



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

2018/09/17

• 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

Strong-Field QEDと真空回折

- 量子場の理論は標準理論をはじめ自然を良く記述しているが、高強度電磁場下ではあまり検証されておらず、**Strong-Field QEDと呼ばれる新分野**を構成

Strong-Field QEDで起こりうる物理現象の例

- 電磁場による真空の屈折率変化
- 相対論的運動をする荷電粒子と光の相互作用
- 高次の非線形相互作用

→高強度レーザーの発達により検証可能に！

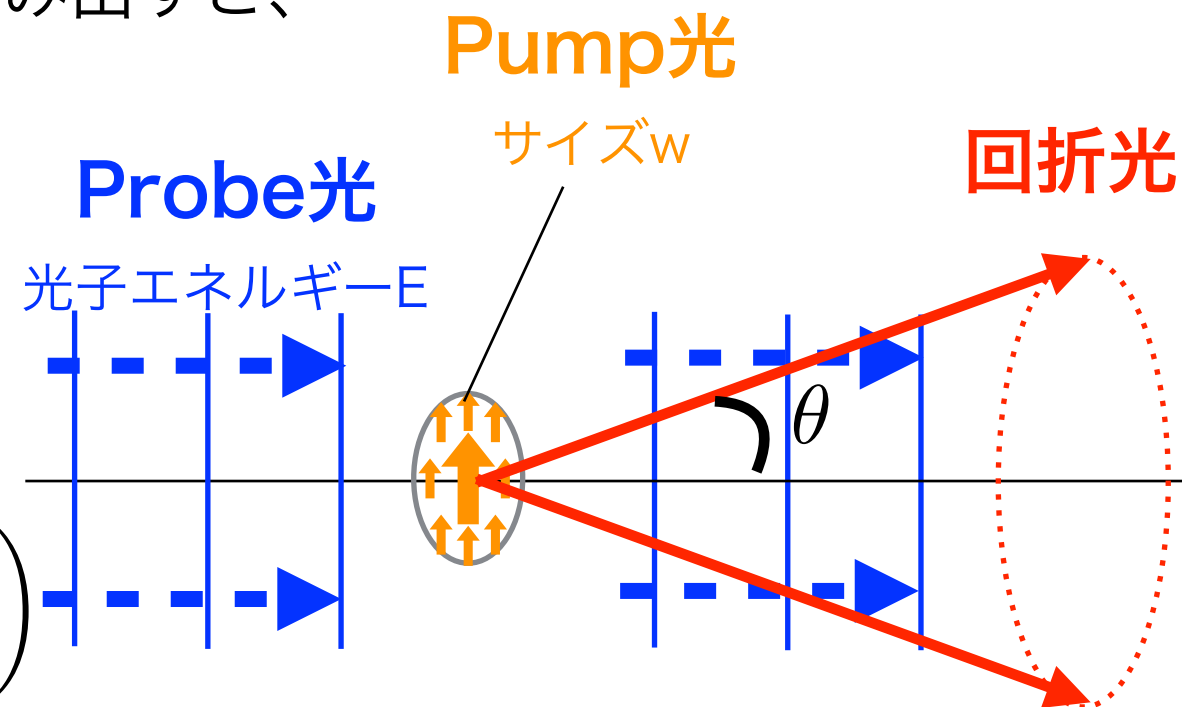
- 局所的な電磁場(pump光)で屈折率勾配を生み出すと、

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

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

- 高強度なprobe光も必要
- 回折確率は(プローブ光の光子エネルギー)²に比例



実験場所：XFEL施設SACLA

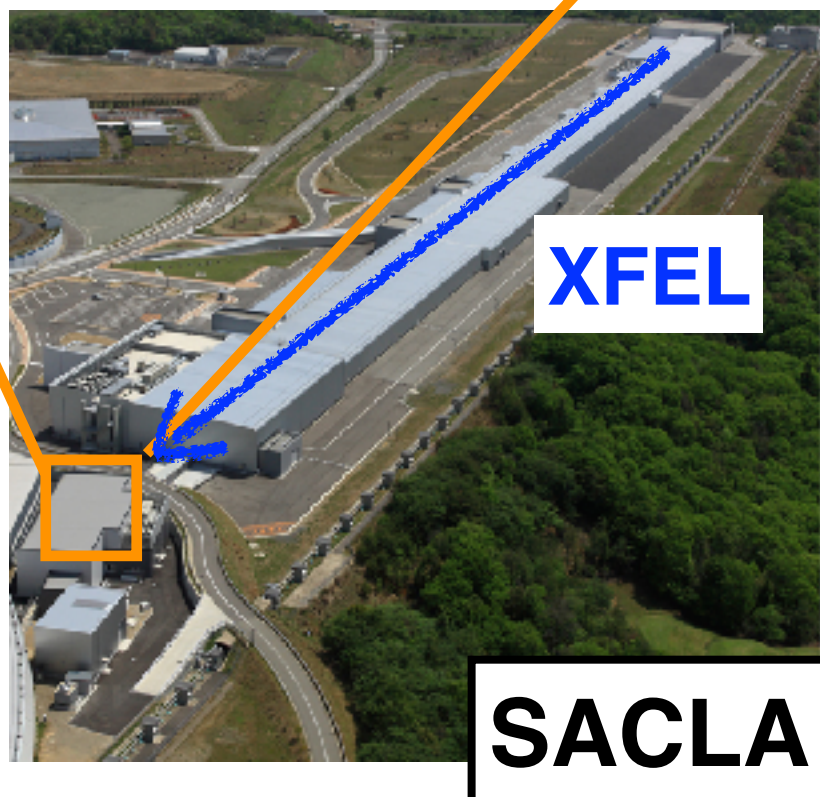
500 TWレーザー



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



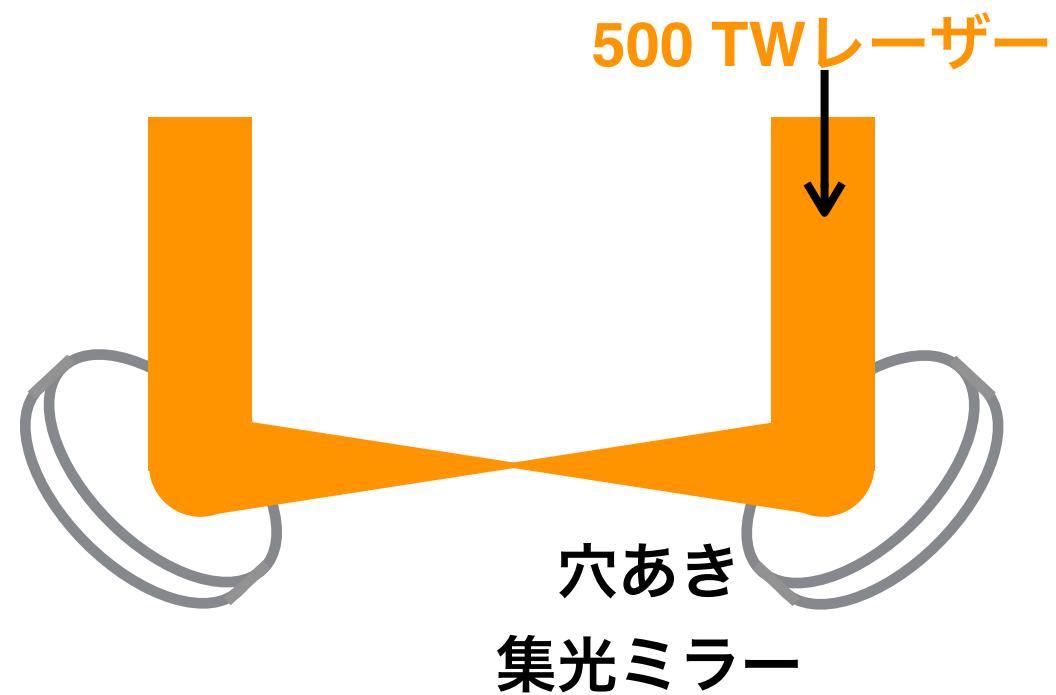
Probe光：SACLAのXFEL

(X-ray Free Electron Laser)

