



X線自由電子レーザー施設SACLAにおける 高強度レーザーを用いた真空回折の探索

清野結大, 山崎高幸^A, 稲田聡明^B, 難波俊雄^B, 浅井祥仁,

藪内俊毅^C, 富樫格^{CD}, 犬伏雄一^{CD}, 玉作賢治^C, 井上伊知郎^C,

大坂泰斗^C, 矢橋牧名^{CD}, 石川哲也^C, 川合健太郎^E

東大理, 高工研^A, 東大素セ^B, 理研/SPRING-8^C, JASRI^D, 阪大工^E

2019/03/15

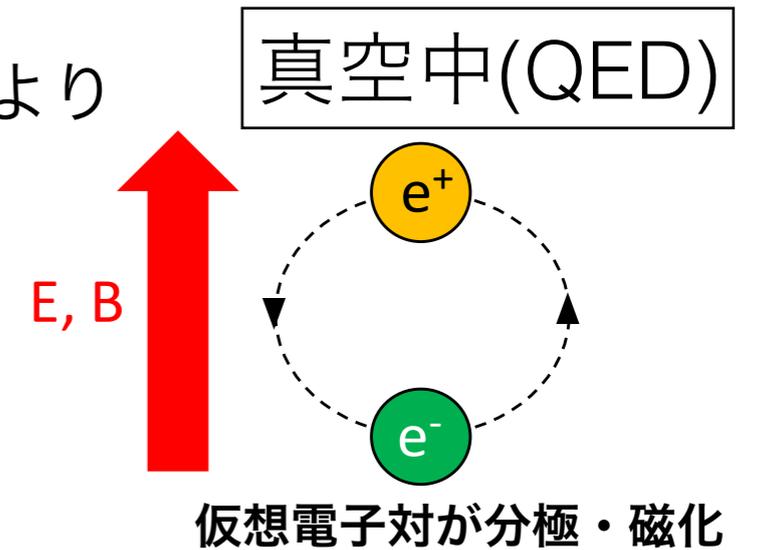
• 本研究はSACLA大学院生研究支援プログラムの助成を受けたものです

真空回折とは

- 標準理論やそれを越えた物理の多くは真空の非線形効果により
高強度電磁場が真空の屈折率を変化させることを予言
しかし未観測 (測りたい!)

ex) QED真空の屈折率: $n = 1 + 9 \times 10^{-24} (B \text{ [T]})^2$

- 未知粒子も屈折率変化に寄与

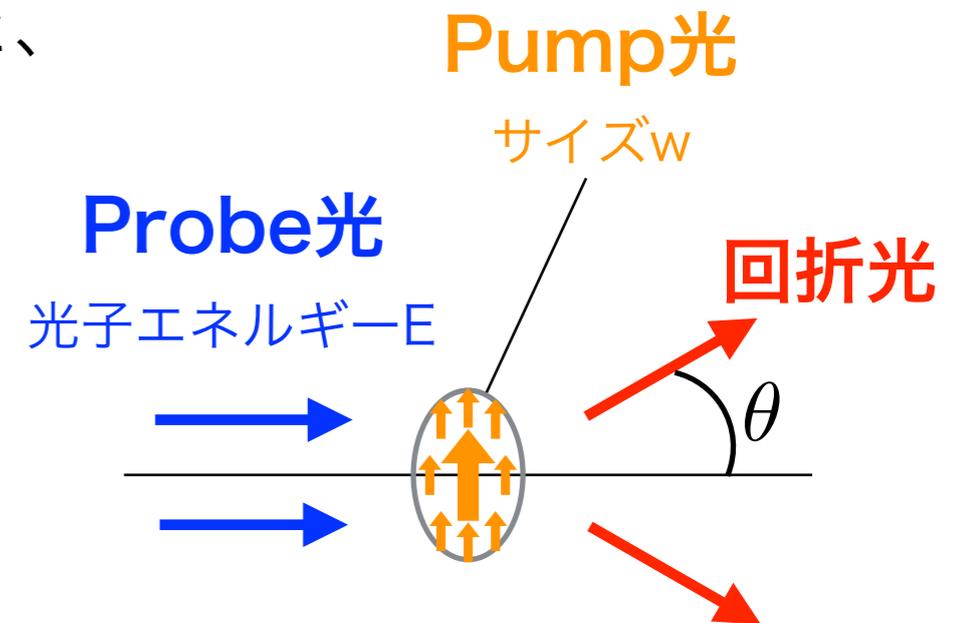


- 局所的な電磁場(pump光)で屈折率勾配を生み出すと、
probe光に回折が生じる→真空回折

- 小さな構造を通過するほど大きく回折
するため、非常に小さい(かつ高強度な)
pump光が必要

$$\theta \sim 60 \mu\text{rad} \times \left(\frac{w}{1 \mu\text{m}} \right) \left(\frac{E}{10 \text{keV}} \right)$$

- 回折確率は(probe光の光子エネルギー)²に比例



実験場所：XFEL施設SACLA

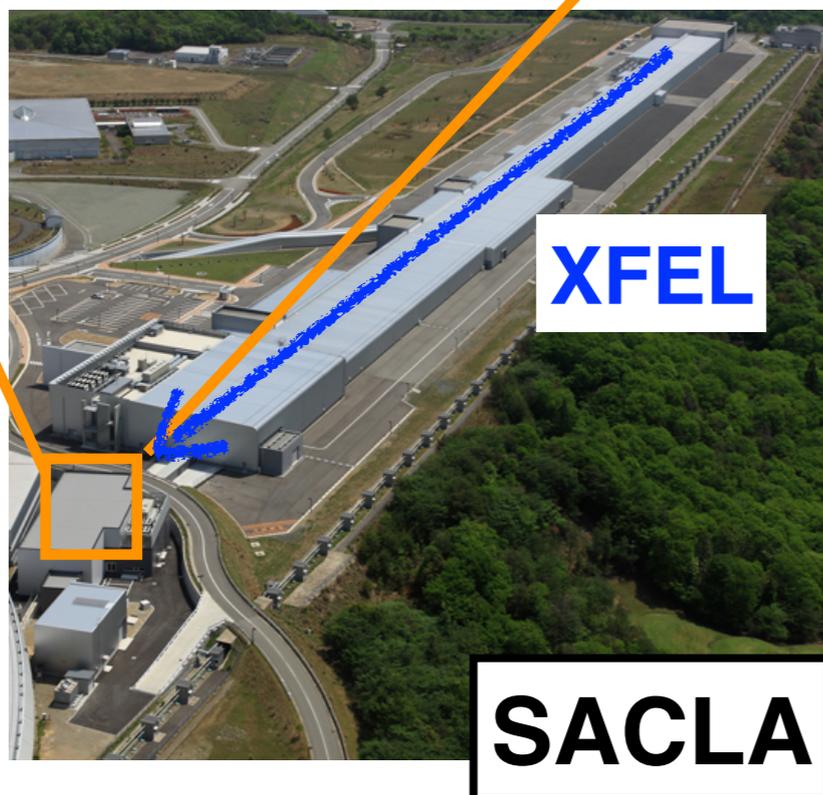
500 TWレーザー



SACLAでは高強度レーザーとXFELが
両方使える！

Pump光：500 TWレーザー

- ・今年度から共用運転開始
瞬間的に高強度なフェムト秒レーザー
パルス幅30 fs、パルスエネルギー10 J
波長800 nm
- ・補償光学の技術により、1 μm まで
集光する



