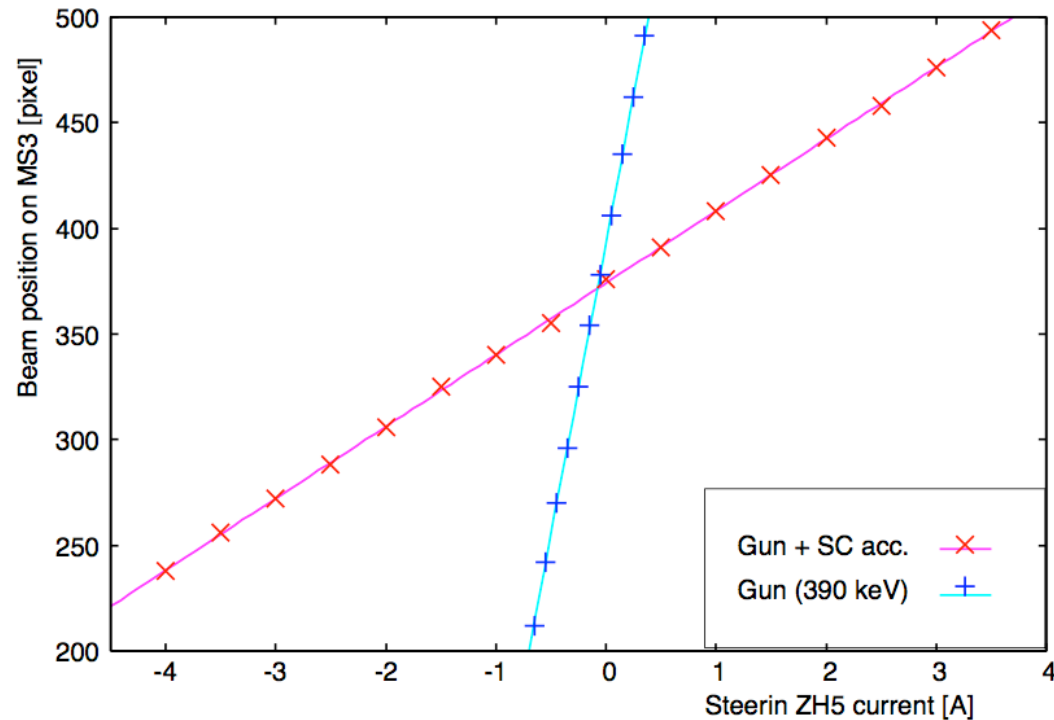
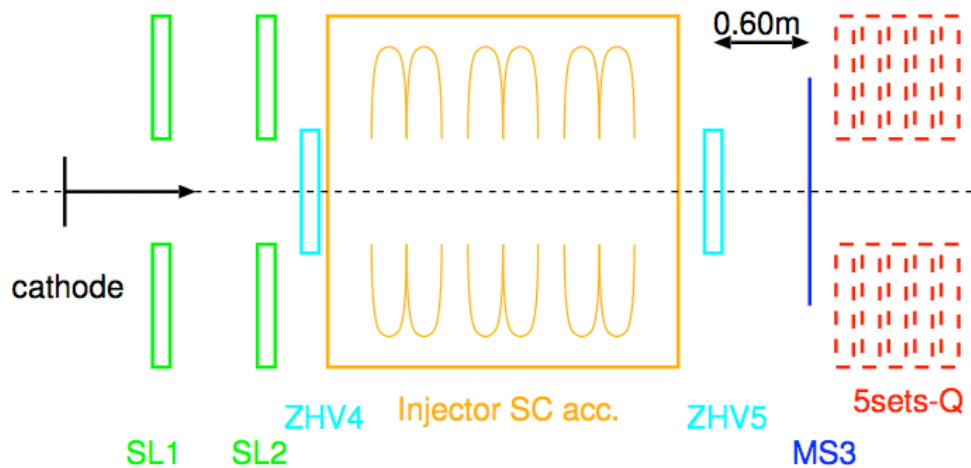
話の内容

- ビームエネルギーってどうやって評価しているの？
- ビーム電流はちゃんとわかっているの？ そこからQEはでない？
- ビーム軌道はどうやって調整しているの？
- エミッタンスはどうやって測定したの、結果は？
- バンチ長はどうやって測定したの、結果は？
- ところでレーザーパルスの時間幅はいくらなの？
- エネルギー拡がりはどうやって測定したの、結果は？
- (で、計算とあっているの？)

ビームエネルギーの測定

ビームエネルギーの測定

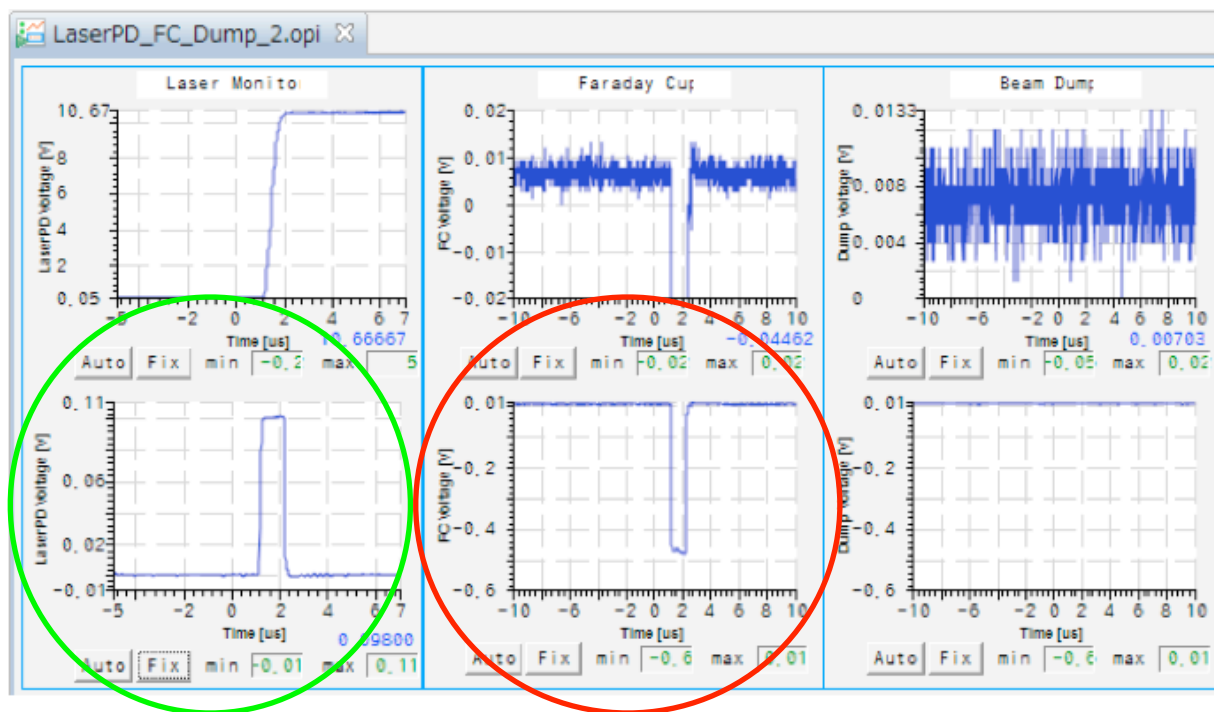
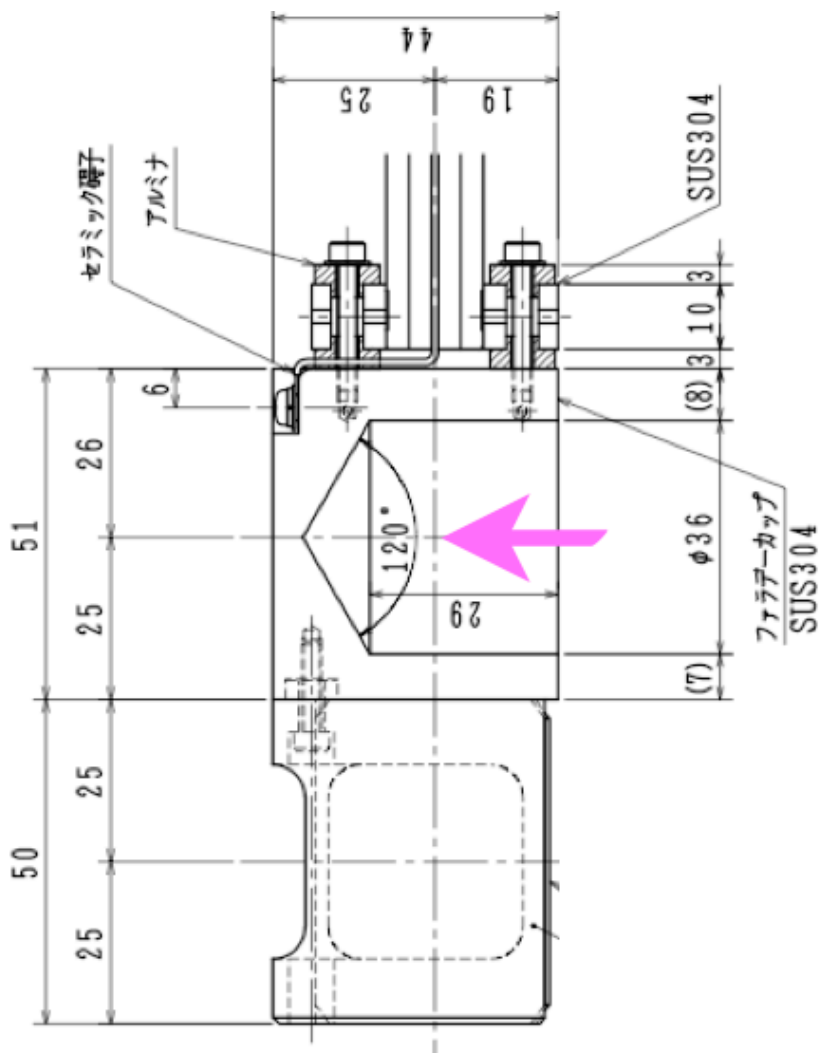
- 電子銃の電圧を基準とする。390kVと信じる。
 - マグネットの磁場測定、スクリーンの校正、機器の設置、に依存しない方法。
- ZHV5の変化にたいしてMS3でビーム位置の動きをみる。
- 同じセットアップで、電子銃のみと加速後、を両方測定できるため、系統誤差がキャンセルする。
- 通常のオンクレスト調整後は、運動エネルギー5.6MeVになることを確認。



ビーム電流の測定

ビーム電流の測定

- 診断部途中のスクリーンモニタMS5は、ファラデカップとの2段式。
- 単に絶縁した金属でビームを止めて、そのまま同軸ケーブルで引き出す。
 - そのままオシロスコープで50Ωで読み出す。
 - 余計なアンプやフィルタは入っていないので、応答は速い。マクロパルス形状が確認できる。
 - オームの法則より、10mAなら500mVの電圧信号になる。

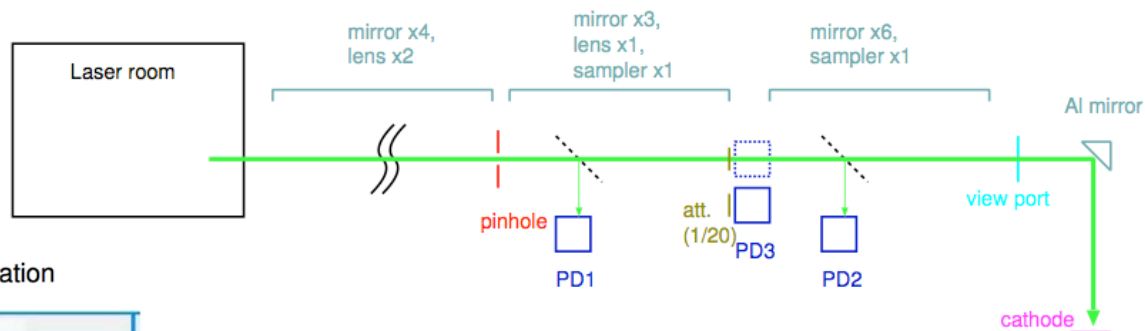


Laser power
monitor

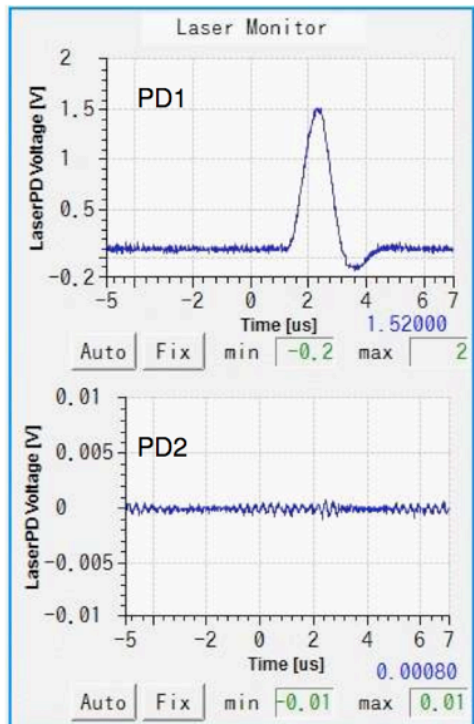
Faraday cup

レーザーパワーの測定

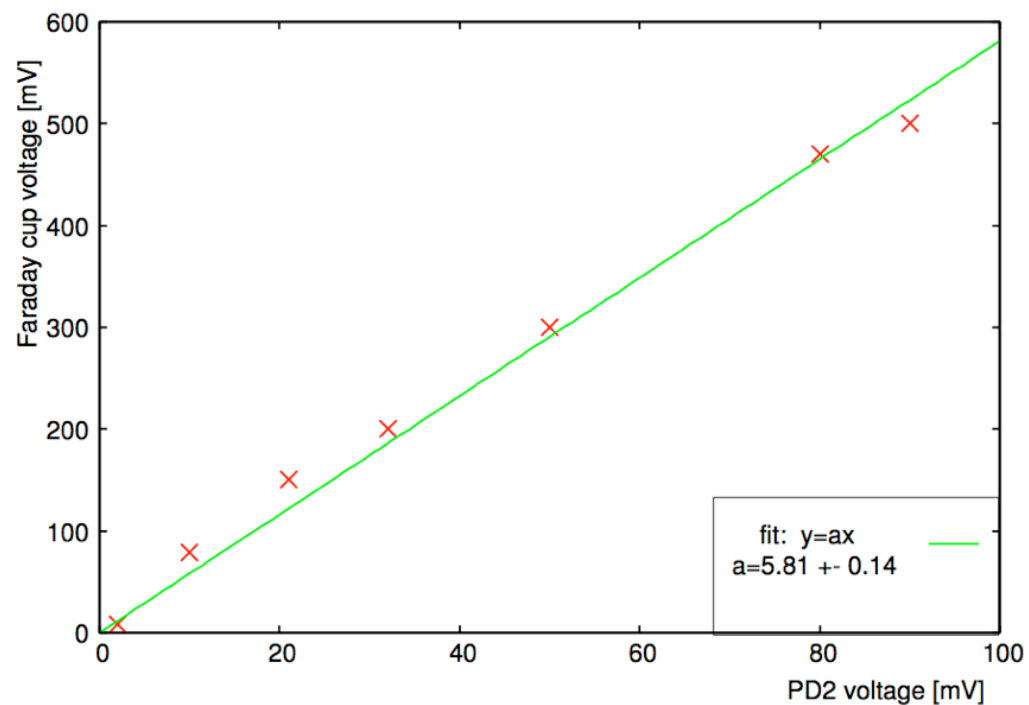
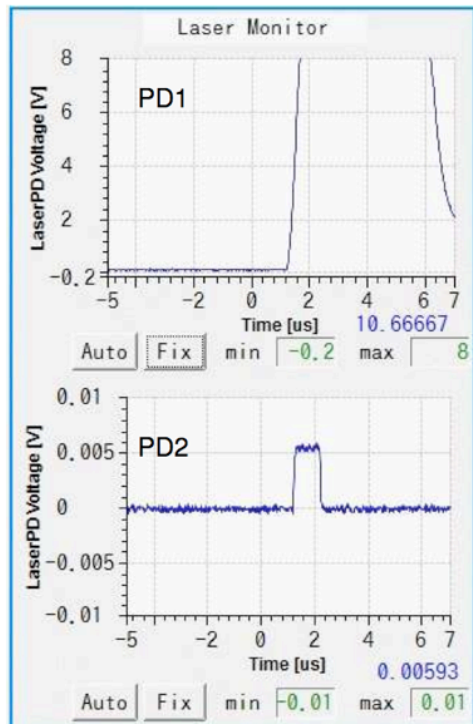
- ともかく、運転で興味があるのは、カソードに入射するレーザーパワー
- 輸送後にピンホールで切り取って円形ビームにしている。ピンホール通過率は1/3程度。
- ピンホールより下流でレーザーを一部サンプルし、フォトダイオードで測定。
 - PD1：低パワーで測定できるように、アンプ付き。応答は遅い。
 - PD2：高パワーで飽和しないように、アンプなし。応答は速い、マクロパルス構造が分かる。



low bunch charge operation



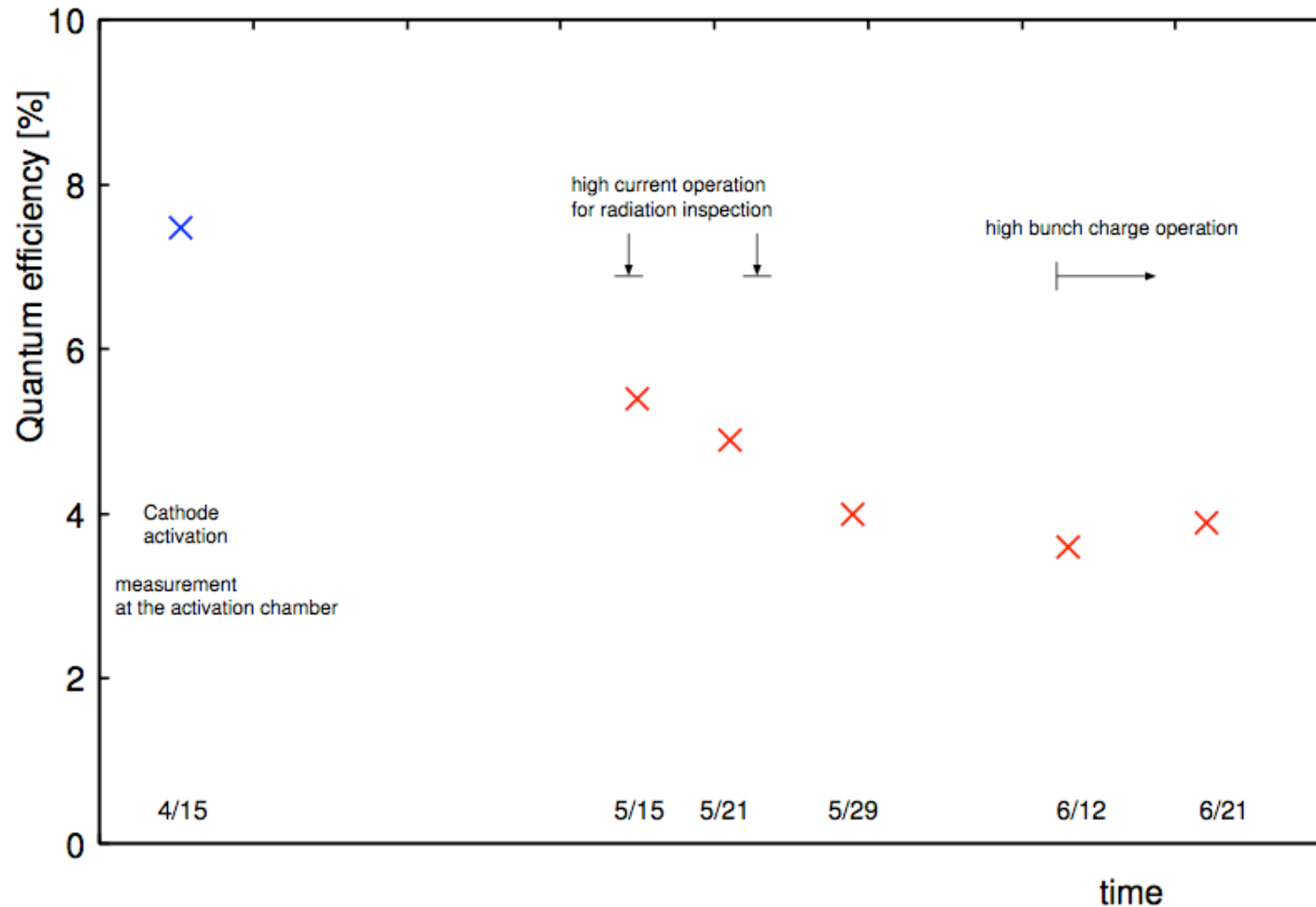
high bunch charge operation



QEの測定

- 運転中のレーザーパワーモニタ信号とファラデカップ信号からQEを見積もった。
- カソードの活性化は、運転開始前の4/15に行われている。
- ビーム診断での通常の運転(7.7pC/b, マクロパルス1us, 5Hz)では、減少している傾向はみられない。
- 最後の週は、QE 3.5% で7.7pC/bunch運転をしていた。
- (レーザーパワー的には、ピンホールで1/3になったうえで、まだ倍くらい余裕)