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

実験セッティング

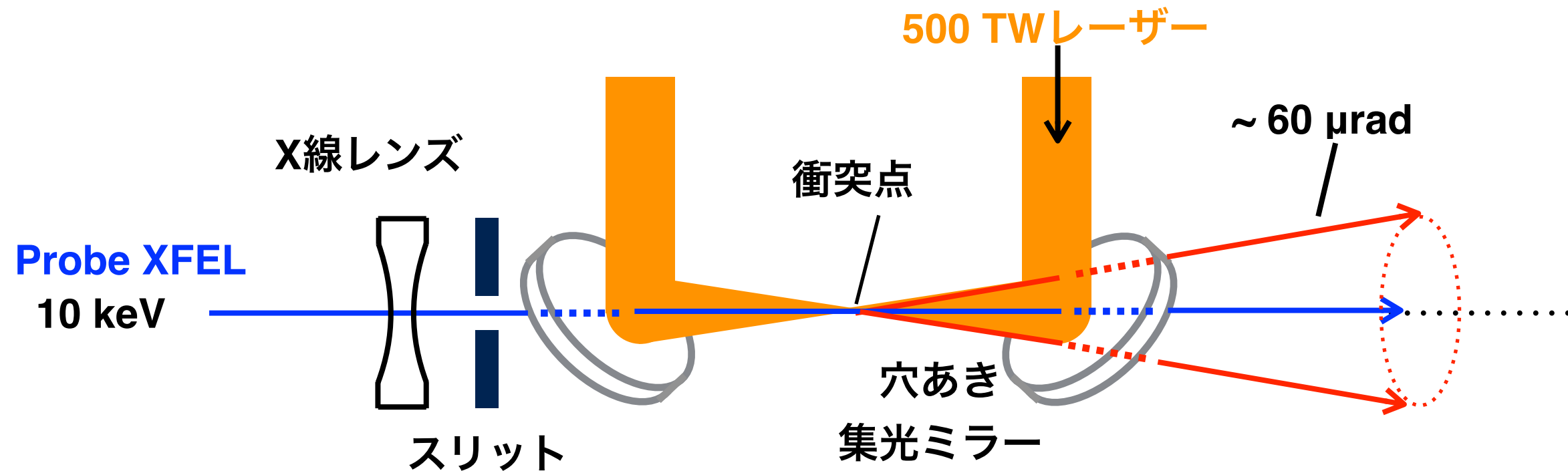
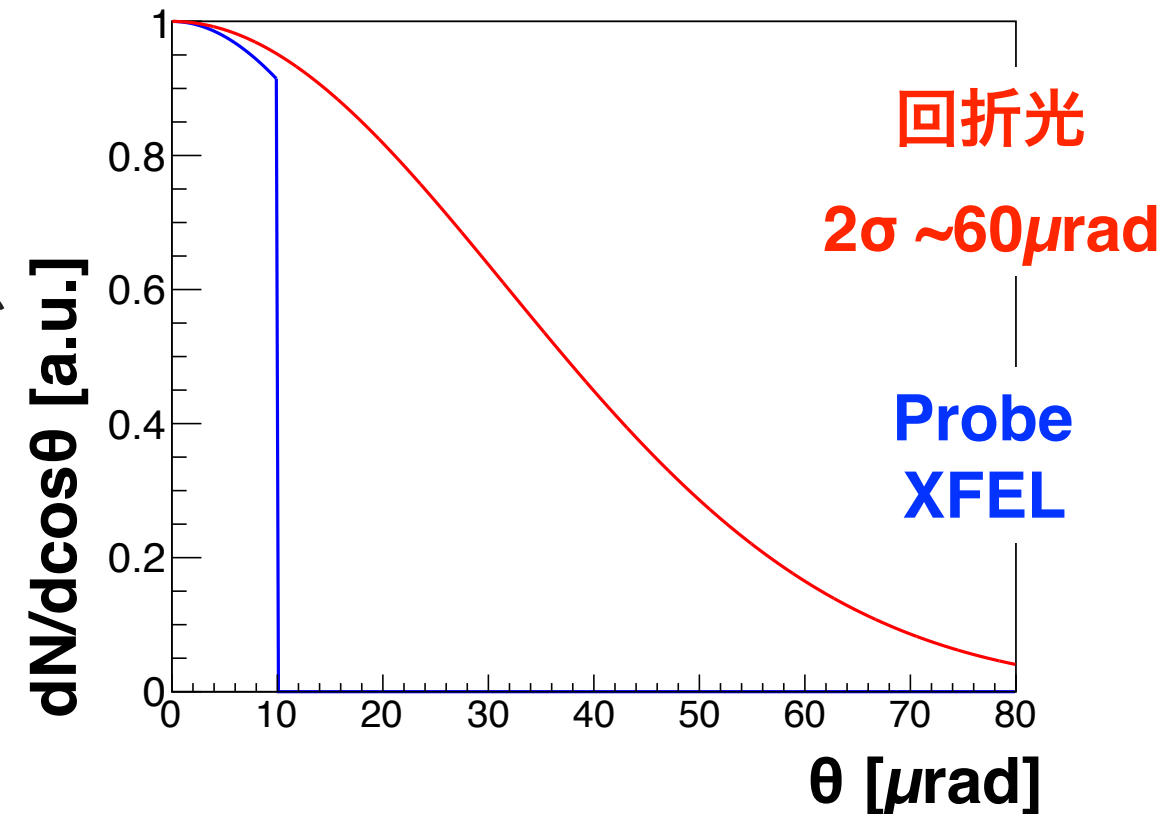
- 500 TWレーザーを1 μm に集光する



実験セツトアップ

- ProbeのXFELを、スリット等で角度発散を抑えつつ、5 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： $\sim 60 \mu\text{rad}$

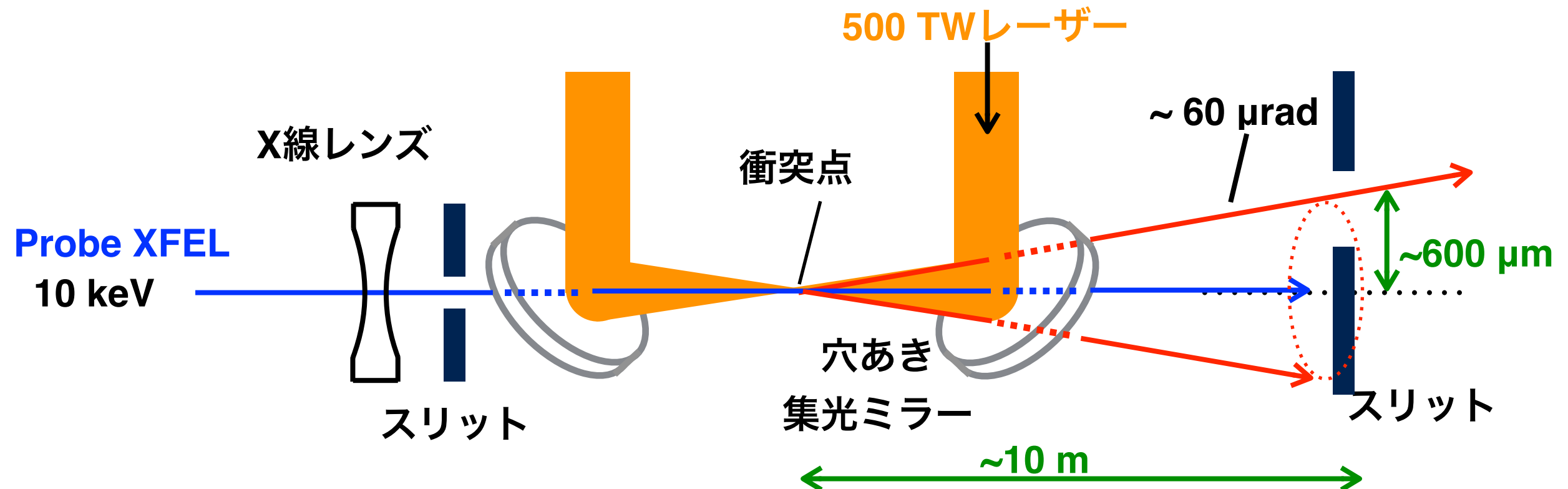
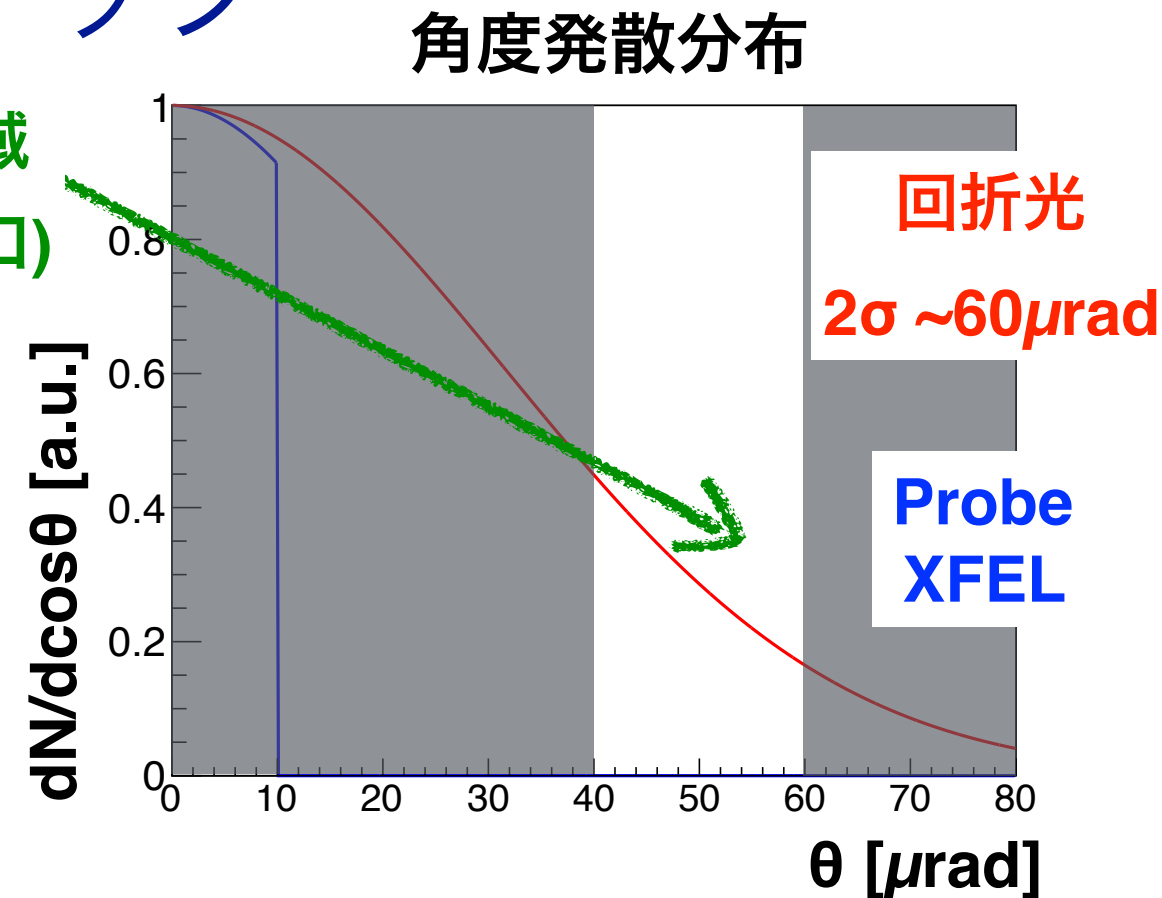
角度発散分布



実験セッティングアップ

- スリットで回折光を切り出す
- 5日間のDAQでシグナル数は
 $\sim 10^4$ photonsに達する
- 解析では、Probe XFELのみを照射する
BG測定の測定量を差し引く

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：2.5 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