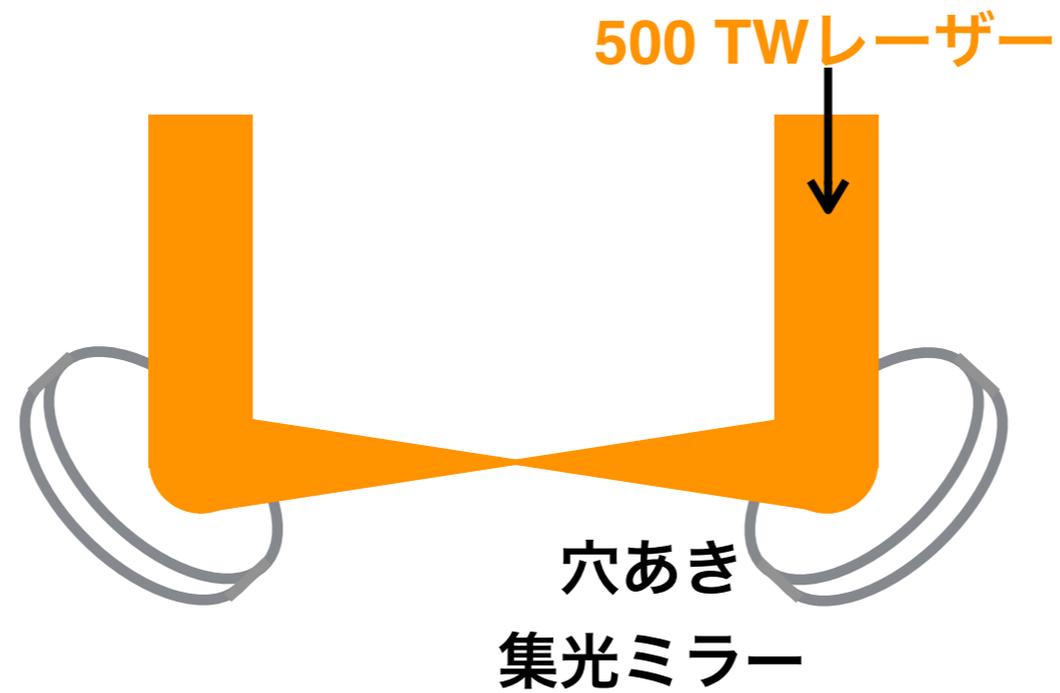
Probe光：SACLAのXFEL

(X-ray Free Electron Laser)

- ・瞬間的に高強度のX線パルス
パルス幅< 10 fs
パルス光子数 10^{11} photon/pulse

実験セットアップ

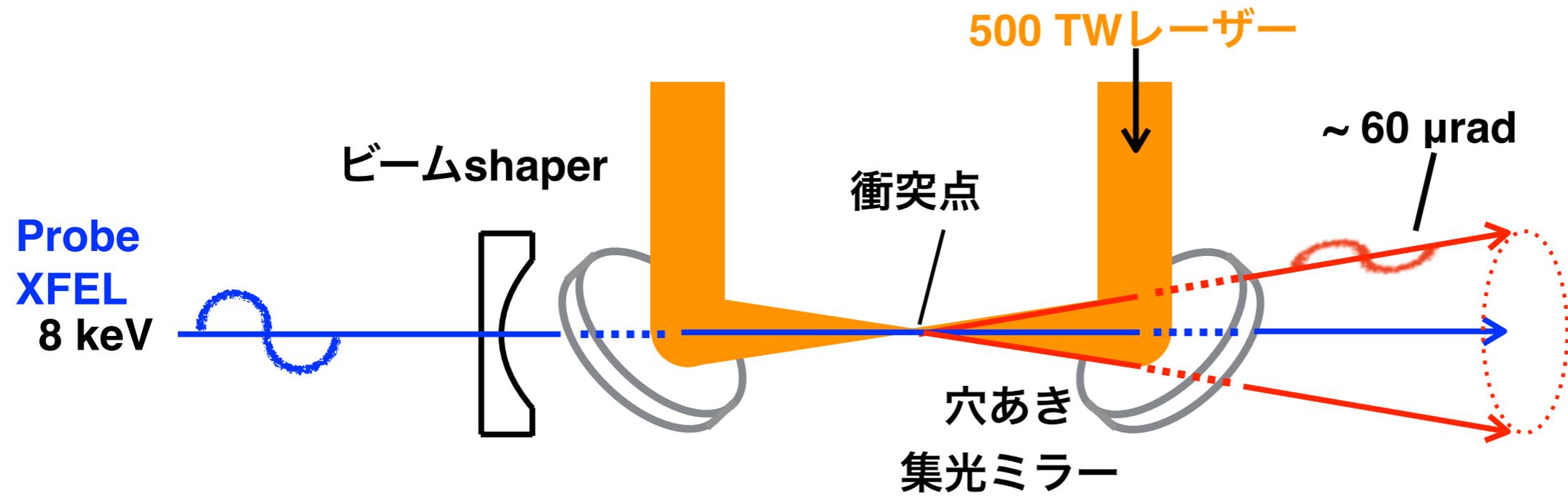
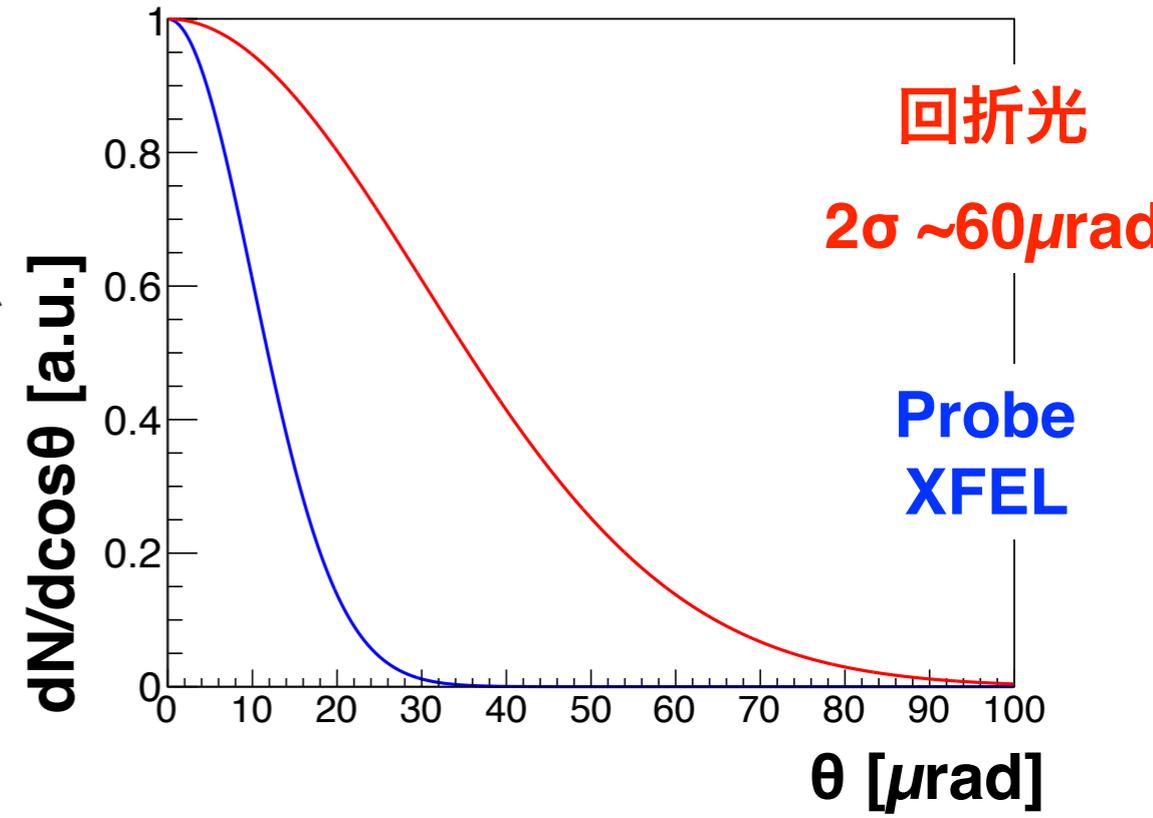
- 500 TWレーザーを1 μm に集光する



