

新しい  
エンブレム  
準備中

# cERL利用実験開発

ERL評価専門委員会

2017.10.27

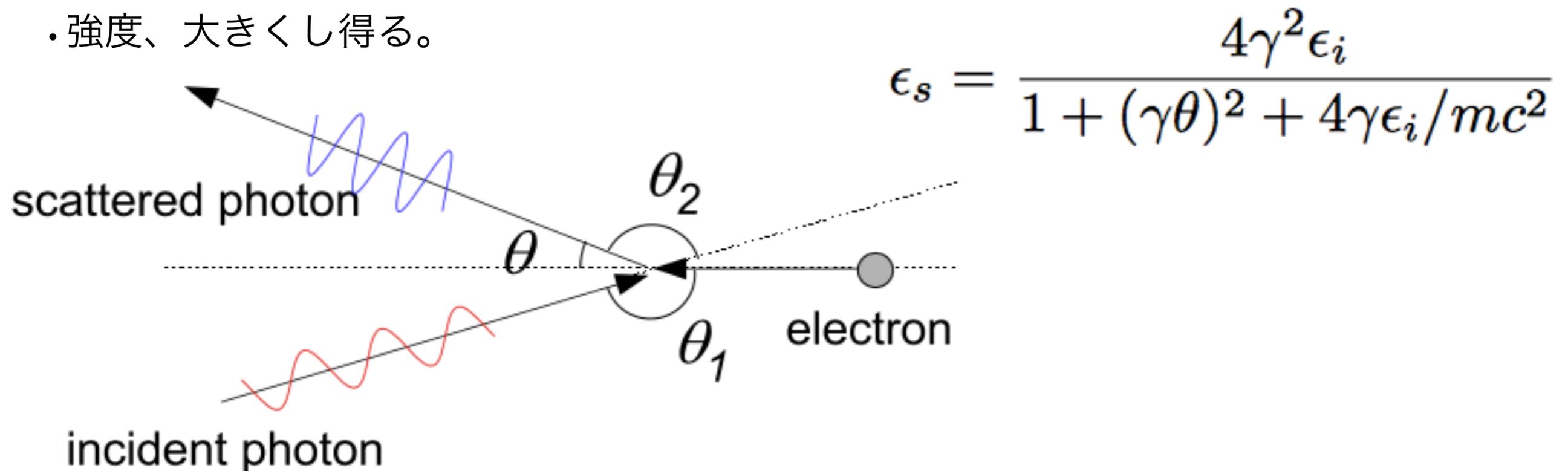
本田洋介 (KEK)

- cERLを利用して加速器周辺技術の開発を行う(試験加速器)。
- 当初から挙がっていた2つの課題
  - レーザーコンプトン散乱X線
  - テラヘルツ光源

レーザーコンプトン散乱

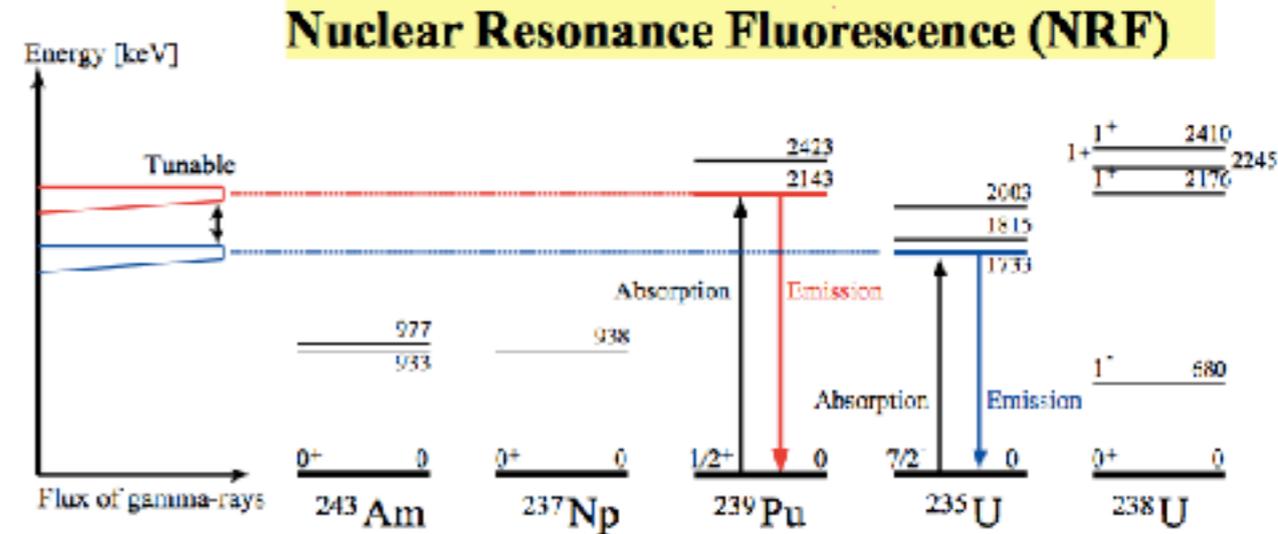
# レーザーコンプトン散乱

- 簡単な運動学。
- 特徴
  - レーザー光子のエネルギーが  $4\gamma^2$  倍
  - 散乱角度とエネルギーが相関
  - レーザー光の偏極を引き継ぐ
- 光源として
  - 比較的小型の加速器で準単色X/ガンマ線がだせる。(とくにガンマ線は他に無い)
  - コリメートして狭帯域化できる。(ERLだと電子ビームのエネルギー広がりが小さい)
  - エネルギー可変、偏極可変。
  - 光源サイズ、小さくし得る。
  - 強度、大きくし得る。



# cERLに絡んだプロジェクト

- 核セキュリティ補助金
  - 原子核共鳴散乱による、非破壊的な核種の同定
  - エネルギー可変単色ガンマ線
  - ERLのエネルギー幅の狭いビーム



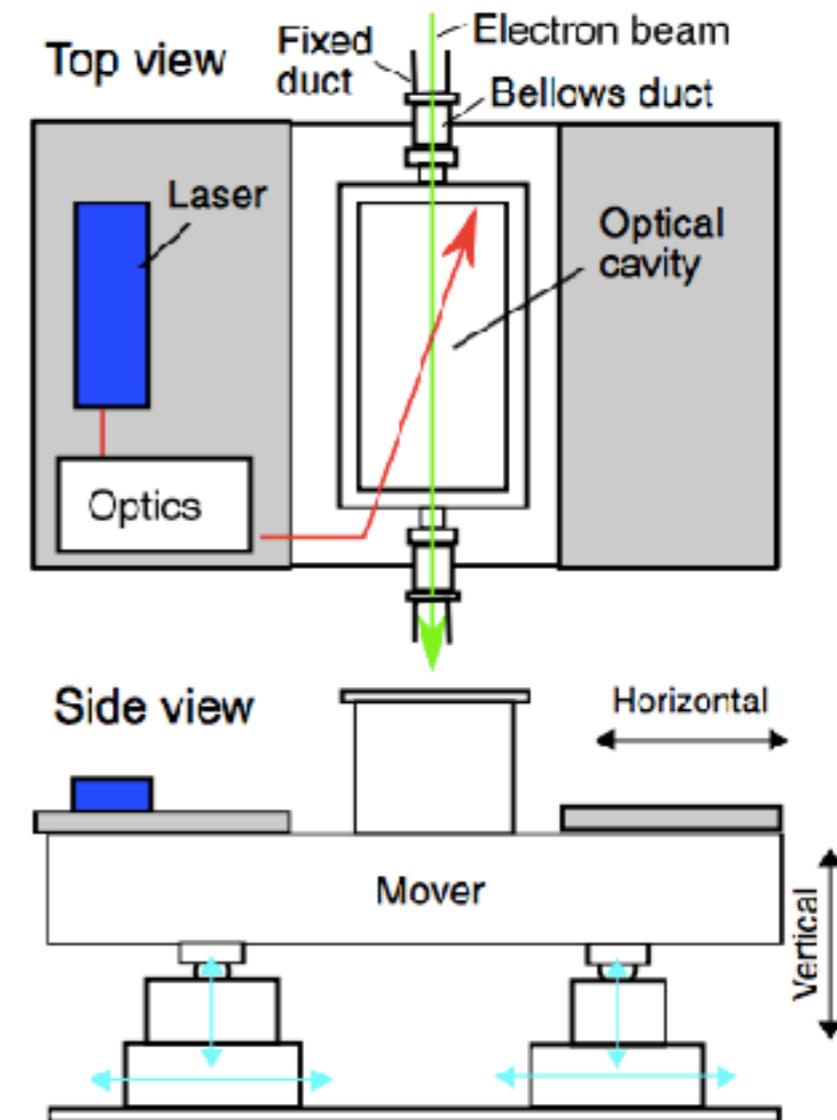
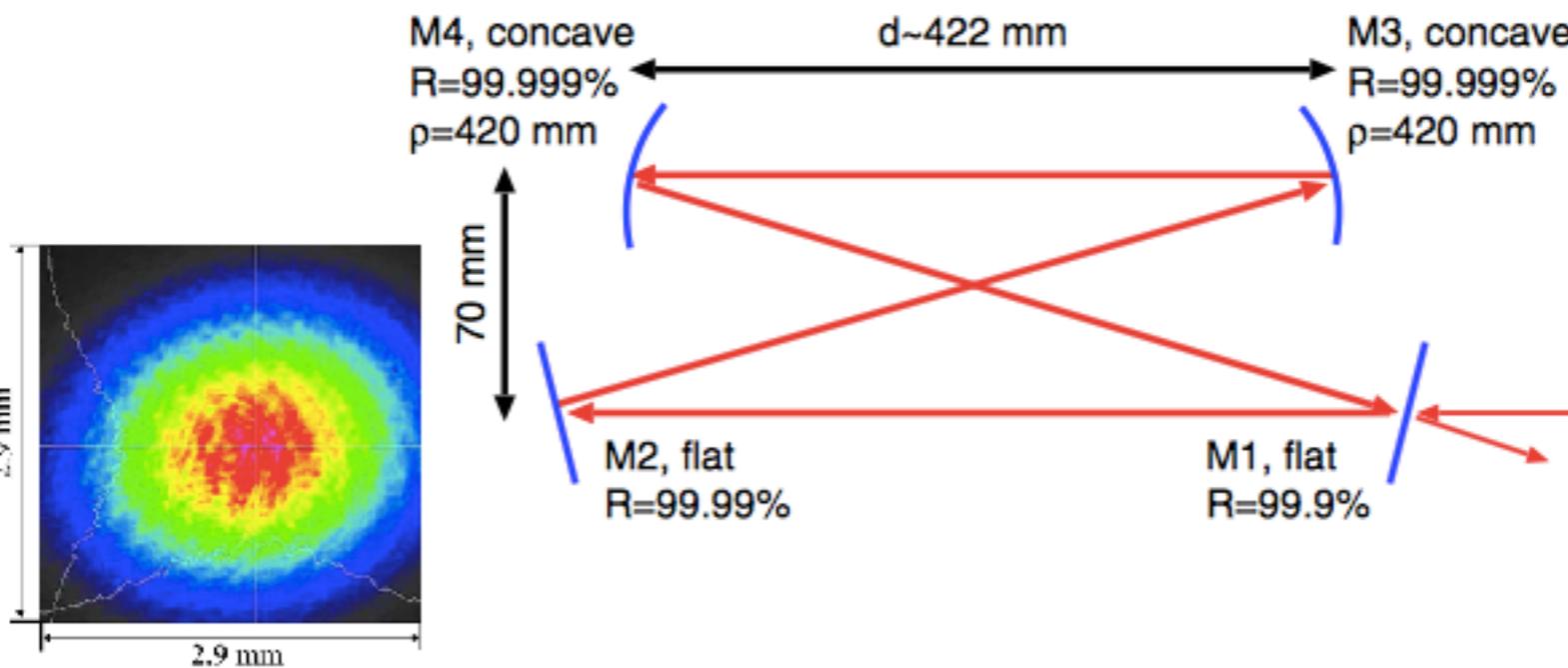
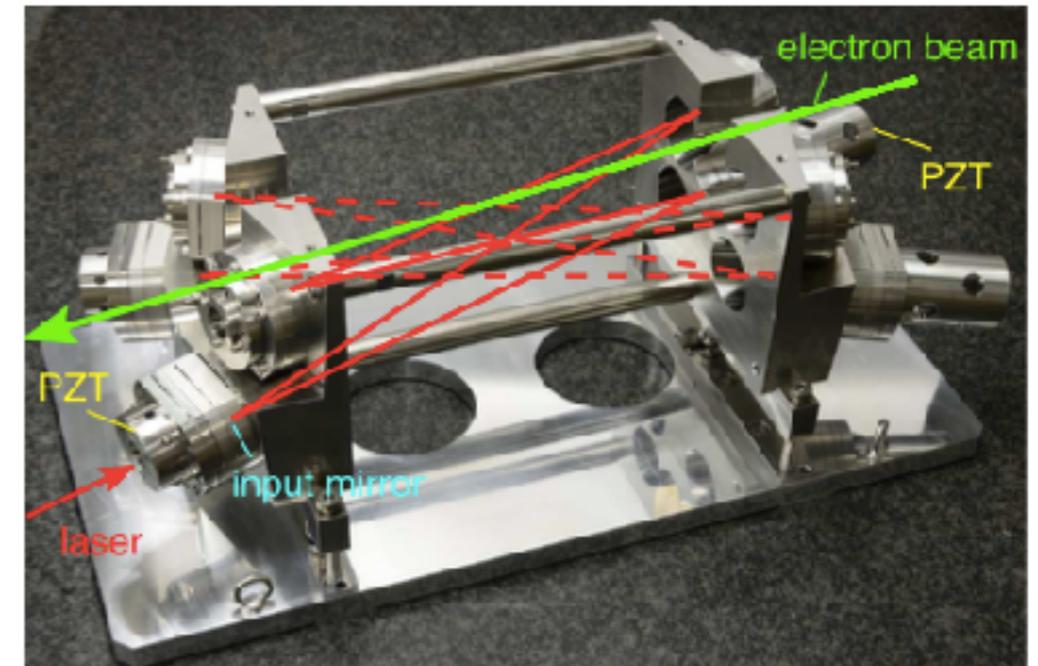
- 光量子融合連携プログラム
  - 医療用硬X線イメージング
  - 微小光源
- ともかく、ERL & レーザーコンプトン が成立するかを示す。
  - 安定な衝突ができるか
  - ERLの強みが出せるか

# cERLで示すべきは

- エネルギーはビームエネルギーで決まっている。
  - 電子ビーム20MeV、レーザー波長 $1\mu\text{m}$ 、なら、7keV
  - この段階で、硬X線やガンマ線を実際に出すのは無理。
- フラックスに関すること
  - 大電流のERL運転
  - 大パワーレーザー共振器
  - スポットでの衝突
- 大電流運転は当然やること、スポットは一般的な調整の延長。
- 最も開発を要することは、レーザー共振器。加速器とは独立して開発すべきこと。
  - 必要なレーザーパワーを実証してからインストールすべき。
- cERLで明らかにすべきこと
  - ERL加速器の安定性。衝突調整に問題無いか。
    - 安定な衝突を示す意味でX線イメージを撮ってみる。
- フラックスは計算できる。一喜一憂するべきものではない。

# レーザー共振器

- 24W (入力) -> 10kW (共振器内)
  - 実際のパワー増大率：430倍
  - 設計値では2200倍
- スポットサイズ  $30\mu\text{m}$