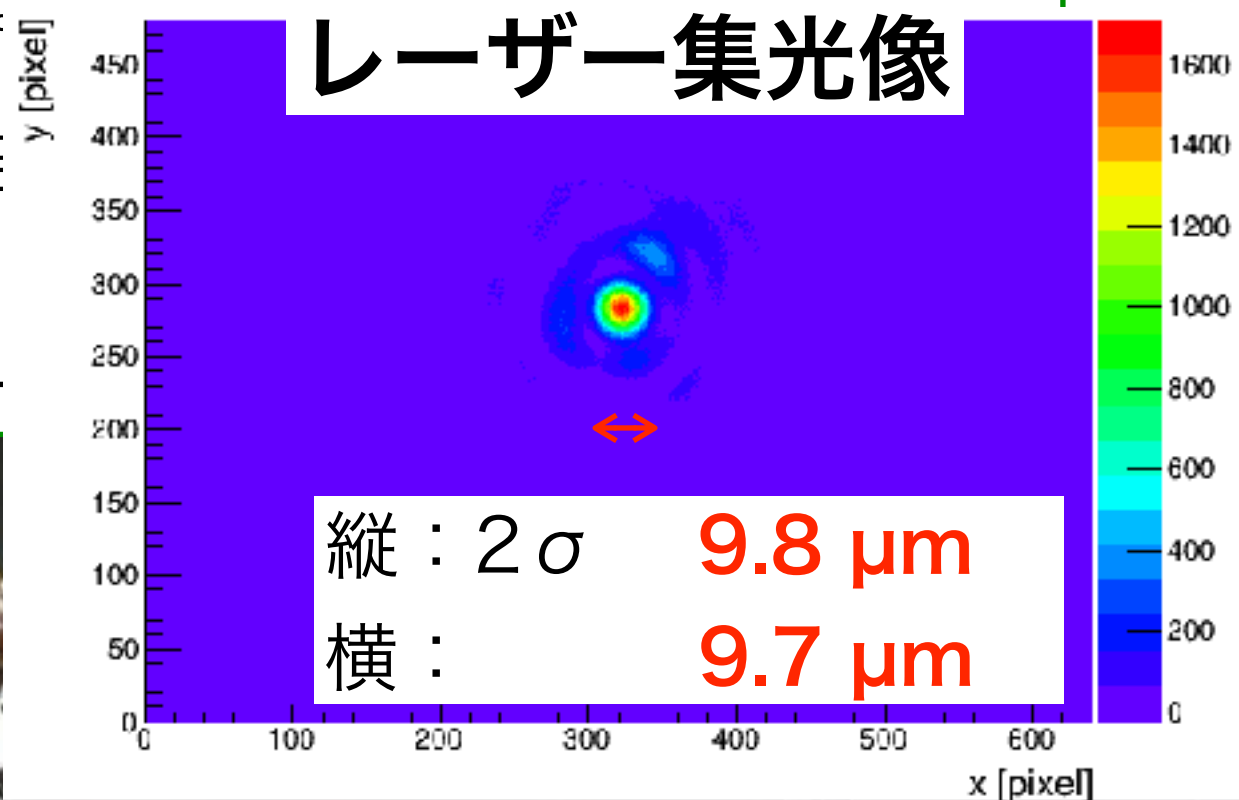
プロトタイプ実験(2017/12)

SACLAで出力の弱いレーザーを用いてブ
アライメント技術の確立 & 世界初の真空

- 期間：2017/12 72時間

- レーザー：2.5 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 ~ 3.5 mm

プロトタイプ実験での課題

1. レーザー集光サイズ

レーザー集光サイズ 目標： $1\ \mu\text{m}$

現状： $9.8\ \mu\text{m}$

→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. BG対策

目標のBG抑制率： 10^{-10}

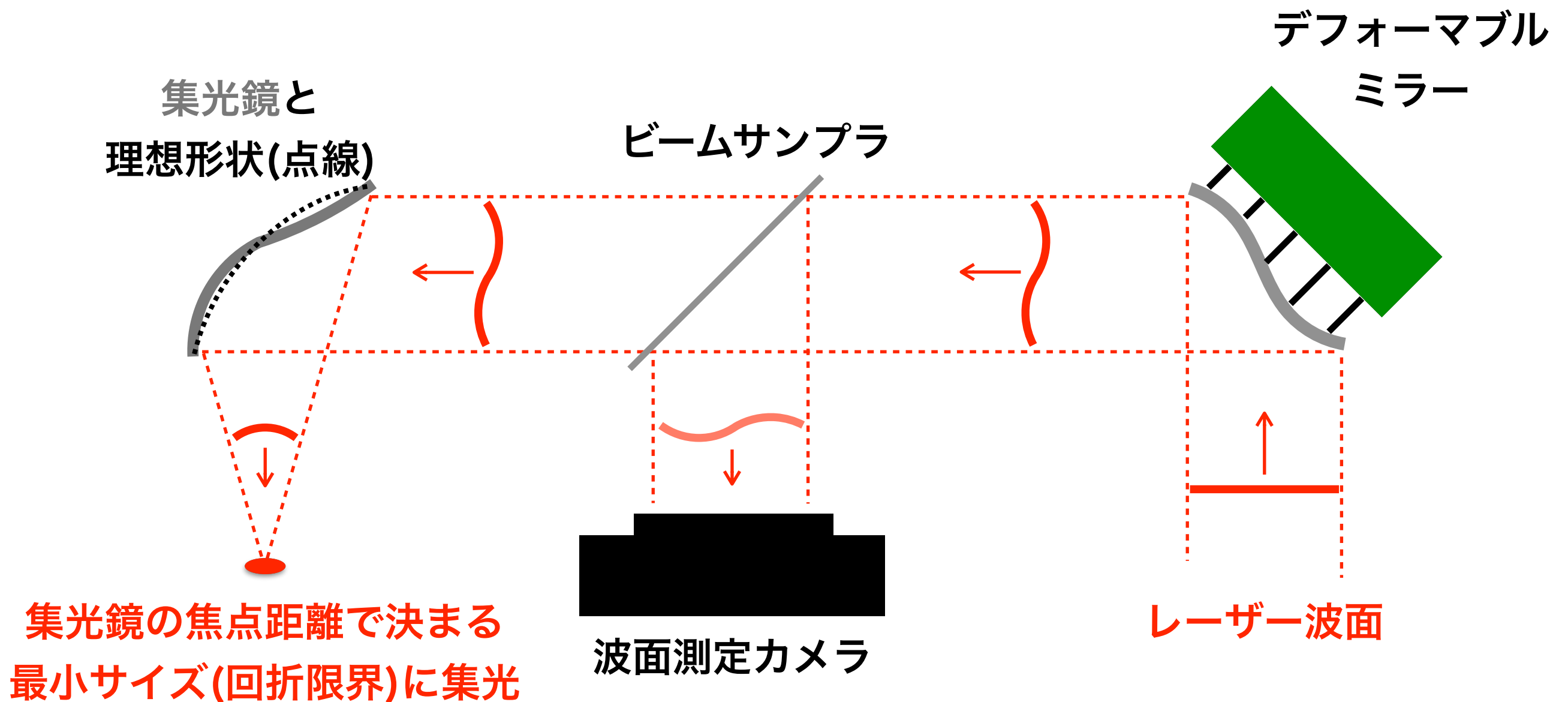
現状： $\sim 10^{-3}$

主なBG源はprobe XFELビーム

→Probe XFELビームを分離するための素子開発

デフォーマブルミラーによる集光サイズの最小化

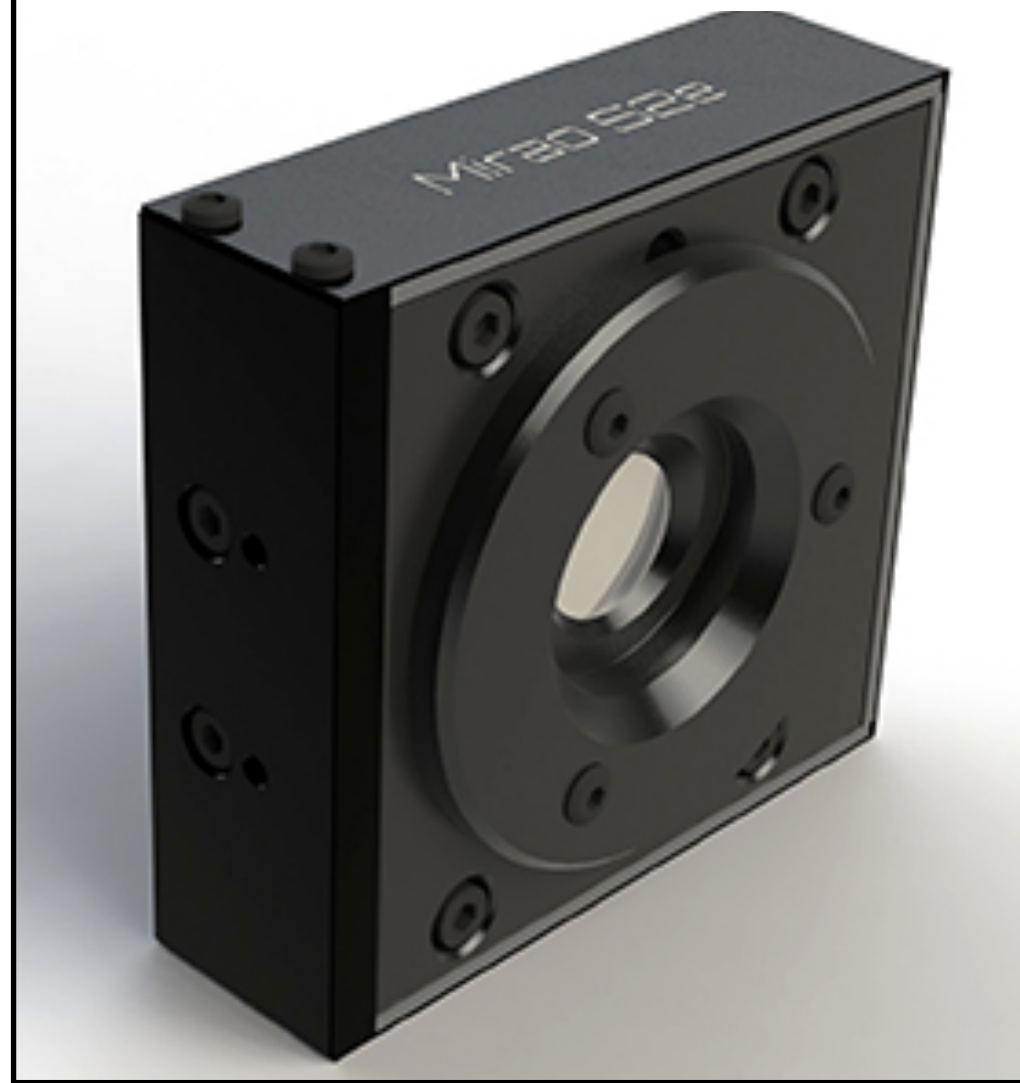
- デフォーマブルミラー：表面形状の変化するミラー。レーザー波面を整形可能
光路の光学素子(主に集光鏡)の表面のゆがみを
打ち消すことができる。