実験セットアップ

- ProbeのXFELを、X線ビームshaperで角度発散を抑えつつ2 μm まで絞る
- Probe XFELを、500 TWレーザー集光点で正面衝突させる
- Probe XFELの一部が回折&偏光変化する
確率： $\sim 10^{-11}$ 角度発散： $\sim 60 \mu\text{rad}$

角度発散分布



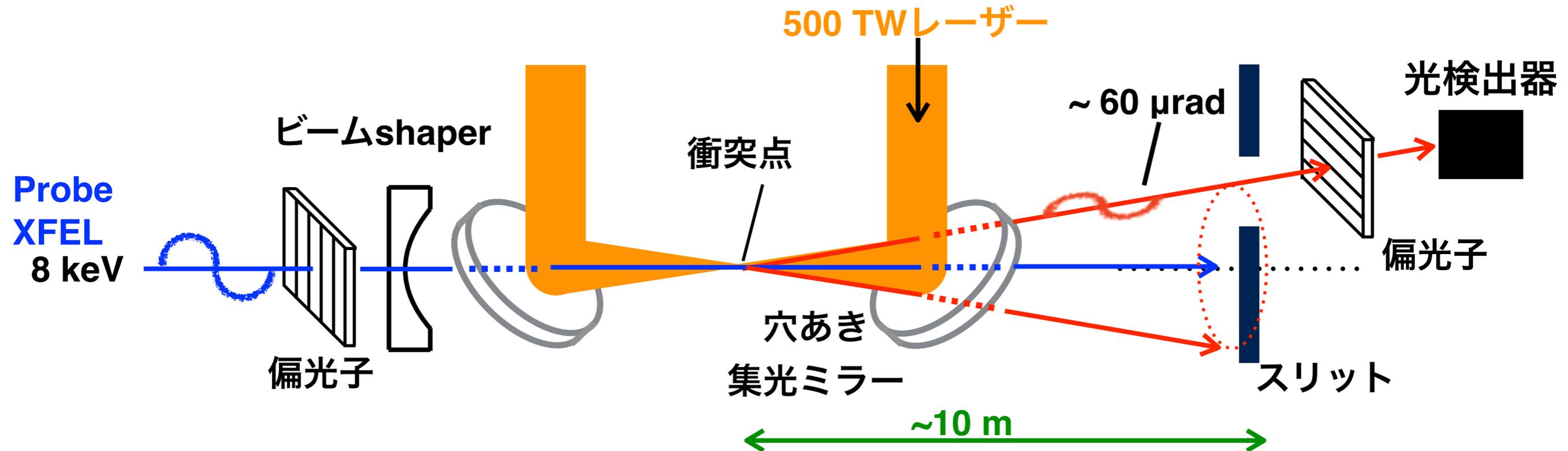
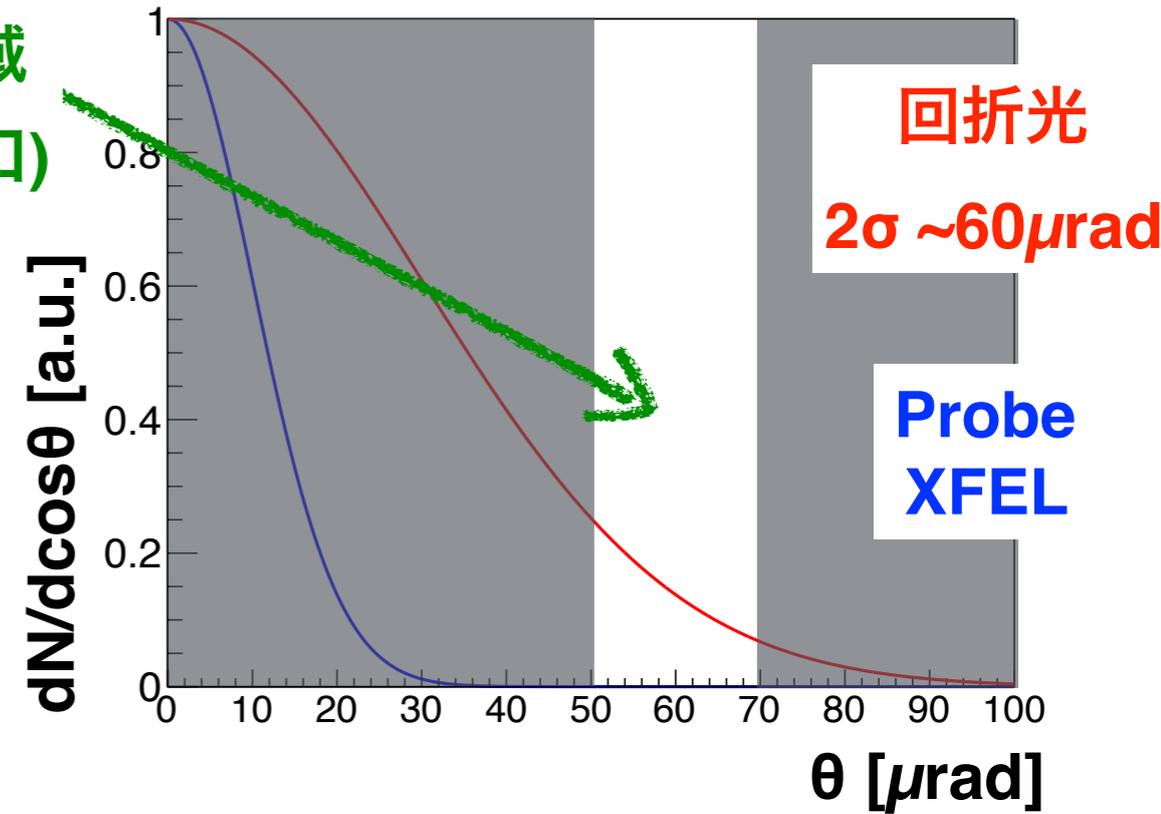
実験セットアップ