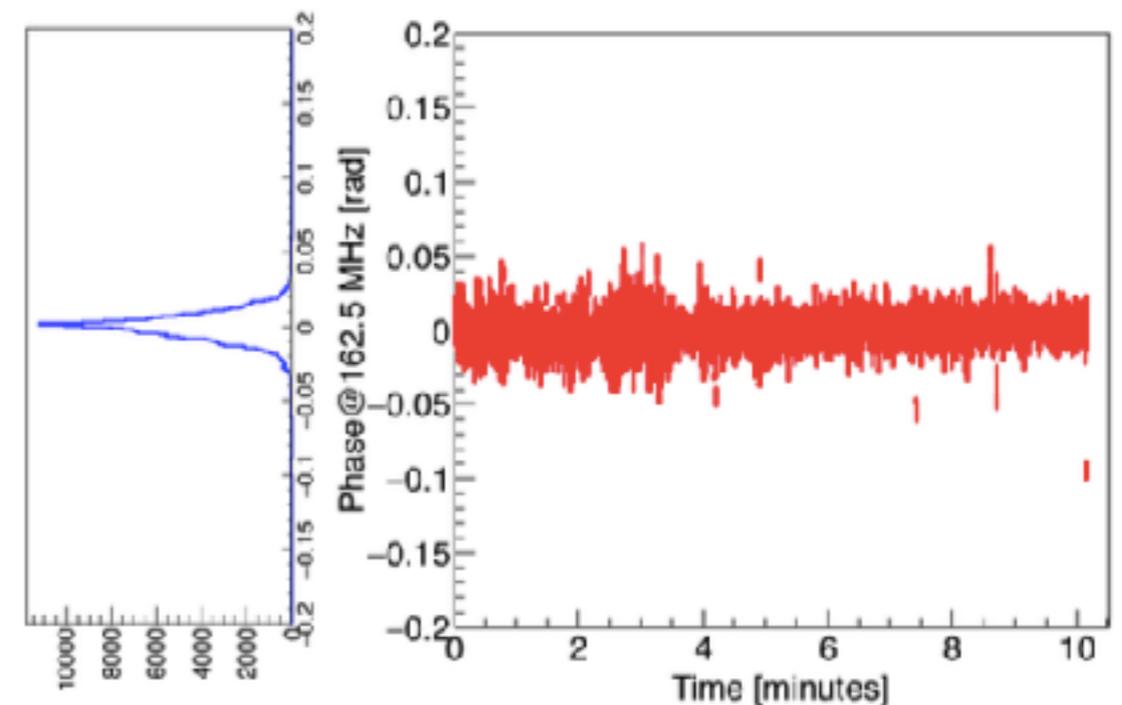
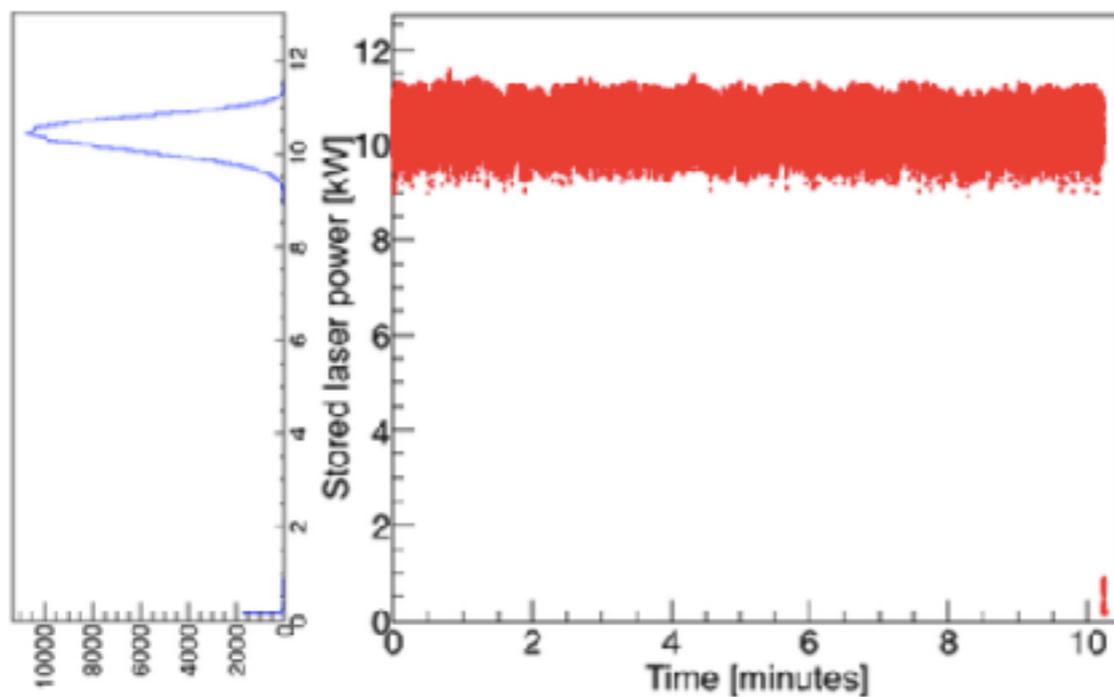
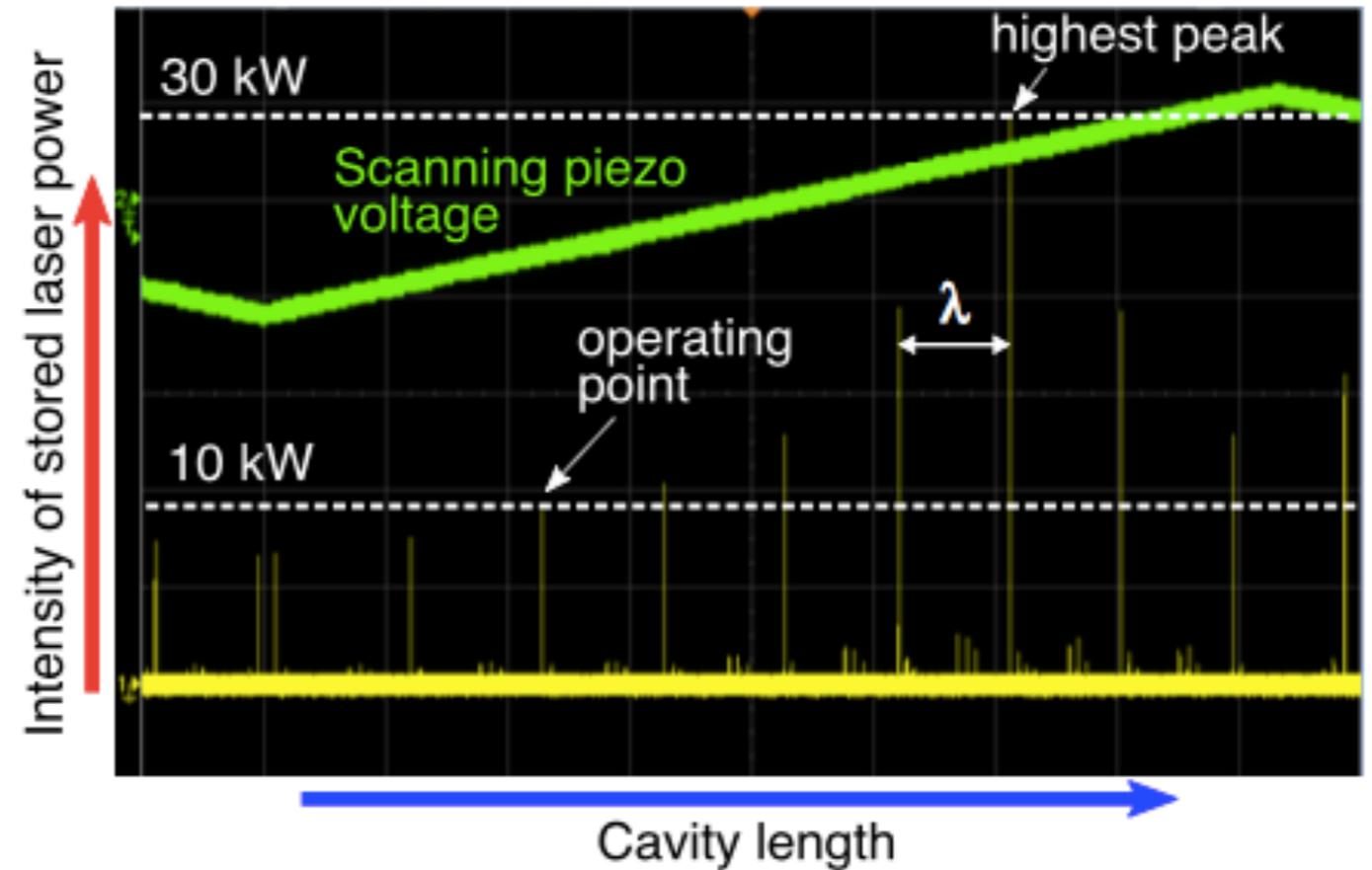


Wavelength	1064 nm
Pulse energy	61.5 $\mu\text{J}$
Injected pulse width (rms)	5.65 ps
Stored pulse width (rms)	10 ps
Repetition rate	162.5 MHz
Collision angle	18°
Spot size at the IP ( $\sigma_x/\sigma_y$ )	24/32 $\mu\text{m}$
Spot size on mirrors ( $\sigma_x/\sigma_y$ )	0.7/0.6 mm

# レーザー共振器の制御

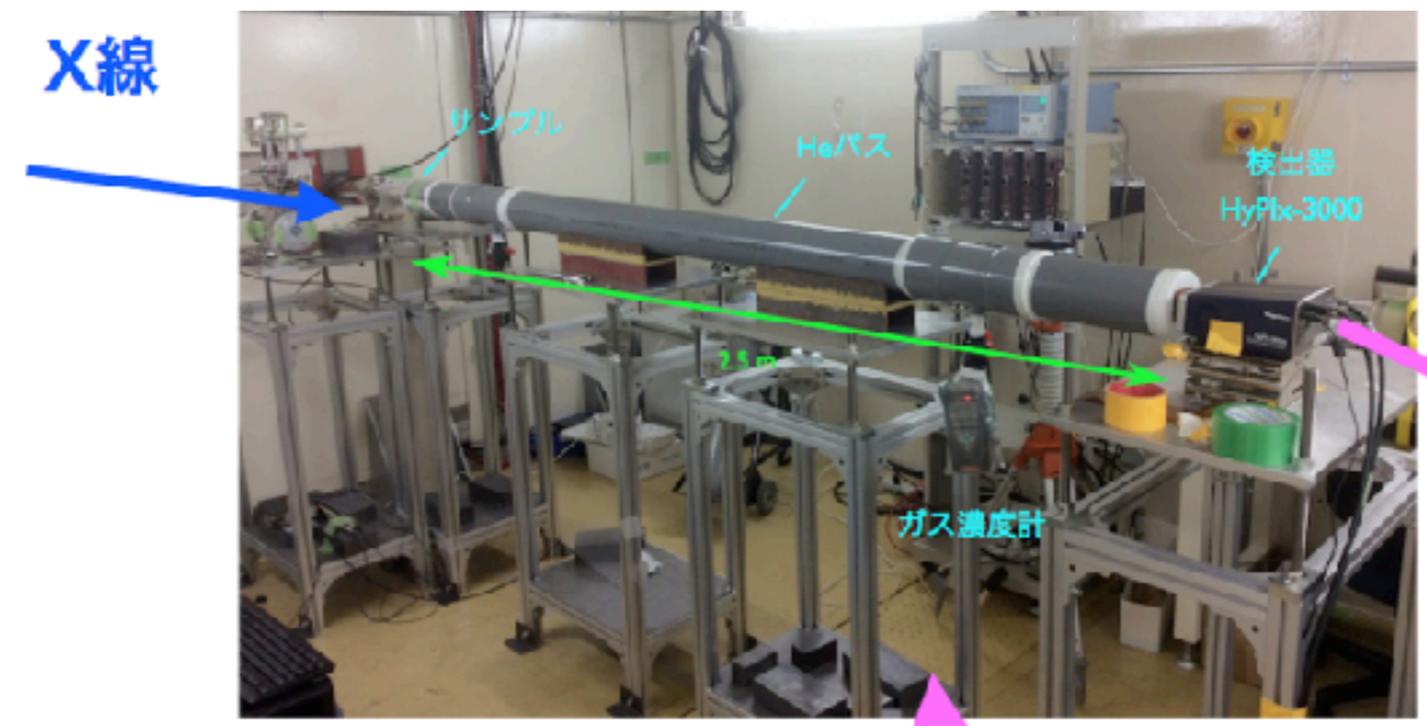
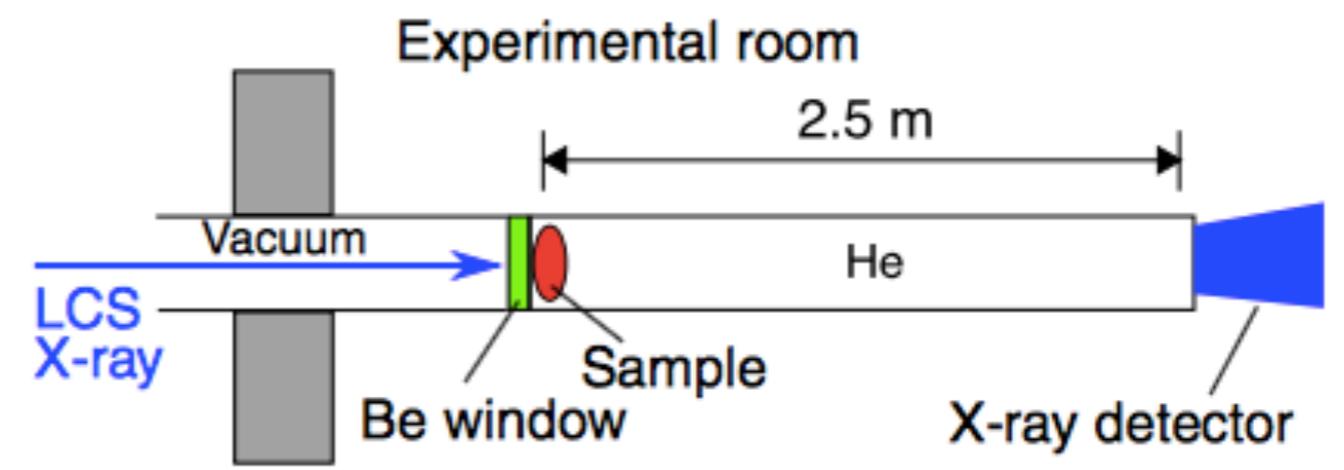
## ・2つの制御

- ・共振器の共鳴にロック
- ・加速器と位相を同期
- ・制御の帯域が足りない点に問題
  - ・高くて細いピークが使えず
    - ・結合効率が低下
    - ・パルスが伸びる
  - ・同期ゲインも上げられない
    - ・タイミングジッタ



# X線ビームライン

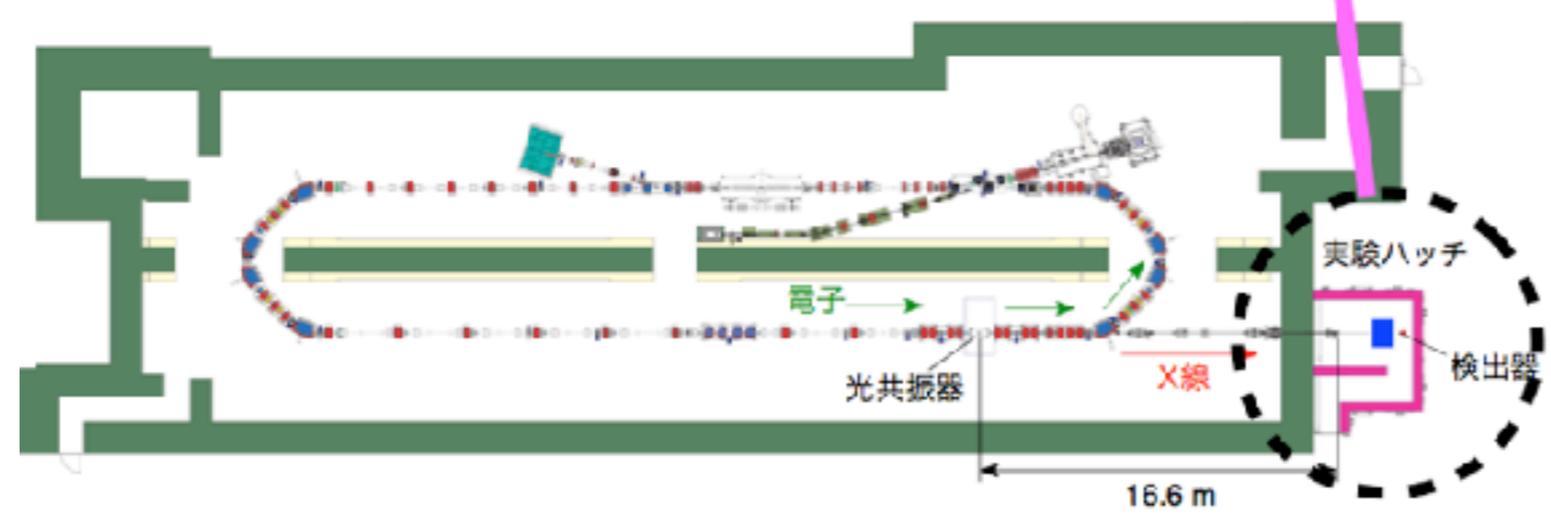
- 7keV X線は空気では吸収
  - Be窓を介した真空ビームライン
  - 実験室内ではHeで満たしたダクト