デフォーマブルミラーによる集光サイズの最小化

- デフォーマブルミラー：表面形状の変化するミラー。レーザー波面を整形可能

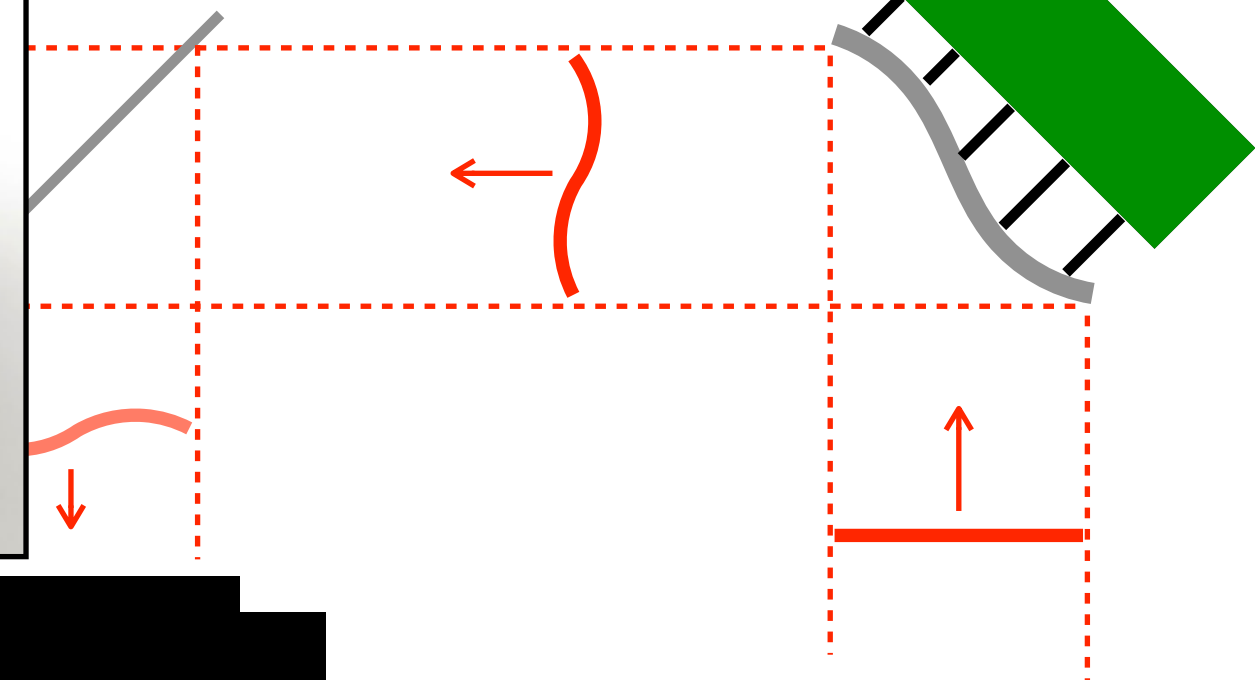
デフォーマブルミラー写真



- ・ $\phi 17.5\text{mm}$ のミラー
- ・ 52本のアクチュエーターによりミラー表面を $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ 歪ませることが可能

デフォーマブル
ミラー

μサンプル



レーザー波面

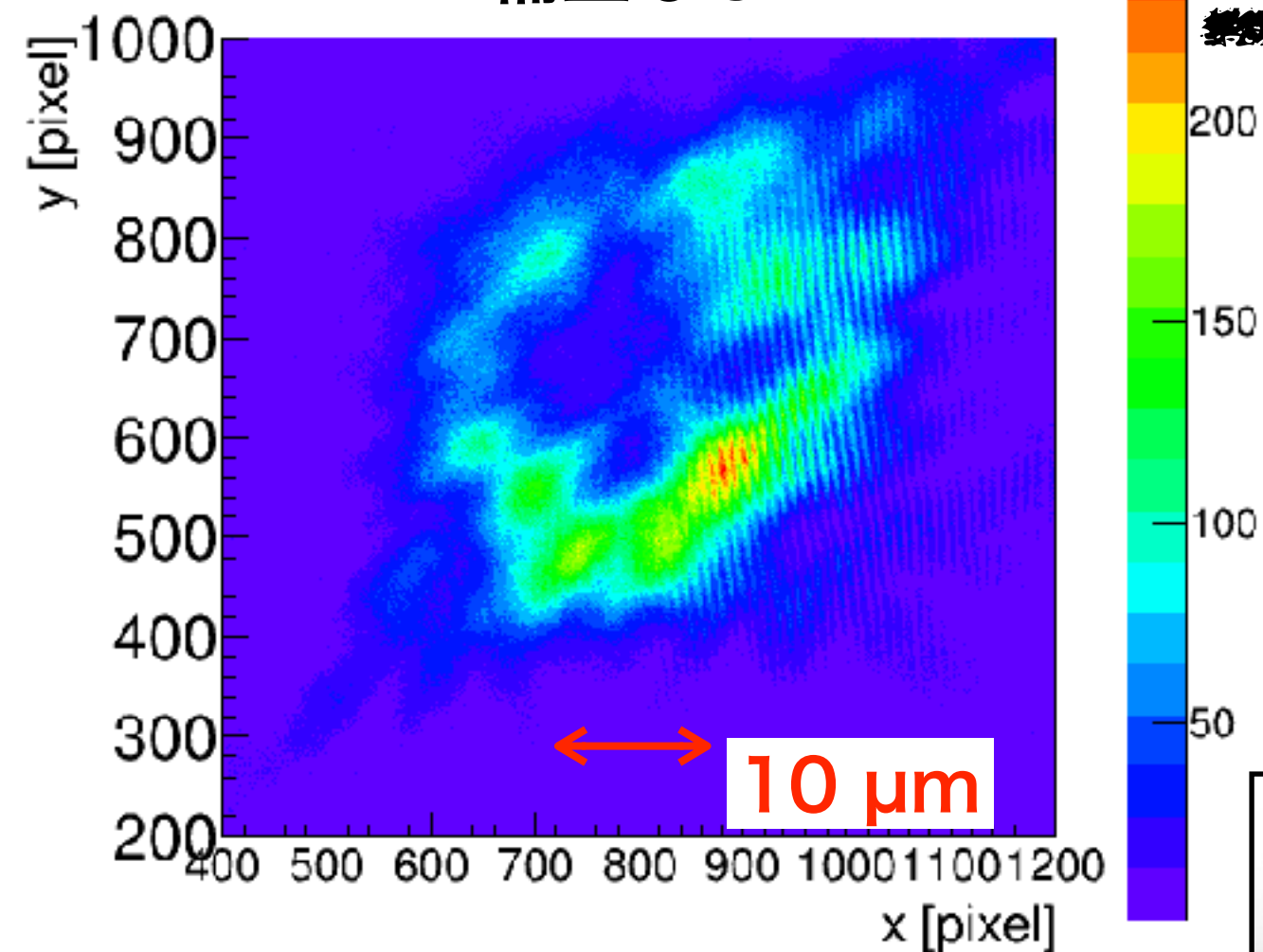
波面測定カメラ

集光鏡の焦点距離で決まる
最小サイズ(回折限界)に集光

デフォーマブルミラーによる集光サイズの最小化

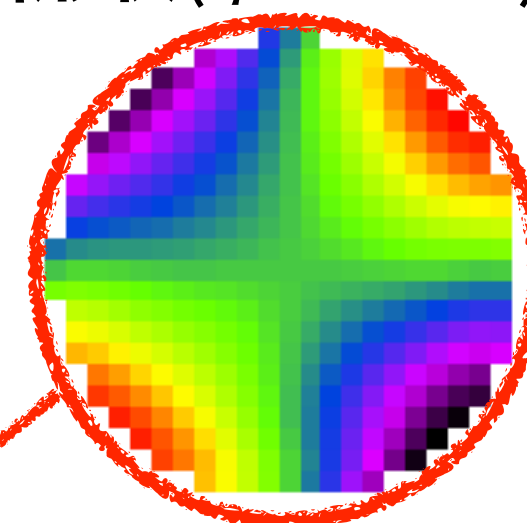
半導体CWレーザー集光像

デフォーマブルミラーの
補正なし



1. 集光像から形状収差を計算
2. デフォーマブルミラーにフィードバック

フィードバック後の
デフォーマブルミラー
表面形状($\phi 13\text{mm}$)