- スリット&偏光子でシグナル光を切り出す
- 5日間のDAQで観測可能

(スリットでの分離精度 : $1e-6$
 偏光子での分離精度 : $1e-9$
 SACLA Seed化 : 1 eV)

角度発散分布

シグナル領域
(スリット開口)



プロトタイプ実験(2017/12)

SACLAで出力の弱いレーザーを用いてプロトタイプ実験を行い、
アライメント技術の確立 & 世界初の真空回折実験を行った

- 期間：2017/12 72時間
- レーザー：0.6 TWフェムト秒レーザー

衝突チャンバ内
写真

XFEL

レンズ

衝突点

穴あき
放物面鏡

50 cm

レーザー
1 σ ~3.5mm

プロトタイプ実験を踏まえた実験課題

1. レーザー集光

レーザー集光サイズ 目標 : $1 \mu\text{m}$

これまで : $9.8 \mu\text{m}$

→補償光学素子のデフォーマブルミラーを導入し、
集光サイズを小さくする

2. X線集光(X線ビームshaperの開発)

シグナルとprobeX線の分離のため、低角度発散のprobeX線が必要

probeX線角度発散 要求 : $20 \mu\text{rad}$

これまで : $70 \mu\text{rad}$

→角度発散を抑え、かつ集光が出来るX線ビームshaperを開発中

✓ 角度発散 : 抑制出来ることを確認

△ 集光 : 今回集光サイズの測定を行った

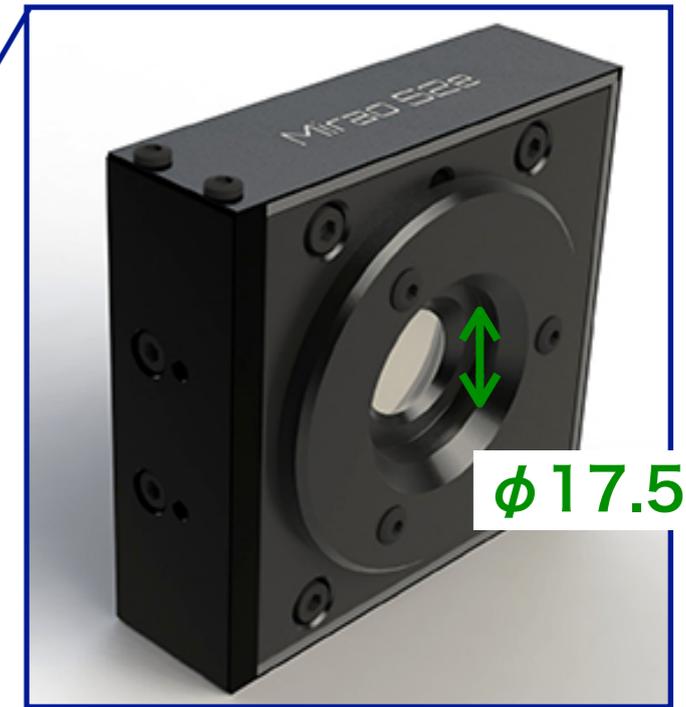
レーザー集光システムへのデフォーダブルミラーの導入

波面形状の乱れは集光サイズを悪化させるため