**検出器**  
HyPix-3000 (リガク)



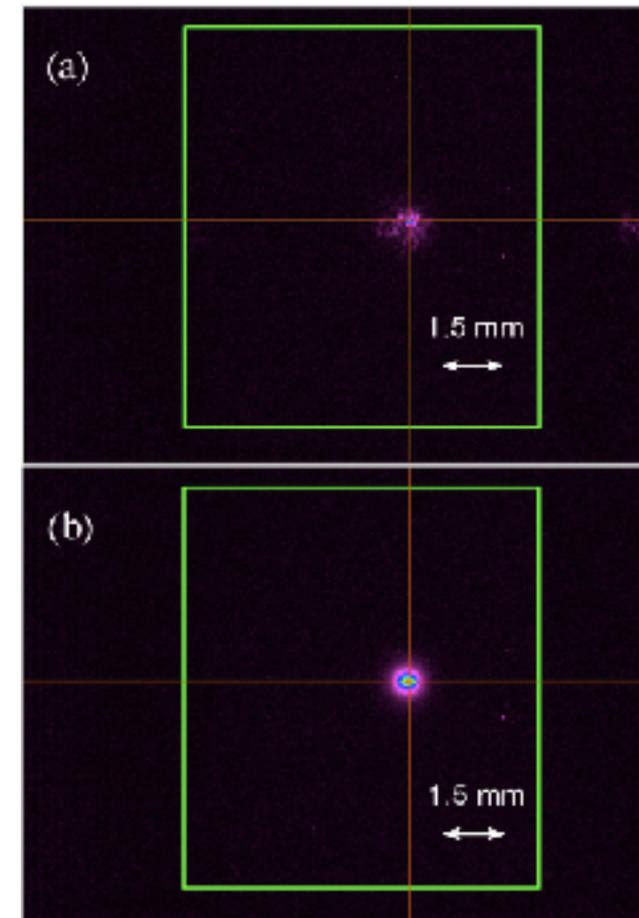
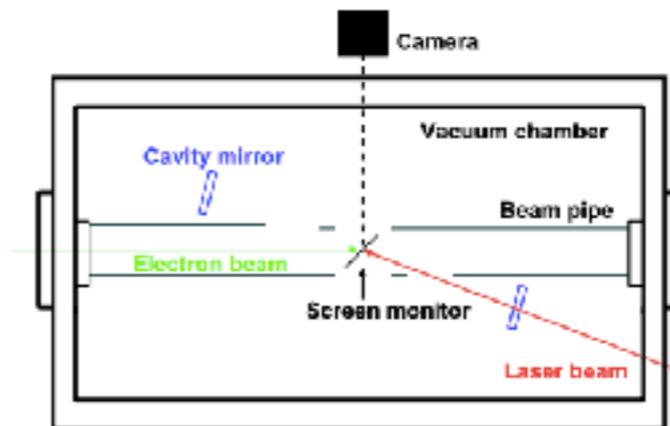
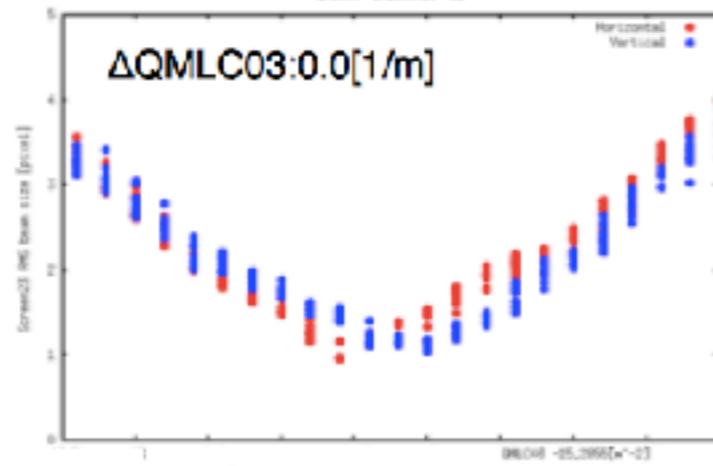
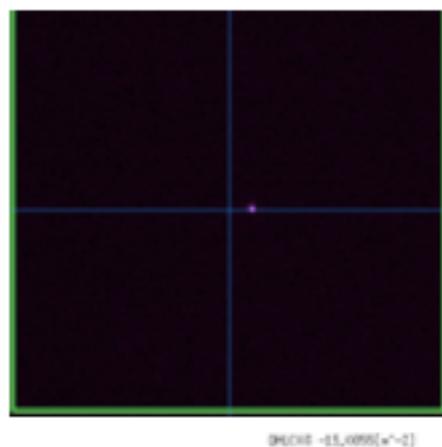
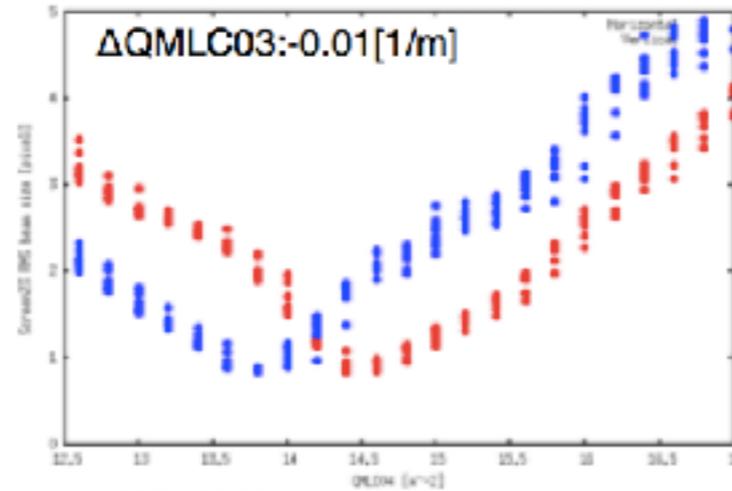
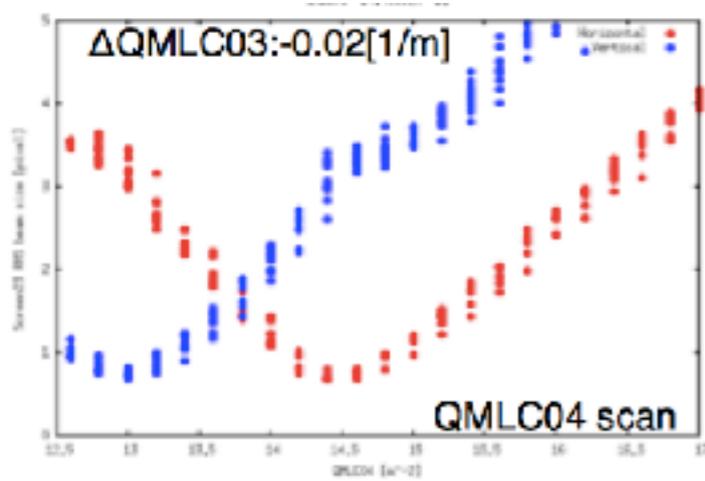
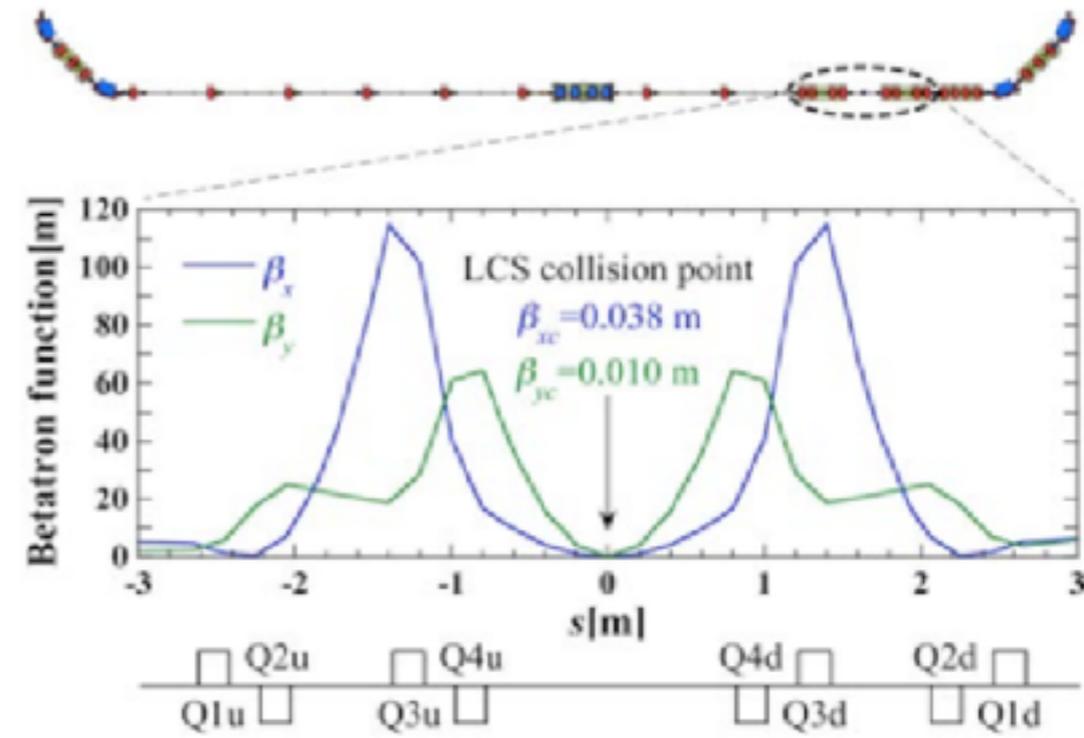
有効検出面積 77.5×38.5 mm  
ピクセルサイズ 100×100 μm



# ビーム調整

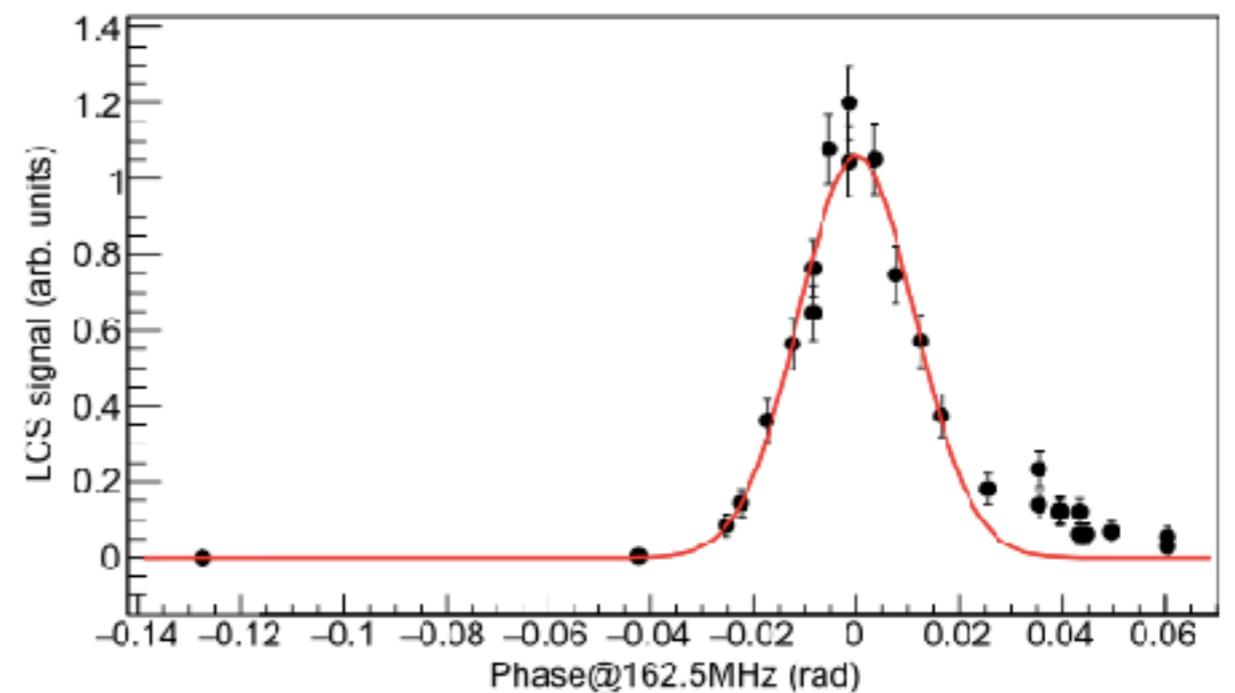
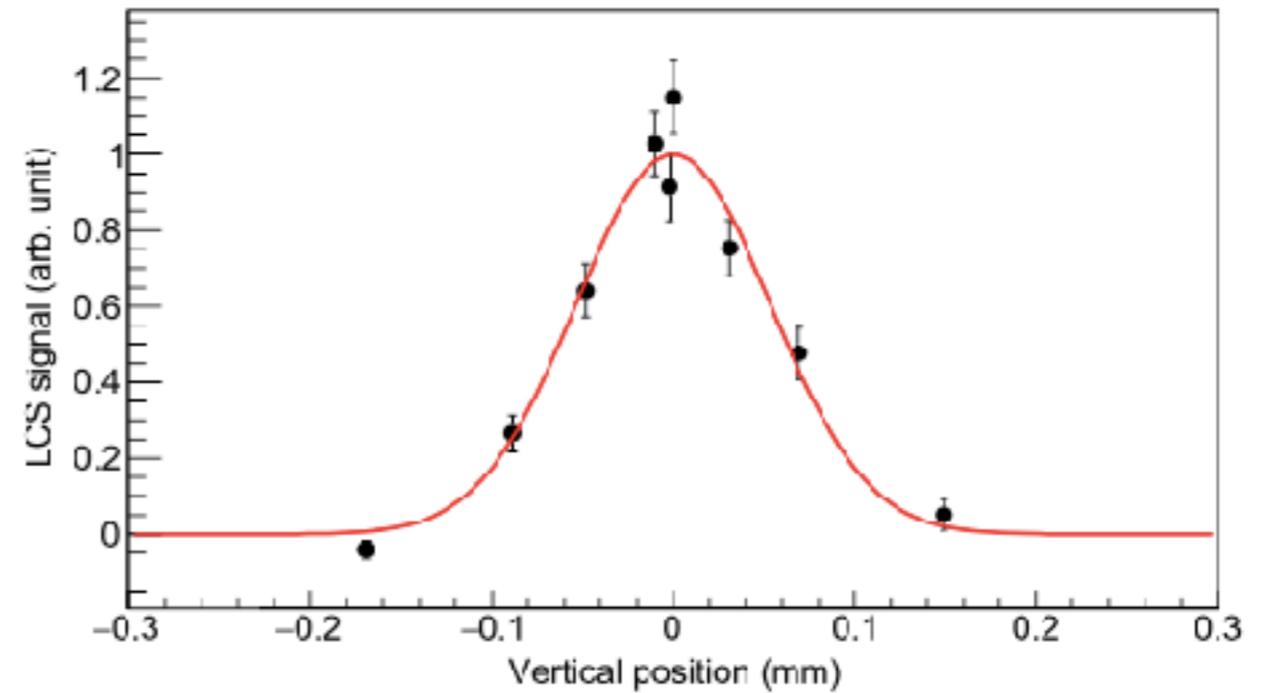
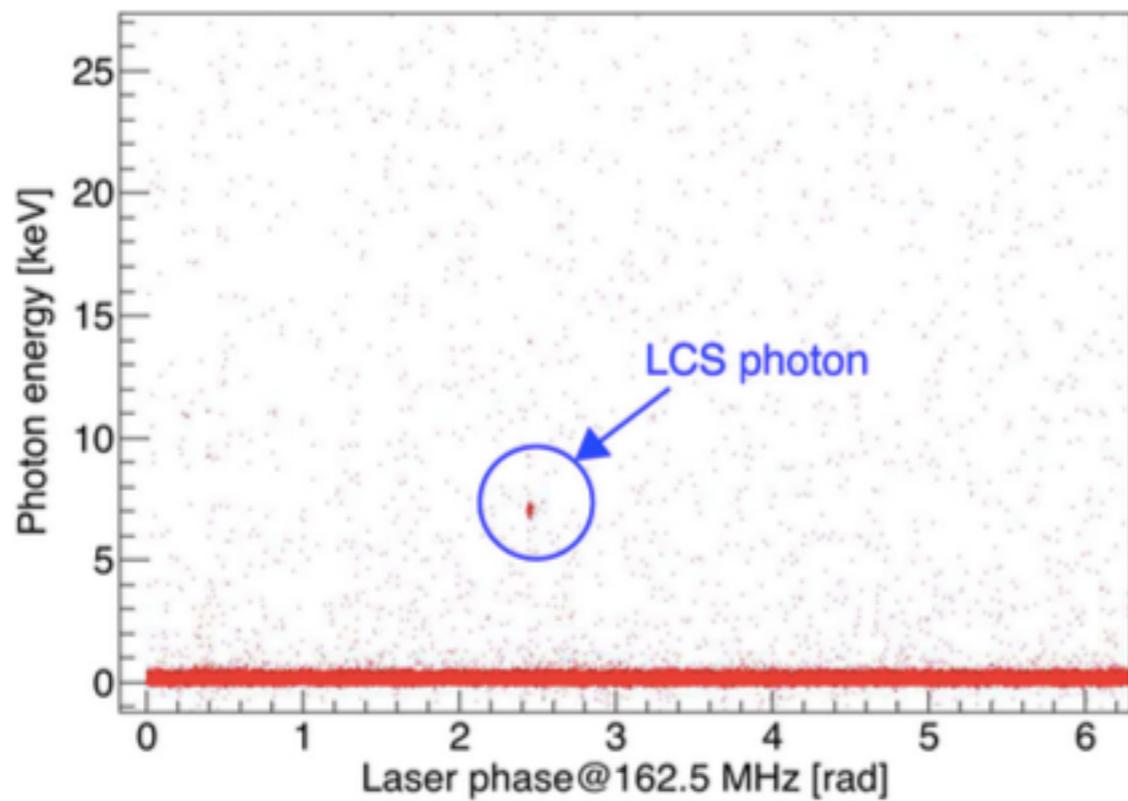
- 光学調整：水平垂直を同時に最小にする。
  - エミッタンス測定と合わせてサイズを推定。
- 位置調整：レーザーとビームをスクリーンで合わせる。
  - 衝突の確立には十分

Energy	20 MeV
Bunch charge	0.355 pC
Bunch length (rms)	2 ps
Spot size ( $\sigma_x/\sigma_y$ )	78/16 $\mu\text{m}$
Emittance ( $\epsilon_{nx}/\epsilon_{ny}$ )	0.32/0.28 mm mrad
Repetition Rate	162.5 MHz