$\pm 1.5\lambda$ 程度の
ゆがみ

1.15
 μm

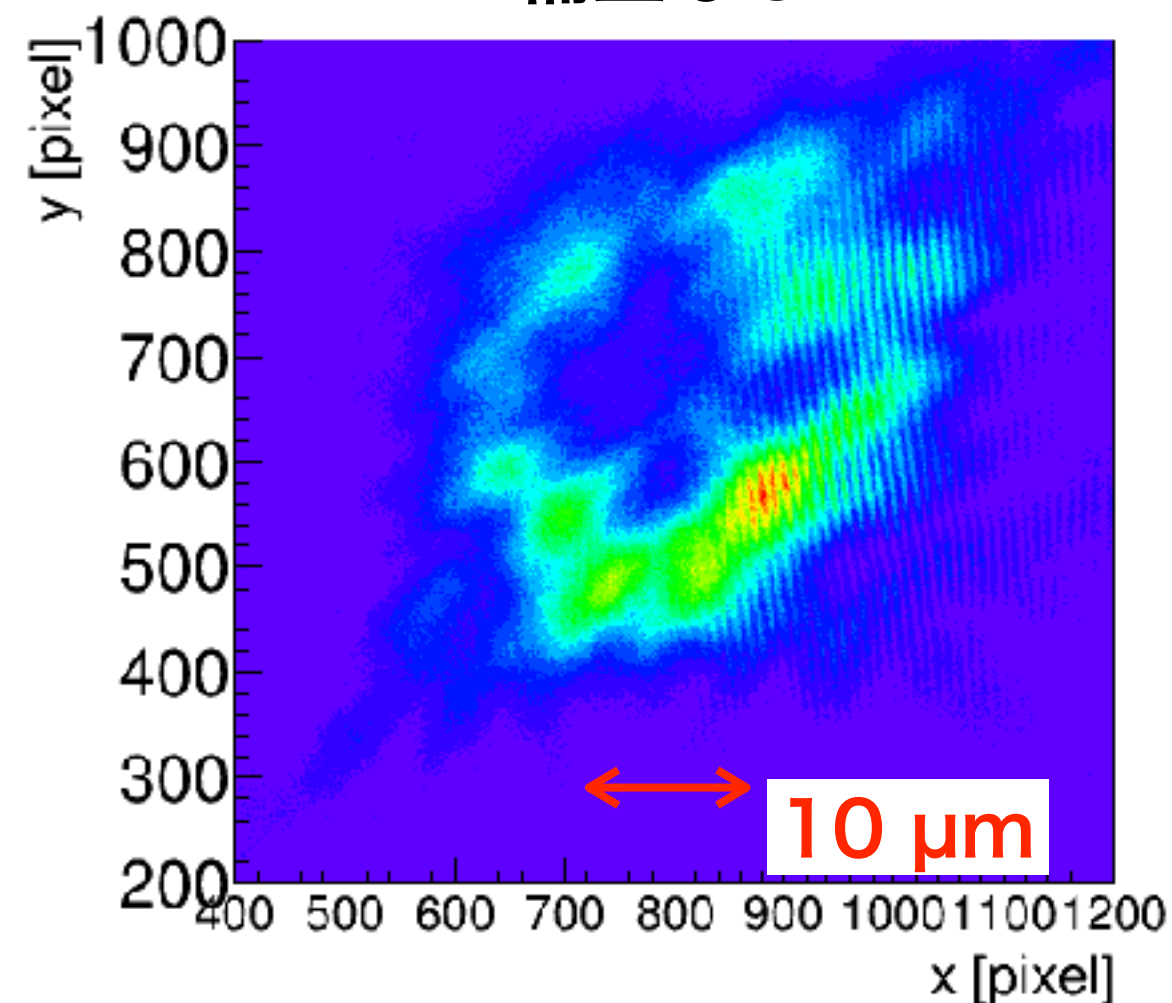
-1.15
 μm

デフォーダブルミラーによる集光サイズの最小化

半導体CWレーザー集光像

デフォーダブルミラーの

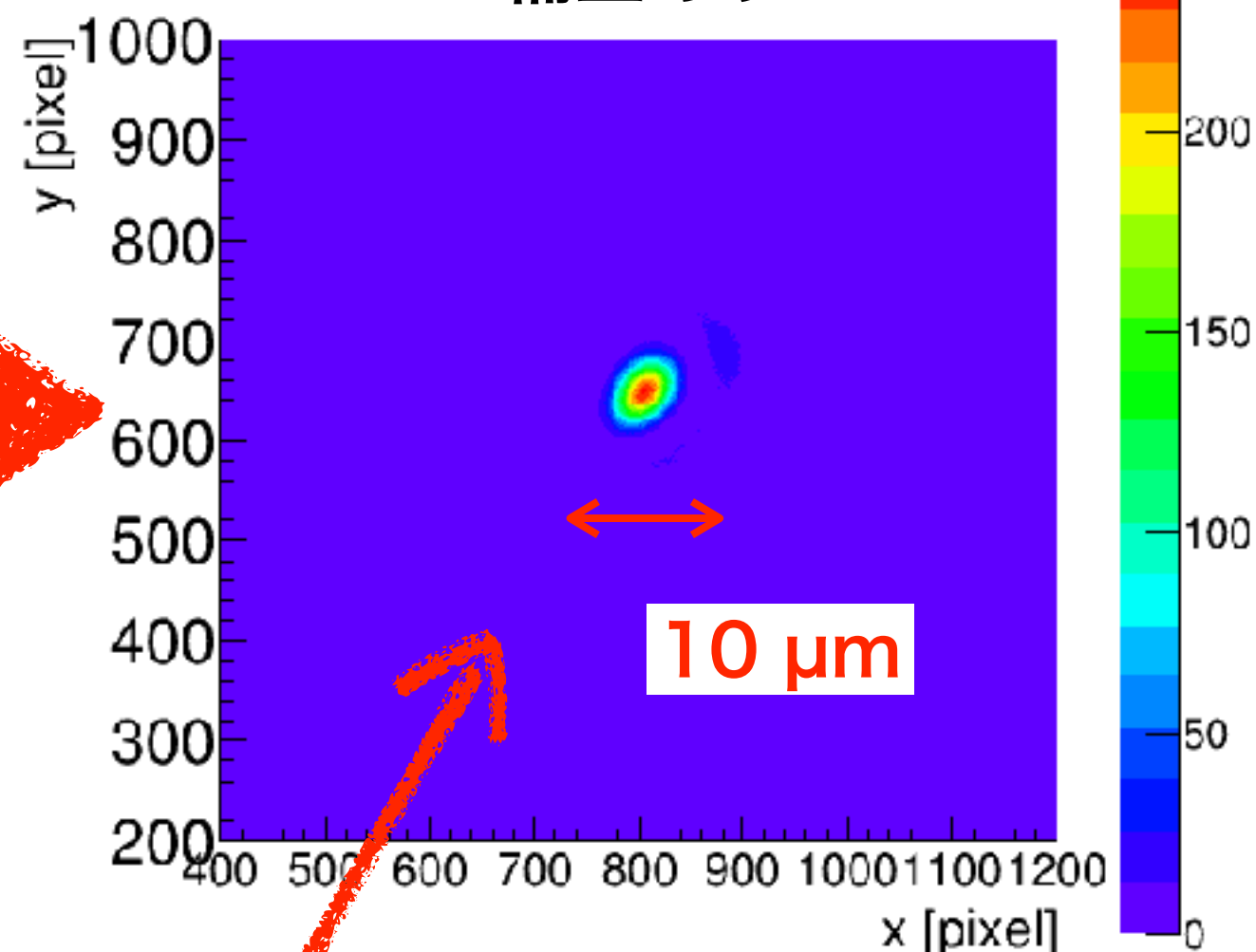
補正なし



半導体CWレーザー集光像

デフォーダブルミラーの

補正あり



集光サイズ： 2.3×2.6 (横 $\times$ 縦) μm

回折限界： $\sim 2\ \mu\text{m}$

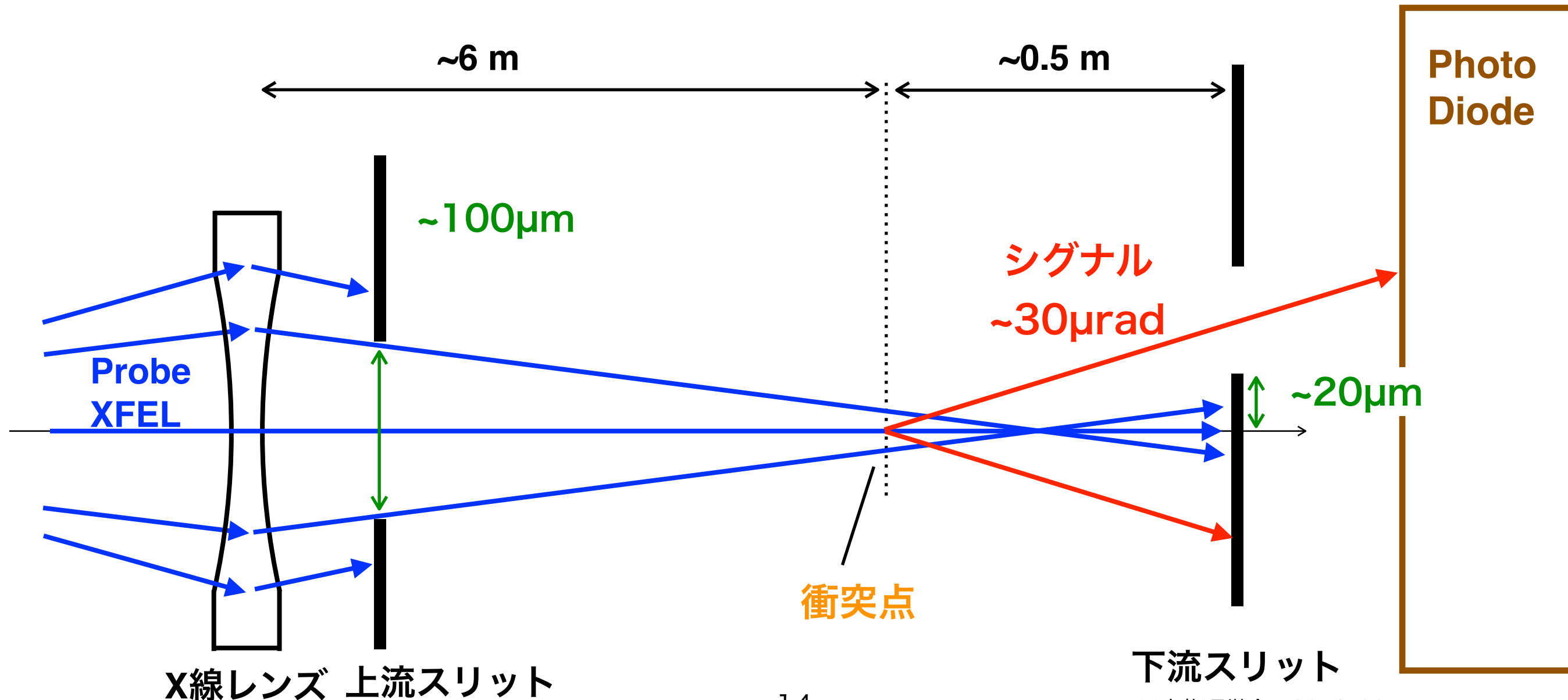
→ およそ回折限界まで集光出来た

次はフェムト秒レーザーでの試験 & 曲率の大きい集光鏡の作成

BG対策(従来の方法)

シグナルの切り出し：角度発散の大きな成分を下流スリットで切り出す

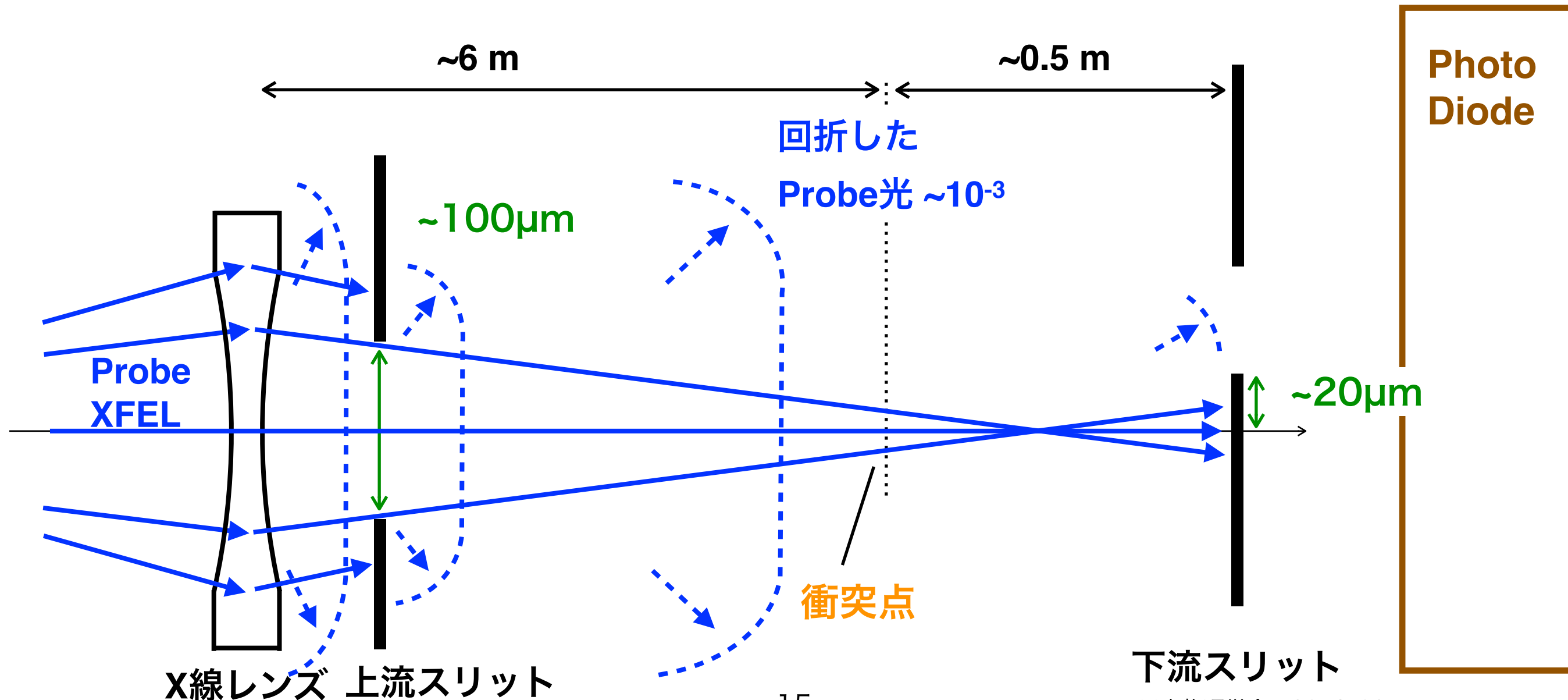
従来のBG対策：Probe光の角度発散($\sim 60\mu\text{rad}$)を上流スリットで抑制する
→集光レンズ開口やスリットで回折したProbe光がBGに