→デフォーダブルミラーを導入

レーザー波面の形状を操作・整形し集光像を最小化する

Imagine社製 Mirao 52e



$\phi 17.5\text{mm}$

52本のアクチュエータで
ミラー表面形状を操作

レーザー集光システムのポンチ絵

デフォーダブル
ミラー

わずかに歪みのある
集光鏡

集光鏡の焦点距離で決まる
最小サイズ(回折限界)に集光

レンズ レンズ

レーザー
波面

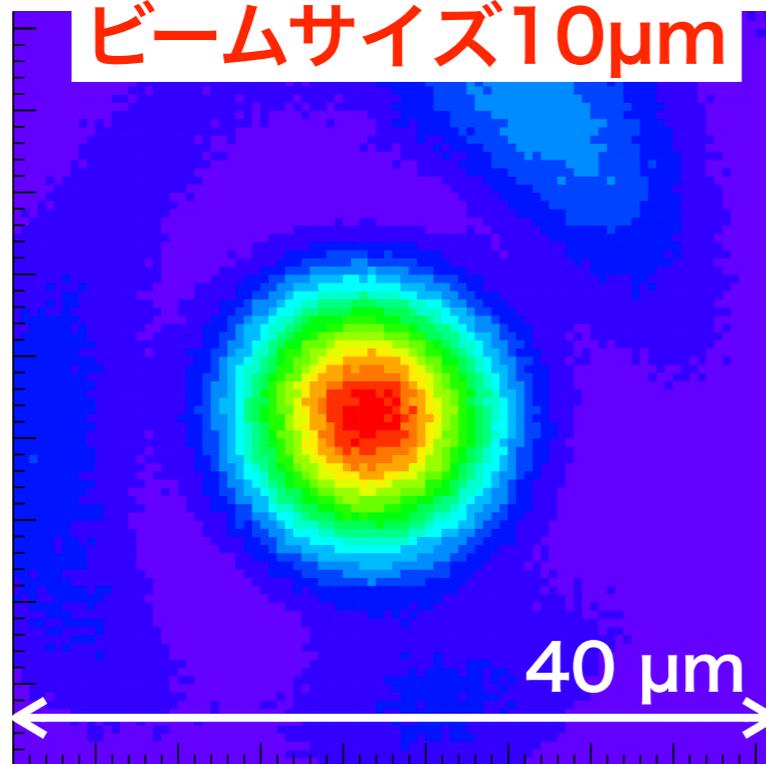
撮像カメラ

レーザー集光サイズの改善結果

波面整形なし

ビームサイズ10 μm

集光像



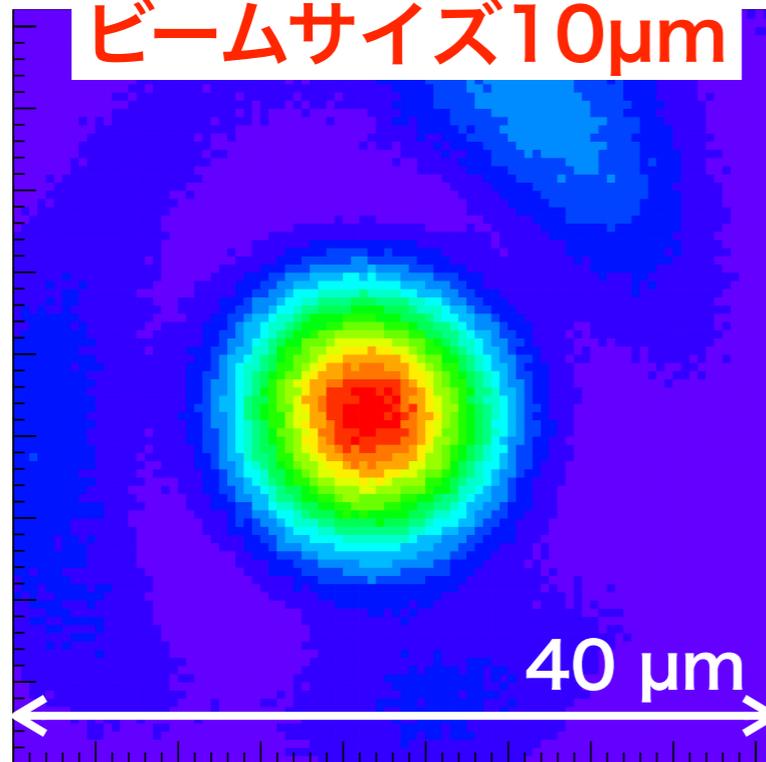
(回折限界4 μm ,集光距離102mm)

- レーザー集光サイズを小さくすることが出来た
- 今後は集光前のビームサイズを拡大し、更に3倍大きな角度で集光することで(3 μm →)1 μm 集光を目指す
(集光前ビームサイズ 7mm→20mm)

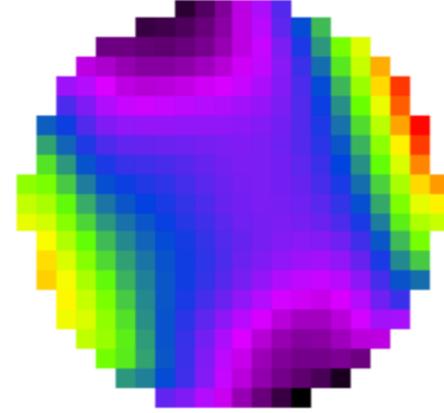
レーザー集光サイズの改善結果

波面整形なし

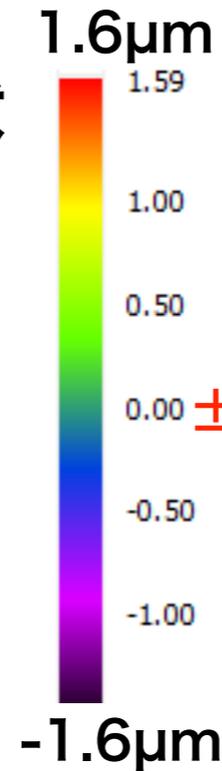
ビームサイズ10 μm



DMミラー形状



(ϕ 13mm)

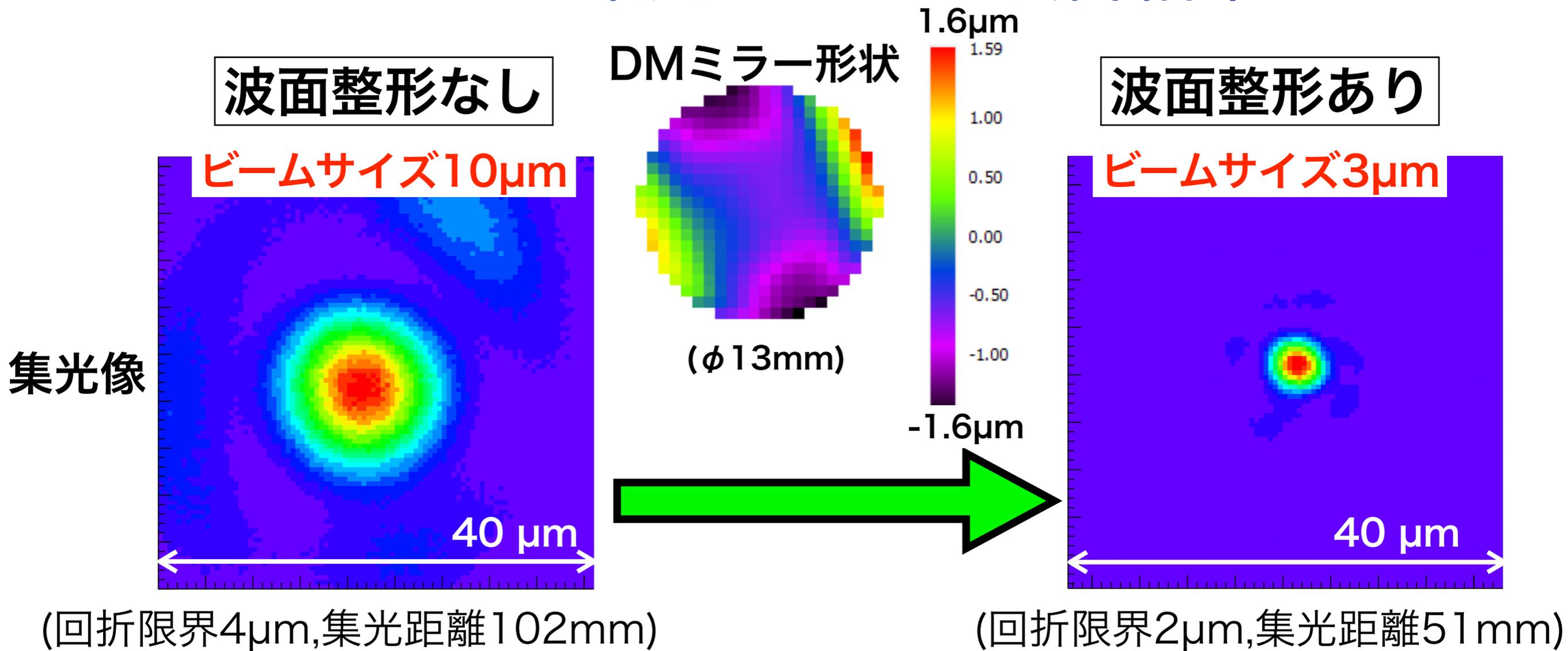


デフォーマブルミラーに
 $\pm 2\lambda$ の表面形状変化を加える

(回折限界4 μm ,集光距離102mm)