# 衝突調整

- ・タイミング、垂直位置をスキャン。

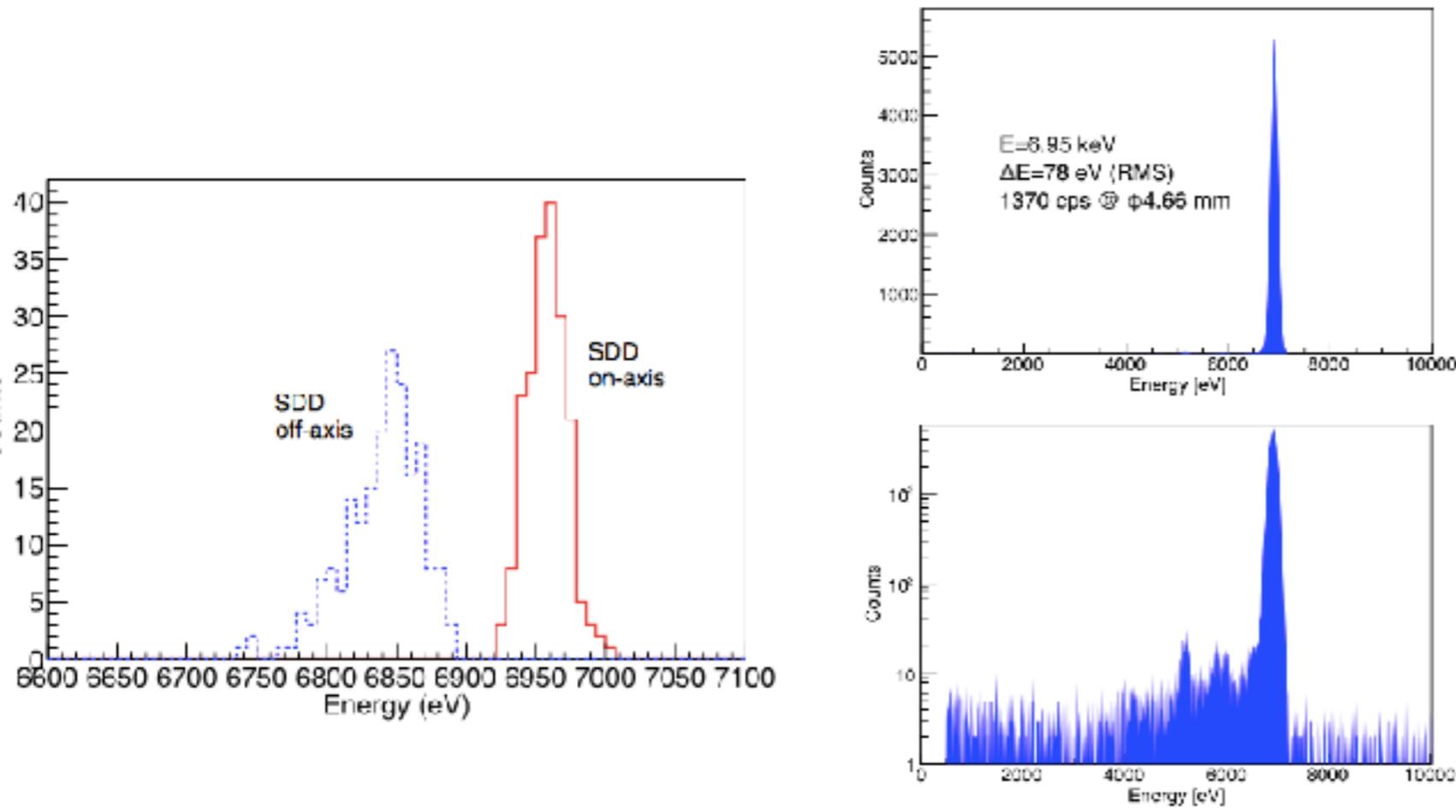


# スペクトル

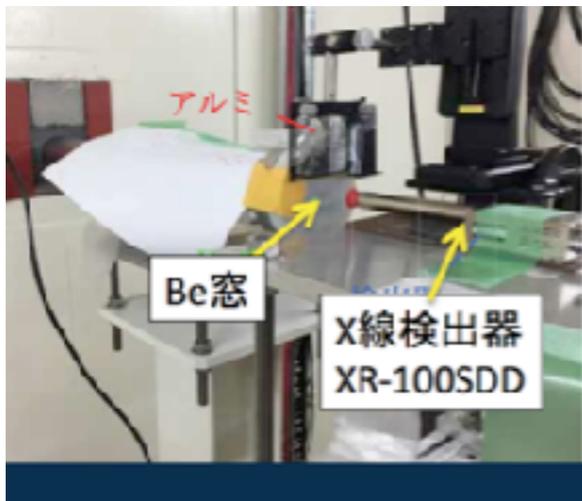
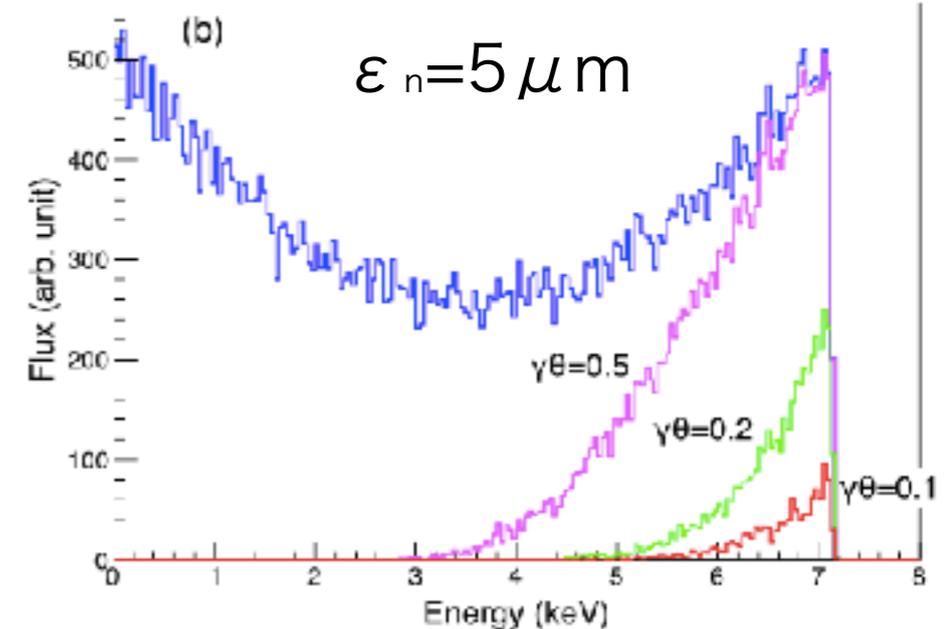
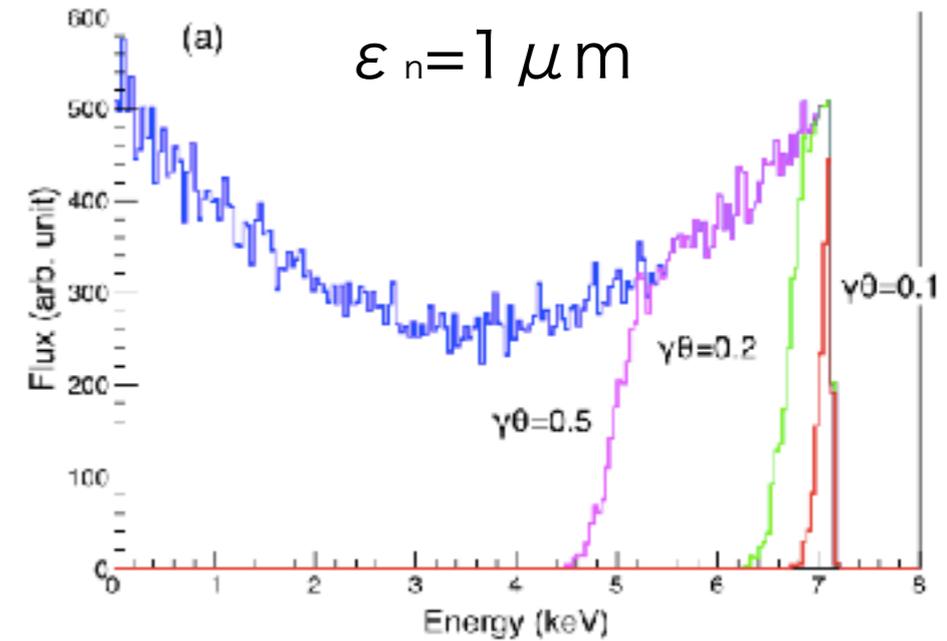
・SDD検出器で測定

・衝突点から16.6m下流で検出器直径4.66mm (開口0.14mrad)

・フラックス  $2.6 \times 10^7$  ph/s (total) ( $1.6 \times 10^8$  in 2016)

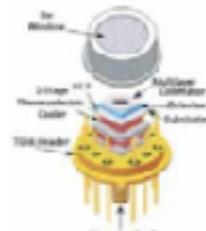


## シミュレーション



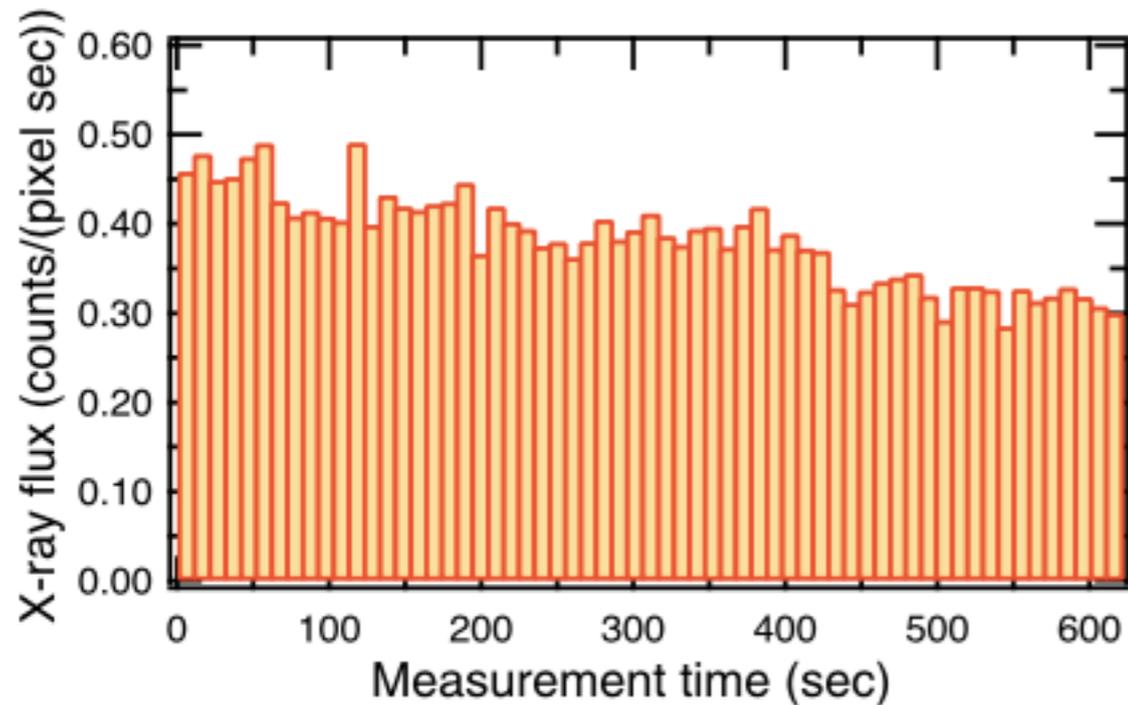
XR-100SDD Silicon Drift検出器

- 仕様
- ・検出器サイズ: 25mm<sup>2</sup>
  - ・シリコン厚: 500μm
  - ・エネルギー分解能@5.9keV: 125eV~140eV FWHM (Peaking time: 1.2μs)
  - ・検出器Beウィンドウ厚: 0.5mil (12.5μm)



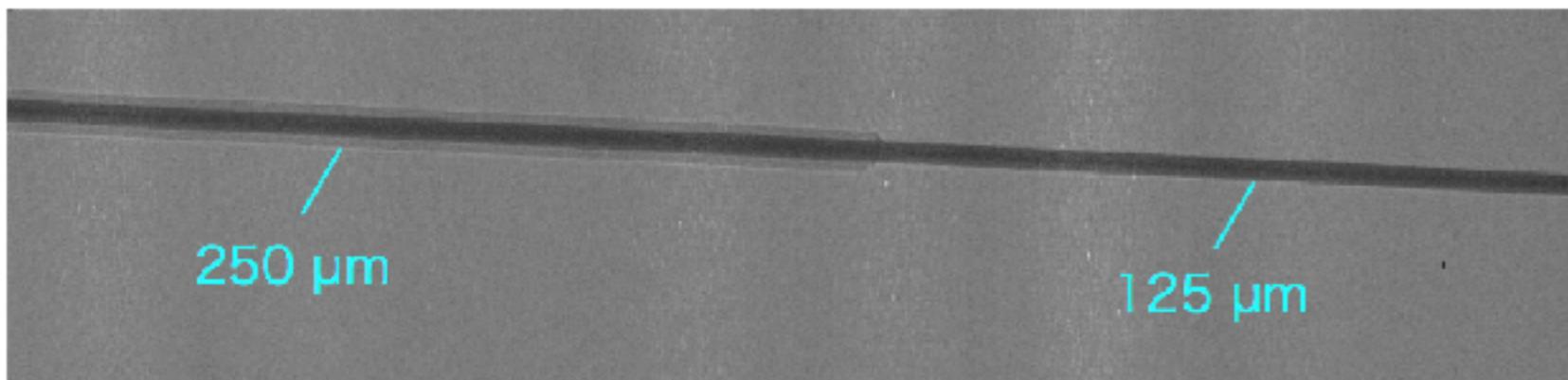
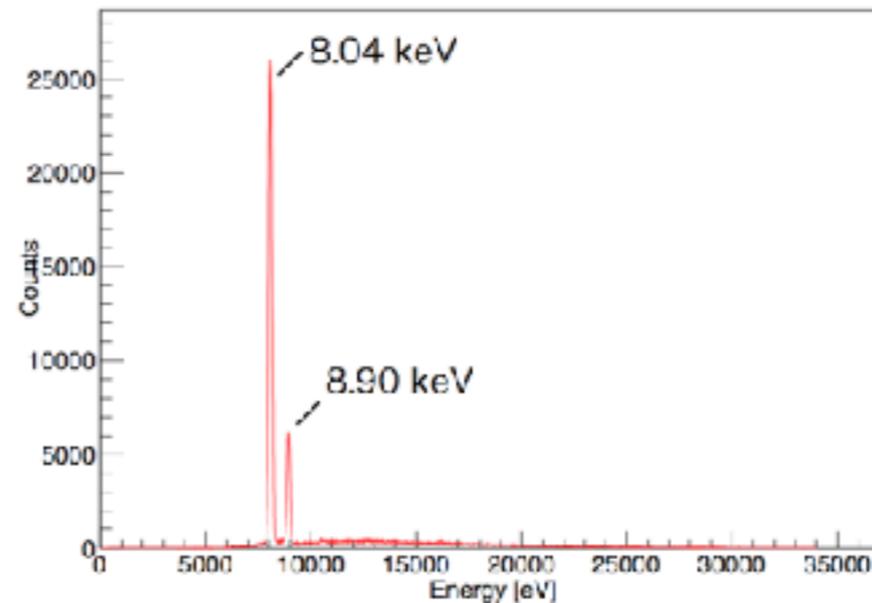
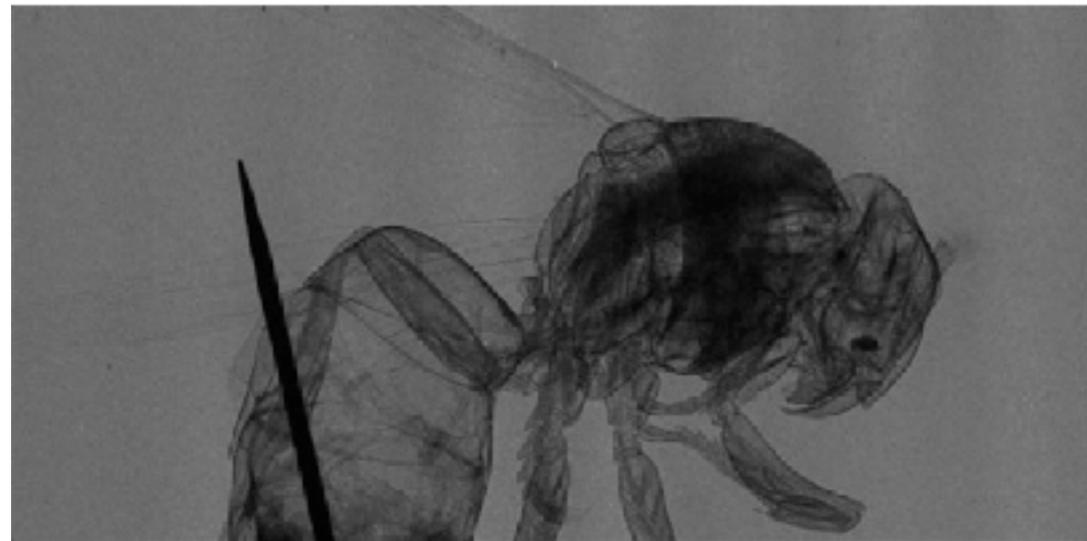
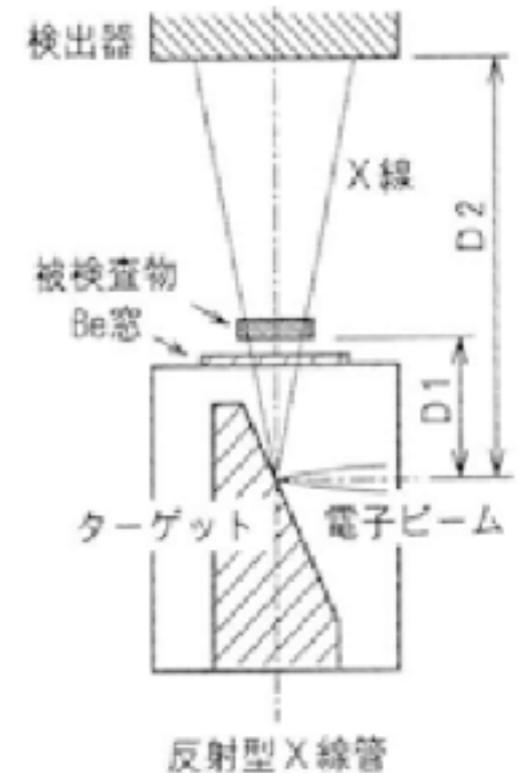
# X線イメージング

- 2015年のデータ
  - $70\mu\text{A}$ ビーム
  - 6kWレーザー
- 2次元検出器(リガクHyPix-3000)を使用
  - ピクセルサイズ $100\mu\text{m}$
- 10minで画像取得
- その間ビーム強度は安定
  - フラックスがやや低下はHeの抜けか。
- 微小光源の効果は見えている。