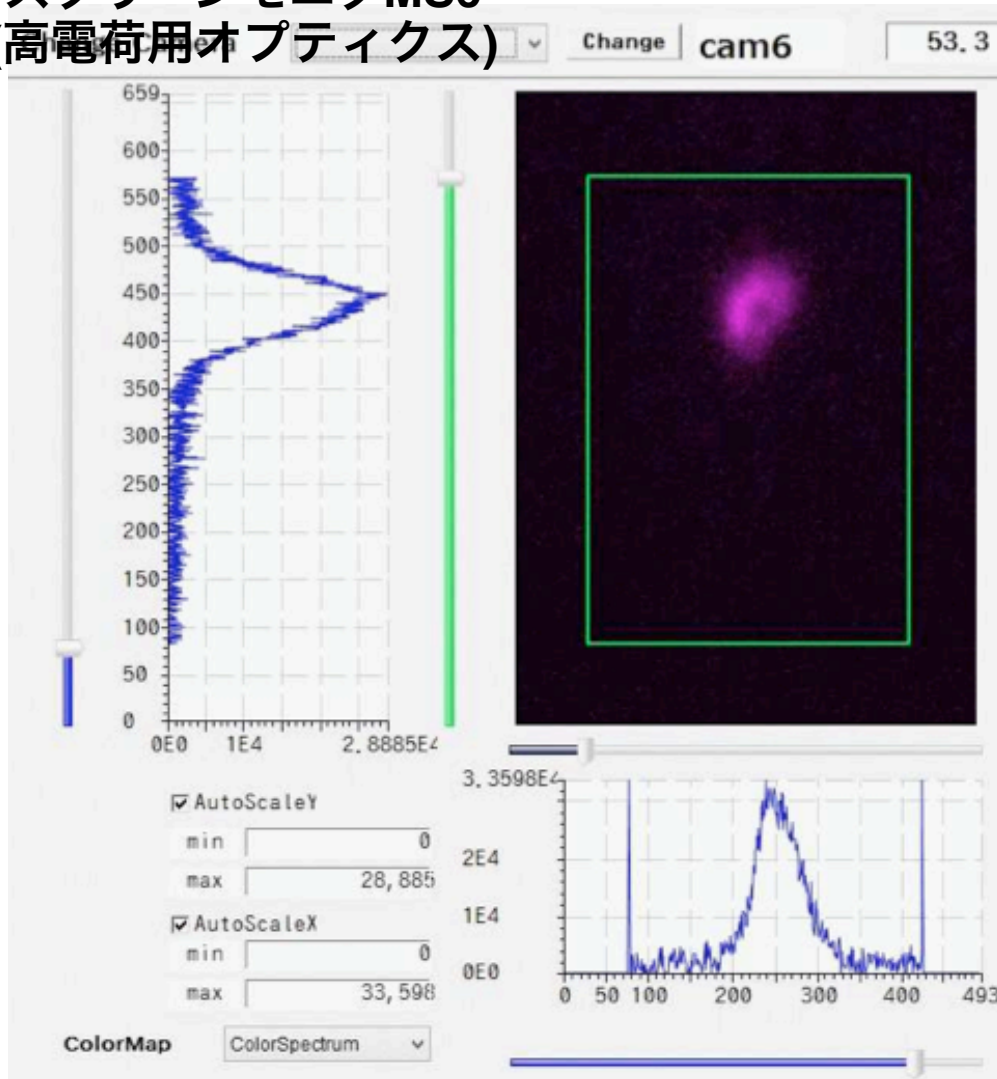
$$I[\text{mA}] = \frac{\lambda[\text{nm}]}{124} \cdot P[\text{W}] \cdot QE[\%]$$



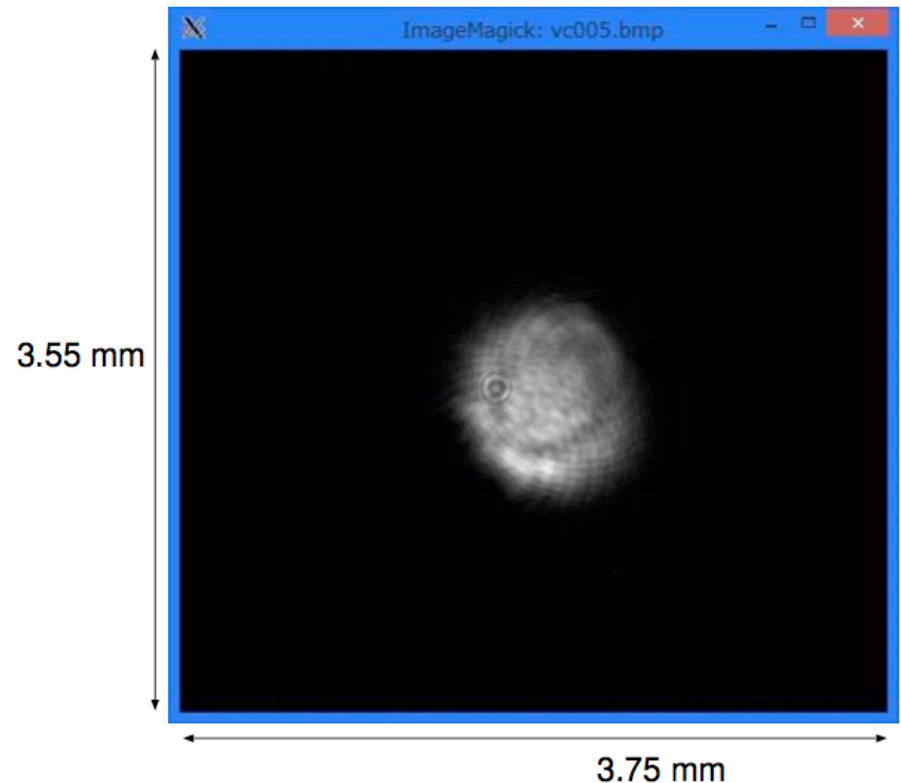
QEの分布

- ただし、QEがビーム運転によって劣化している様子はある。
- たまたま結像条件になっているとき、ビームプロファイルがドーナツ型になっているのがわかる。
 - 中央部は周りに比べて1/2とか(最後の週で)。
 - レーザーに位置ジッタがあり、プロファイル全体は20%程度ジッタするが、ドーナツの穴は動かないことから、多分、レーザーの中央部に光が存在しないのではなく、QE分布に穴が存在。
 - レーザープロファイルのモニターを確認しても、それほど悪くない。

スクリーンモニタMS6 (高電荷用オプティクス)



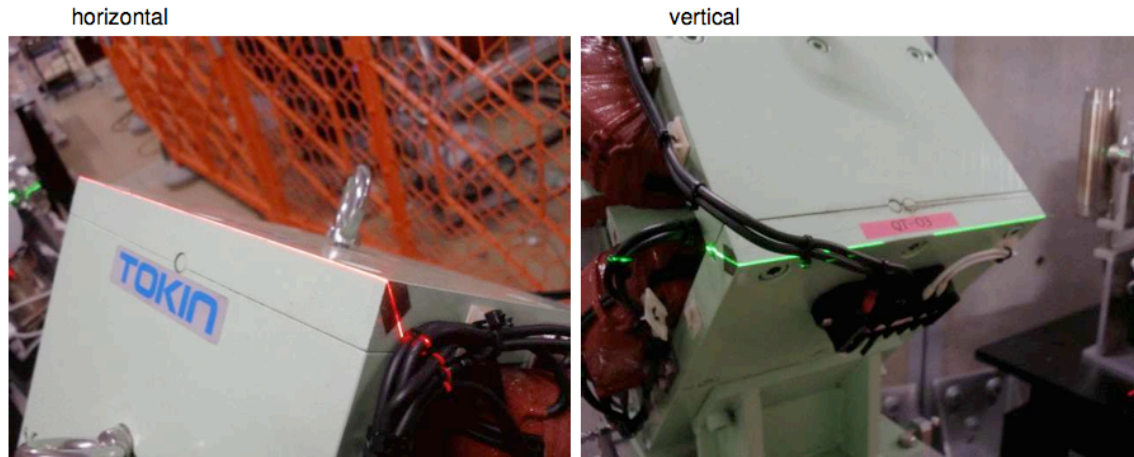
レーザープロファイル (仮想カソードCCD)



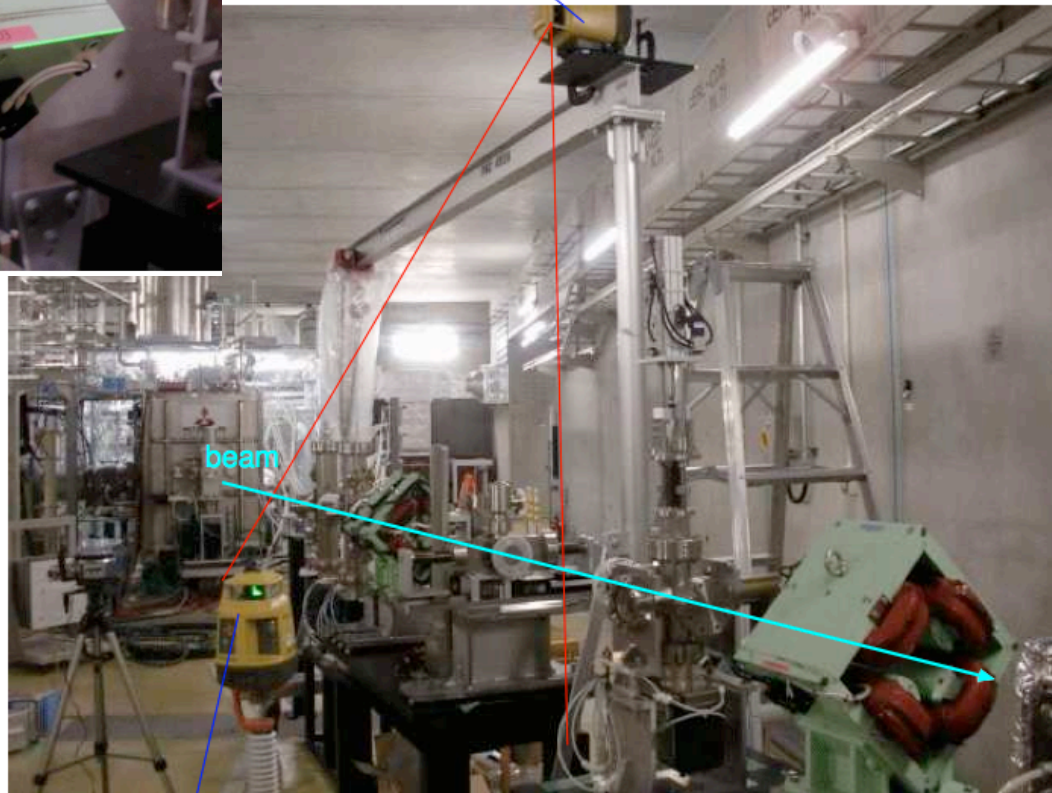
ビーム位置の測定

ビーム軌道の測定

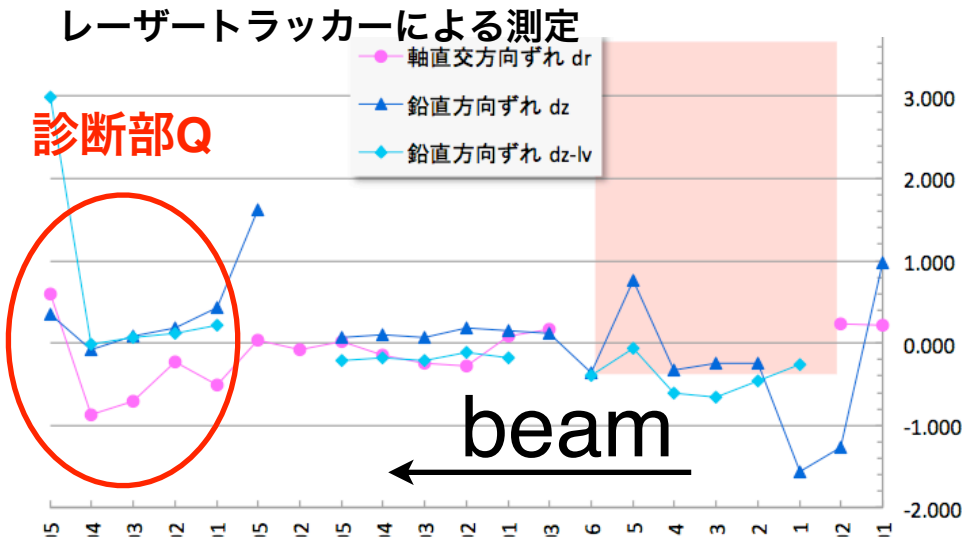
- 診断部のQマグネットはそれなりにアライメントされているので、これをビーム位置モニタとして軌道を調整する。
- Qマグネットは、アライメントレーザーラインを基準に設置した。
- サブmmの精度。レーザートラッカーの測定でも確認されている。



rotating-laser
(beam line)

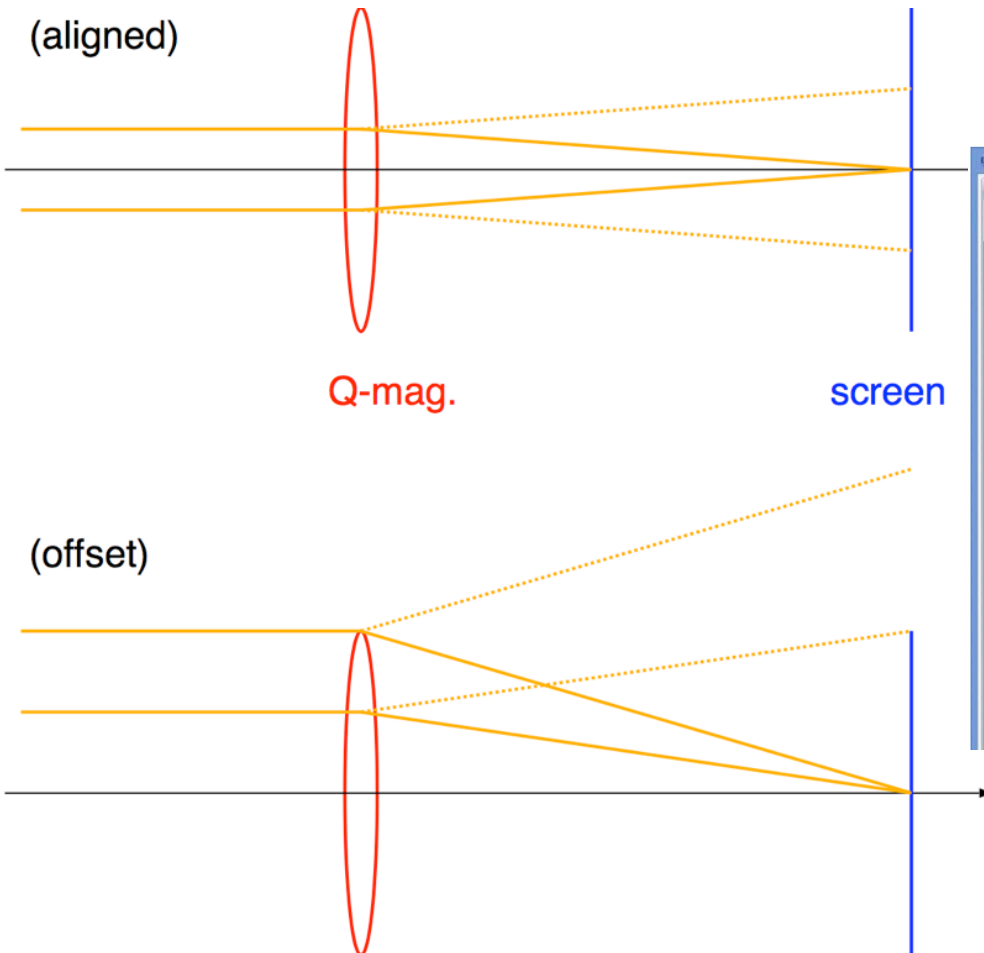


rotating-laser
(level)



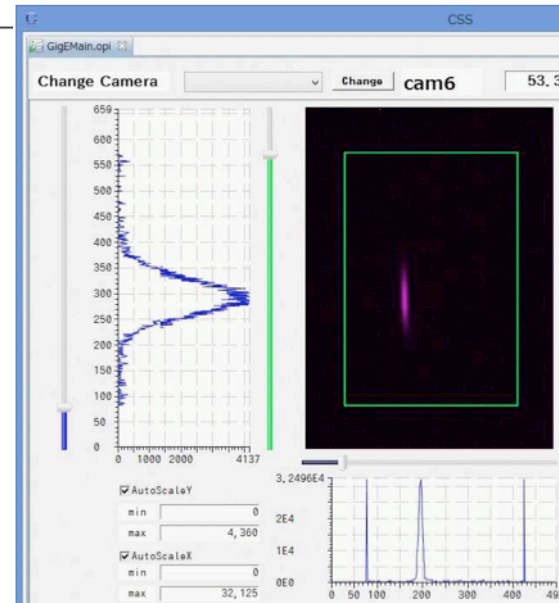
ビーム軌道の調整

- Qマグネットによる軌道応答より、ビーム位置を調整する。(Beam Based Alignment)
 - Qマグネットの強さを変調し、下流のスクリーンで位置を見る。上流のステアリングを調整する。
 - 手順通り行くと、全てのステアリングの設定が決まる。
- 1mm程度のビームを、扁平になるところまで収束発散して重心の動きを見る。位置の変化にして、1mm以下は容易に分かり、調整できるので、サブmmの精度で軌道を調整しているつもり。
- モニタ(Qマグネット)の設置精度と、読み取り(スクリーンの動き)を込みで、1mm以内に軌道を調整した。

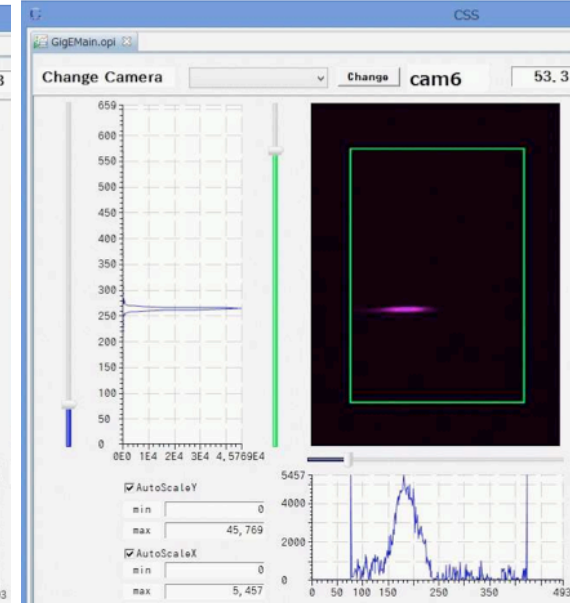


QMGE01 BBAの例

QMGE01=0.2A



QMGE01=-0.15A

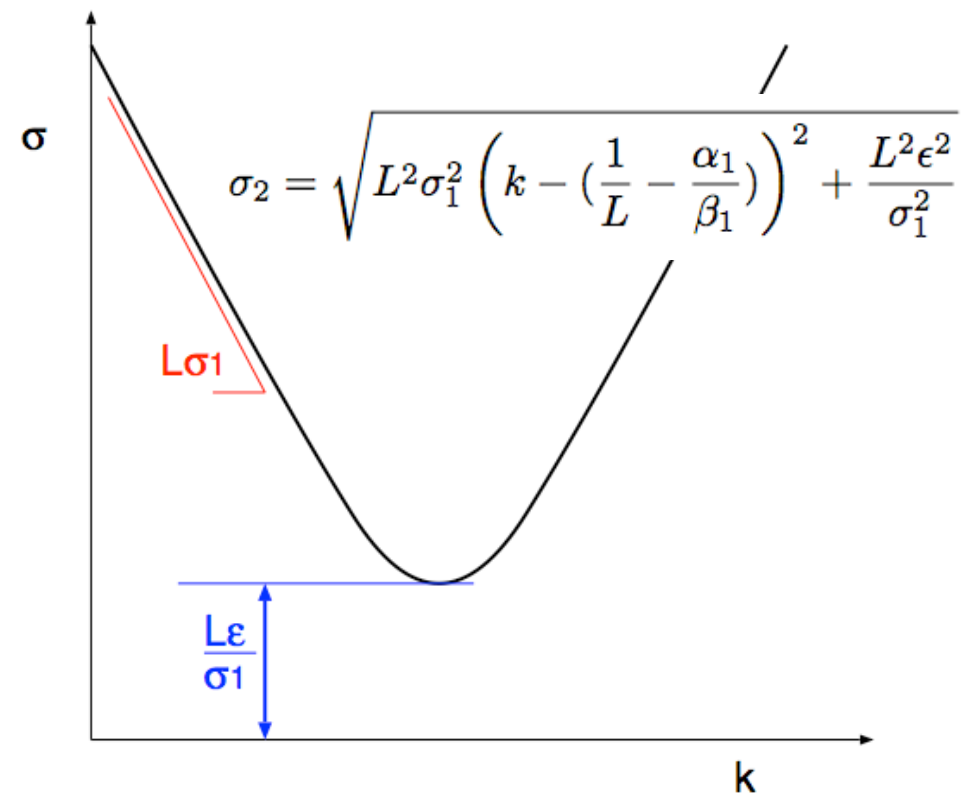
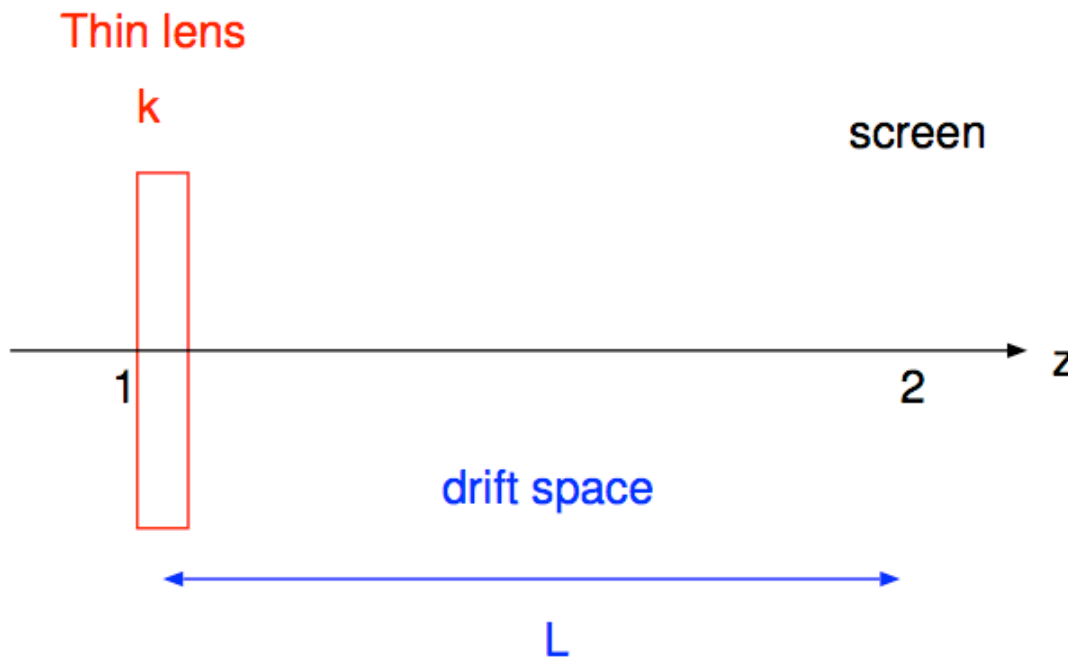


MS6で測定

エミッタンスの測定

エミッタンスの測定(ウェストスキャン)

- ウェストスキャンによる方法 (ソレノイドスキャンあるいはQスキャン)
 - 特別なモニタを用意していなくても、スクリーンモニタがあれば測定できる。
 - 低バンチ電荷で空間電荷による発散力が効かないとき
 - 一番絞ったときにスクリーンが飽和しないように注意
- 必要な情報
 - 収束レンズのk値と、自由空間の距離