- レーザー集光サイズを小さくすることが出来た
- 今後は集光前のビームサイズを拡大し、更に3倍大きな角度で集光することで(3 μm →)1 μm 集光を目指す
(集光前ビームサイズ 7mm→20mm)

レーザー集光サイズの改善結果



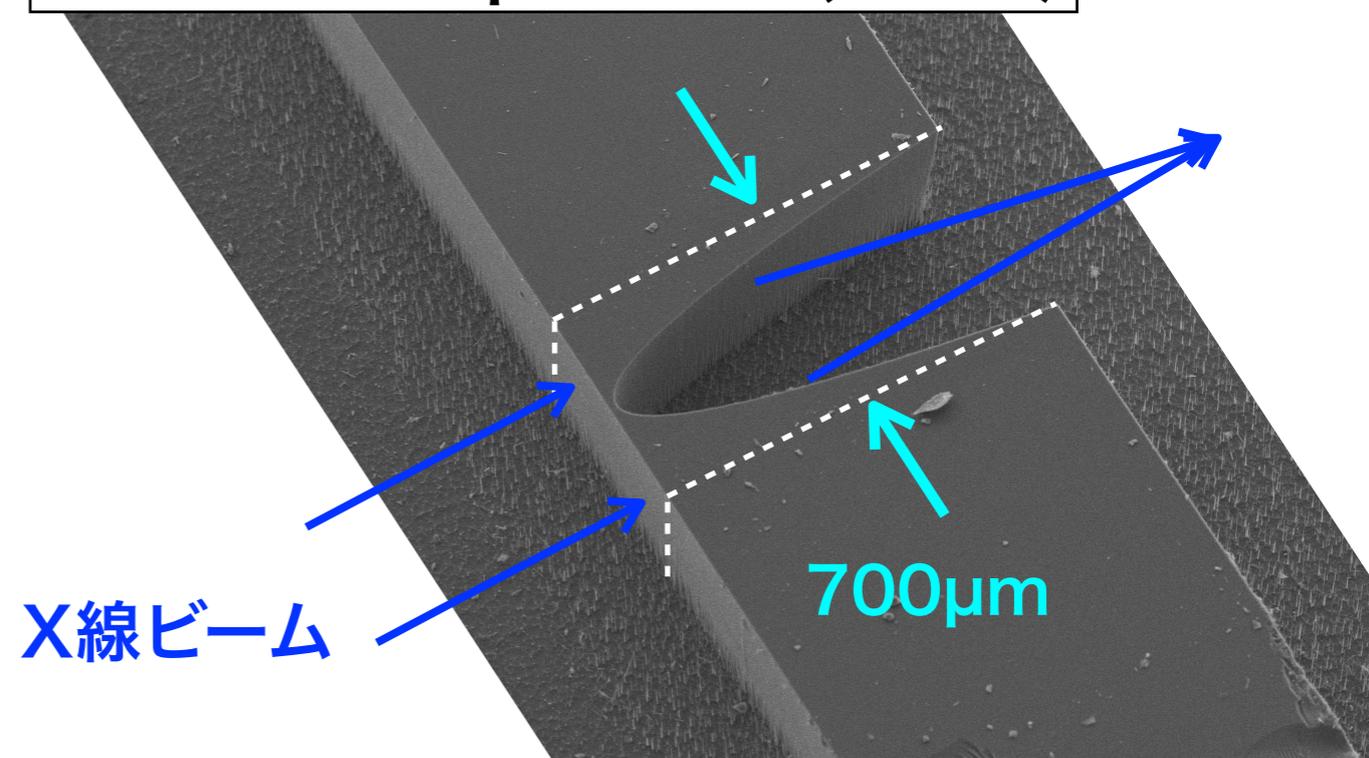
- レーザー集光サイズを小さくすることが出来た
- 今後は集光前のビームサイズを拡大し、更に3倍大きな角度で集光することで($3\mu\text{m} \rightarrow$) $1\mu\text{m}$ 集光を目指す
(集光前ビームサイズ $7\text{mm} \rightarrow 20\text{mm}$)

X線ビームshaperの集光study

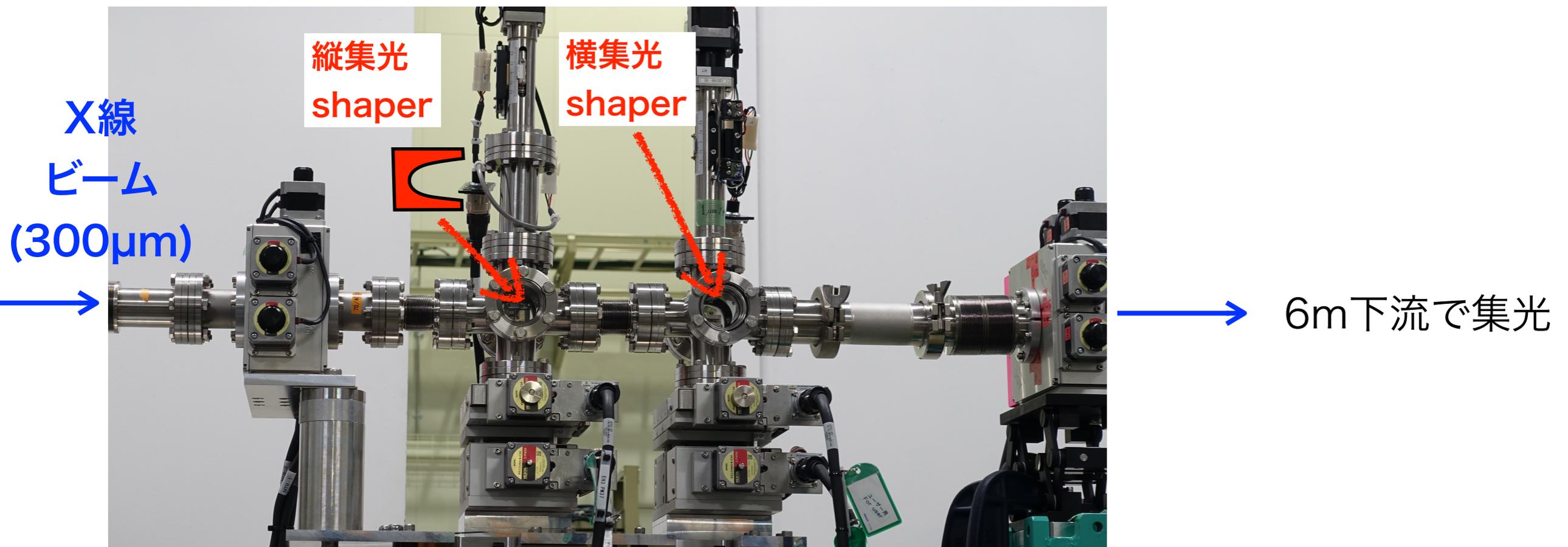
X線ビームshaper

- ・ Si基板に二次関数形状をエッチングで形成
 - ・ ビームが二次関数形状を透過
→ビームをgaus分布にshaping
→1次元集光効果をもつ
- クロスして重ねて、
2次元に集光できるか測定