# X線イメージング

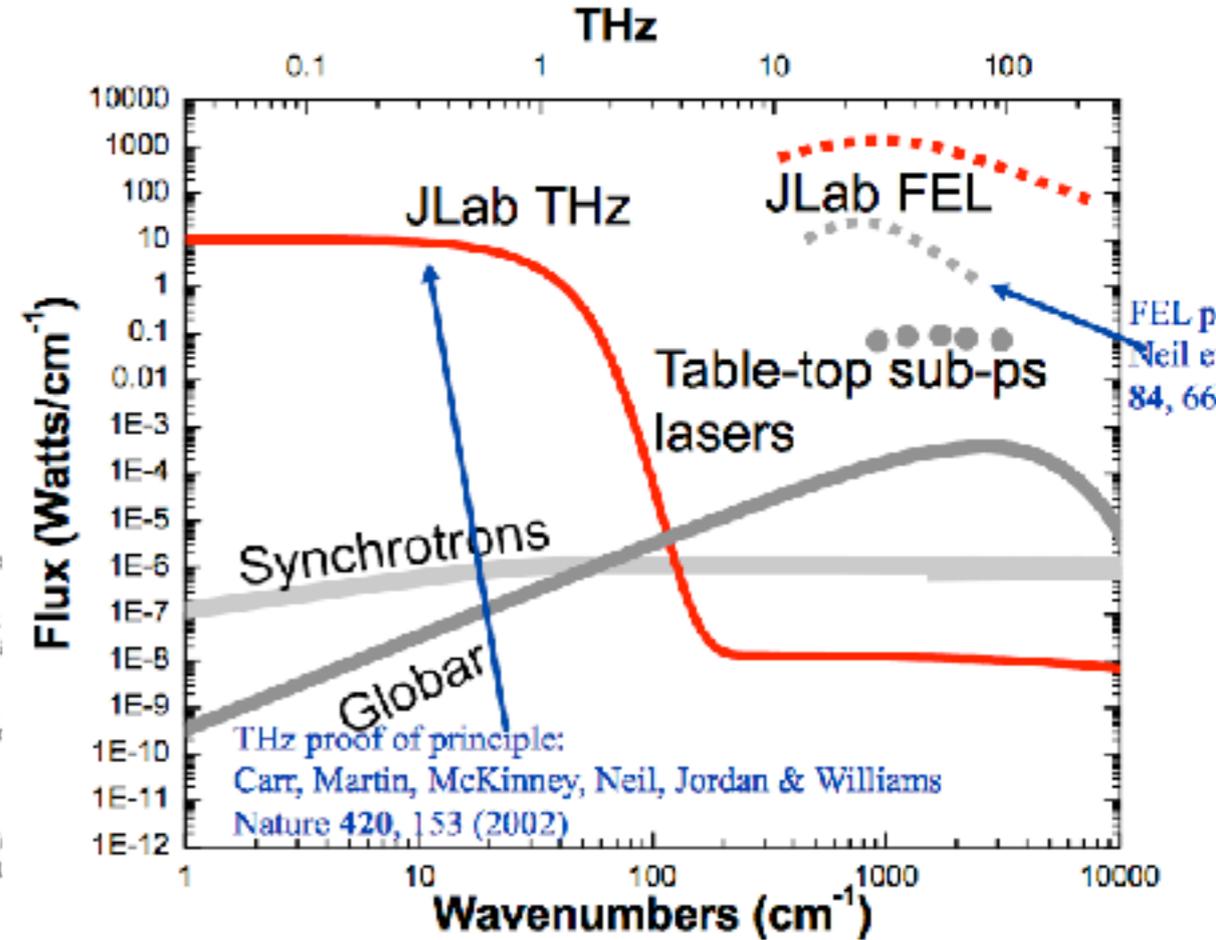
- 現状のcERLの代替となる光源
- マイクロフォーカスX線管
  - 15年前のモデルで、40kV, 20 $\mu$ A、スポットサイズ20 $\mu$ m
  - 最新のモデルだと、230kV, 1mA、スポットサイズ4 $\mu$ m
- 銅の特性X線で8keV単色が出せる。
- 同じハチ、同じ検出器で比較測定、10secで十分な画像。
- Heパスなしでもx200のフラックス



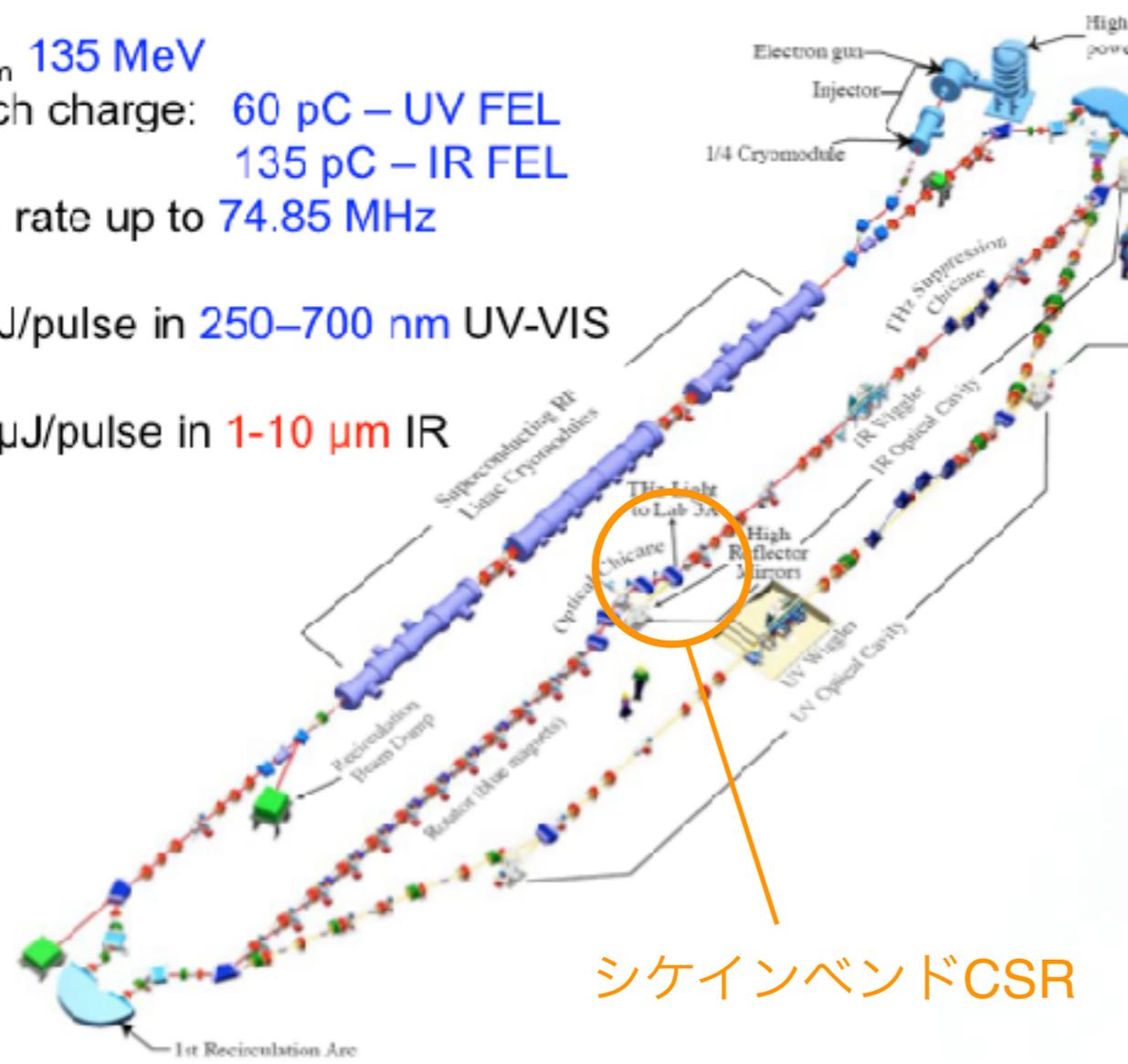
# テラヘルツ光源

# ERL加速器によるTHz光源の例

- JLab ERL-FEL(既に運転終了)
- FELアンジュレータ入口のシケインベンド
- バンチ圧縮されたビームからのCSR光源
- 1~10Wの白色THz光

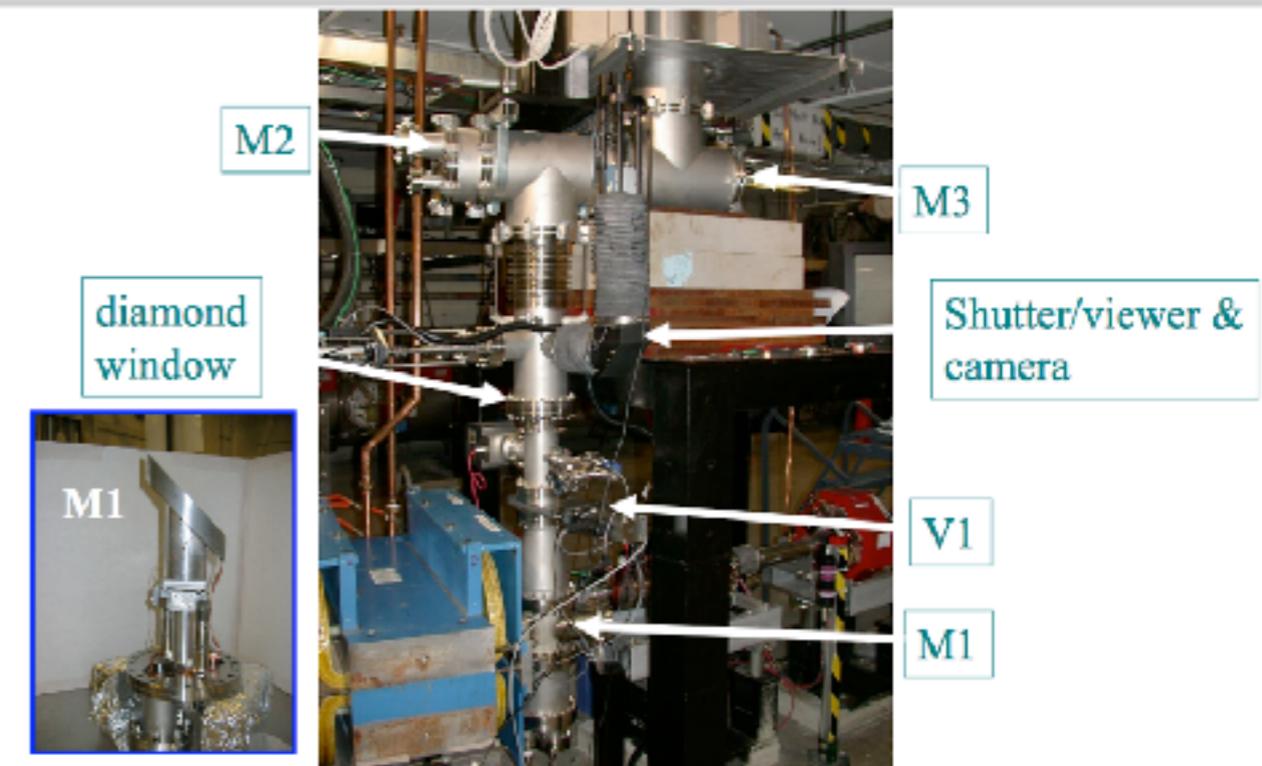


$E_{\text{beam}}$  135 MeV  
 Bunch charge: 60 pC – UV FEL  
 135 pC – IR FEL  
 Rep. rate up to 74.85 MHz  
 25  $\mu\text{J}$ /pulse in 250–700 nm UV-VIS  
 120  $\mu\text{J}$ /pulse in 1-10  $\mu\text{m}$  IR



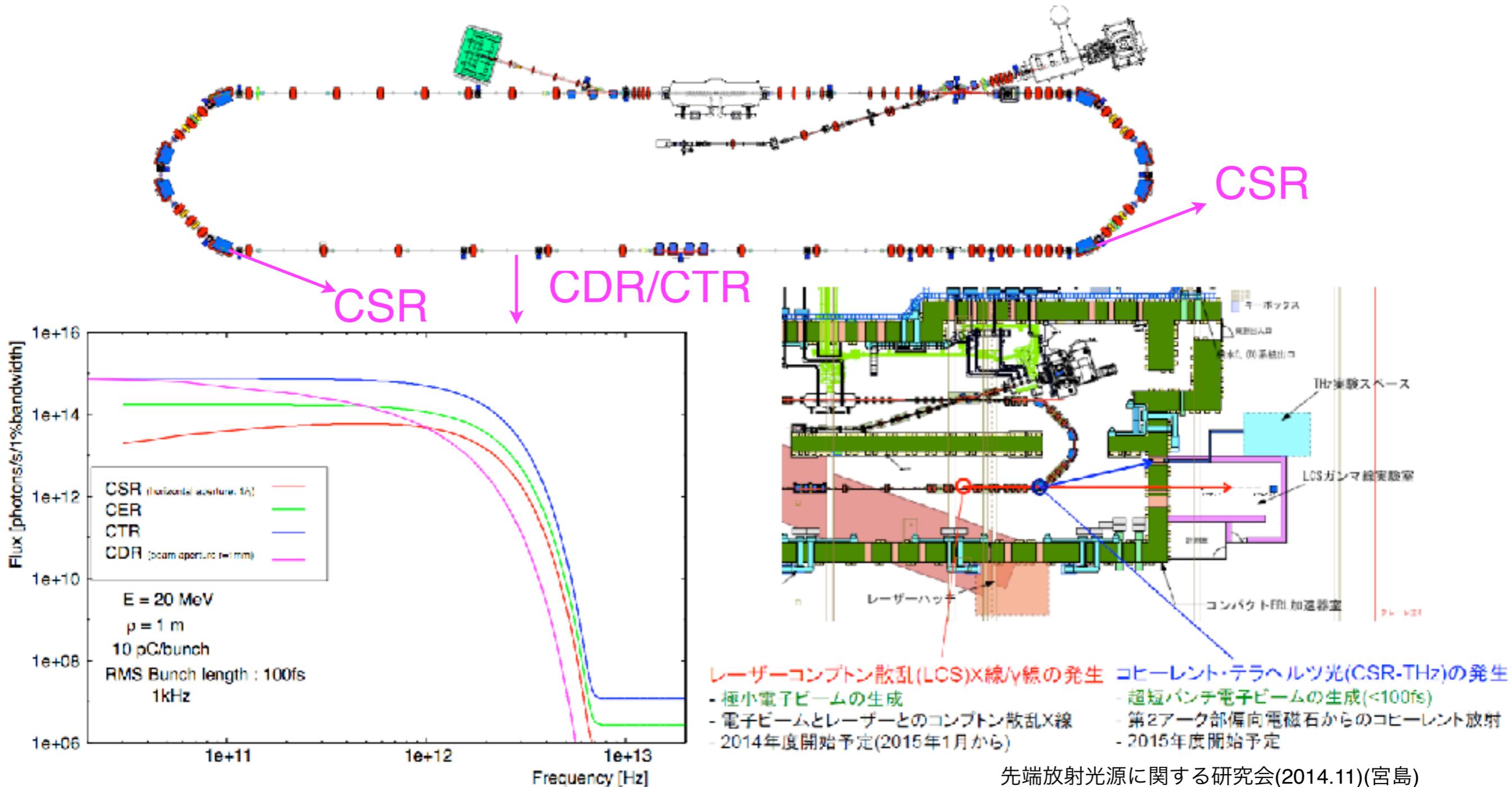
シケインベンドCSR

JLab Terahertz Beam Extraction and Transport



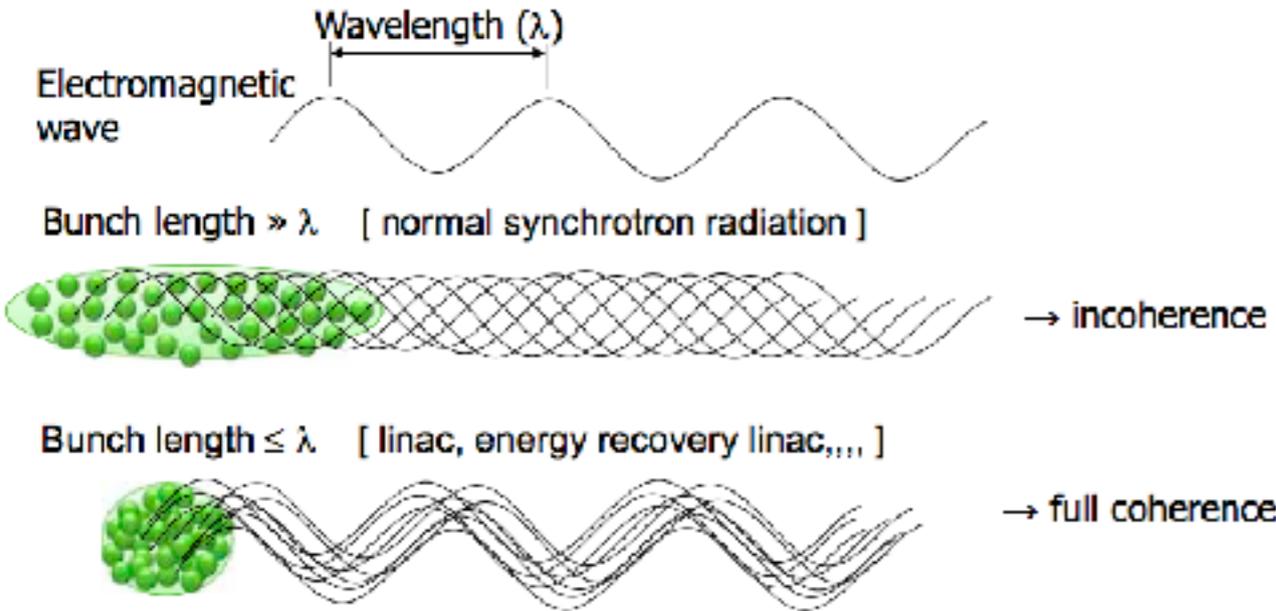
# cERLでのTHz光源

- cERLでも、JLabと同様の白色THz光源の可能性を検討。
- エネルギーには依存しないので、バンチ形状と強度が同じなら、概ね同等の強度が得られる。
  - 10pC/bunch, 100MHz = 1mAだと、10mW/1%BW=1W白色光源。
- 候補
  - ベンドからのCSR。CW運転可能。
  - 直線部に標的を入れて、CTR/CDR。(ビーム損失させるので平均電流は制限される。ビーム診断に利用。)