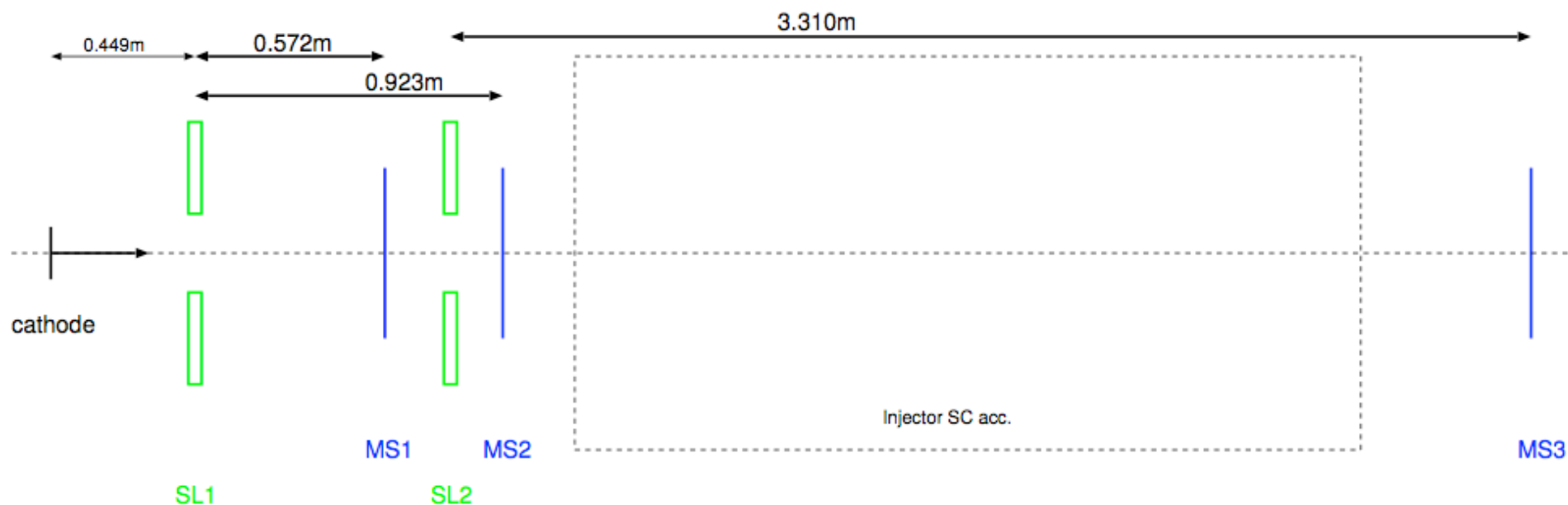


入射部のエミッタンス測定

- 電子銃のみの加速、390keV
- 低電荷での測定。
- ソレノイドスキャンで行った。
 - ソレノイドは収束と同時にプロファイルを回転する。ここでは、水平垂直は独立な意味をもたないことに注意。
 - ソレノイドのk値は、磁場測定による。
- 3つのレイアウトで測定し、比較した。

$$k = \left(\frac{eB_{sol}}{2\gamma m_e \beta c} \right)^2 \cdot L_{sol}$$

データセット	スキャンするソレノイド	測定するスクリーン	距離 L
1	SL1	MS1	0.572 m
2	SL1	MS2	0.923 m
3	SL2	MS3	3.310 m

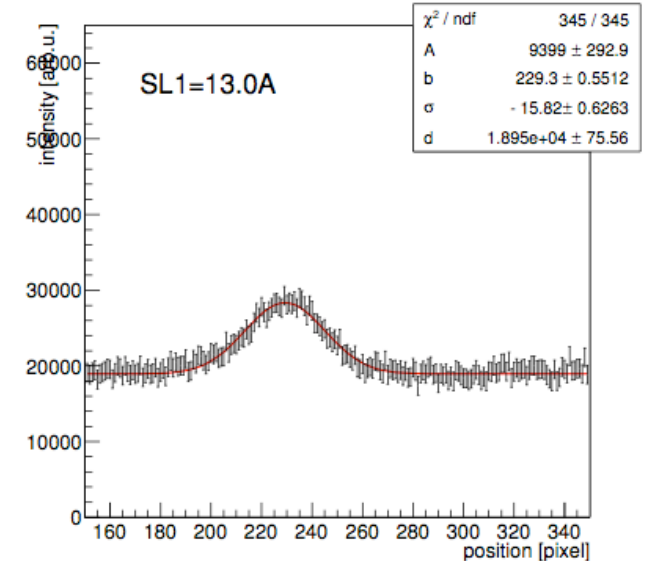
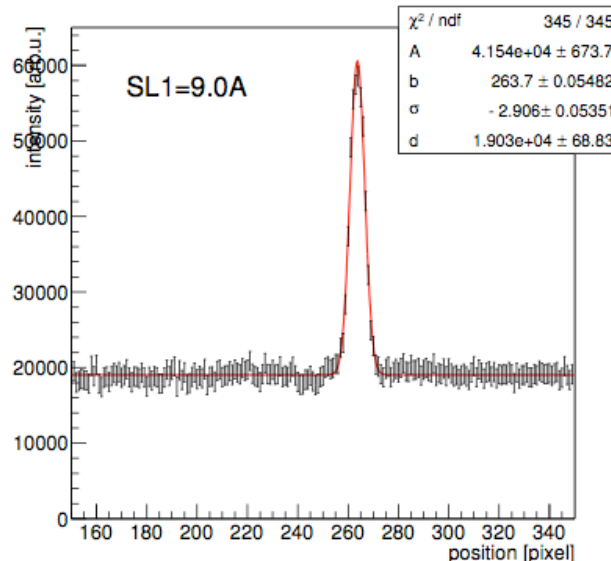
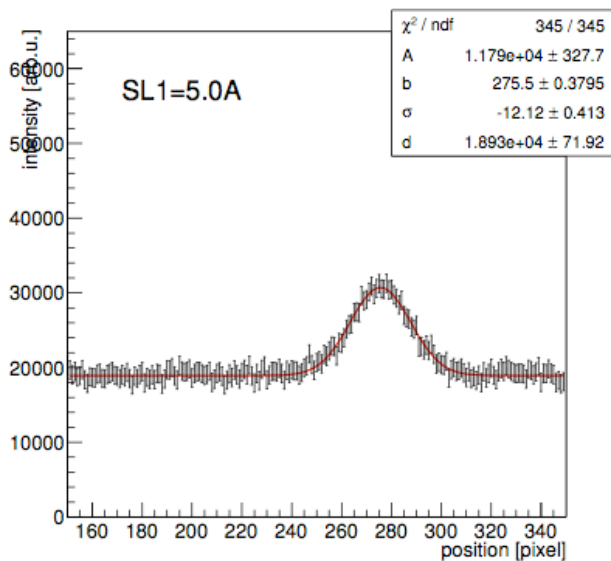
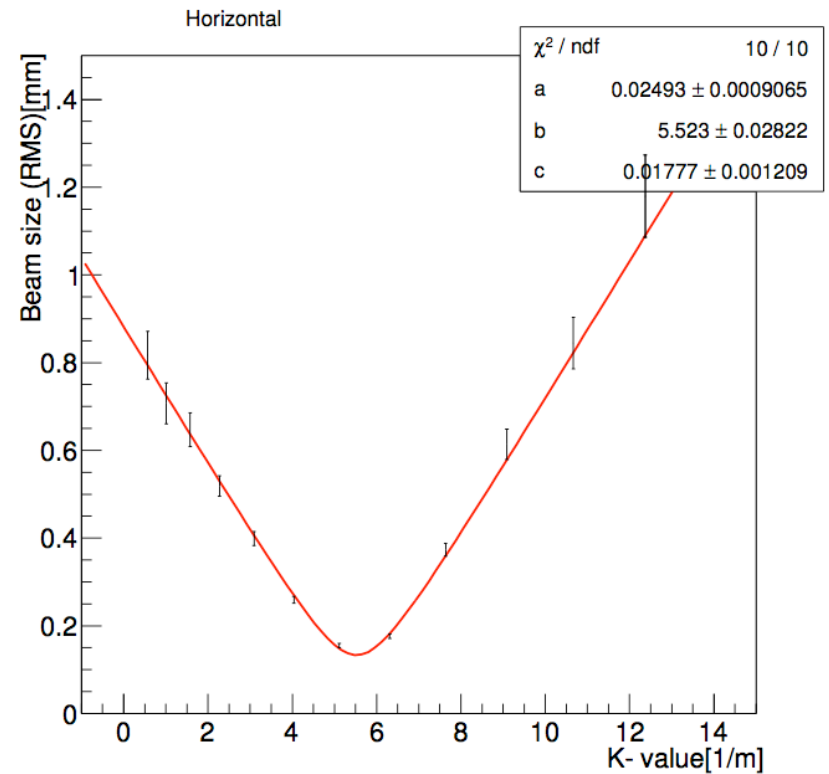


ソレノイドスキャンの例

- SL1スキャン、MS1測定の際の例
 - プロファイルはガウス関数フィット
 - スキャンは双曲線フィット

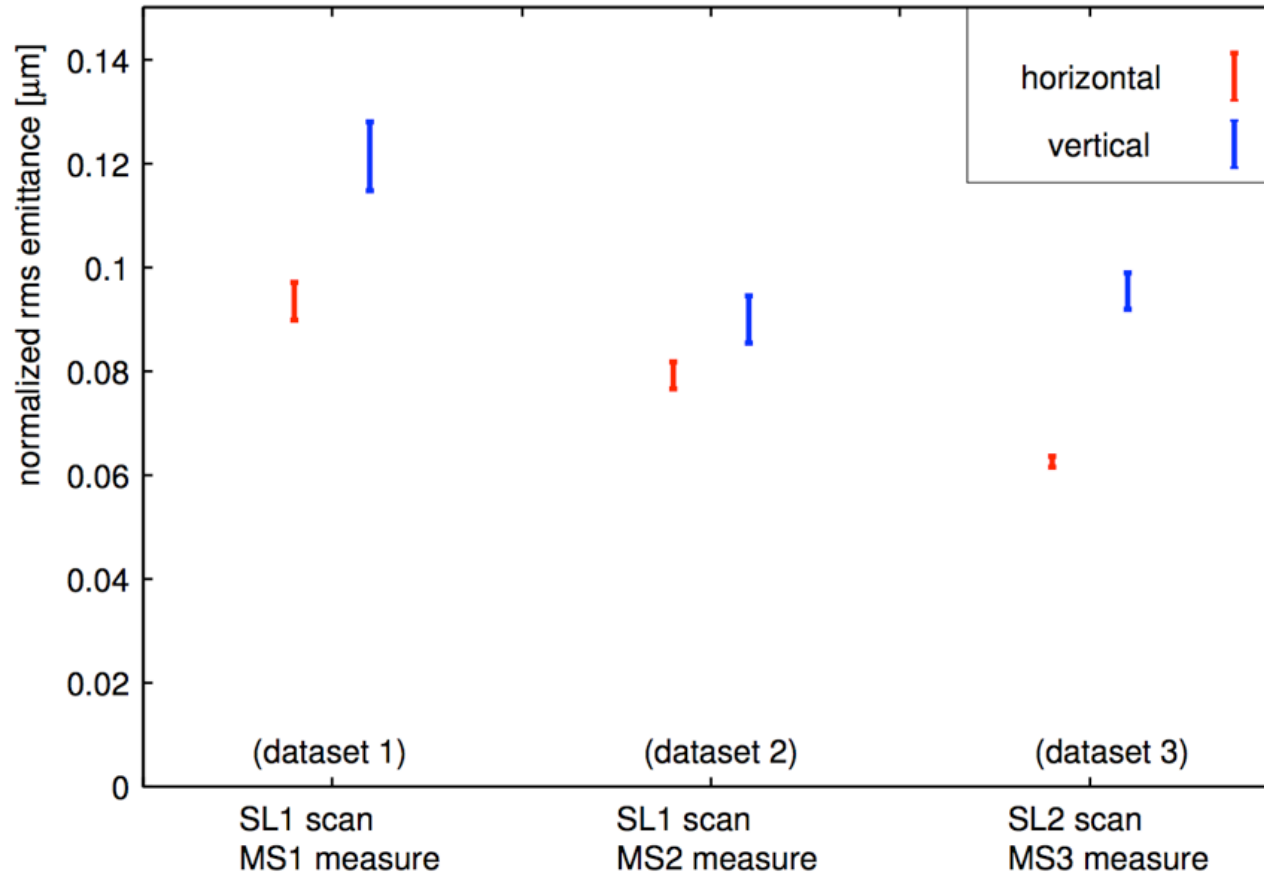
$$y = \sqrt{a(k - b)^2 + c}$$

$$\epsilon_n = \gamma\beta \frac{\sqrt{ac}}{L^2}$$



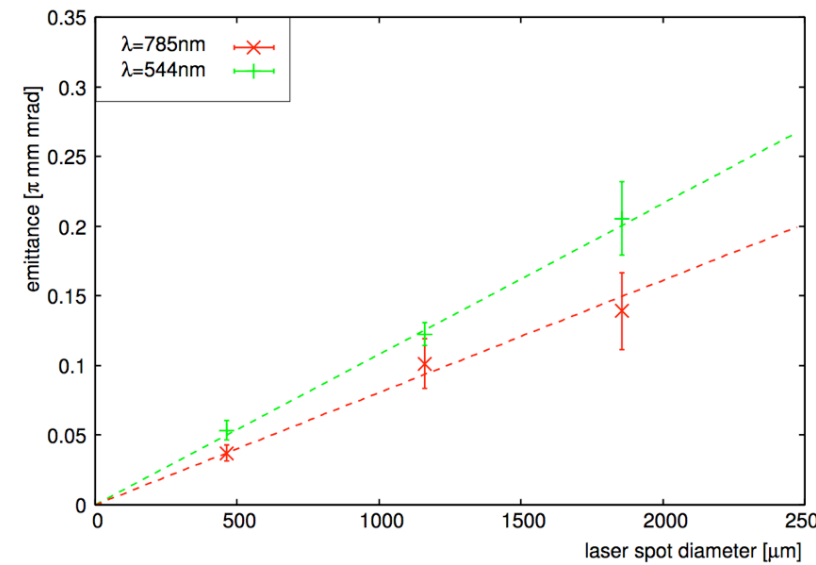
入射部のエミッタンス

- 3つの測定の結果。
- 水平垂直はあまり意味無し。とにかく、これらをひっく
るめて平均すると、規格化エミッタンスは $0.07\mu\text{m}$ (誤差
+-10%)。
- 普通にカソードの性能そのままのビームが出せている。



カソードのエミッタンス

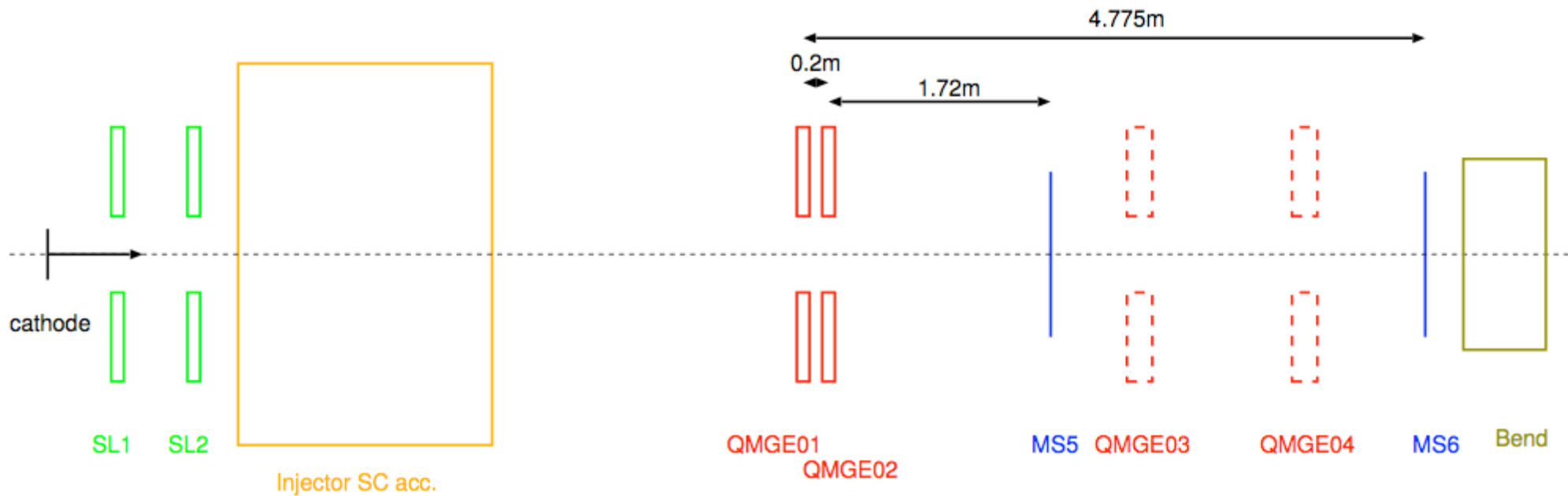
$$\epsilon_{n \cdot rms} = \frac{D}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\langle E_{k_x} \rangle}{m_0 c^2}}$$



200kV電子銃での測定

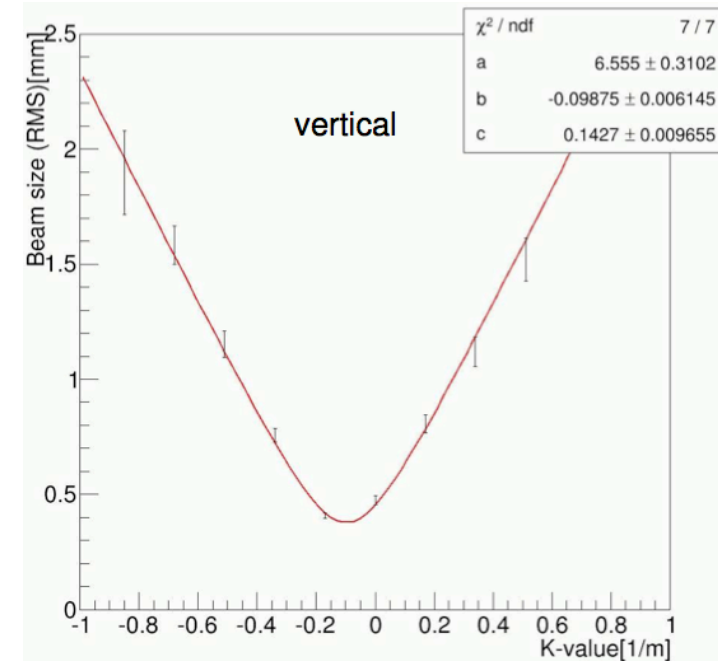
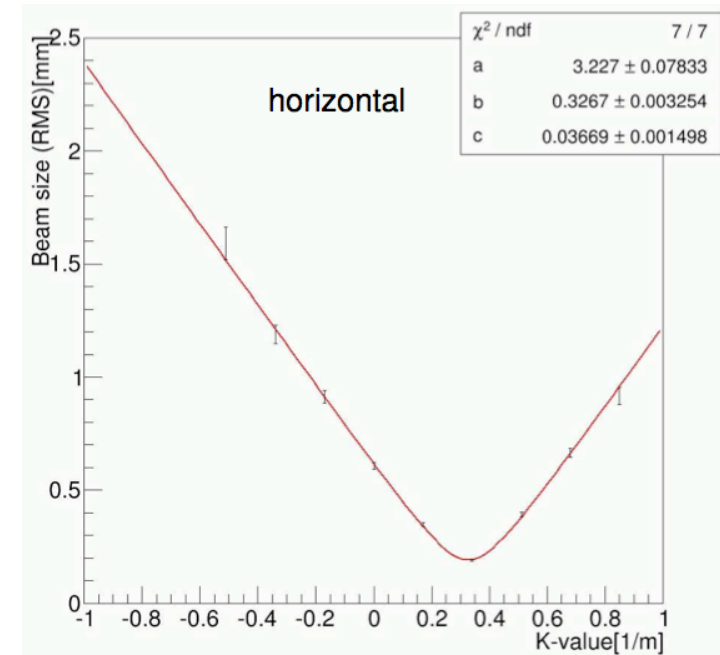
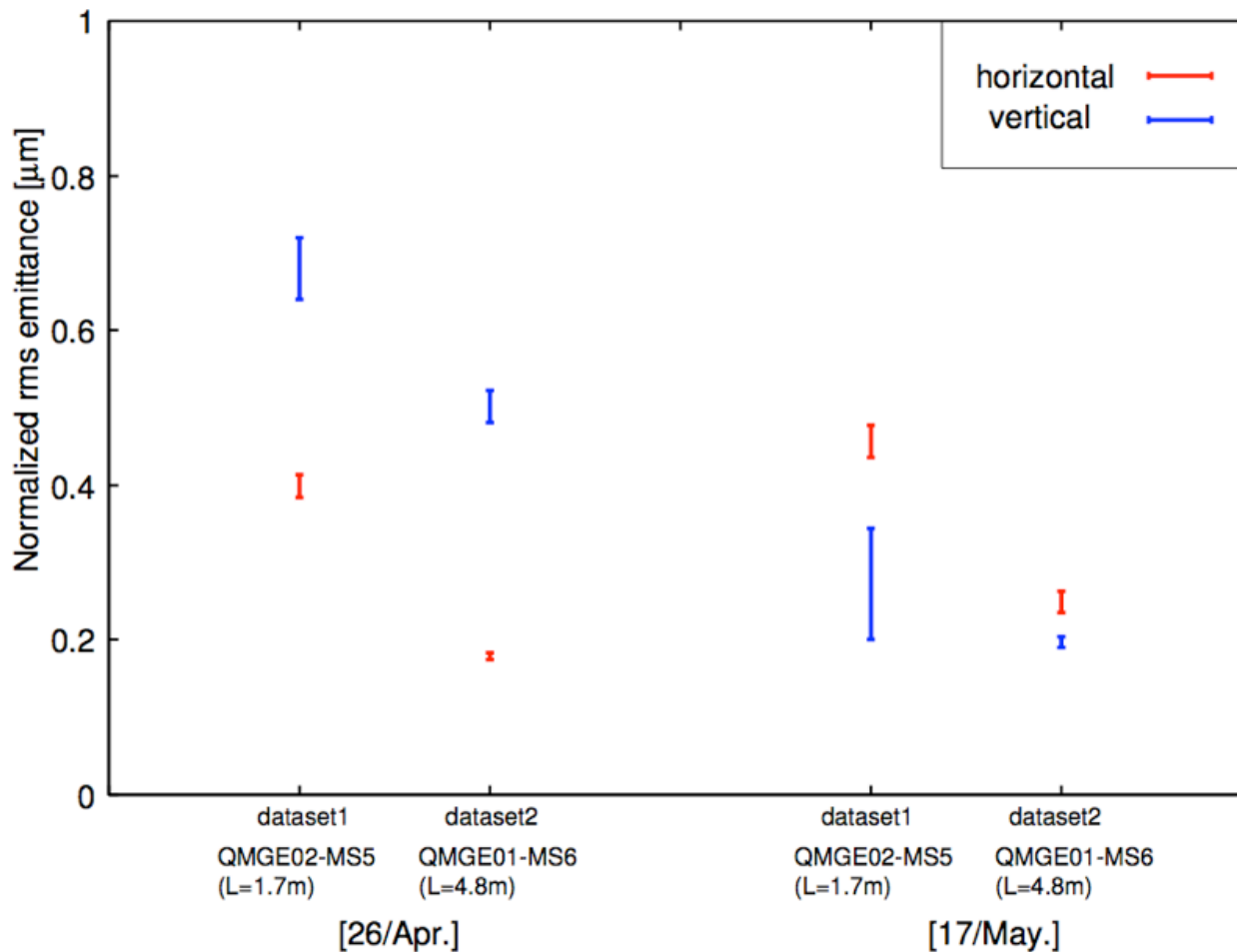
診断部のエミッタンス測定