X線ビームshaper試作品(Si基板)



SACLAでのX線集光実験セットアップ(3月)

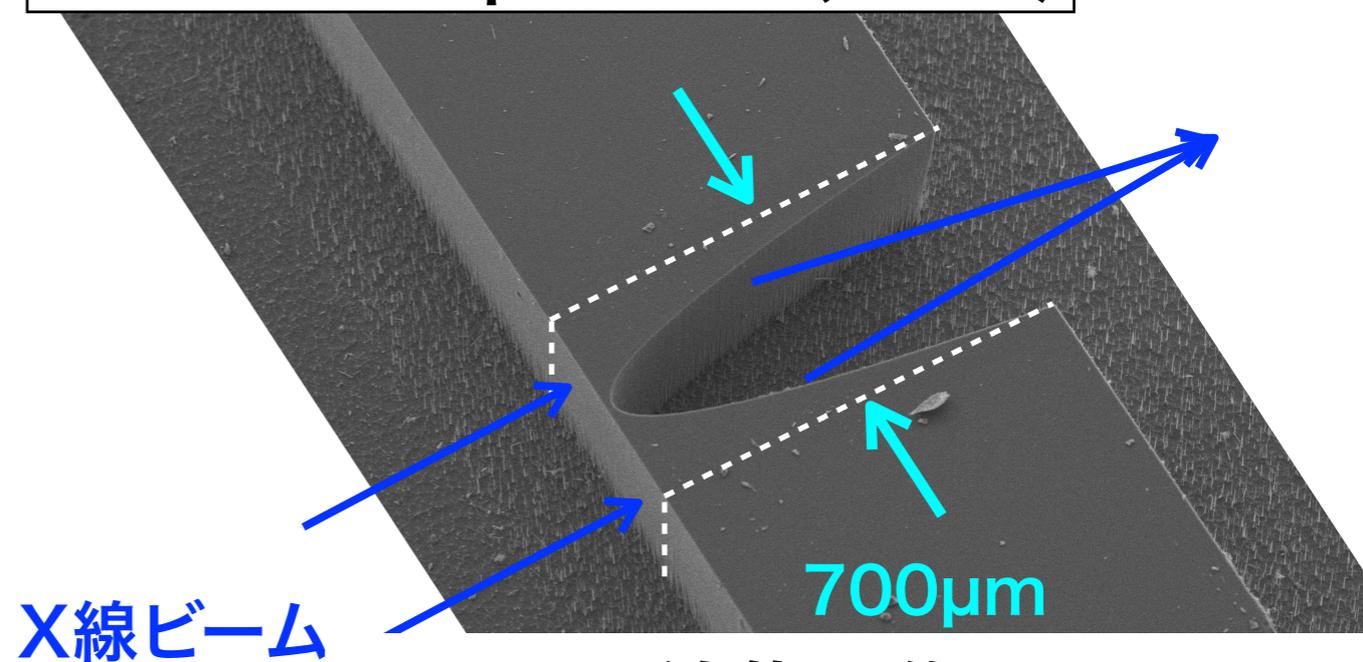


X線ビームshaperの集光study

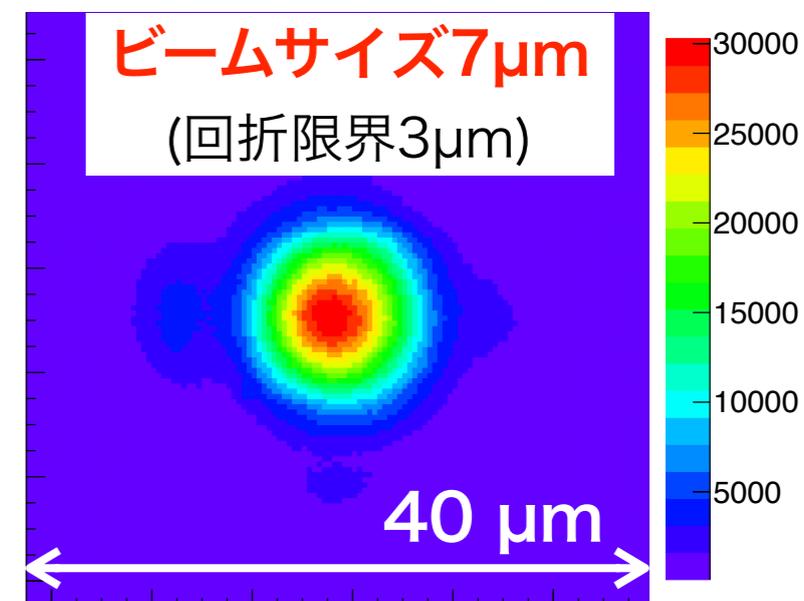
X線ビームshaper

- Si基板に二次関数形状をエッチングで形成
 - ビームが二次関数形状を透過
→ビームをgaus分布にshaping
→1次元集光効果をもつ
- クロスして重ねて、
2次元に集光できるか測定

X線ビームshaper試作品(Si基板)