# コヒーレント放射

- バンチ長が波長以下になると、放射がコヒーレントにおこり、 $N^2$ の強度依存性になる。
- バンチ長は波長の1/10が目標
- 1THzのコヒーレント放射を得るには、バンチ長100fs以下

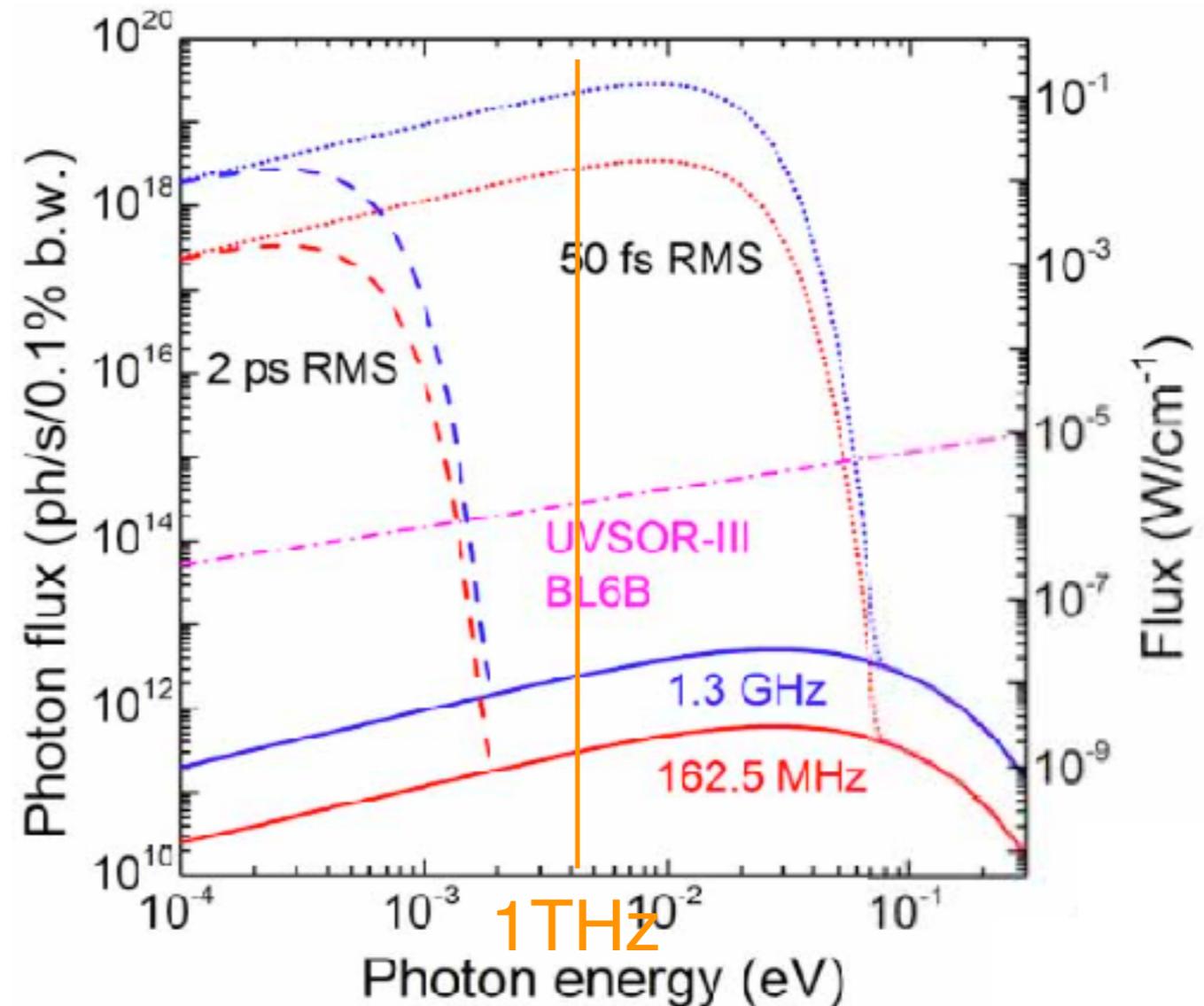


SR Power emitted by an electron bunch

Normal (Incoherent) SR

Coherent SR

$$P = P_0 (N_e + N_e^2 F_e)$$

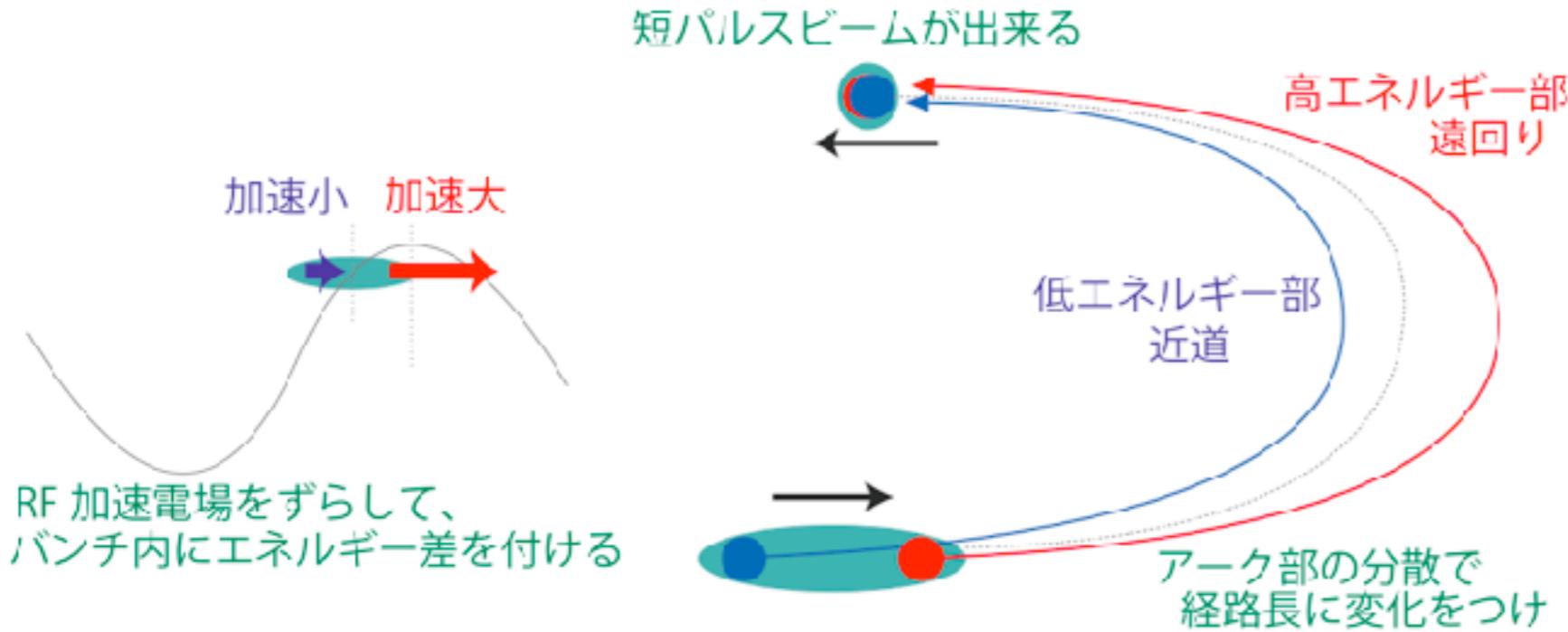


## 現状のcERLの配置を仮定

1. 加速エネルギー：20 MeV, 目標 35 MeV
2. 偏向電磁石の軌道半径：1 m
3. 取り込み可能な立体角：発光点から 820 mm のところに 50 mm 角
4. バンチ内電子数：最近の典型的な運転 0.5 pC/bunch, 目標 7.7 pC/bunch
5. バンチ長：典型的な運転 2 ps RMS, 目標 50 fs RMS
6. RF 周波数：162.5 MHz または 1.3 GHz

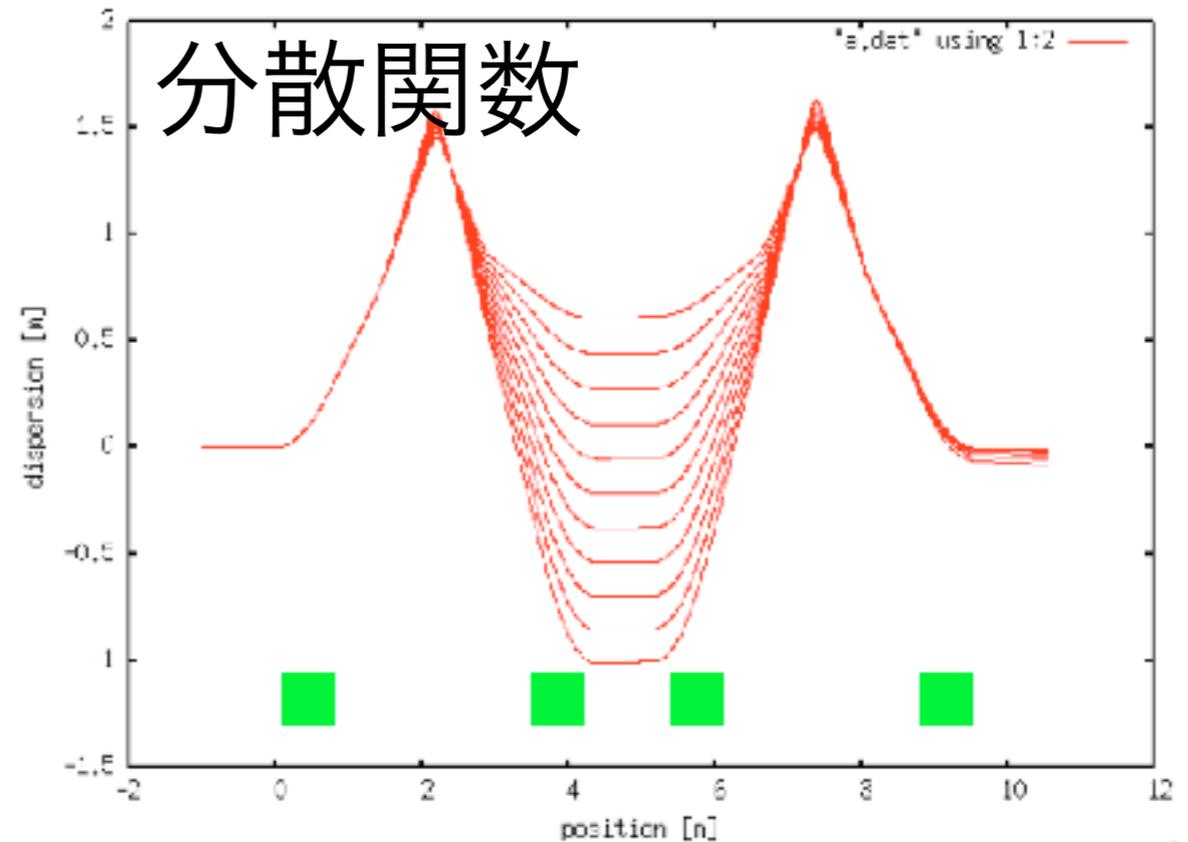
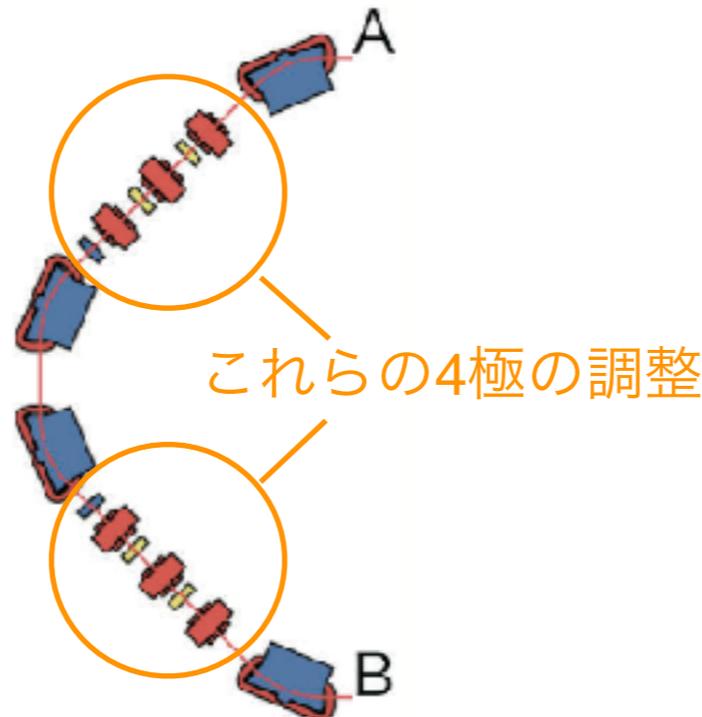
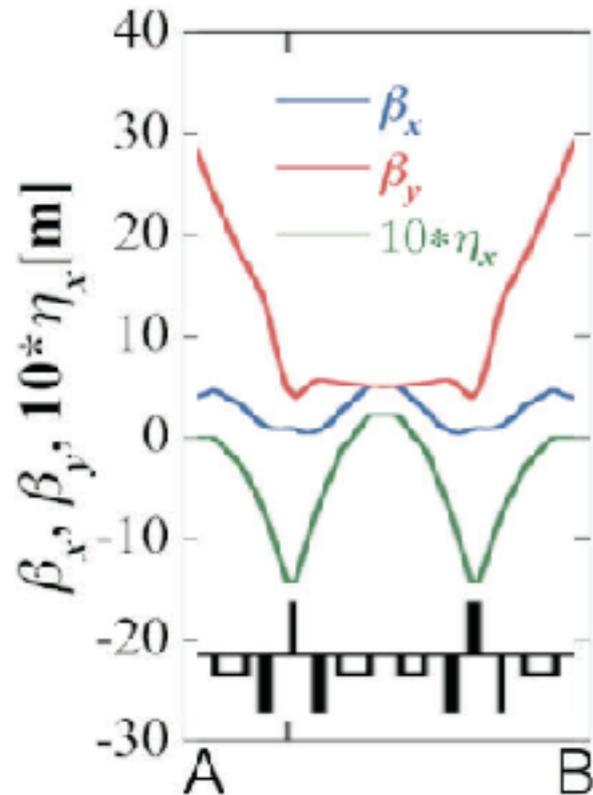
# バンチ圧縮の原理

- cERLでは、空洞オフレスト加速と、アーク部分散によって、バンチを圧縮する。
- アーク部の3連4極電磁石の組み合わせで分散関数が調整できる。R56なる量が変わる。
- R56を微調整し、直線部でバンチが圧縮される最適な条件を決める。