- はじめは(低電荷のとき)、Qスキャンで測定した。
- 解析方法などソレノイドスキャンと同じ。
- (規格化エミッタンスは変わらないが)加速によってエミッタンスが小さくなる。
 - スクリーンモニタの分解能以下まで絞れてしまうので、できるだけ長い距離で緩やかに絞る。
 - QMGE01をスキャンし、MS6で測定。



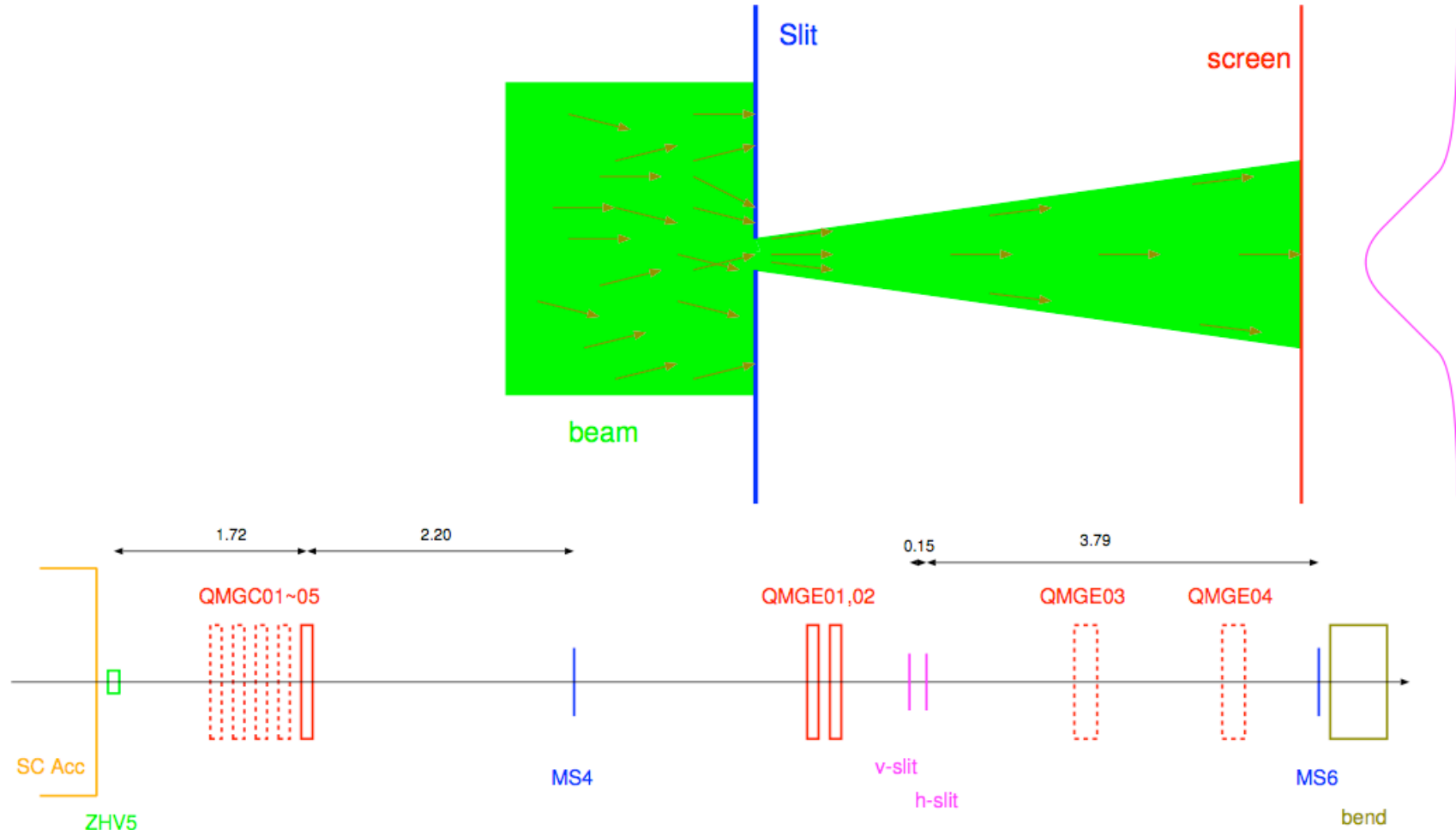
診断部のエミッタンス

- Qスキャン、低電荷時
- 加速空洞における軌道調整がエミッタンスに影響する。
- 加速空洞のBBAを行い、それなりに調整した結果、 $0.25\mu\text{m}$ 以下になった。
 - シミュレーションでは $0.1\mu\text{m}$ まで行くとのこと
 - (ただし、完全に3空洞の中心に軌道を合わせる事は出来ない)



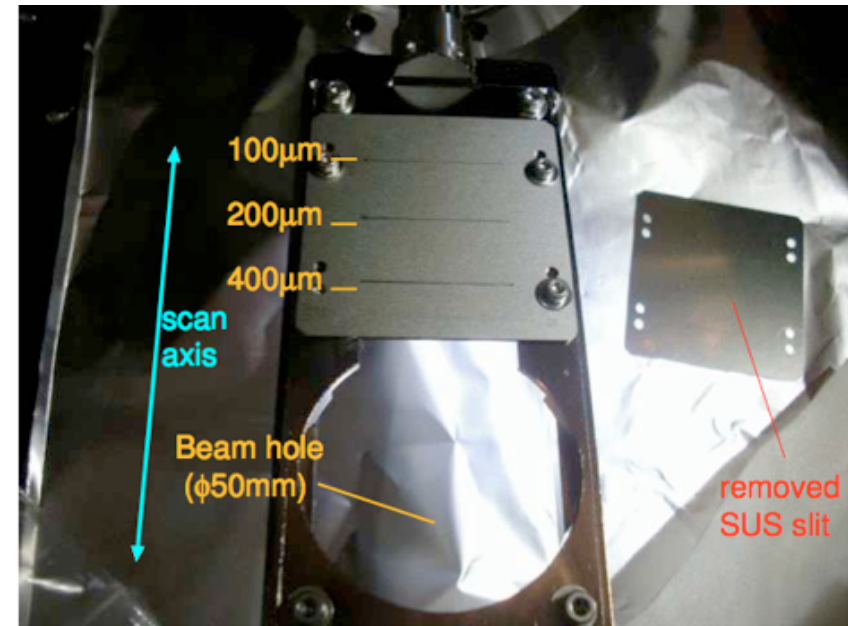
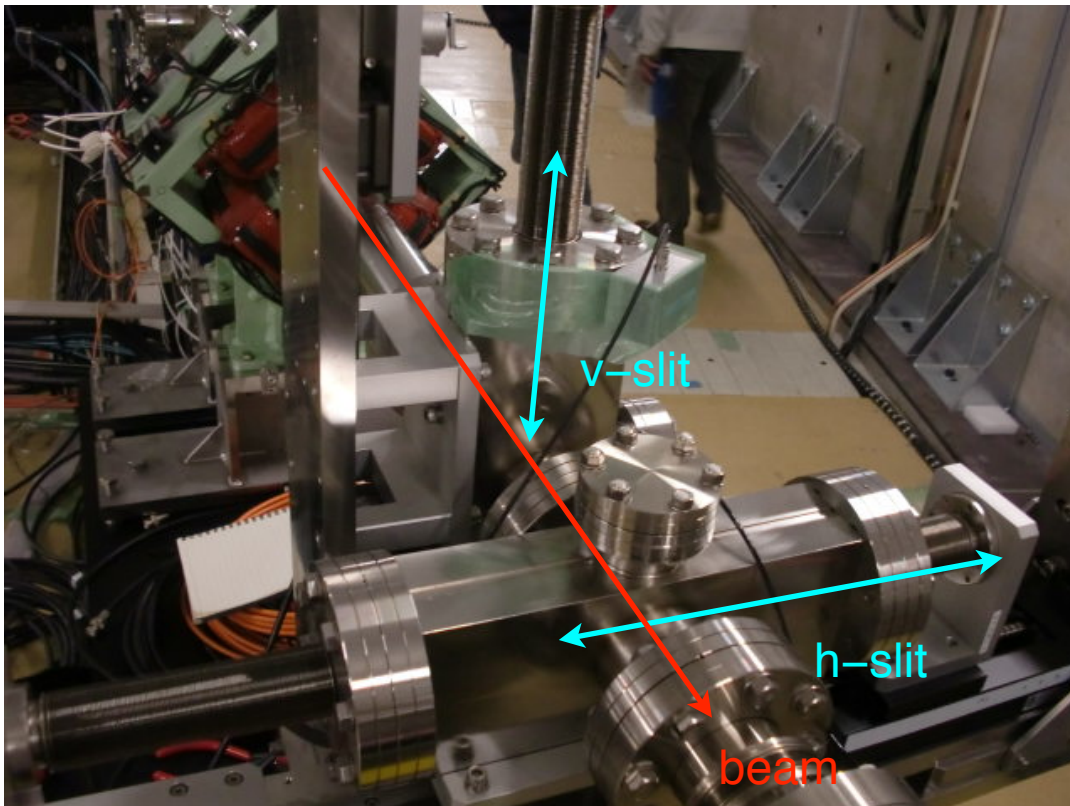
エミッタンス測定(スリットスキャン)

- バンチ電荷が高いとき、空間電荷の発散力が影響してしまう。長い距離をとばすQスキャンでは苦手。
- 高バンチ電荷のときのエミッタンス測定のために、スリットスキャンシステムを用意した。
- スリット以降は電荷が小さいので、長い距離とばしても空間電荷の影響が小さい。
- 原理
 - スリットでビームの一部を切り取る。(位置をきめる)
 - 距離を飛ばしたあとの拡がり方を測定する。(角度分布)
 - 位置と角度のマップがとれるので、位相空間分布が得られる。



スリットスキヤナ

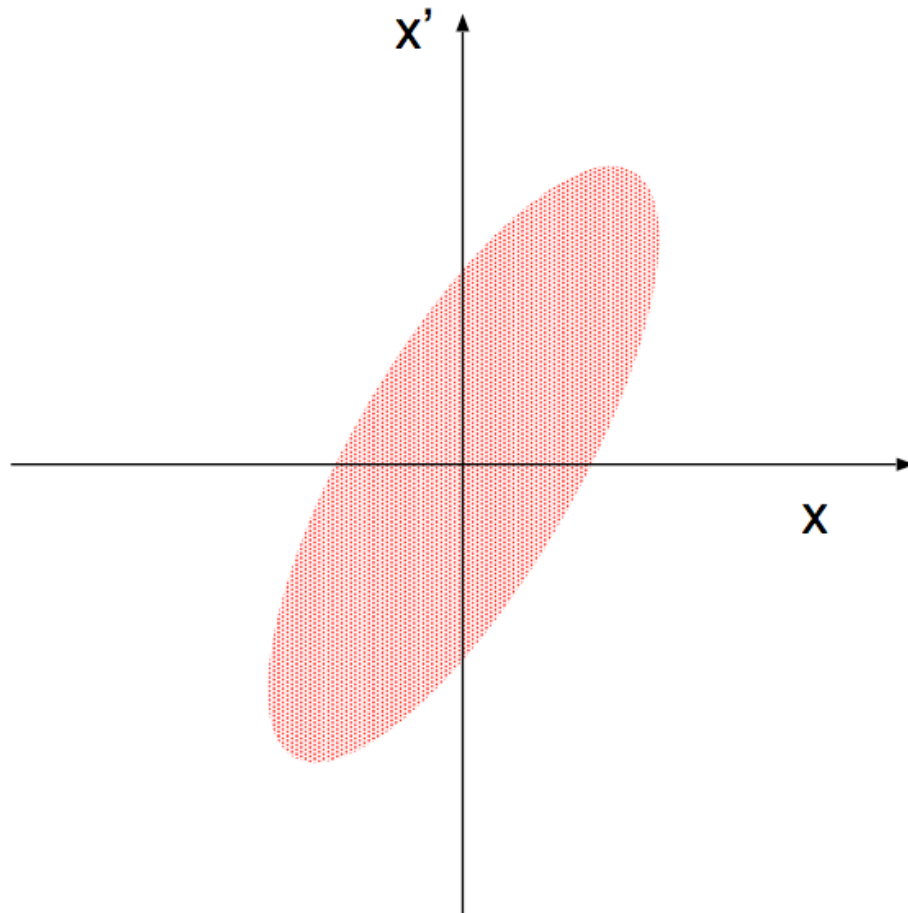
- 垂直、水平それぞれにスキヤナチェンバがある。
- ダブルベローズ機構で精密に動くステッピングモータ式
- 厚み1mmのタングステン板に、ワイヤ放電でスリット状の穴を加工
- 設置前に顕微鏡で確認したが、十分良く出来ている。
- 100,200,400 μm の3つのスリットがあるが、基本100 μm スリットしか使っていない。



顕微鏡で確認

スリットスキヤンの解析

- 位相平面の強度分布 $I(x, x')$ を測定する。
- x をスキャンしながら、各 x にたいして $I(x')$ を測定する。
 - $I(x')$ はガウス型とし、フィットによって関数を決めた。フィットの誤差により誤差の評価をしている。
- $I(x, x')$ が得られれば、あとは定義に従ってエミッタンス ϵ を計算する。



$$\epsilon = \sqrt{\bar{x}^2 \bar{x}'^2 - (\overline{xx'})^2}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{x, x'} I(x, x') \cdot x}{\sum_{x, x'} I(x, x')}$$

$$\bar{x}' = \frac{\sum_{x, x'} I(x, x') \cdot x'}{\sum_{x, x'} I(x, x')}$$

$$\bar{x}^2 = \frac{\sum_{x, x'} I(x, x') \cdot (x - \bar{x})^2}{\sum_{x, x'} I(x, x')}$$

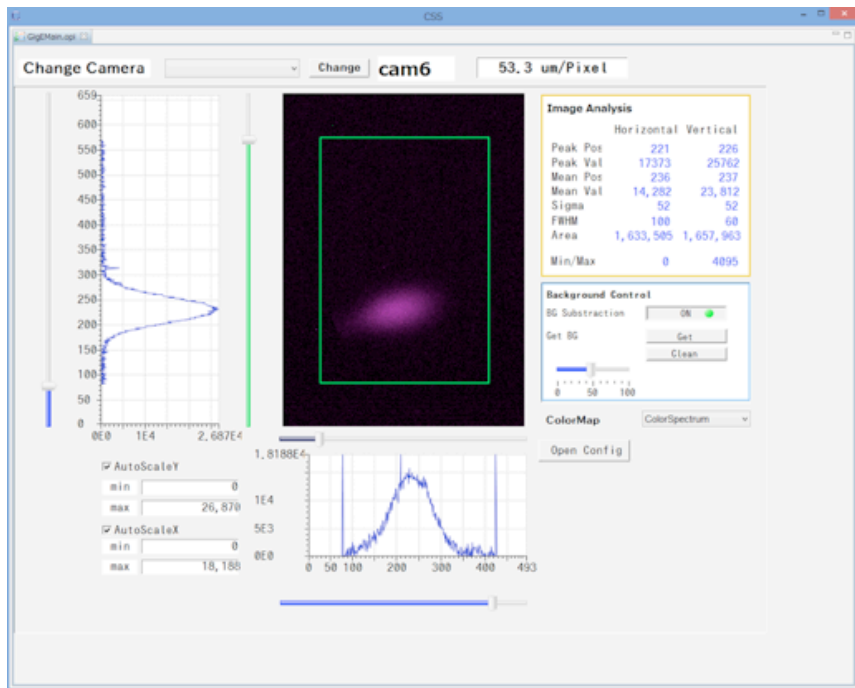
$$\bar{x}'^2 = \frac{\sum_{x, x'} I(x, x') \cdot (x' - \bar{x}')^2}{\sum_{x, x'} I(x, x')}$$

$$\overline{xx'} = \frac{\sum_{x, x'} I(x, x') \cdot (x - \bar{x})(x' - \bar{x}')}{\sum_{x, x'} I(x, x')}$$

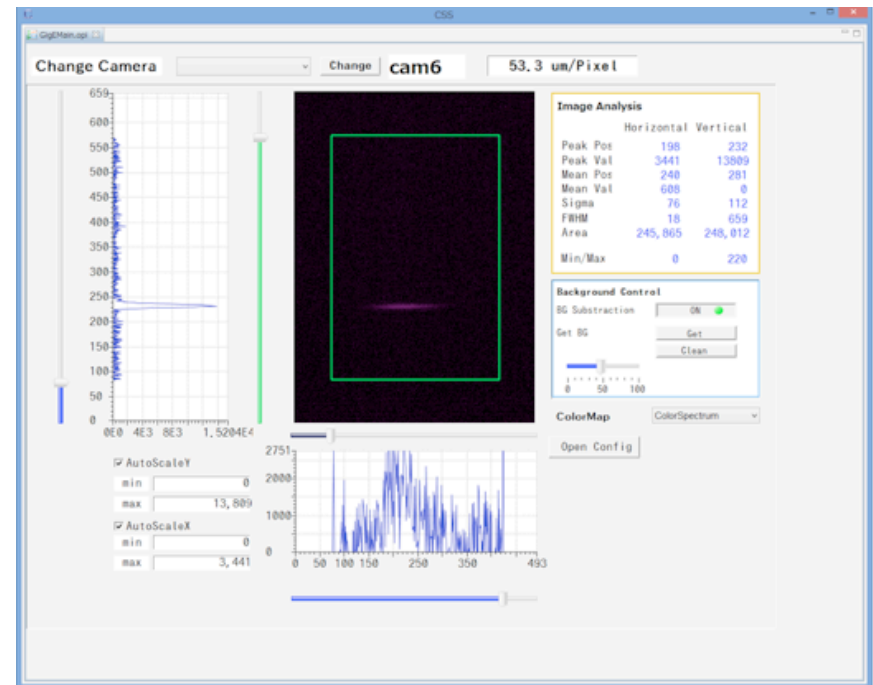
測定例

- スクリーンモニタの分解能は、 $72\mu\text{m}$ (水平)および $33\mu\text{m}$ (垂直)と評価している。(斜め45度の配置)
- MS6においてこれより十分大きくないと測定が信用できない。 $135\mu\text{m}$ 以上になるようにしている。
- ($100\mu\text{m}$ で切り取られたビームのRMSサイズは $29\mu\text{m}$ 。スリットのサイズは無視できる。)
- 手順
 - ビームをMS6で確認したうえで、スリットを挿入
 - $100\mu\text{m}$ のスリットを用いて、全体を20ステップ程度でスキャン。各ステップでMS6でサイズを測定。