BG対策(従来の方法)

シグナルの切り出し：角度発散の大きな成分を下流スリットで切り出す

従来のBG対策：Probe光の角度発散($\sim 60\mu\text{rad}$)を上流スリットで抑制する
→集光レンズ開口やスリットで回折したProbe光がBGに



BG対策(従来の方法)

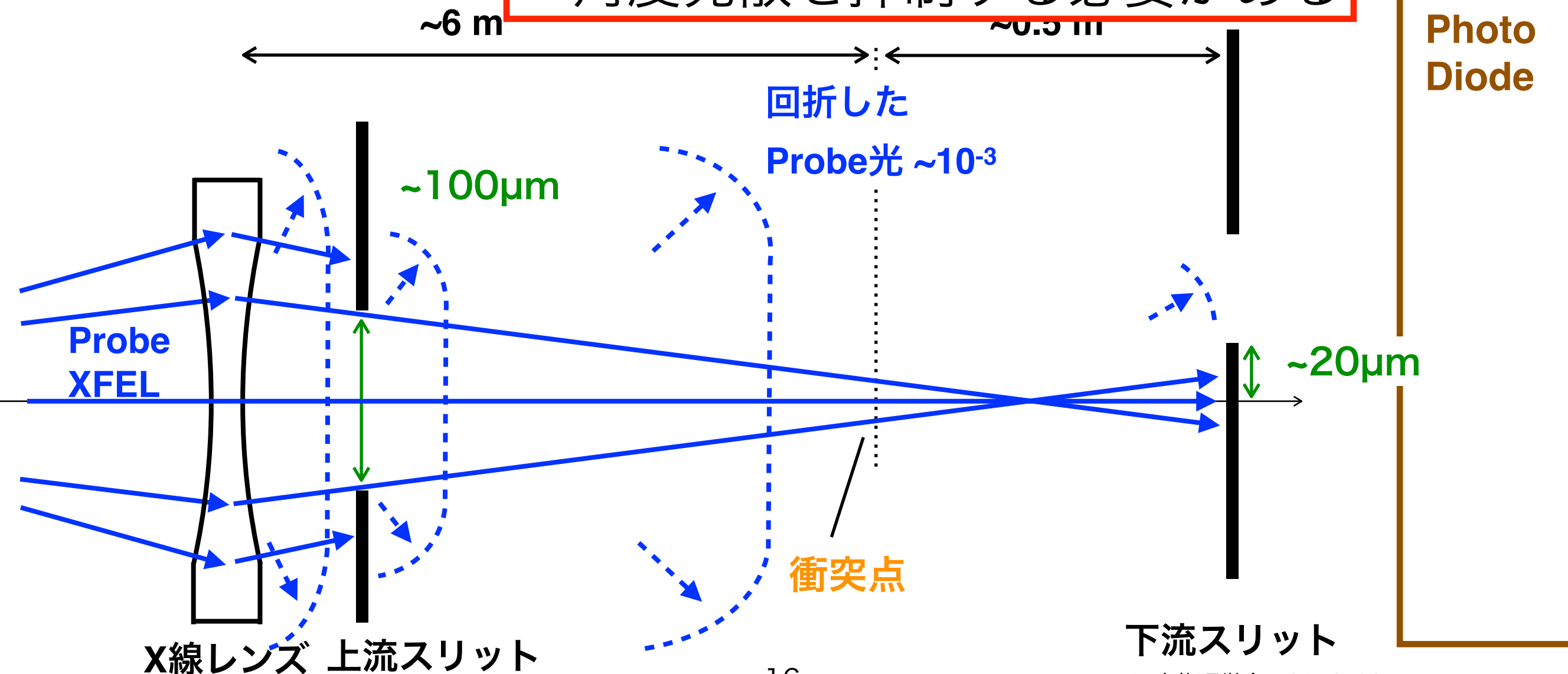
シグナルの切り出し：角度発散の大きな成分を下流スリットで切り出す

従来のBG対策：Probe
→集光

BG対策の課題

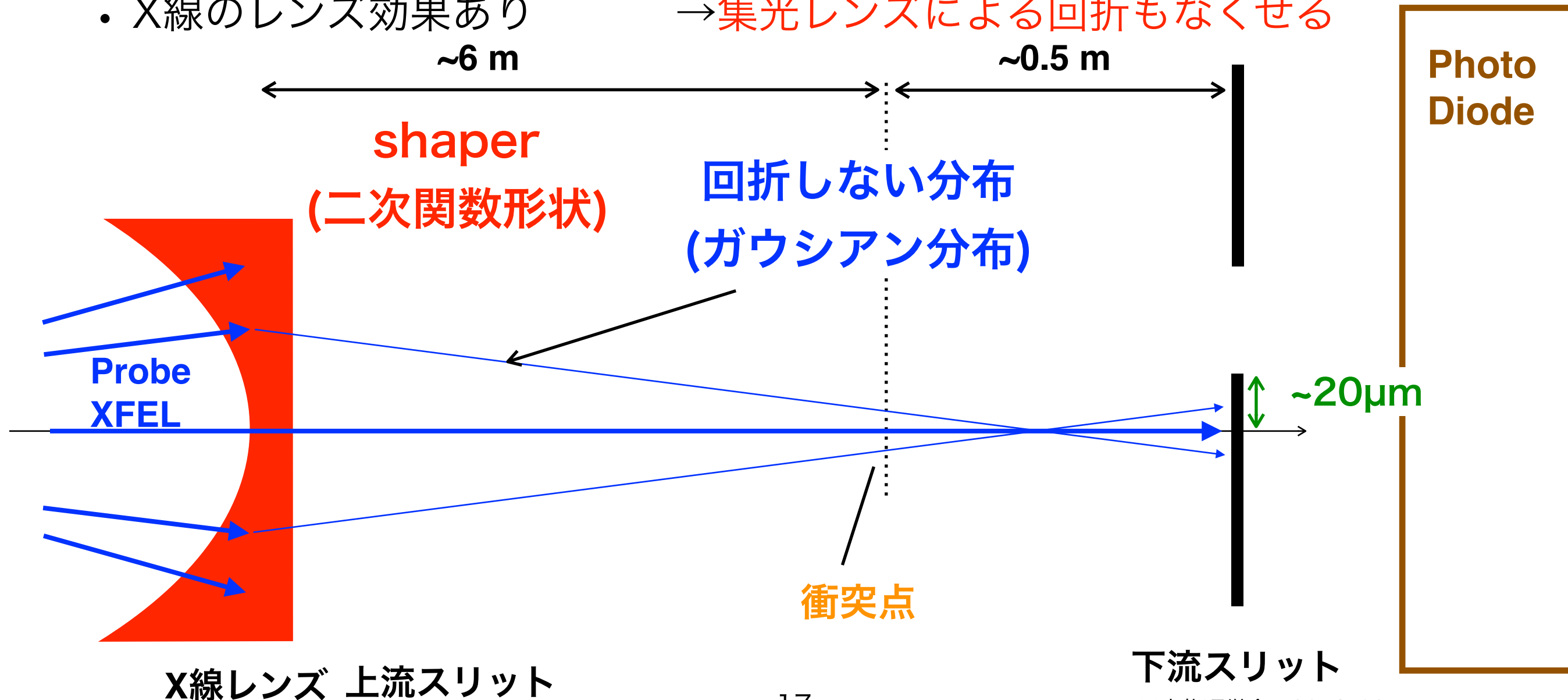
→Probe光を回折させずに、
角度発散を抑制する必要がある

抑制する
BGに



shaperの開発

- **shaper** : ビーム軸外側がより厚い、透過型光学素子
- 外側の光をより強く減衰 → Probe光を細く、**角度発散を抑制**
- Probe光強度を連続的に減衰 → 透過光が**回折を起こさない**滑らかな分布(ガウシアン分布)に**shaping**される
- X線のレンズ効果あり → **集光レンズによる回折もなくせる**