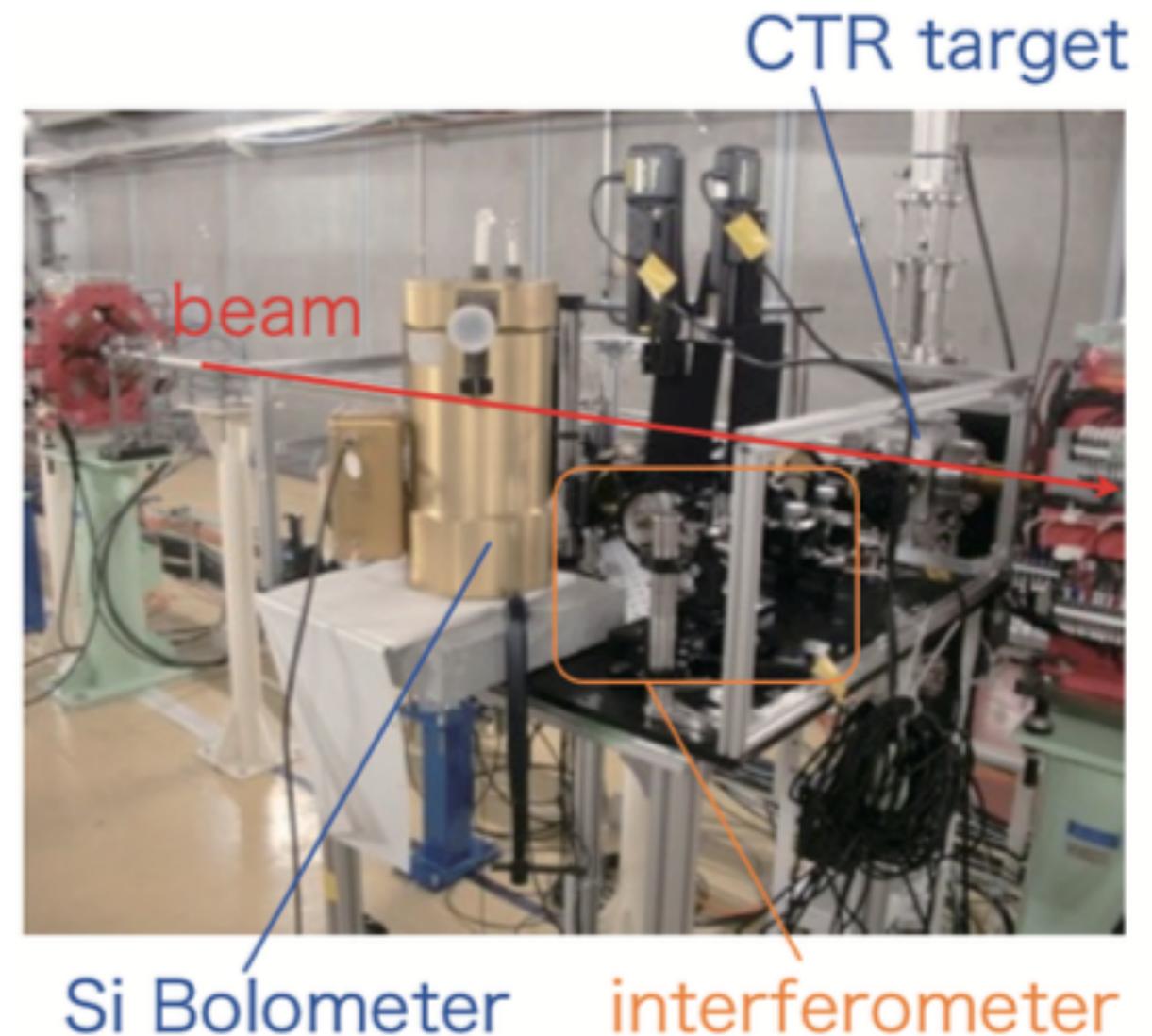
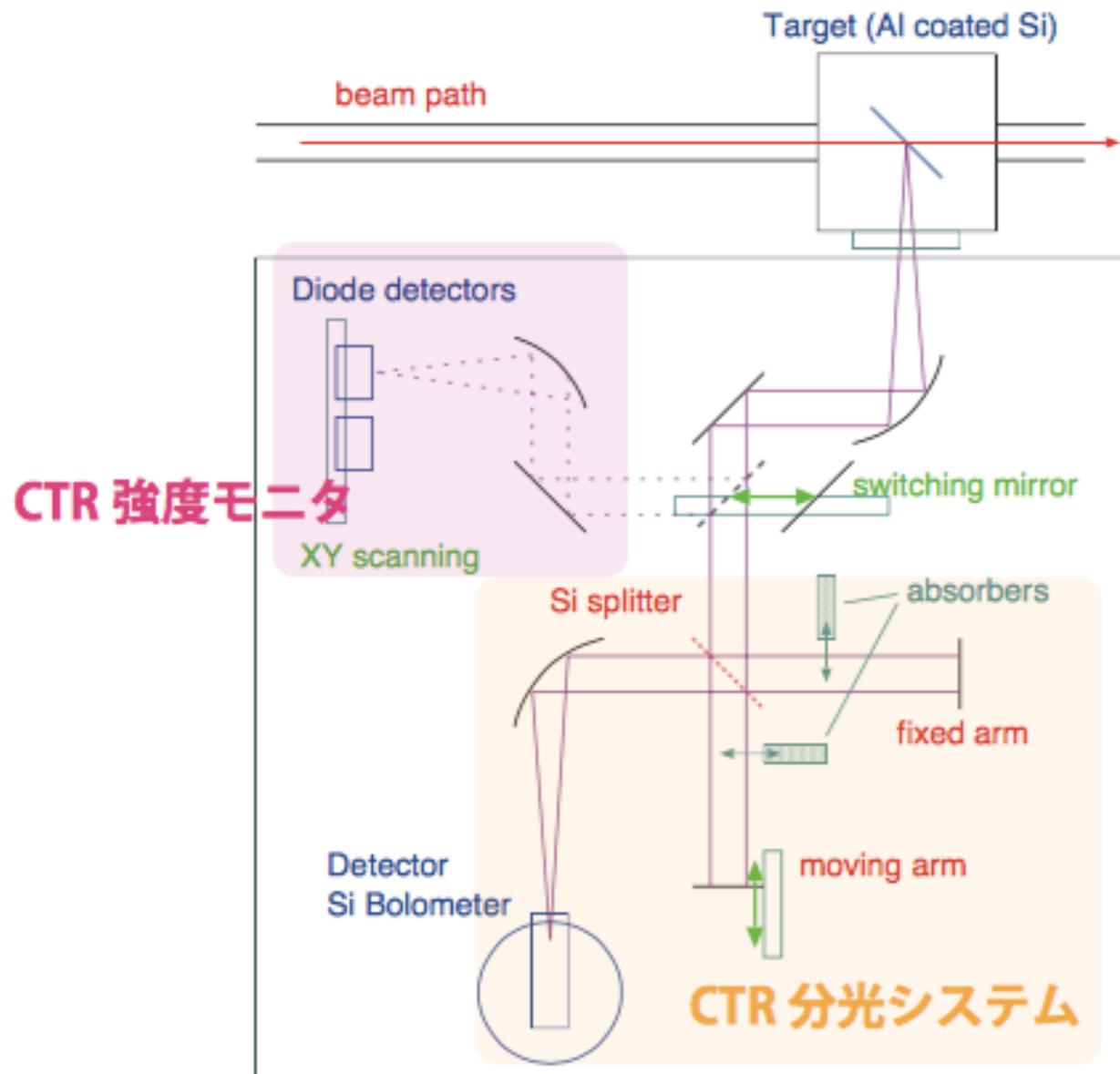
$$R_{56} = \int \frac{\eta(s)}{\rho} ds$$

$$\Delta z = R_{56} \left( \frac{\delta p}{p} \right)$$



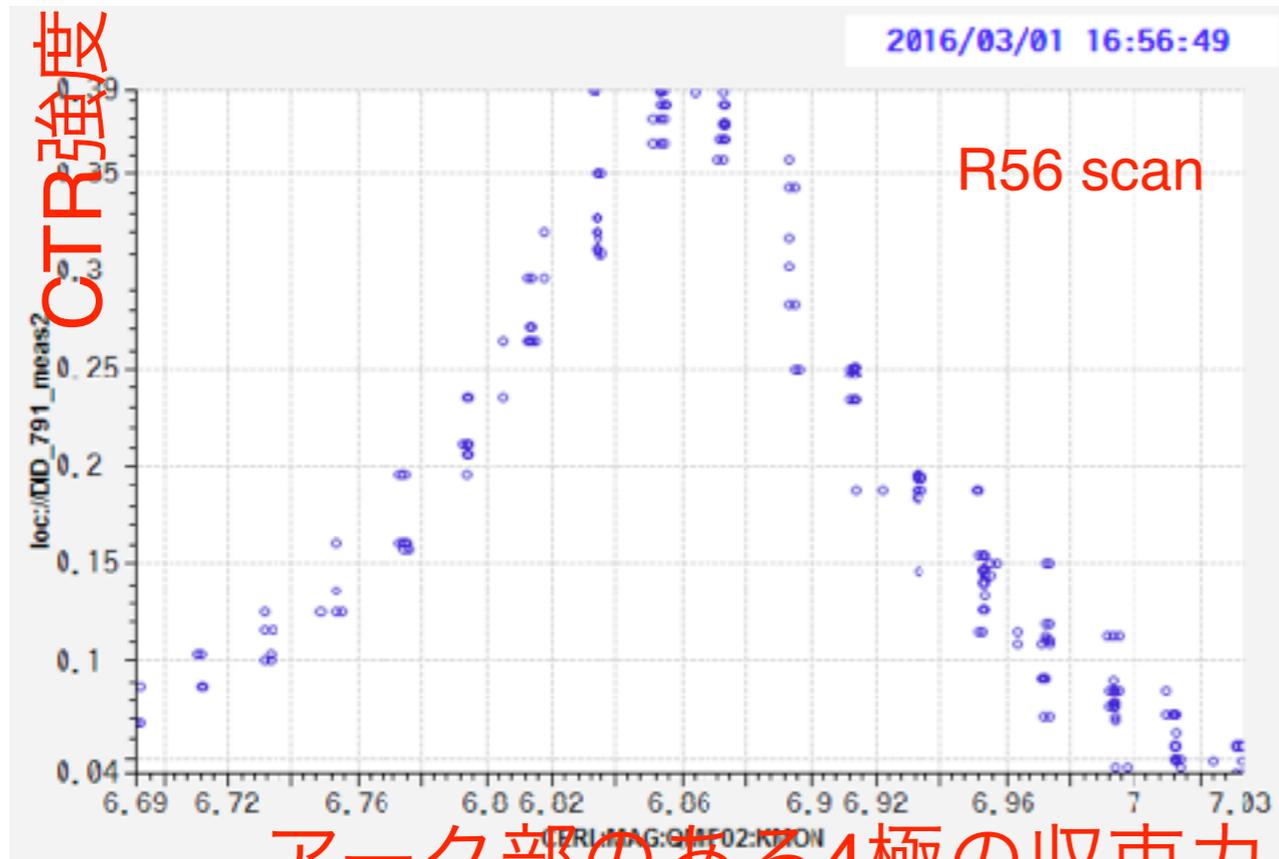
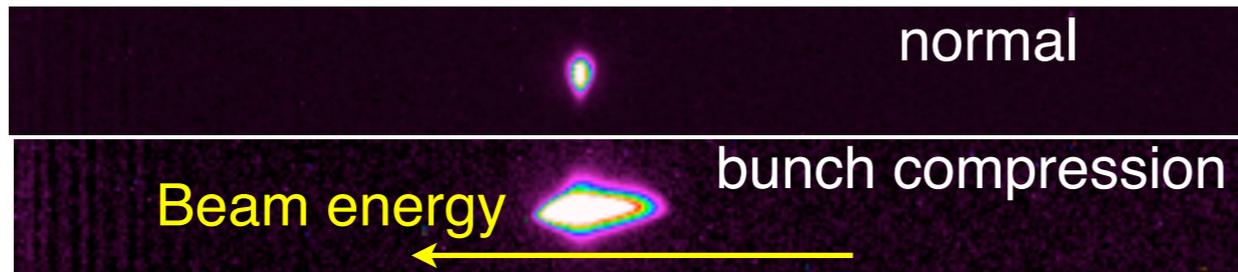
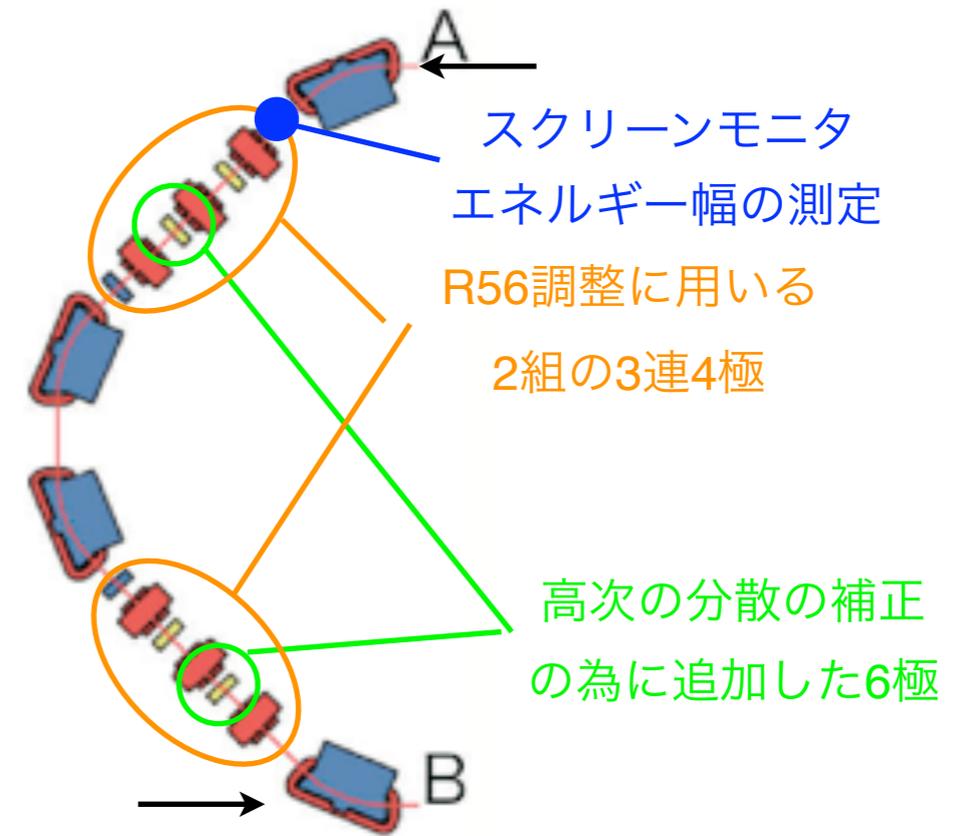
# バンチ長診断装置

- 直線部のCTRポートで測定
- 強度を指標にビーム調整
- 干渉計でスペクトル

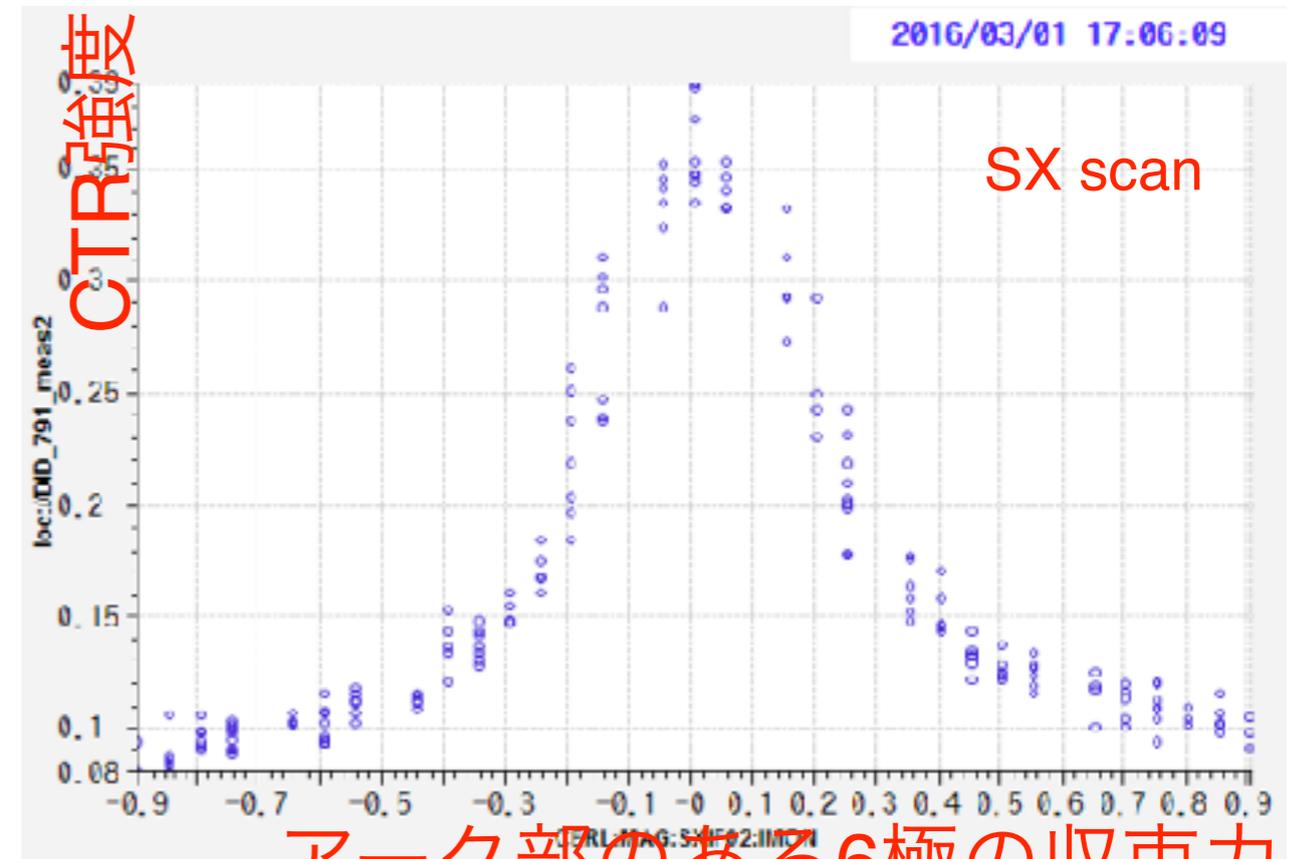


# バンチ圧縮の調整

- 主加速空洞の位相をシフト(オフクレスト)
  - エネルギーは変わらないよう、振幅は上げる。
- 220GHzのダイオード検出器でCTRの強度を見ながら、アーク部の調整。
- R56スキャン, 6極のスキャン