スリット無し

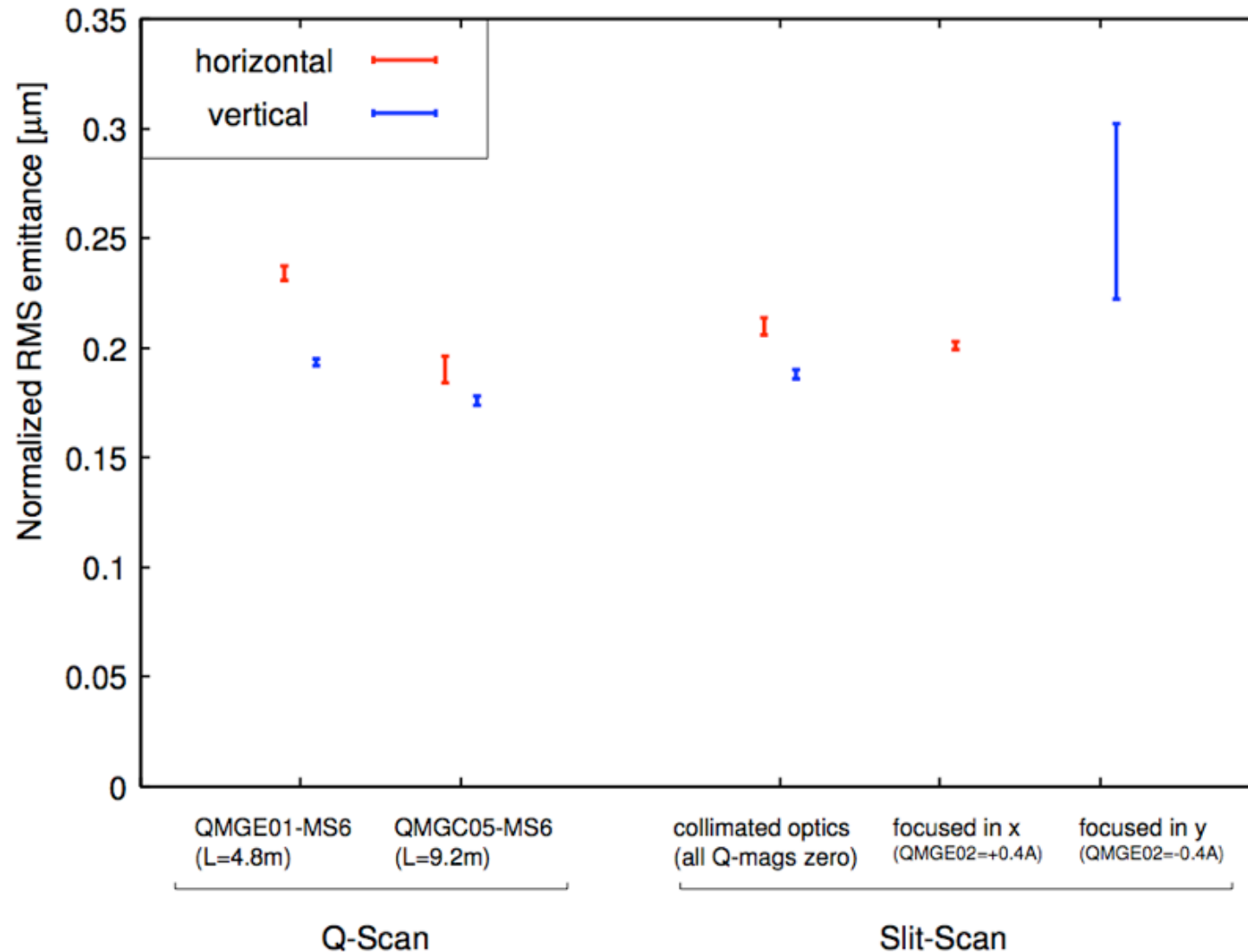


100 μm 幅スリット挿入



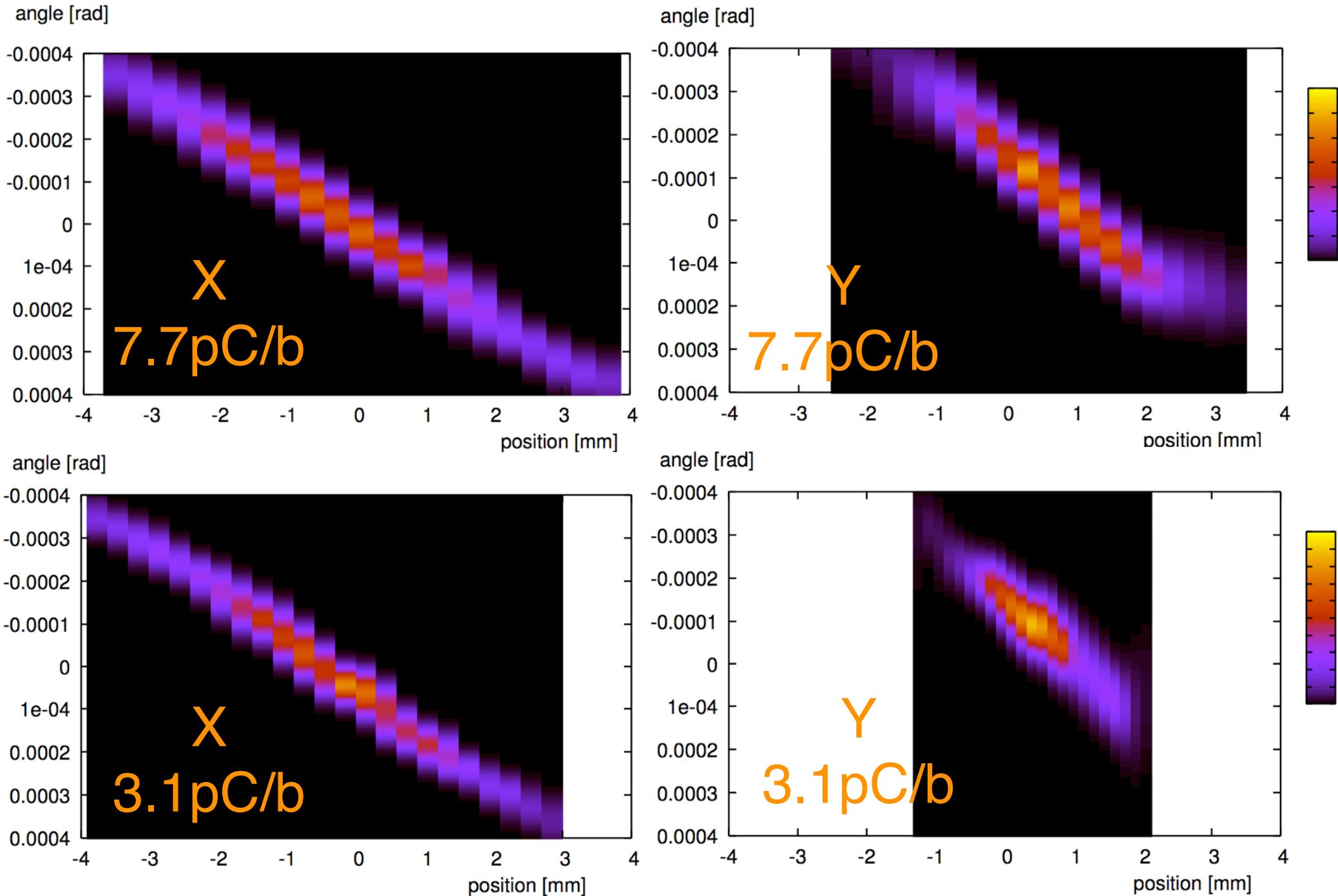
Qスキャンとスリットスキャンの比較

- 確認のため、連続して2つの方法でエミッタンス測定し、比較した。低バンチ電荷時。
- 良く一致している。
- スリットスキャンについては、ビームオプティクスを変えての測定も行い、結果が変化していないこともわかる。
- 低電荷の時、規格化エミッタンス $0.2\mu\text{m}$



エミッタンス測定例

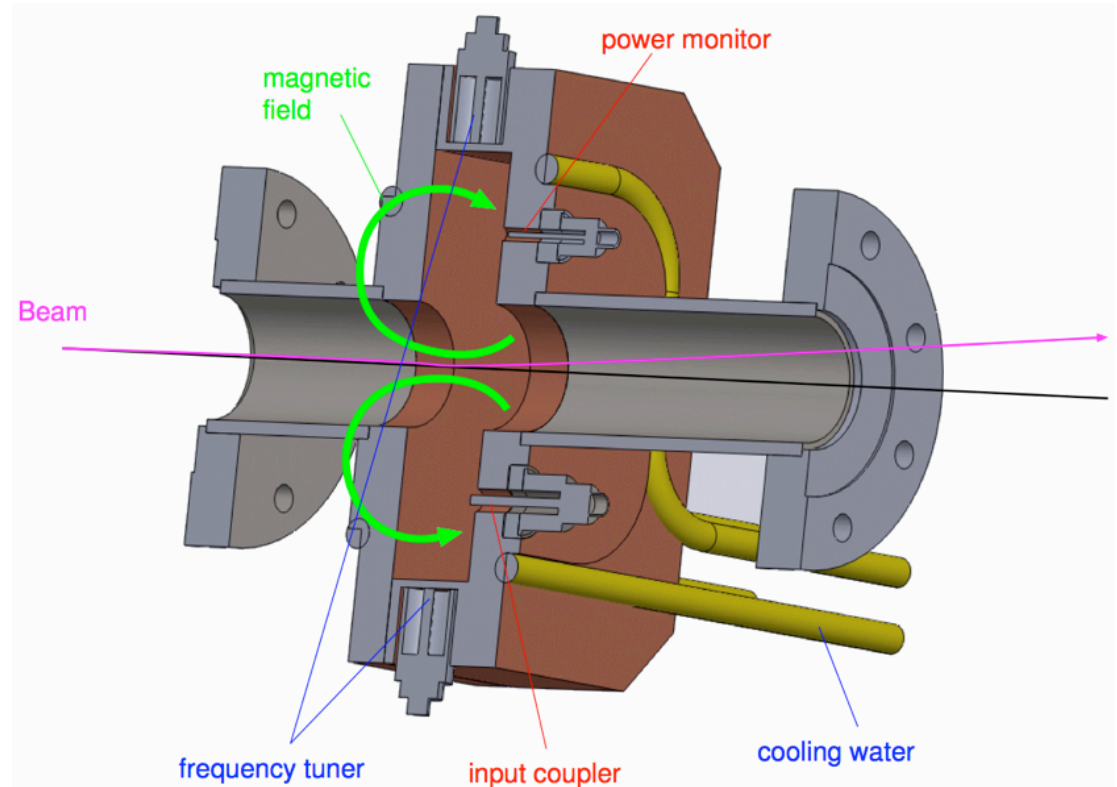
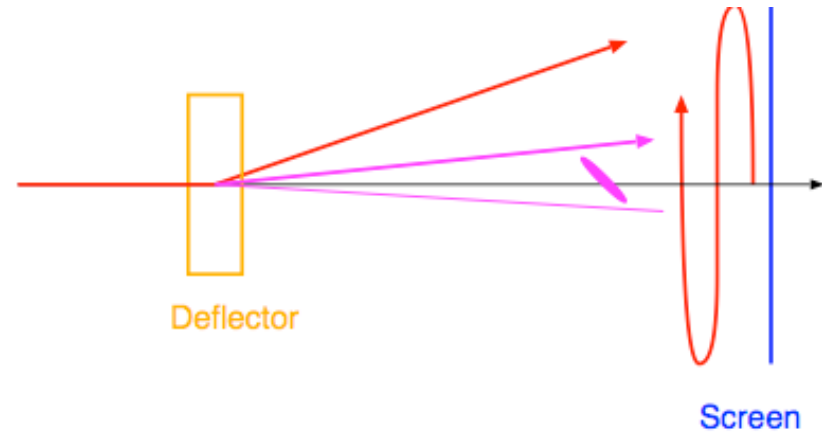
- 高バンチ電荷時。6/26の測定、レーザー3ps、バンチャー50kV。



バンチ長の測定

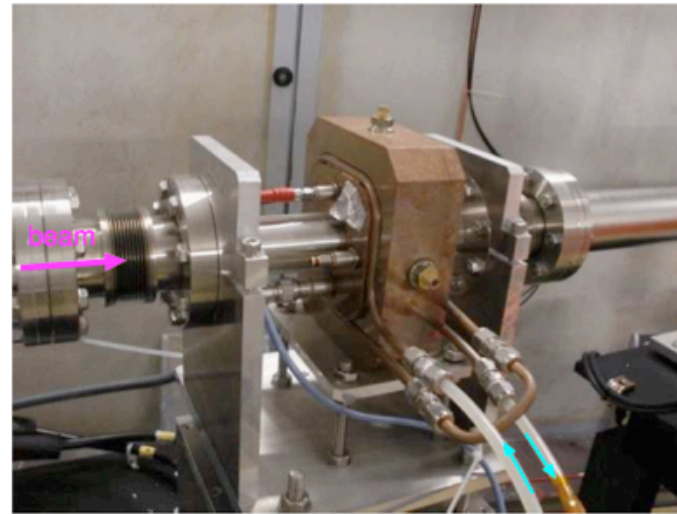
バンチ長の測定

- 偏向空洞システム：RF空洞内の時間変化する磁場でビーム軌道を横方向に挿引し、時間軸をスクリーンでの位置に射影する。
- 電子銃の試験で使用していた偏向空洞をもちいる。
 - 2.6GHz、ダイポールモード
 - Q-loadedは7000 (時定数 $0.4\mu\text{s}$)
- 今回はエネルギーが5MeVなので、より大きなキックが必要。
 - パルスアンプに変更した。
 - 間にQマグネットを設置。
 - 距離を大きく。
 - ただし、距離を大きくするとビームが絞れないので、思った程は得しない。

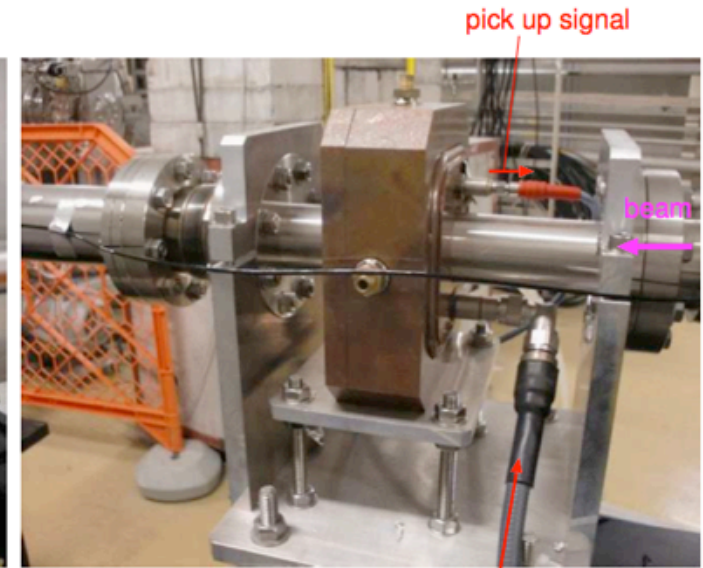


偏向空洞の設置状況

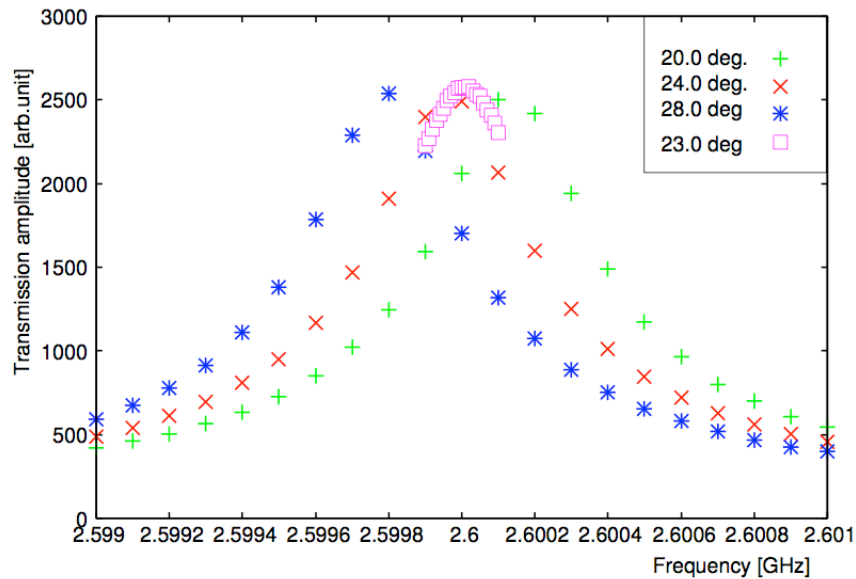
- 垂直方向にキックする向き。
- 架台の下に、アンプとチラーが設置されている。
- 周波数調整は、チラーで。



cooling water



Power input



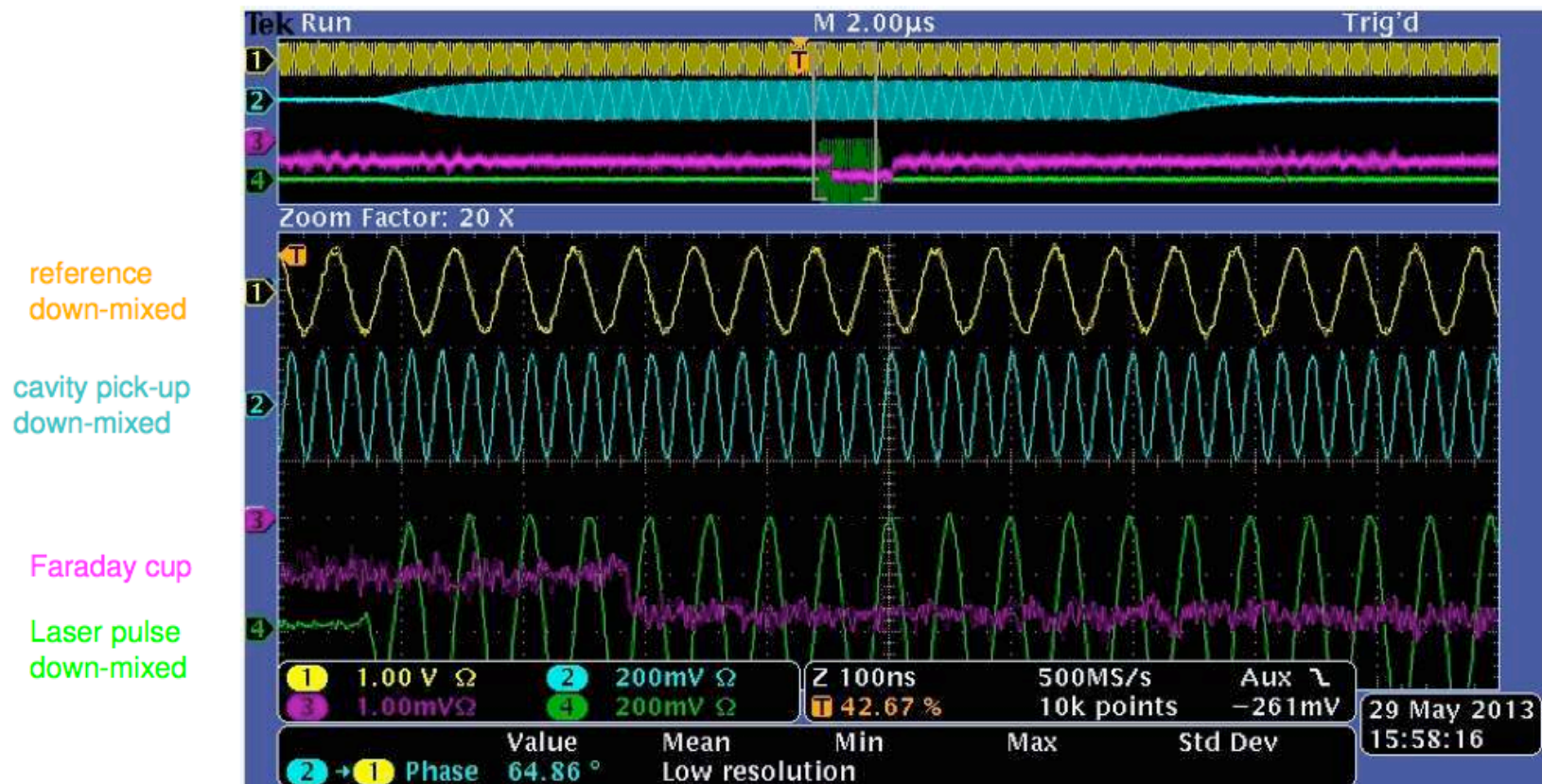
chiller



RF amplifier

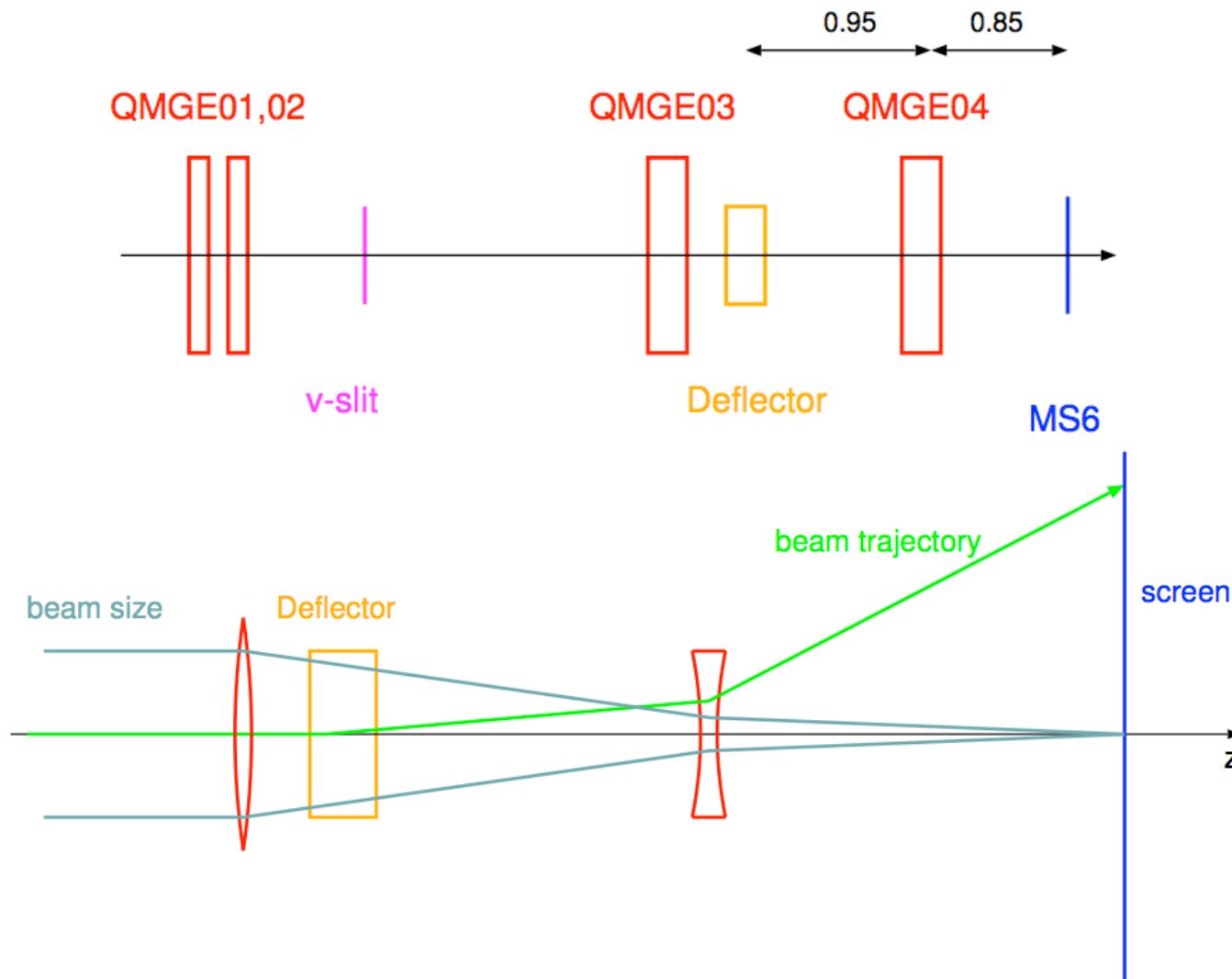
偏向空洞の動作状況

- ビームのプリトリガで、パルスアンプをオンにする(パルス幅 $10\mu\text{s}$)。
- 数 μs で空洞は定常状態になり、マクロパルス幅 $1\mu\text{s}$ のビームが通過する。
- 空洞のモニタと制御
 - ピックアップポートからの 2.6GHz 信号をダウンコンバートしてモニタ。
 - ビームとの位相は、位相シフタで調整
- パワー
 - 入力ピークパワーで 600W (ケーブルのコネクタでのロスとか無視して評価、多分もう少し低い。)
 - デュティは $1/20000$ なので、熱負荷はほとんど無い。