shaper試作品

- Siをイオンエッチングで加工した1次元shaperの試作品を作成

一次元shaperポンチ絵

エッチング方向

ガウシアン分布

2次関数形状

Probe
XFEL

shapingする方向

Si基板

Si製shaper写真

エッチング深さ
0.8 mm

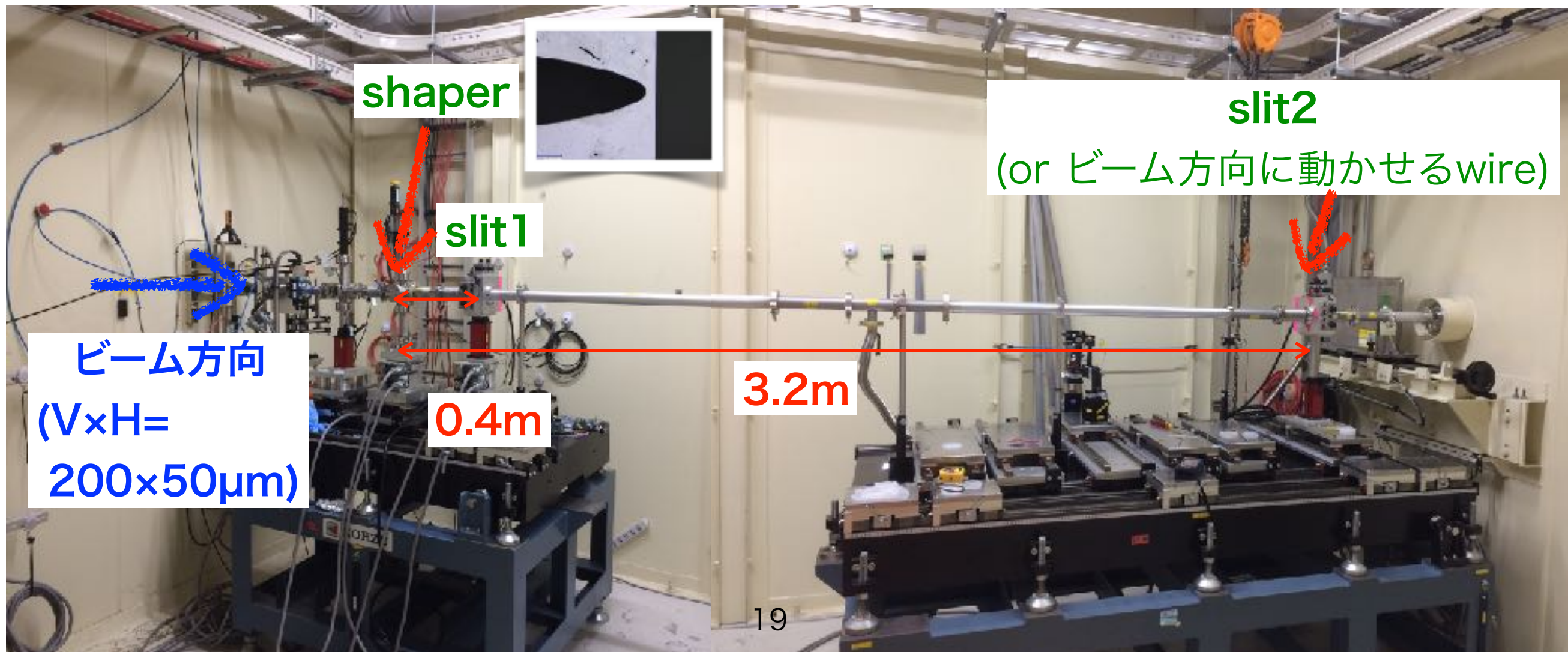
開口~3mm

Probe
XFEL

SPring-8でのshaper性能評価

- SPring-8 BL19LXUでshaperの性能評価を行った(2018/06 5日間)
- shaperにX線ビームを照射
(ビームサイズ 垂直×水平=200 μ m×50 μ m)
- ビームの垂直方向をshaping
- 3項目を評価

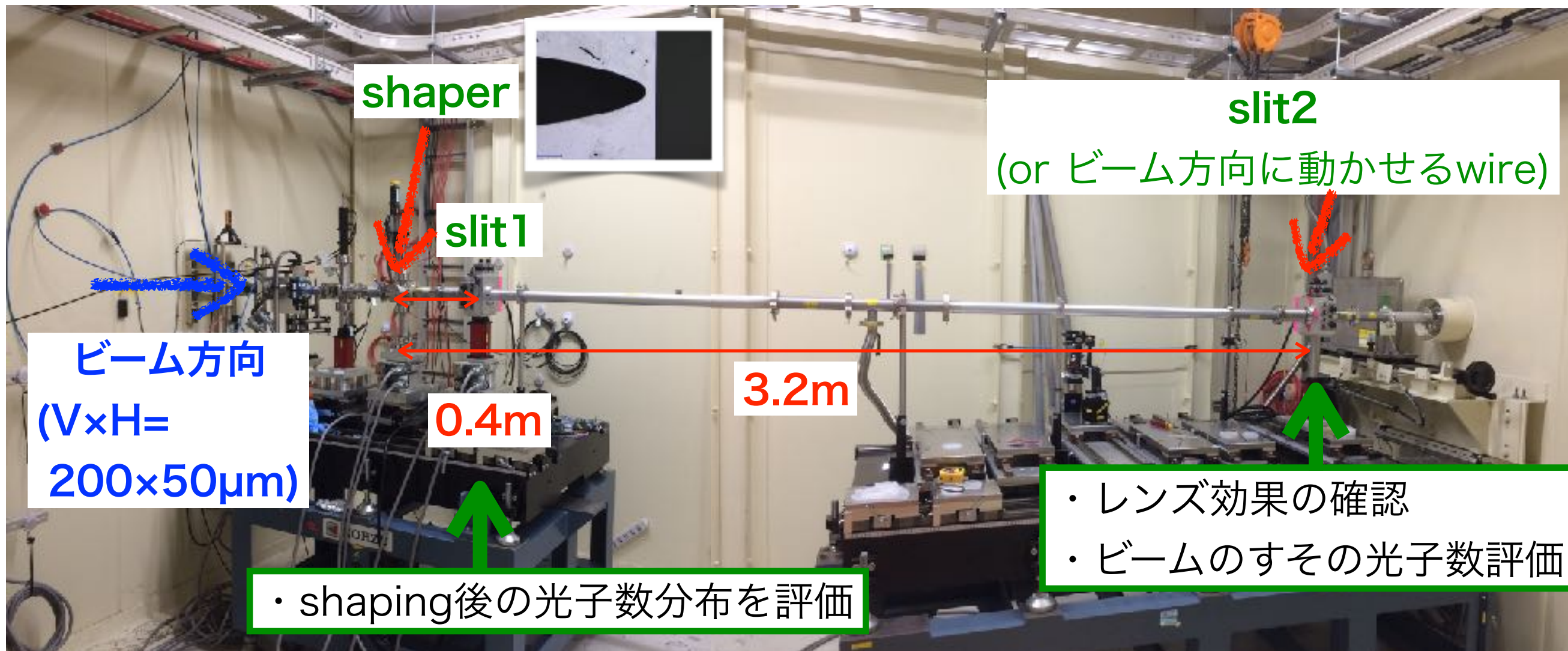
実験ハッチ写真



SPring-8でのshaper性能評価

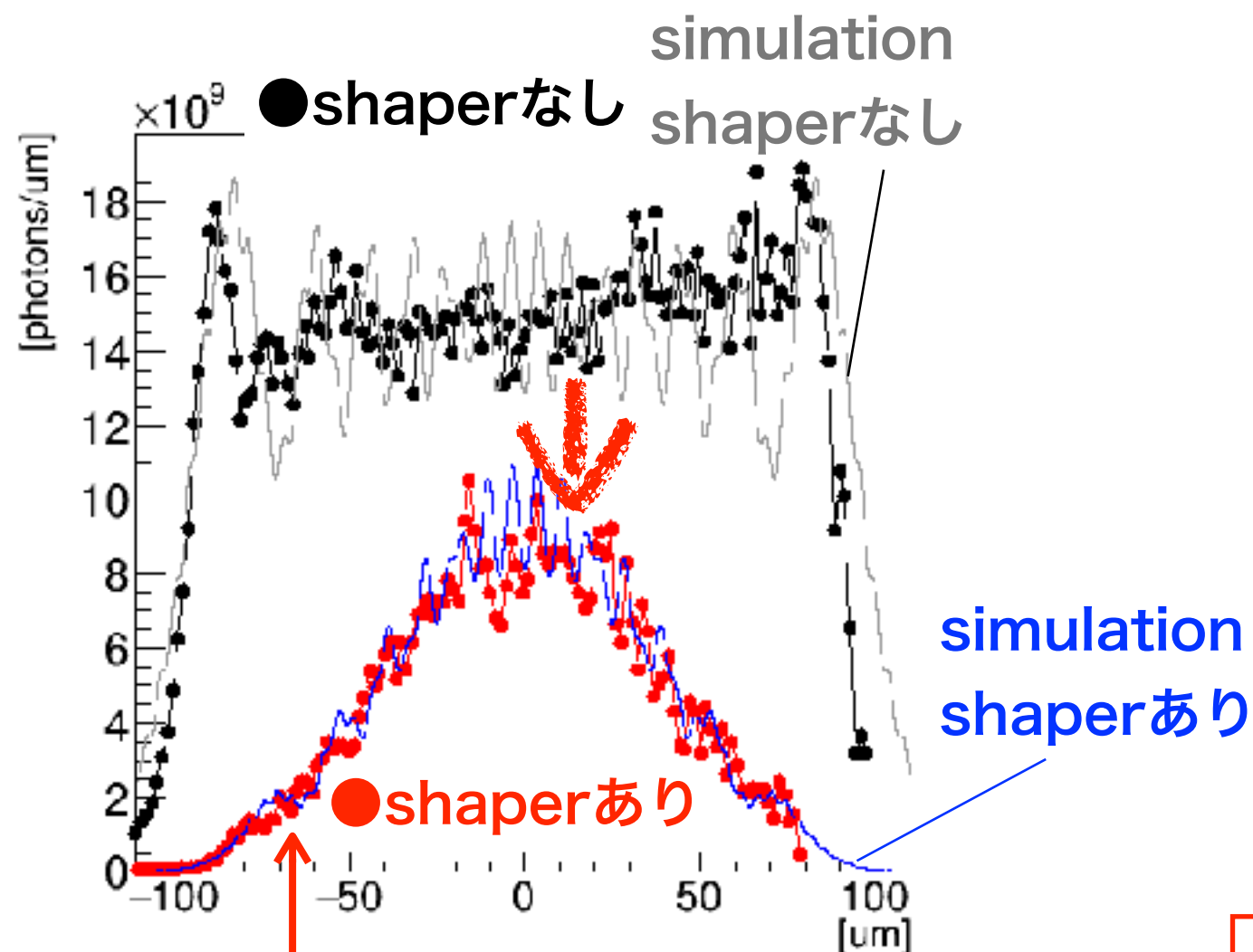
- SPring-8 BL19LXUでshaperの性能評価を行った(2018/06 5日間)
- shaperにX線ビームを照射
(ビームサイズ 垂直×水平=200 μ m×50 μ m)
- ビームの垂直方向をshaping
- 3項目を評価