アーク部のある4極の収束力

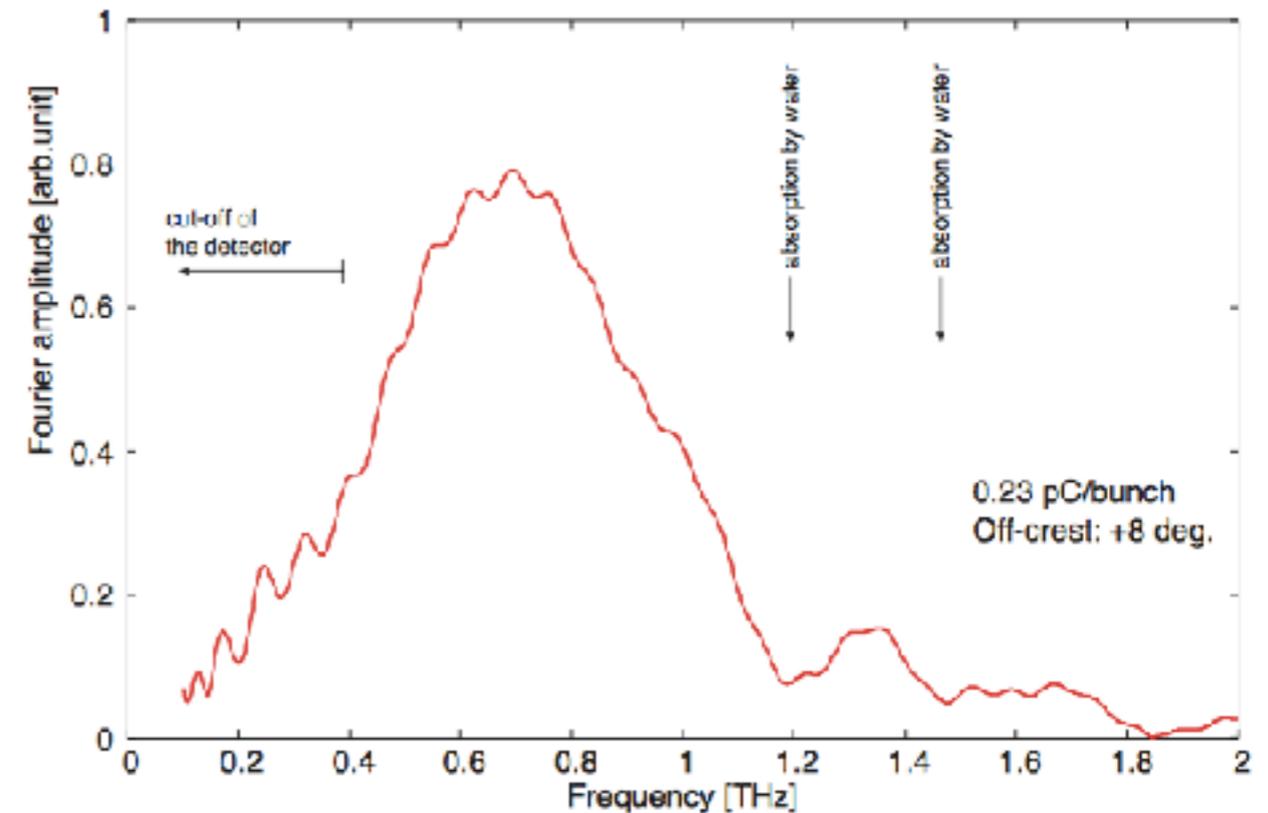
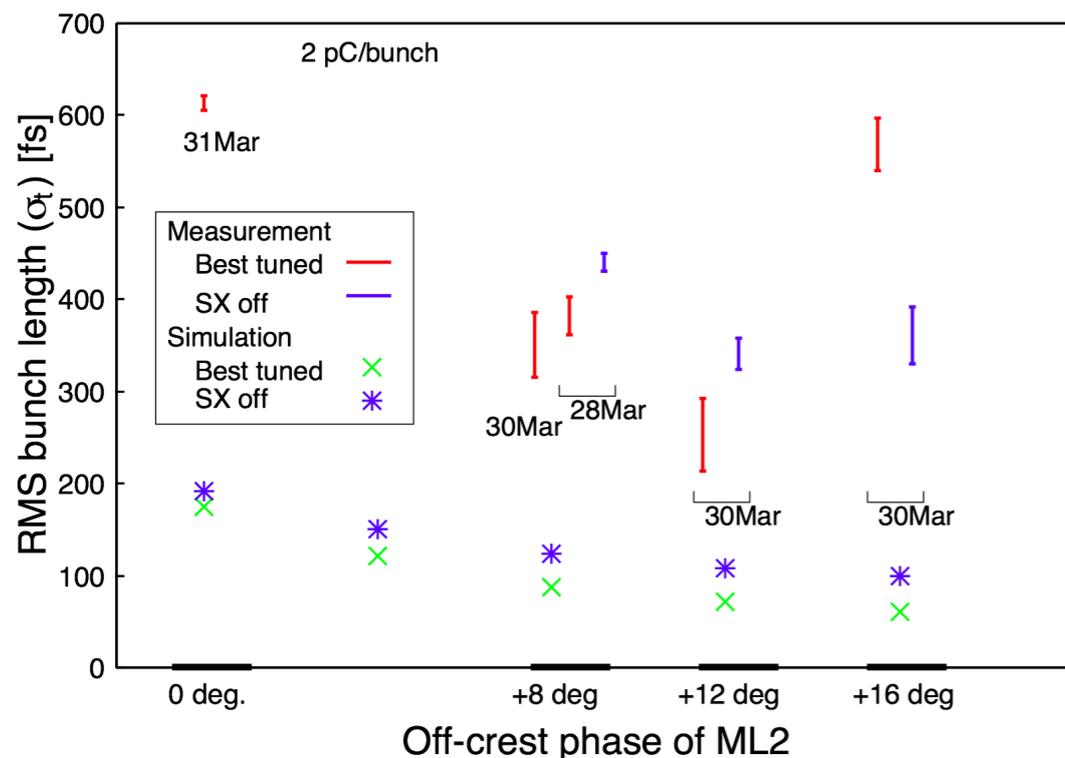
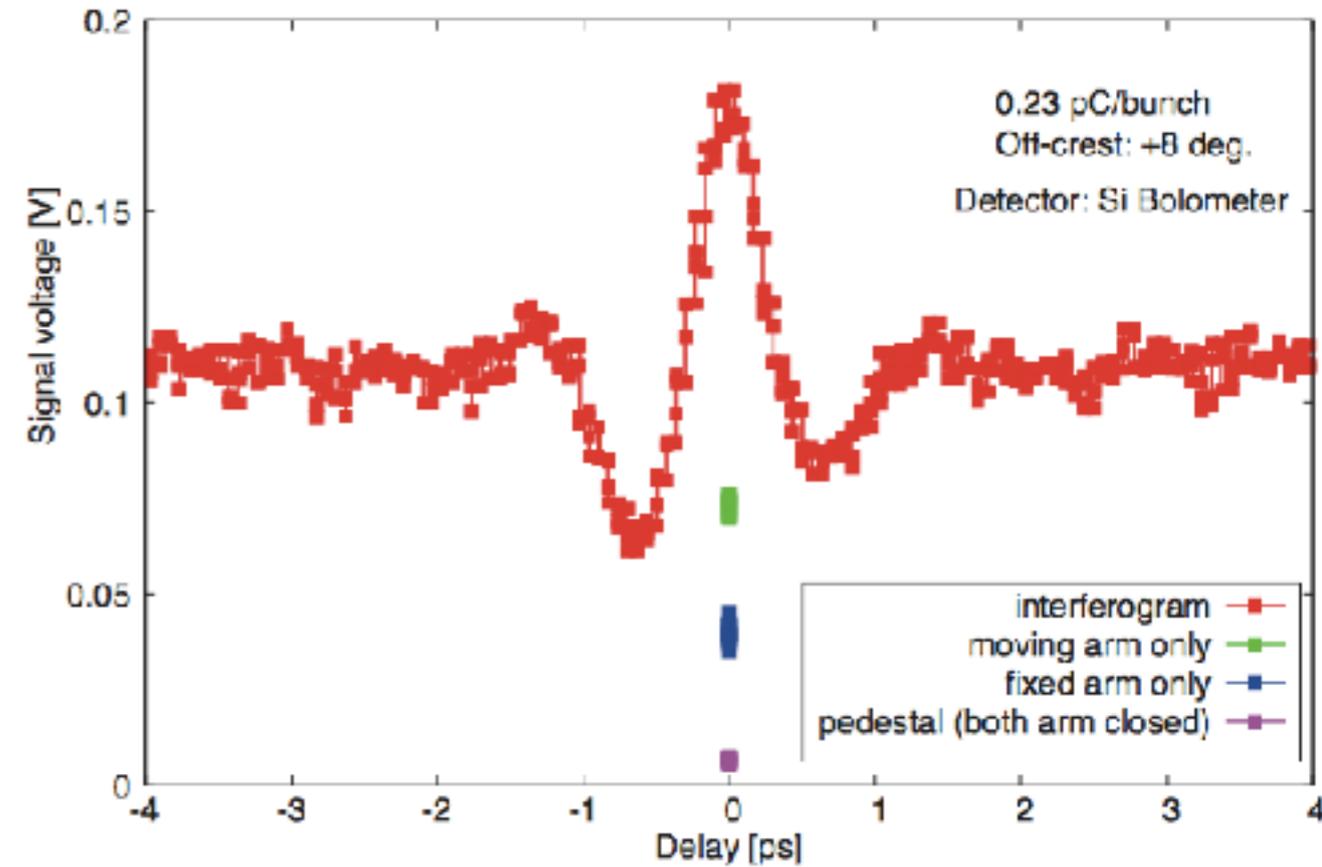


アーク部のある6極の収束力

# スペクトル

- CTRの自己相関測定(マイケルソン干渉計)
  - フーリエ変換でスペクトル
  - バンチ長も推定

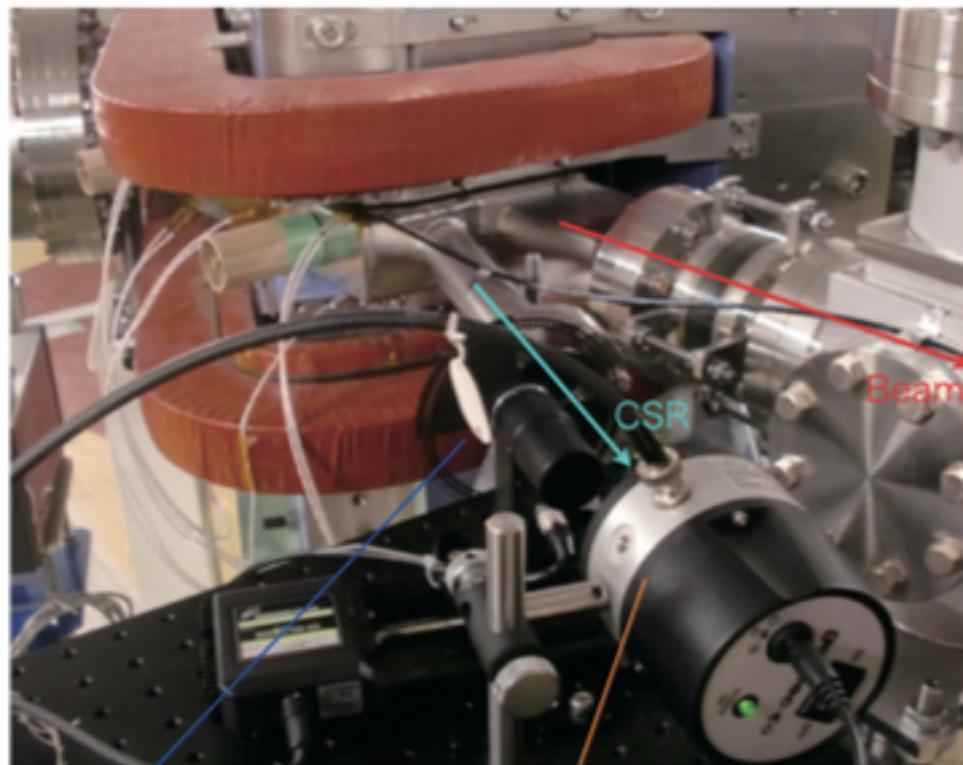
Parameter	Value
Kinetic energy of the return loop	19.5 MeV
Kinetic energy of the injector	2.4 MeV
Acc. gradient of the main linac	$2 \times 8.5$ MeV/cavity
Off-crest phase of the main linac	8 degree (typ.)
Bunch charge	0.23 pC/bunch
Macro-pulse width	$1 \mu\text{s}$
Micro-pulse repetition	162.5 MHz



# 利用実験にむけて

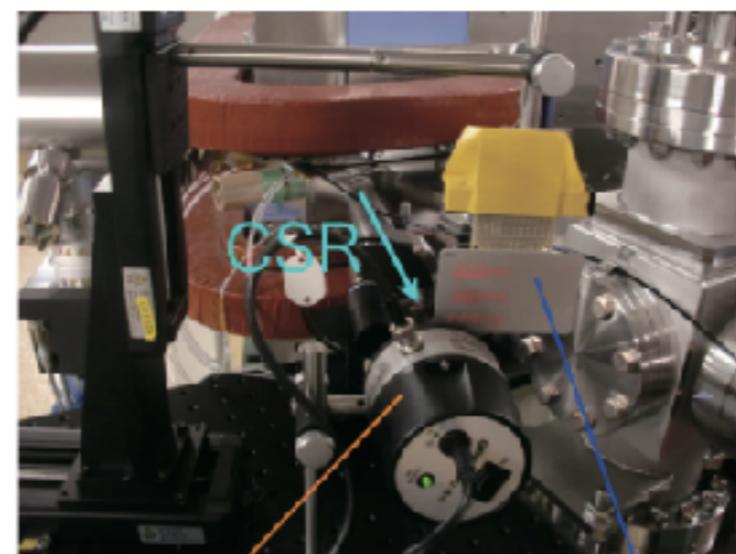
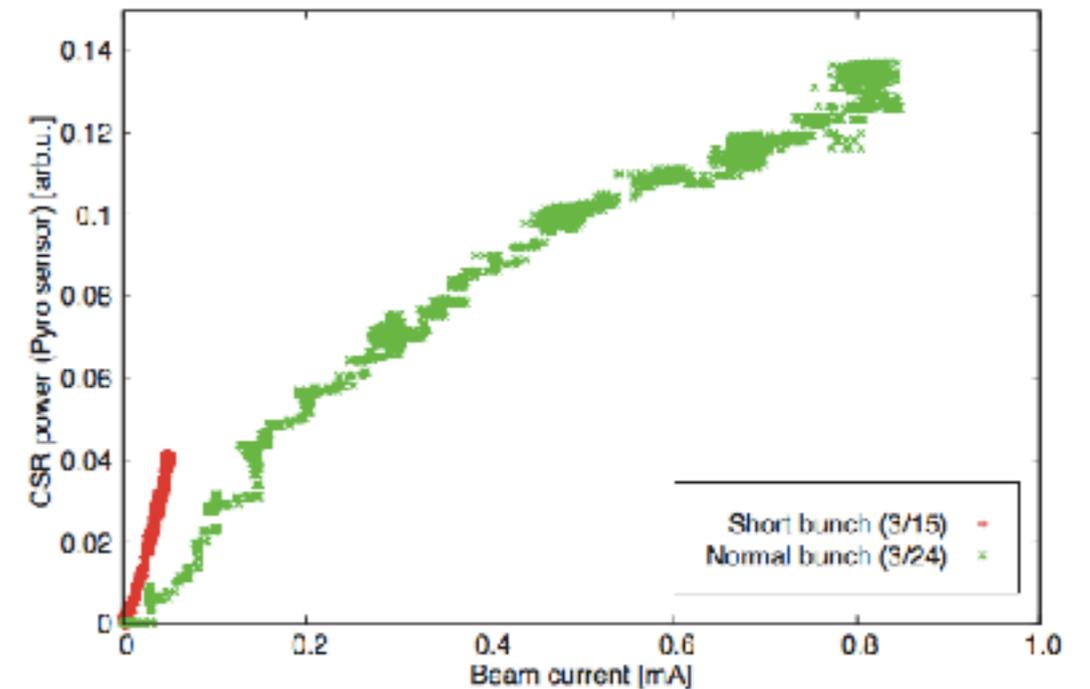
- CTRは診断には都合が良い。(発光点が良く定義される、発光スペクトルが一様)
- CTRはビームを破壊、連続運転に向かない。
- ベンドからのCSRが連続運転、高平均パワーに適する。
- バunch圧縮運転でのビーム電流は、いまのところ $50\mu\text{A}$ 。
- ICカードの透視のデモ

## アーク出口偏向電磁石接線ポート



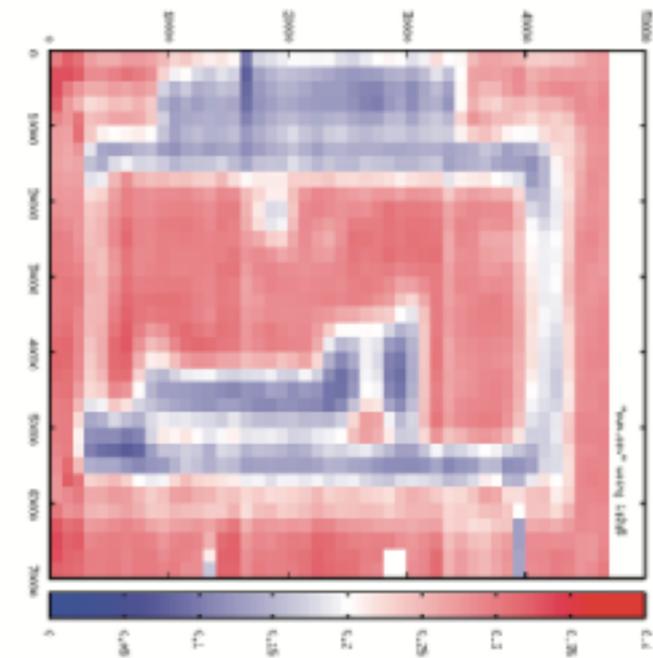
chopper

THz detector (Pyro sensor)



Detector

sample



# まとめ

- レーザーコンプトン散乱とテラヘルツ光源の試験に利用されている。
- レーザーコンプトン
  - 今のビームエネルギーでは利点が無い。
  - レーザー側の開発が十分でない。
- テラヘルツ
  - 診断装置としてはじめた。
  - 高電荷でのバンチ圧縮運転はこれから。
  - ビームラインの整備はなされていない。
- コンパクトERLならではの特性を生かした実験を推進すべき
  - 低エミッタンス、短バンチ、高繰り返し