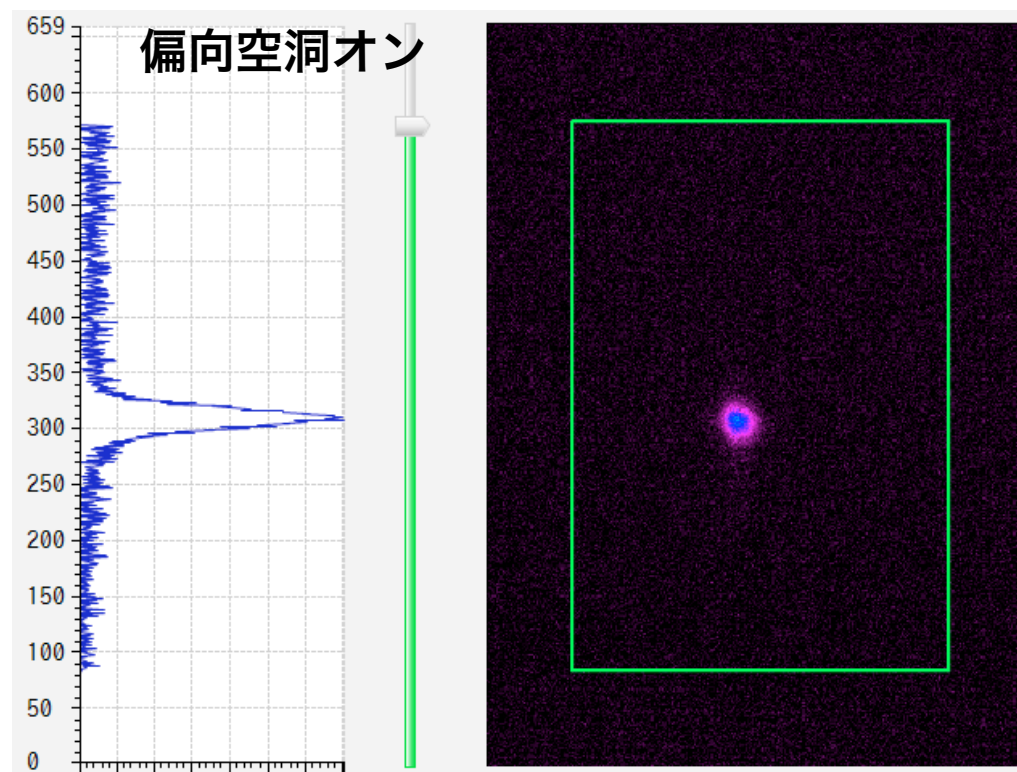
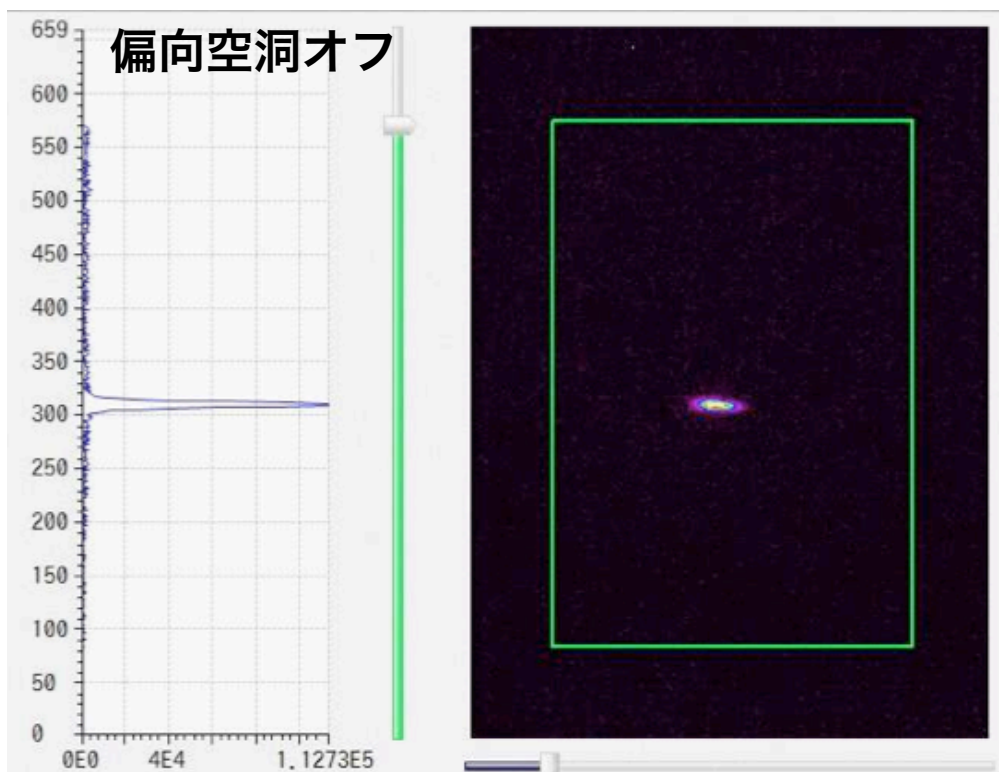
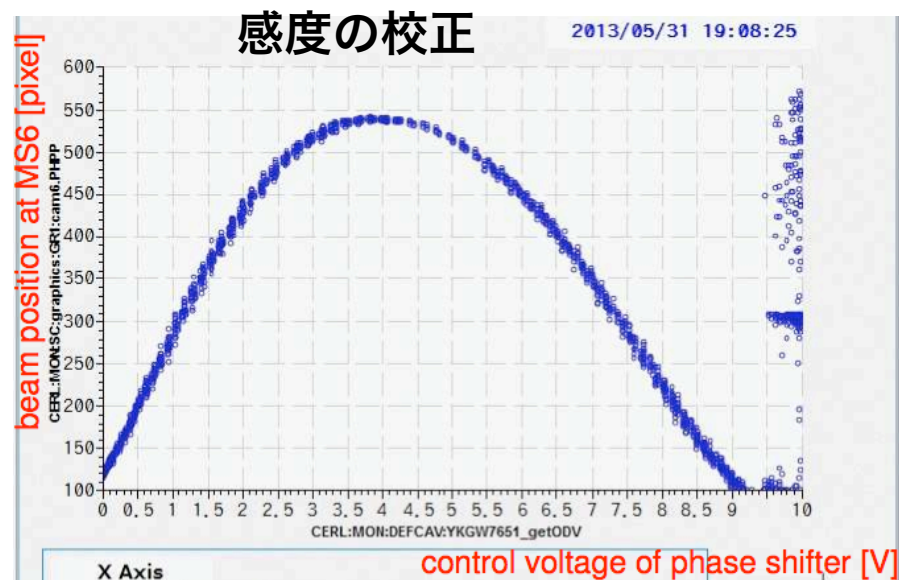
測定時のビーム光学

- 感度を上げるために、発散光学系を用いる。中間のQマグネットQMGE04を使う。
- ドリフトスペースの時と比べて、3倍程度に感度が上がる。
- スクリーンでのスポットサイズが小さい程、分解能が良い。
- 発散光学系でもビームを絞るように、上流のQマグネットで調整する。
- スリットでビームを切り取る作戦も併用する。



測定例

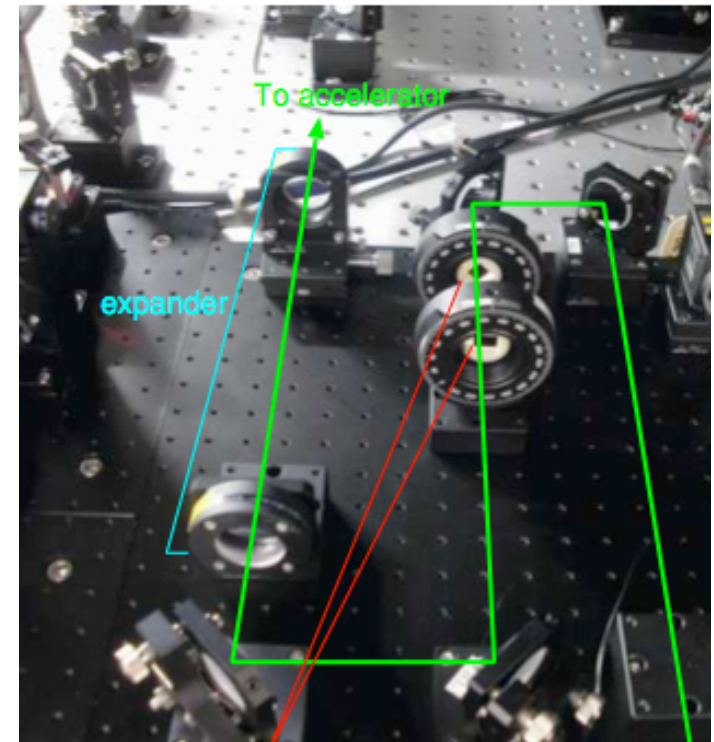
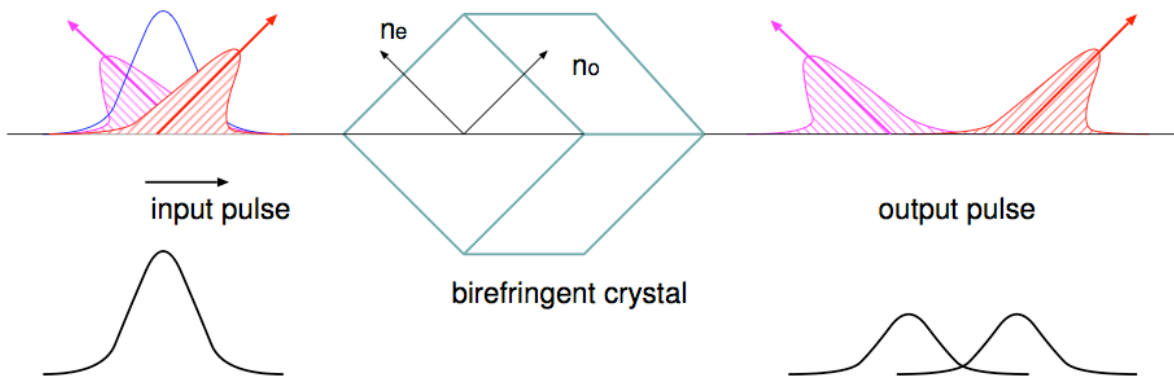
- 測定の手順
 - 発散光学をセットし、ビームを絞るように微調整。
 - 位相を360度スキャンして、キック量の振幅を確認。
 - 位相をノードに合わせる。
 - 偏向空洞のパワーオンオフでサイズを測る。
- 偏向空洞オフ時のサイズから評価し、**分解能は0.7ps。**
数psのバンチ長は十分測定できる。



レーザーパルスの時間構造

レーザーパルス幅

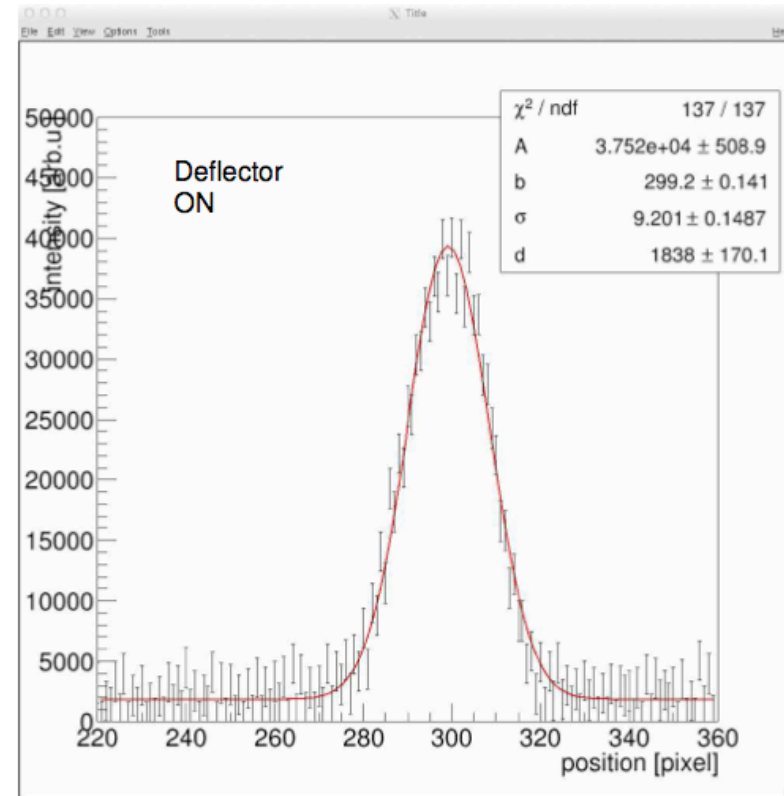
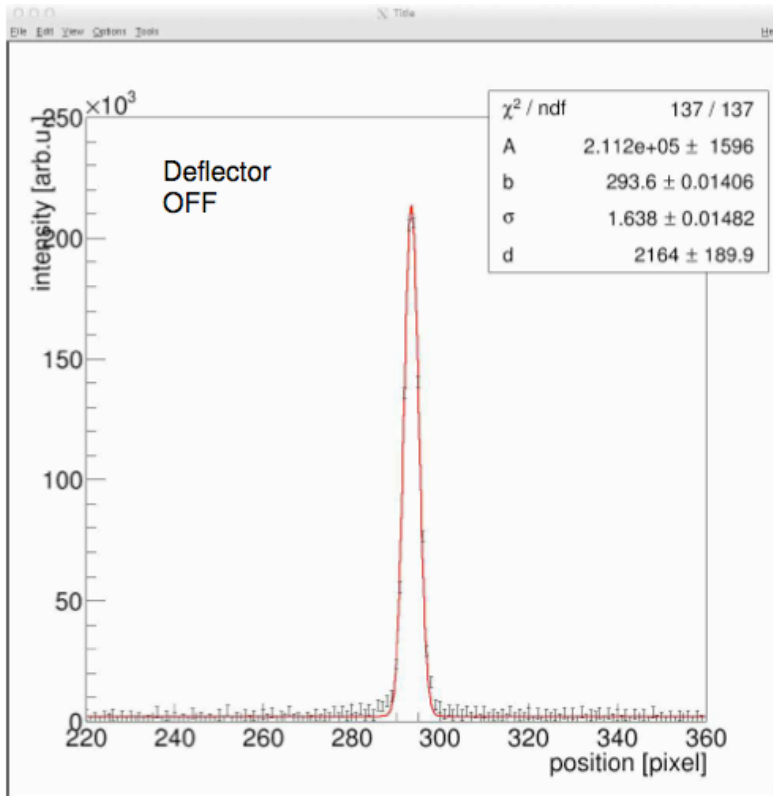
- 電子銃での初期パルス長は、空間電荷効果に大きく影響する。
 - 短パルスよりは、フラットトップ長パルスの時間構造で、電荷密度を低く抑えるのが望ましい。
 - 16psフラットトップを目標。はじめは簡単のため3psガウス型で。
- レーザーシステムのパルス幅
 - 発振器でのパルス構造は、8ps(FWHM)のガウス型
 - これがそのまま増幅されて、線形領域で波長変換すると考えられる。(波長変換で少し短くなるかも。)
 - つまり、基本は3.4ps(RMS)のガウス型。
- フラットパルス化
 - 複屈折結晶を使ったパルススタックの方法。偏光によってパルスを時間方向に分裂させる。
 - YVO4結晶2個(厚み11.6mmと5.8mm)を用いて4分割し、16psフラットになるつもり。



YVO4 crystal

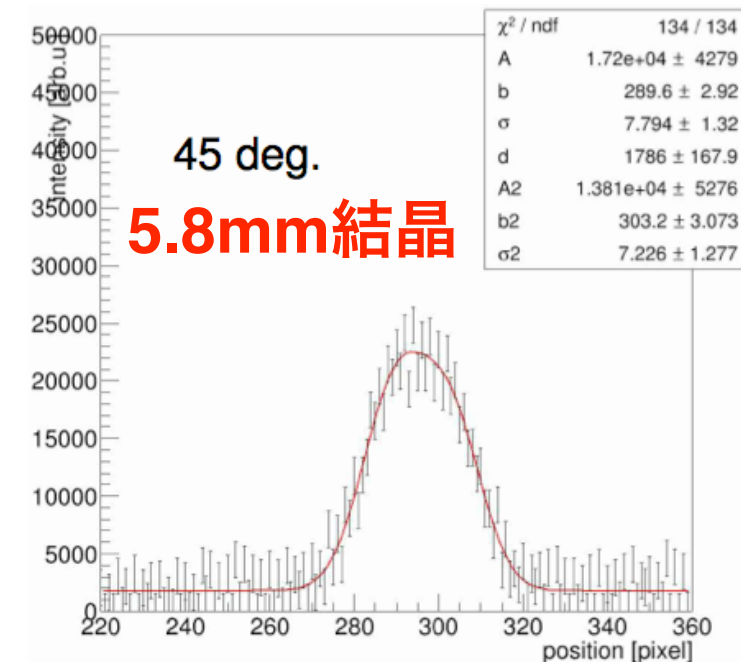
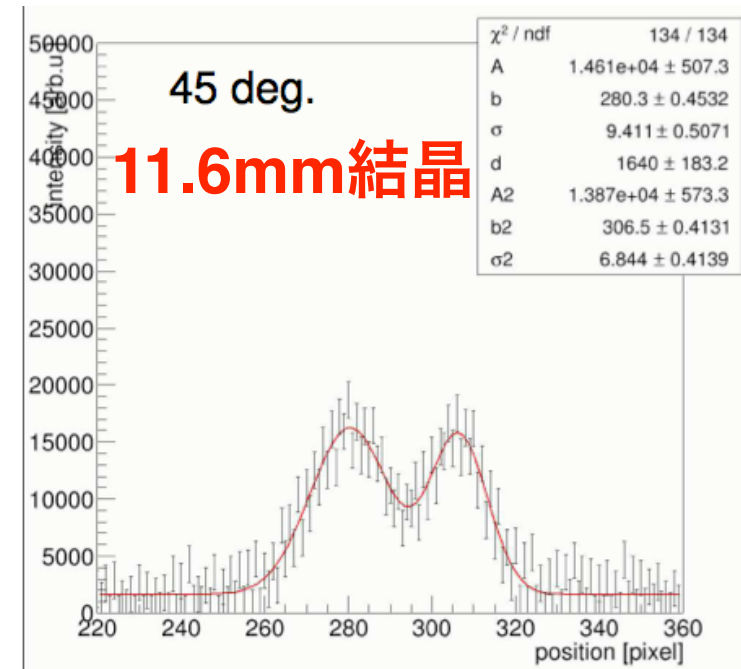
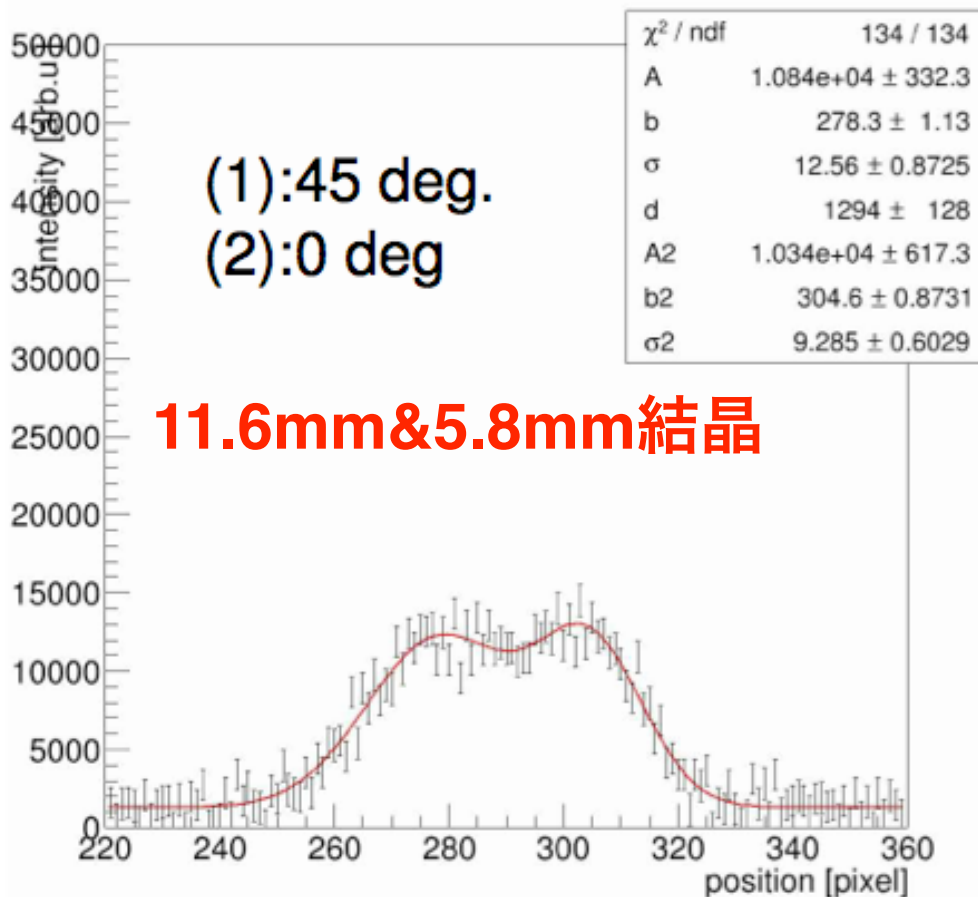
レーザーパルス幅の確認

- 診断部でバンチ長を測定することで、初期パルス幅(レーザーパルス幅)を確認する。
 - ただし、バンチャーオフで、加速空洞がオンクレストの状況で。
 - (6/20に加速空洞の位相調整をする以前は、完全にオンクレストでは無かった。)
- まず、もともとのフラットパルス化をしない場合。
 - 感度校正係数は2.86pixel/ps
 - RMSバンチ長は 3.34 ± 0.05 psと評価された。(予定どおり)



フラットパルス化

- 結晶を1枚入れると2つに分裂する効果を確認
 - 11.6mmだと明らかに分裂
 - 5.8mmだと頭がつぶれた程度
- 11.6mmの結晶と5.8mmの結晶を併用して、4つのパルスが連なってフラットトップになったつもり。
- 15.7ps(FWHM)と評価された。



ビームの測定

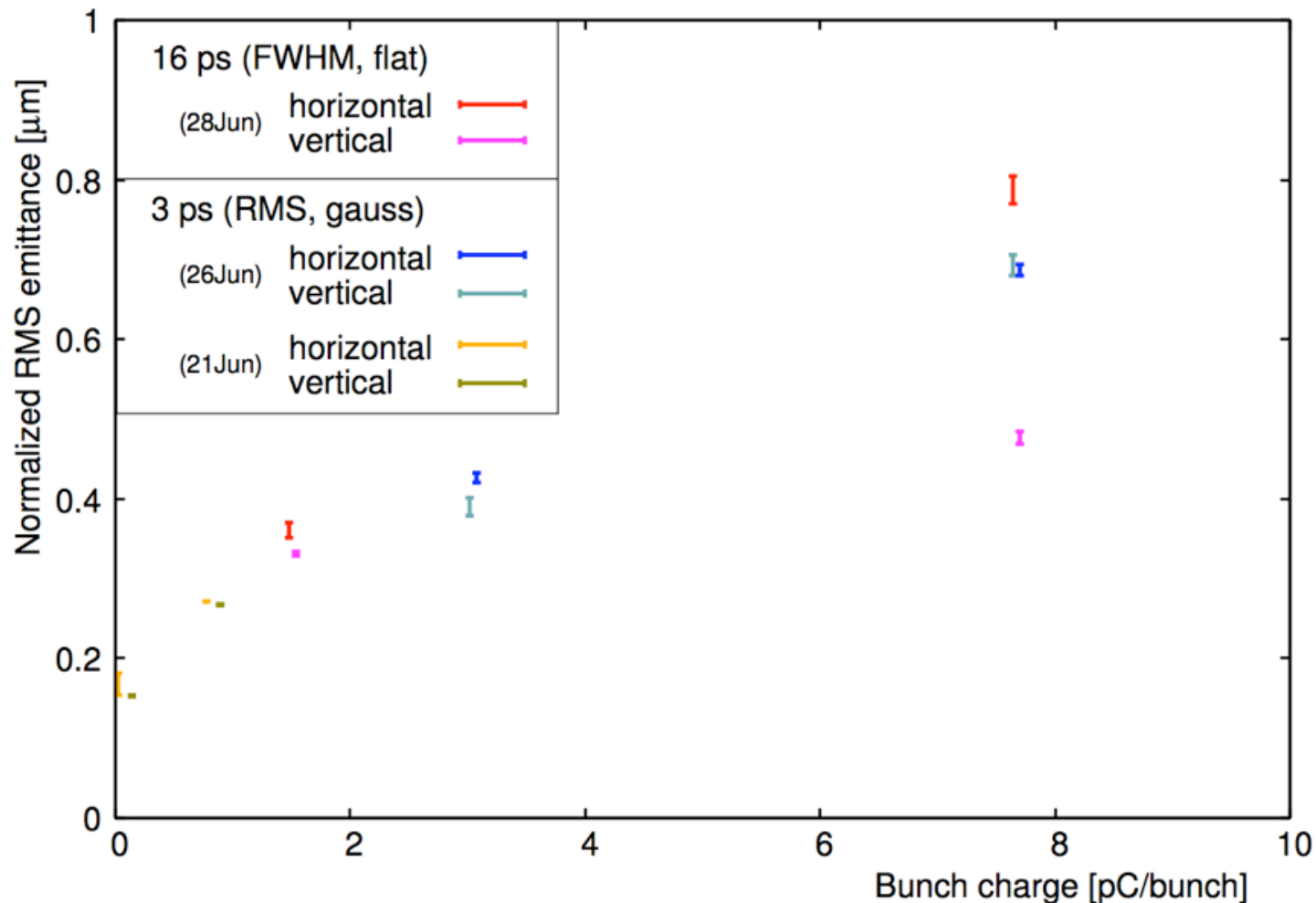
測定したビーム条件

- 以下のあれこれをやったあと、最終的にシステムティックにビームを測定したのは、最終週6/21~28。
 - 測定装置の立ち上げ
 - レーザー増強による高電荷運転
 - 加速空洞の位相調整
 - レーザー時間構造
- Phase-1でひととおりやっておきたかったこと
 - バンチ電荷7.7pC/bunchの条件で、エミッタンス、バンチ長、エネルギー拡がり、を測定した。
 - 一連の測定はバンチャーあり