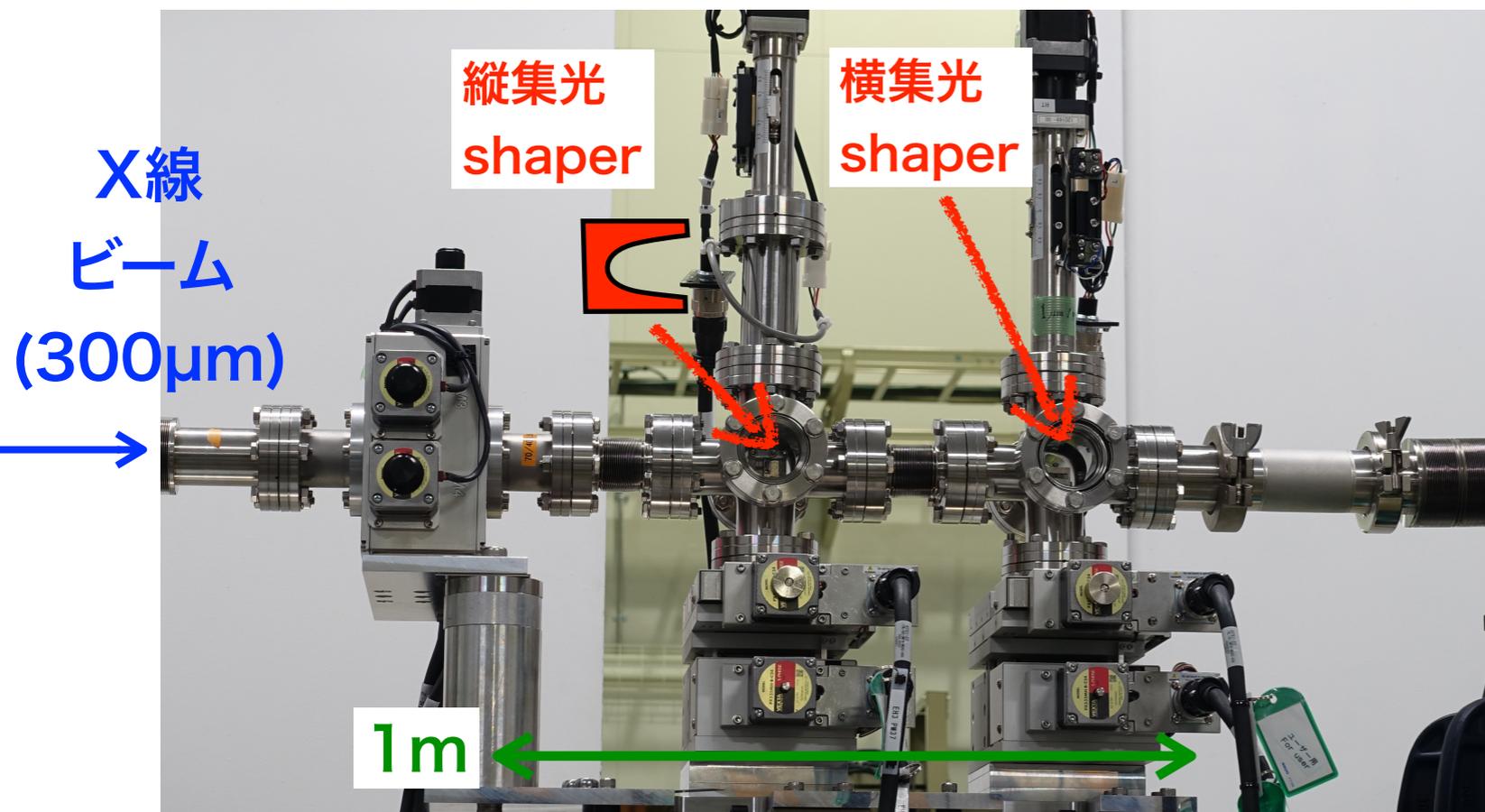


X線集光像



- ✓ 集光出来ることを確認
- △ 回折限界近くの集光性能が必要
レンズ形状の評価を検討中

SACLAでのX線集光実験セットアップ(3月)



真空回折観測へ向けた今後の課題

- **レーザー集光**

- 0.6 TWレーザーでの1 μ m集光のstudy
- 500 TWレーザーでの集光study

- **shaper開発**

- 集光効果の改善

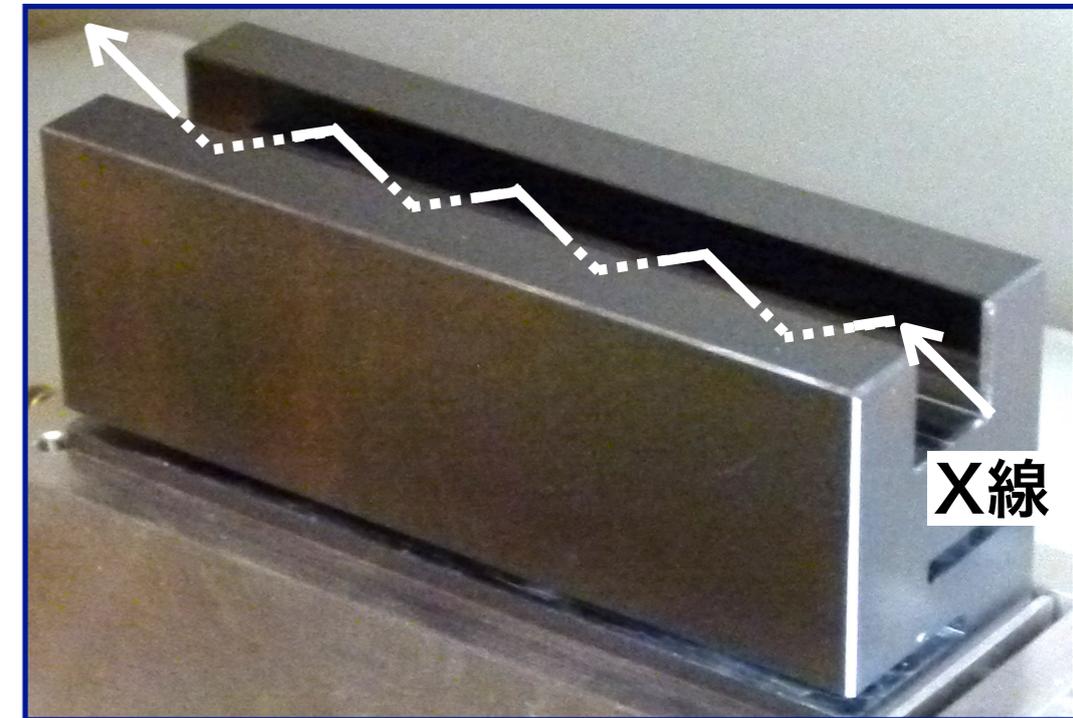
- **BG抑制用の偏光子開発**

- 偏光変化をみる偏光子の開発
Siの複屈折率の結晶面依存性や
表面粗さの消光比への影響等の
測定を計画中

- **500 TWレーザーでの実験システムの設計及び測定**

- 来年以降に5日間の測定を行い、
真空回折の世界初観測

高強度電磁場は真空複屈折も生む
→シグナルの一部は偏光変化する
→特定の偏光を通す偏光子(精度 $1e-9$)で
S/Nを向上させる



開発中のSi製偏光子

(1つの偏光成分のみ反射する
Si511面で8回反射)

まとめ

- 真空回折とは、高強度電磁場によって真空の屈折率が変化し、伝播する光が回折する未観測現象
- 本実験では高強度電磁場を500 TWレーザーで生成し、SACLAのXFELをprobe光として真空回折を探索する
- レーザー集光サイズの最小化のためにデフォーダブルミラーを導入
集光studyを実行中
- X線ビームshaperを開発中。集光効果を確認できた
- 来年以降に500 TWレーザーを用いて実験を行い、QEDで予言される真空回折の初観測を行う