	日付	バンチ電荷 [pC/b]	レーザー時間幅 [ps]	バンチャー電圧 [kV]	SL1 [A]	SL2 [A]	測定内容
A	6/21	0.02, 0.77	3 (RMS, gauss)	40	7.2, 8.7	3.0	エミッタンス
B	6/26	3.1, 7.7	3 (RMS, gauss)	50	8.3	4.99	エミッタンス
B	6/26	0.03~7.7	3 (RMS, gauss)	50	8.3	4.99	バンチ長
B	6/26	0.03~7.7	3 (RMS, gauss)	50	8.3	4.99	エネルギー拡がり
C	6/27	0.03~7.7	16 (FWHM, flat)	50	8.3	4.99	バンチ長
C	6/27	0.03~7.7	16 (FWHM, flat)	50	8.3	4.99	エネルギー拡がり
D	6/28	1.5,7.7	16 (FWHM, flat)	50	8.3	4.99	エミッタンス

エミッタンスの結果

- 高電荷になるにつれて、プロファイルが悪化している問題がある。が、とにかくエミッタンスを測定した。
- ひとまずの目標である、7.7pC/bunchで規格化エミッタンス $1\mu\text{m}$ 、はクリア。
- やはり、エミッタンスも高電荷になるにつれ悪化している。
 - 空間電荷のシミュレーションでは、7.7pC/bunch程度ではエミッタンスはそんなに変わらないはず。
- レーザーのパルス幅は効いているのかいないのか。空間電荷以外の原因がありそう。
- (バンチャー電圧と依存性がある傾向あり)

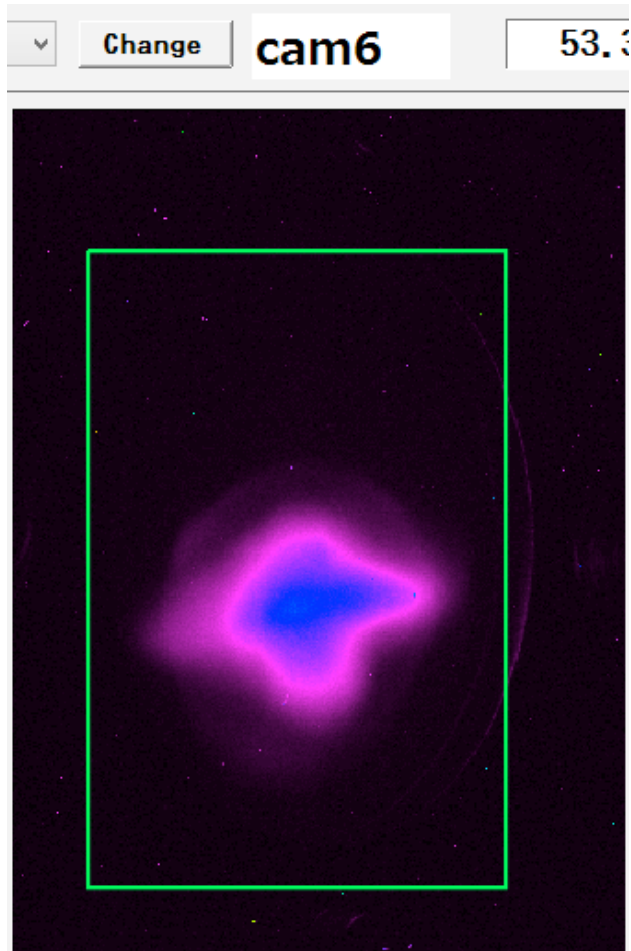


高電荷時のビームプロファイル

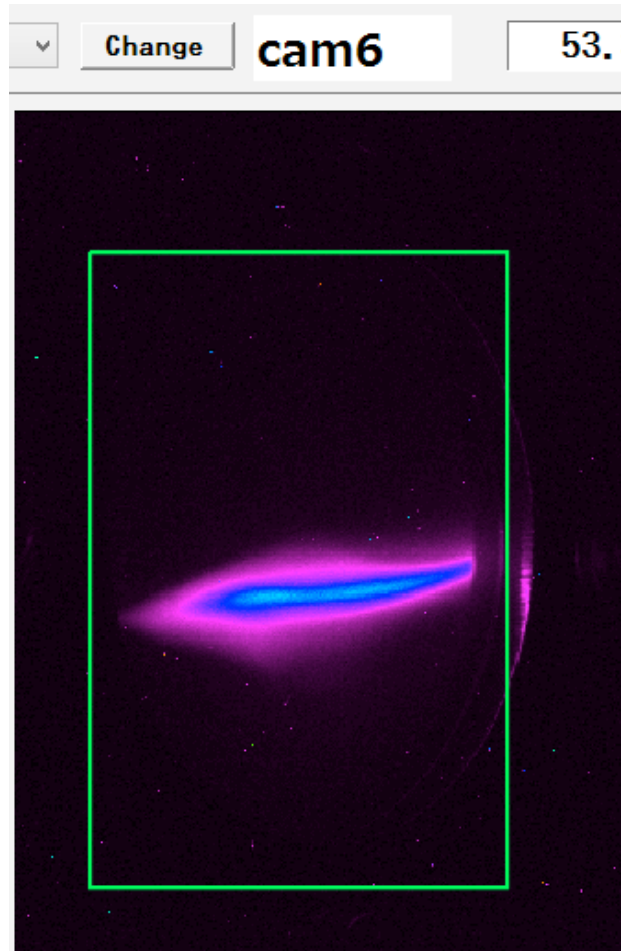
- 高電荷になるにつれて、プロファイルが悪化する。
- 診断部のQマグネットは全てオフなので、真円になるべきところだが、、、
- バンチャー電圧と依存性がある傾向あり
- 本当は、バンチャー電圧を上げたいところだが、プロファイルが崩れてしまう。

エミッタンス測定時の条件

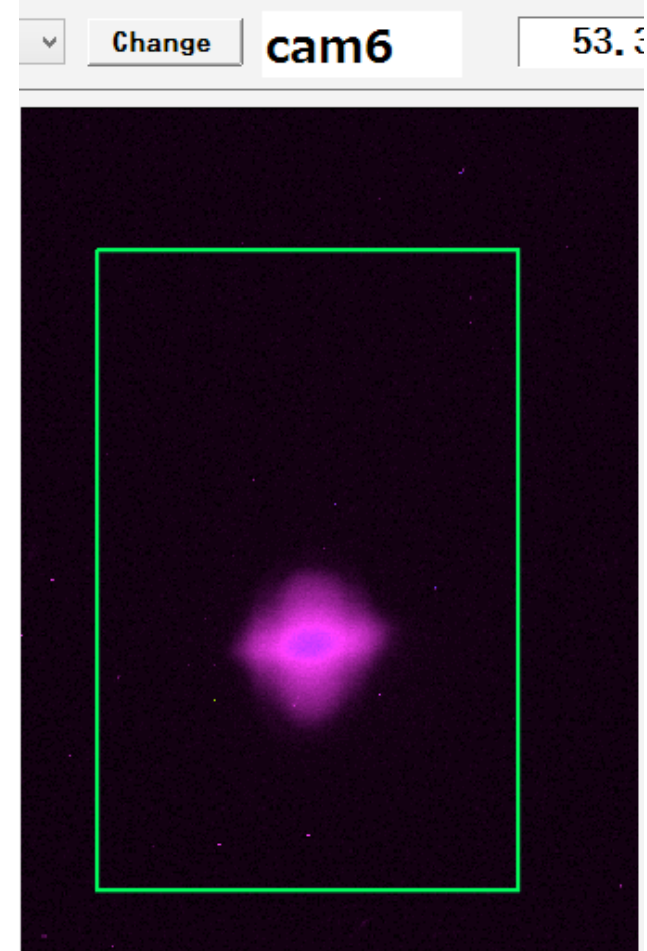
7.7pC/bunch
バンチャー 50kV



7.7pC/bunch
バンチャー 75kV



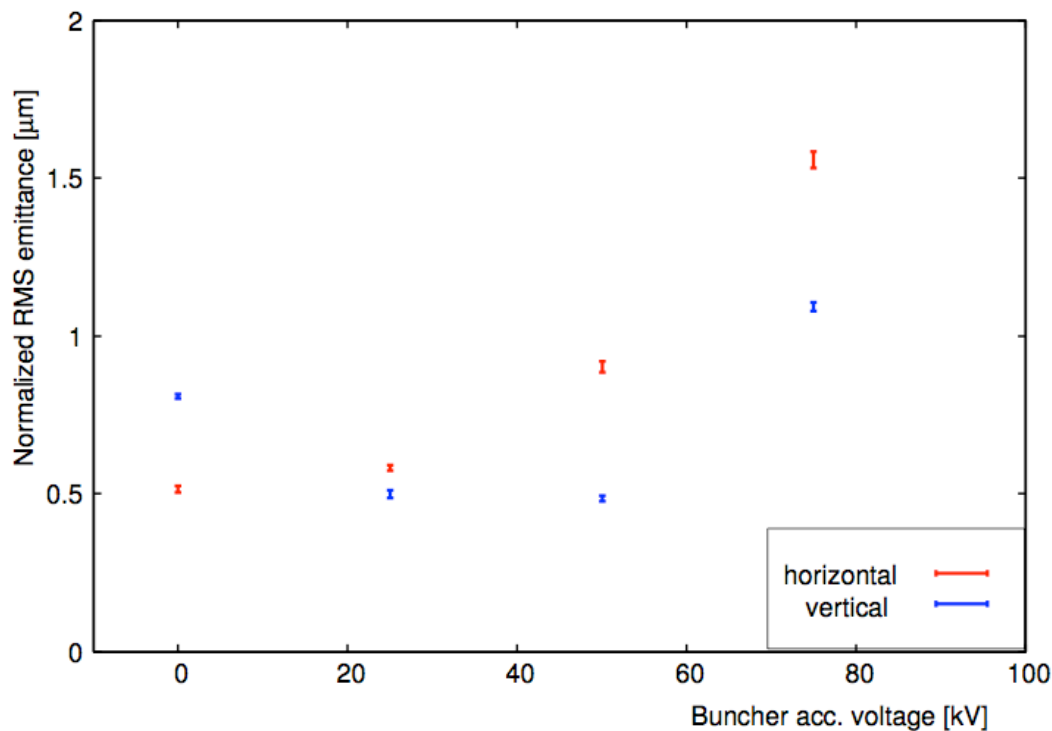
1.5pC/bunch
バンチャー 75kV



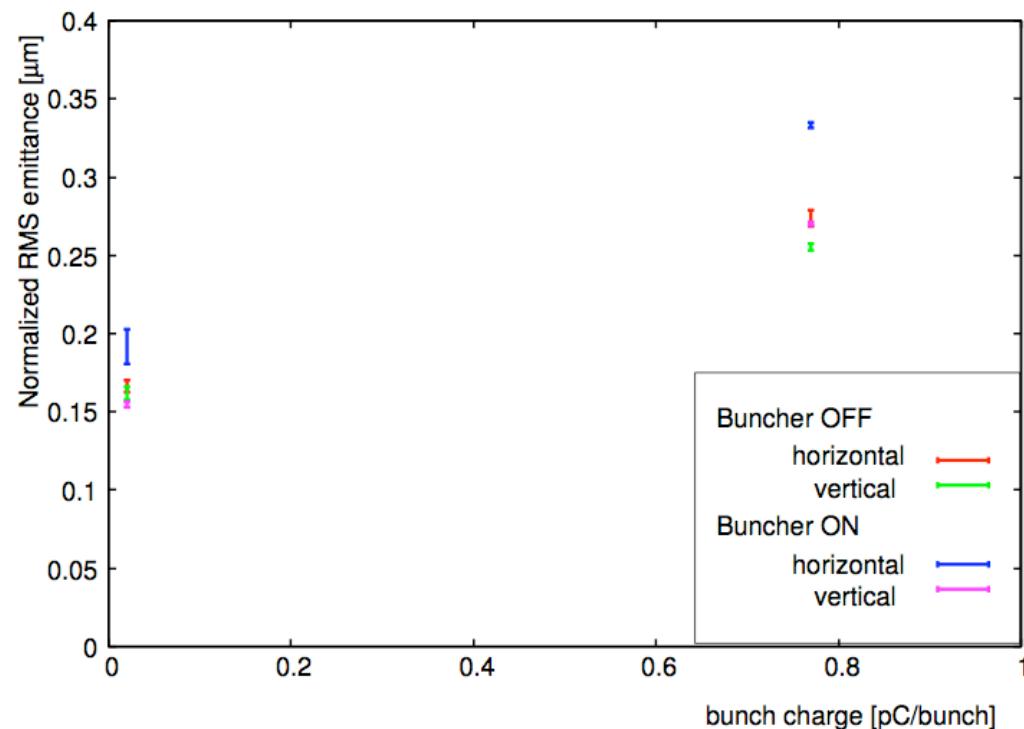
試しにエミッタンス測定

- バンチャー電圧を変えて、エミッタンスを調べてみた。
 - バンチ電荷は7.7pC/bunch, レーザー16ps
 - バンチャー電圧が高くなるほど、エミッタンスが悪化する傾向にある。
 - バンチャー電圧少し低めで **規格化エミッタンス0.6 μ m**
- 低電荷運転時に、バンチャーの有り無しで比較したときは、大きな差は見られなかった。
- 高電荷、かつバンチャー有りで、何か変な事になっているようだ。

7.7pC/bunchで、
バンチャー電圧を変えて測定

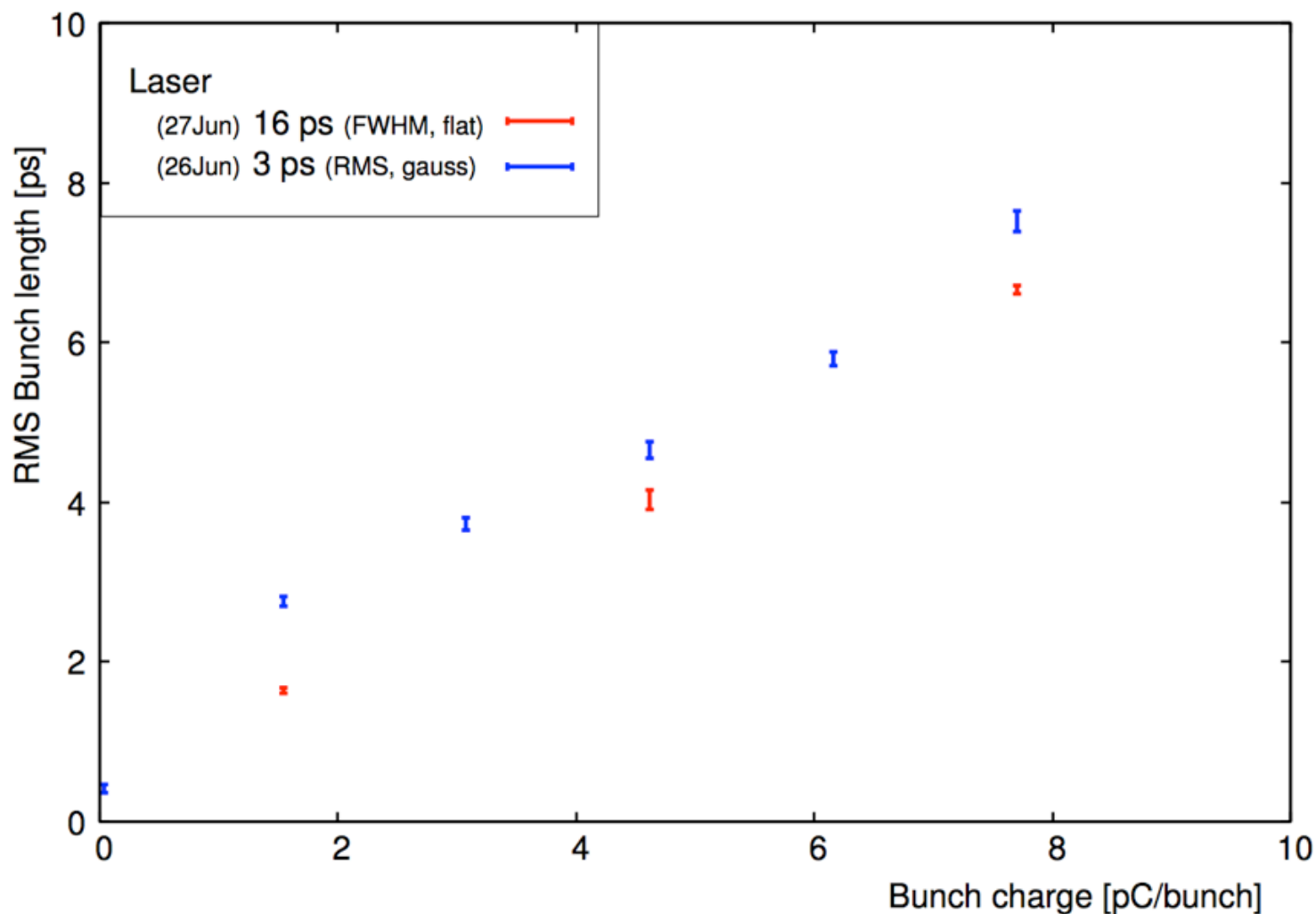


低電荷で、
バンチャーオンオフで測定



バンチ長の結果

- 高電荷になるにつれて、バンチ長が伸びている。
- 初期バンチ長でそれほど変わらない。
 - (短パルス高電荷だと空間電荷ですぐにバンチが伸びてしまうのか)
- 設計では2.1psの予定だが、どうも長い。**7.7pC/bunch**のとき、7ps(RMS)
- バンチャー電圧を変えて試したこともあったが、短くなりそうな感じでは無かった。
(系統的に調べるには時間不足)

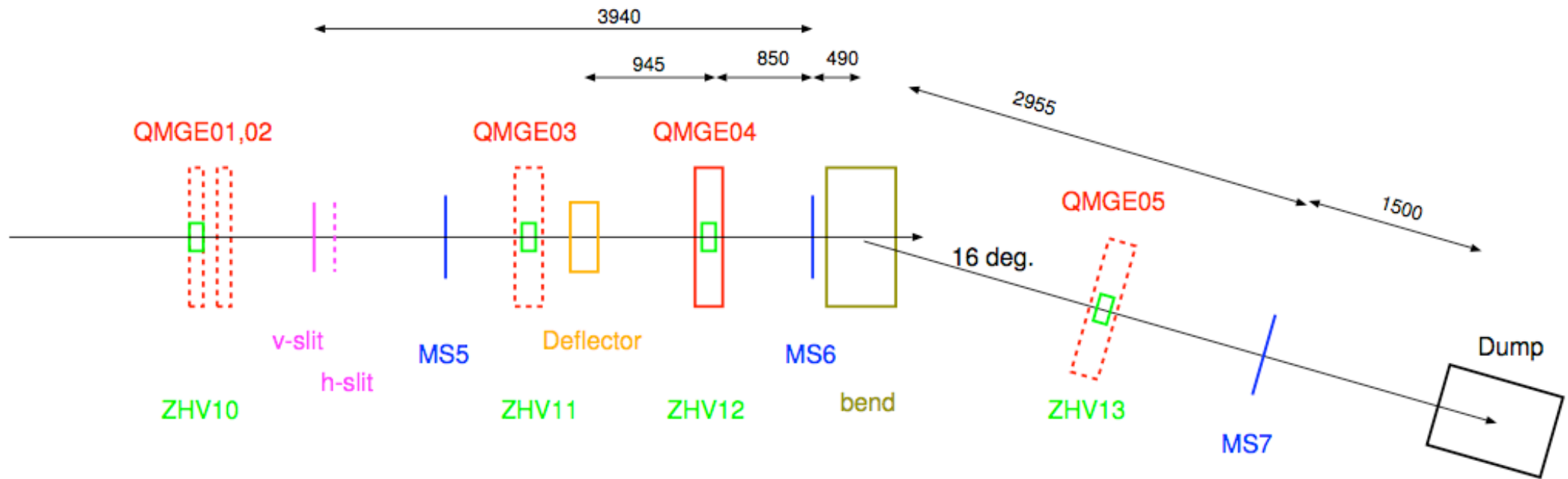


エネルギー拡がりの測定

ダンプラインのセットアップ

- 偏向電磁石で16度まげ、ダンプに向かう。
- 分散は曲げ角と距離で決まる。
- スクリーンMS7では、分散 $\eta=0.825\text{m}$ (ダンプラインのQオフのとき)

$$\eta = L\theta$$

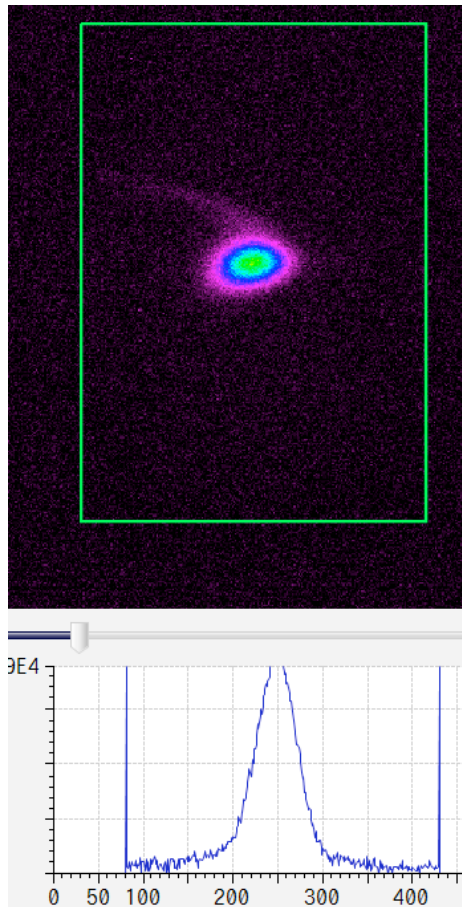


エネルギー測定の設定アップ

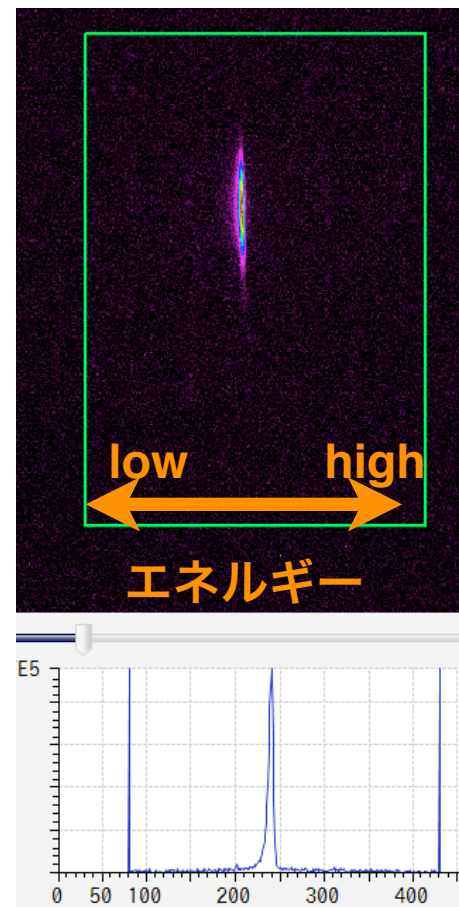
- 偏向電磁石より上流のQマグネット(QMGE04)で収束して、MS7でのベータ関数を絞る条件では、MS7でのサイズはほぼ運動量拡がりになる。
- MS7の画面では、右がエネルギー高い。

$$\sigma = \sqrt{\beta\epsilon + \left(\eta \frac{\sigma_p}{p}\right)^2}$$

QMオフ
主にベータ関数によるサイズ

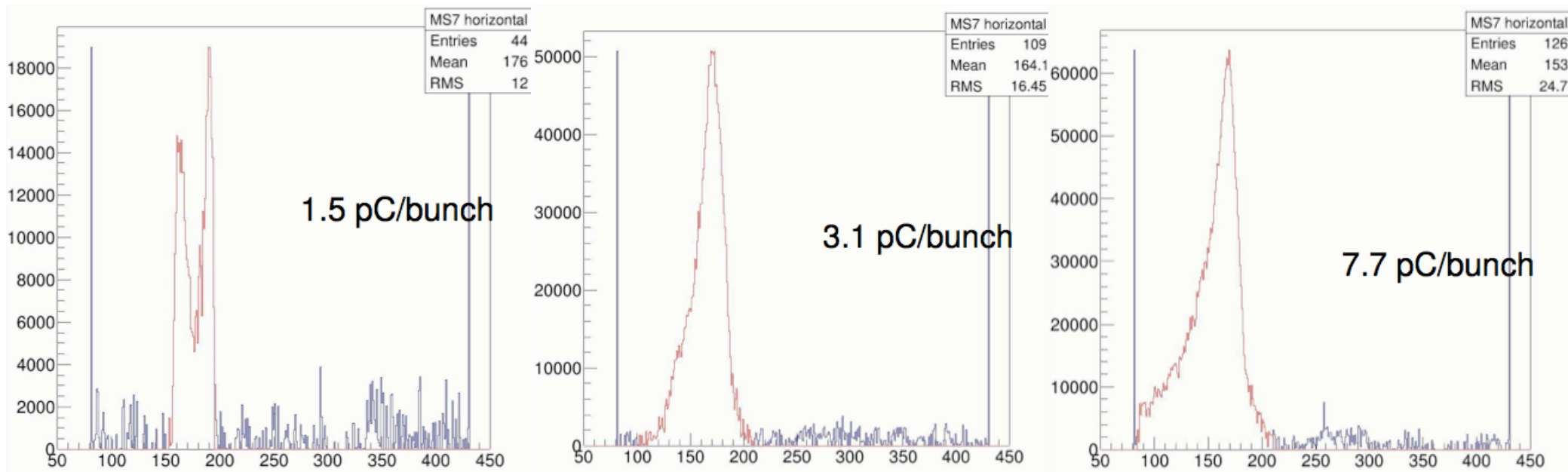


QMGE04で収束
運動量分布測定



エネルギー拡がり測定の例

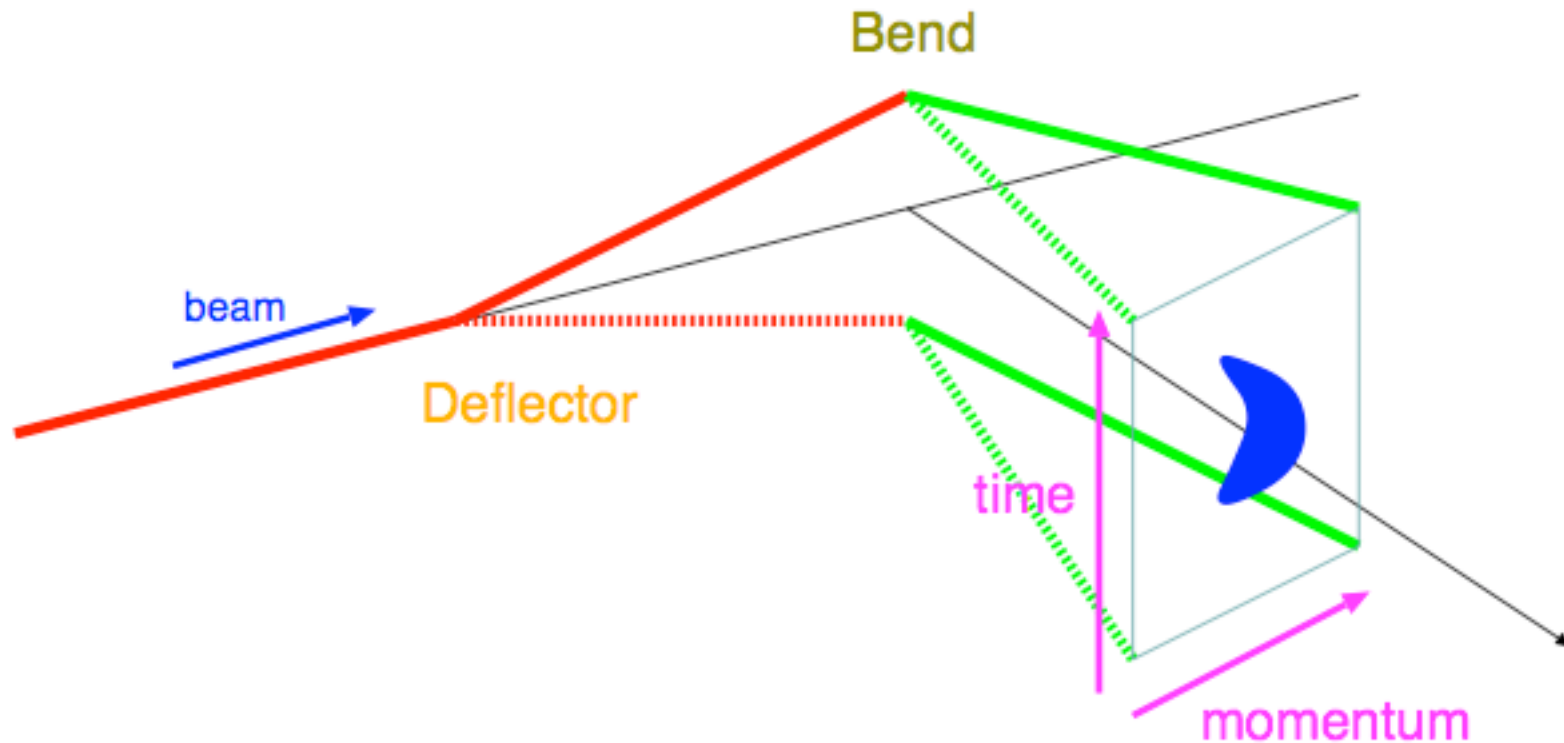
- レーザー16ps(FWHM,flat)、バンチャー50kVのときの例。
- 分布が複雑なので、ここではガウス関数によるフィットではなく、そのままRMSを計算することにした。
- バンチ電荷が高くなるにつれ、分布が広くなる。また、高エネルギー側の切れがなだらかになる。
- 1.5pC/bunchのときパルスが分裂している。バンチャー電圧は変えていない。
- 電荷がそこそこ低いため時間方向に過収束され、電荷密度が高くなって空間電荷効果により分裂したのか。



最後にもう一つ

縦方向位相空間測定

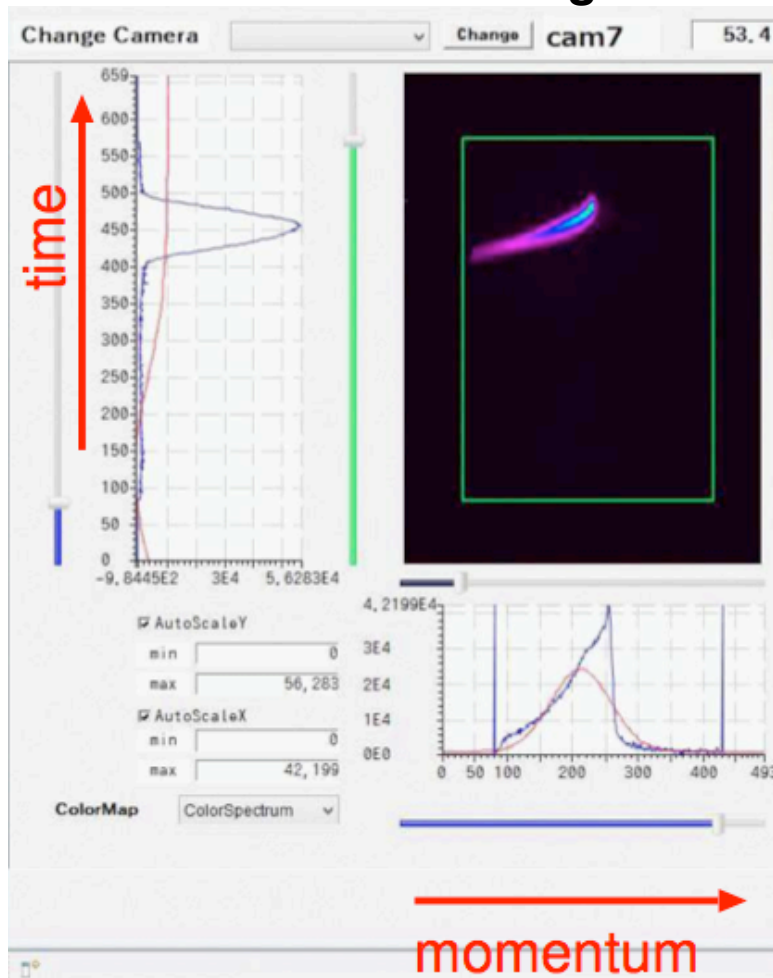
- 水平方向に曲げて行うエネルギー分布測定に、垂直方向に曲げて行うバンチ長測定を加える。
 - そのままでは、MS7で垂直方向のサイズが大きくなってしまいうので、上流のスリットで細くする。
 - MS7にエネルギーと時間の平面が得られる。(縦方向位相空間)



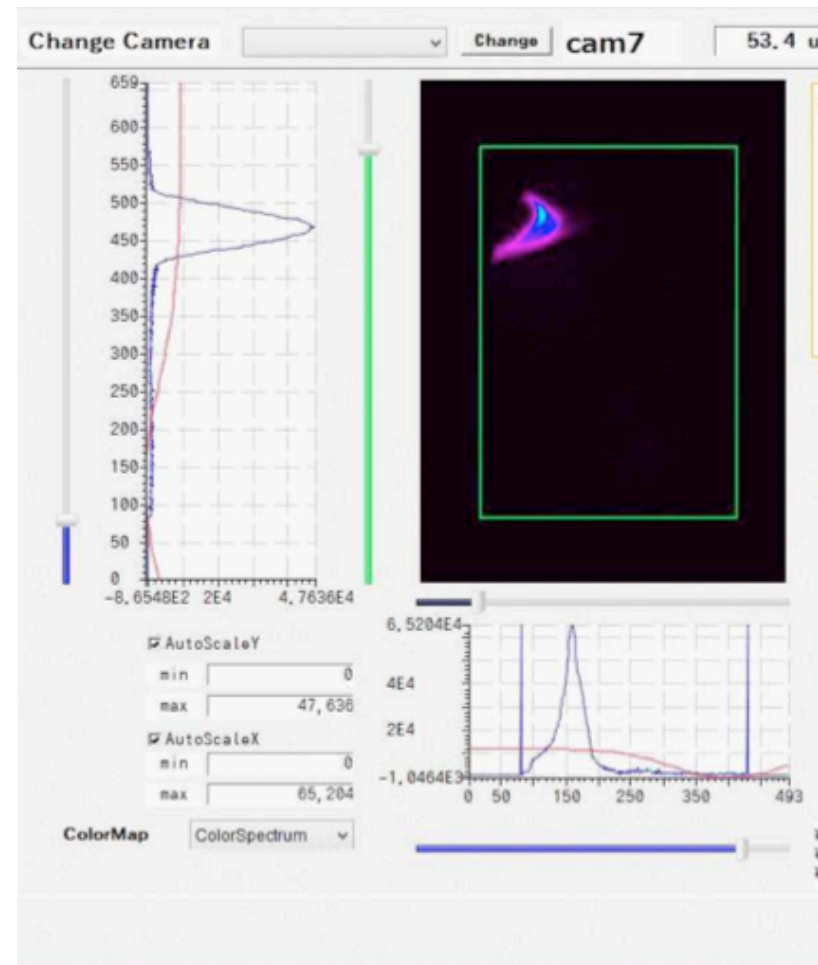
縦方向位相空間測定

- バunchの中央が加速電場のクレストにのると、三日月型になる。
- (少しずれていたなので空洞位相を微調整した。)

Before fine tuning



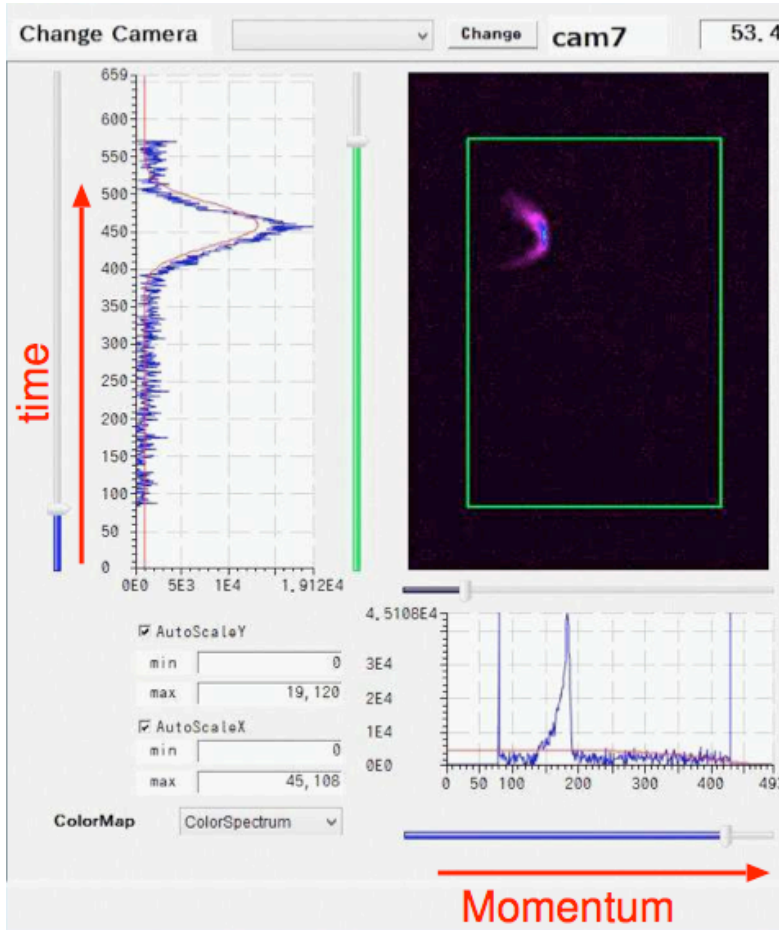
After fine tuning



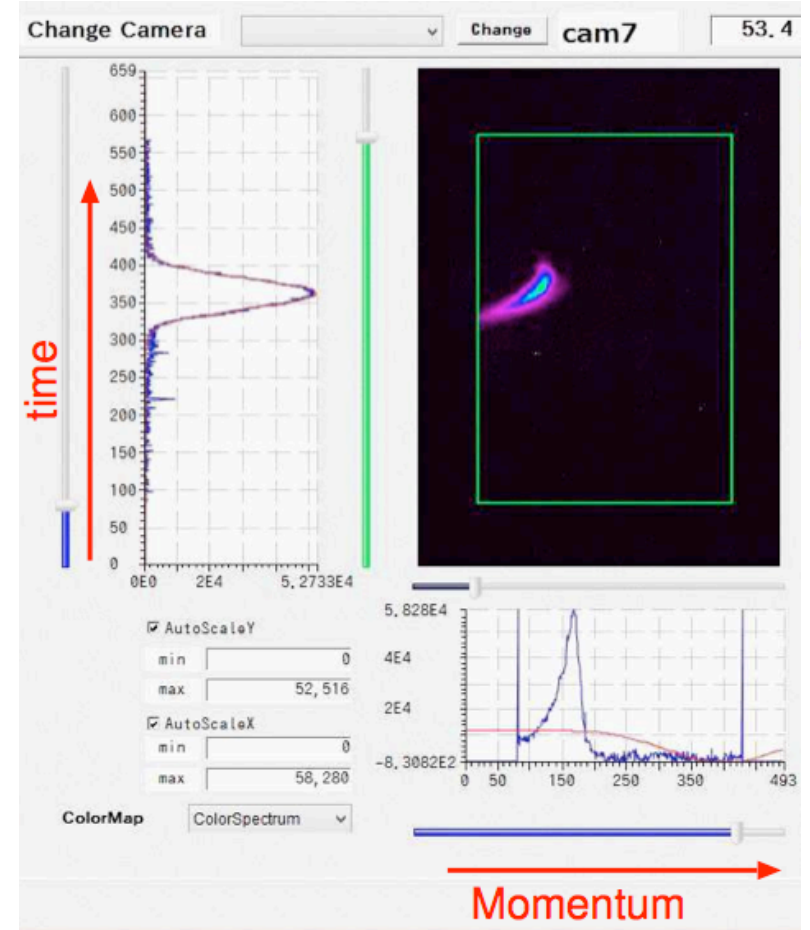
縦方向位相空間測定

- バンチャーオフでも、オンクレストに合わせて、エネルギー拡がり小さい。

バンチャーオフ

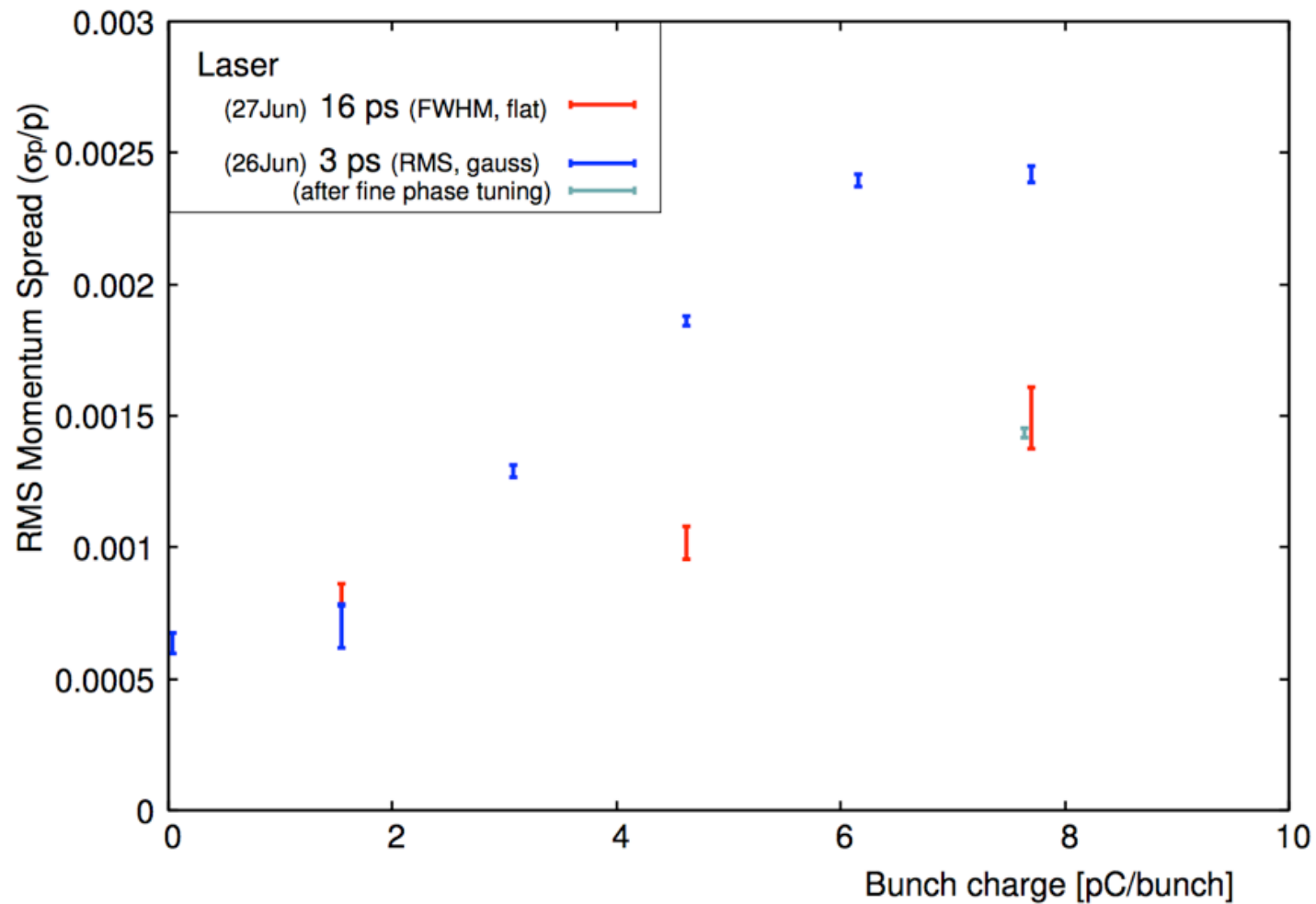


バンチャーオン



エネルギー拡がりの結果

- レーザー3psのとき、一通り測定したあとで空洞位相の微調整をした。
- 運動量拡がり0.0015が得られた。重心のジッタはその1桁下。
- 設計値は0.0017なので、達成できている。



まとめ

- エミッタンス
 - 入射部390keV、低電荷で、 $0.1\mu\text{m}$
 - 診断部、低電荷で、 $0.2\mu\text{m}$
 - 診断部、 7.7pC/bunch において、最も良い値で、 $0.6\mu\text{m}$
- バンチ長
 - 7.7pC/bunch で、 7ps(RMS)
- エネルギー拡がり
 - 7.7pC/bunch で、 $0.15\%\text{(RMS)}$