実験ハッチ写真



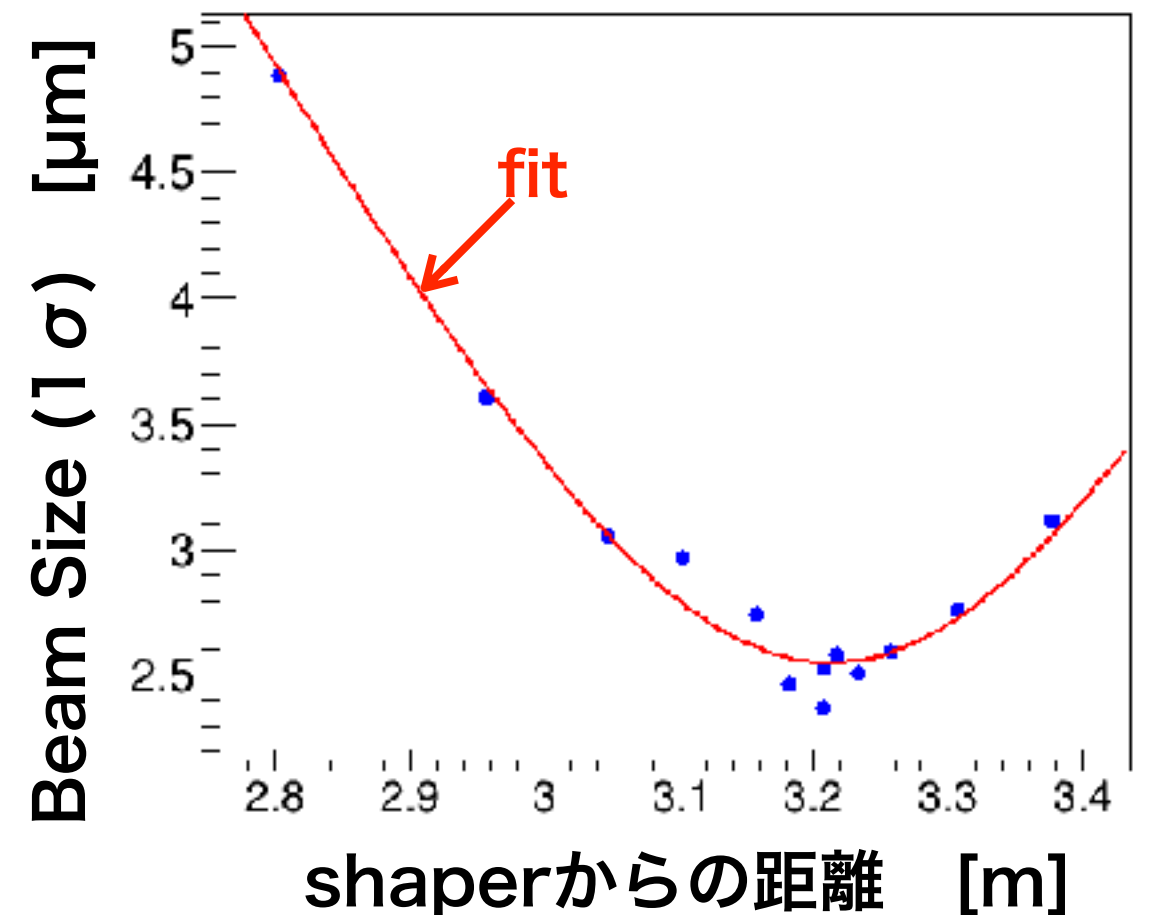
shaping効果、レンズ効果の確認

shaper下流での光子数分布 (0.4m下流)



透過光がsimulation通り
shapingされることを確認
(1σ 40 μm のガウシアン分布)

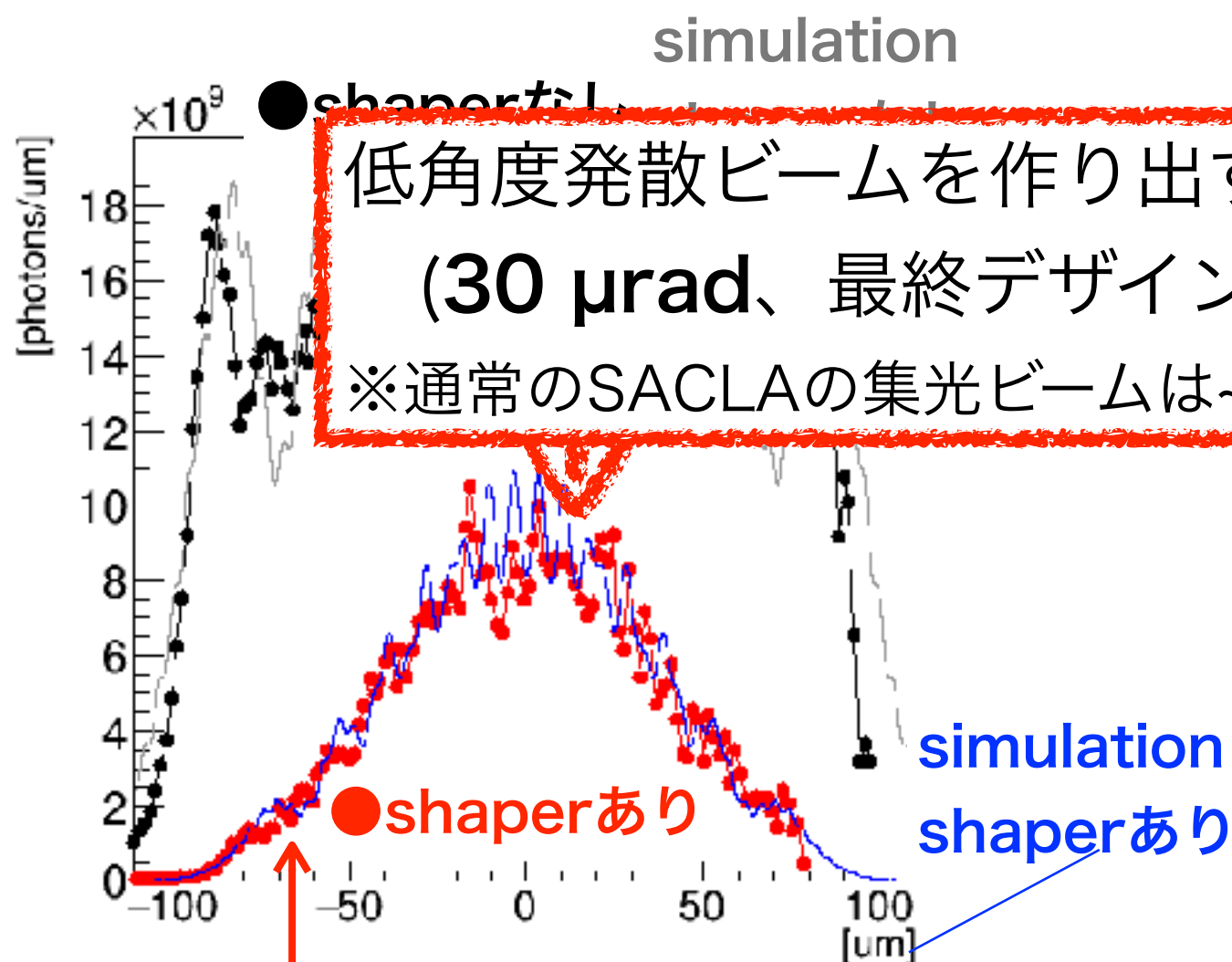
shaper下流でのビームサイズ (ビーム軸方向複数位置でスキャン)



レンズ効果を確認、期待通りの集光距離
 $f=3.21\text{m}$ (設計値とのズレ < 6%)

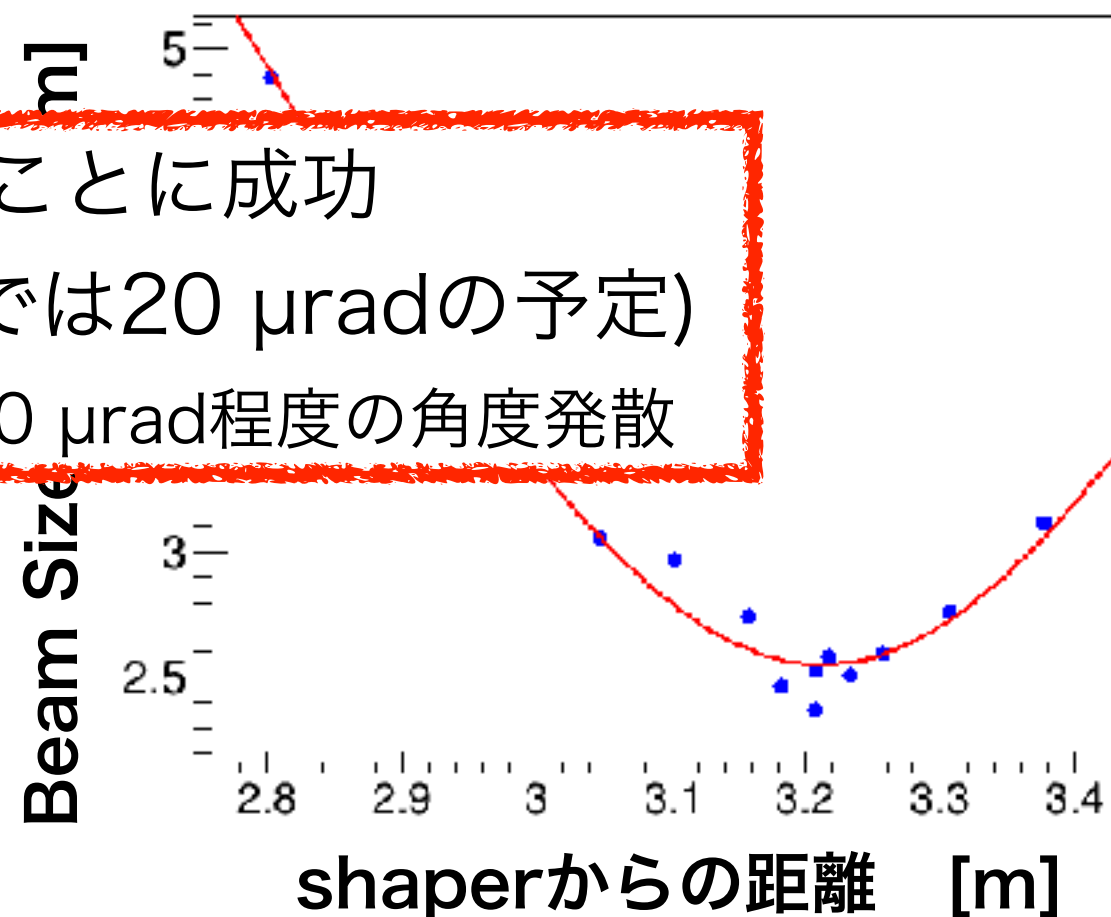
shaping効果、レンズ効果の確認

shaper下流での光子数分布 (0.4m下流)



透過光がsimulation通り
shapingされることを確認
(1 σ 40 μm のガウシアン分布)

shaper下流でのビームサイズ (ビーム軸方向複数位置でスキャン)

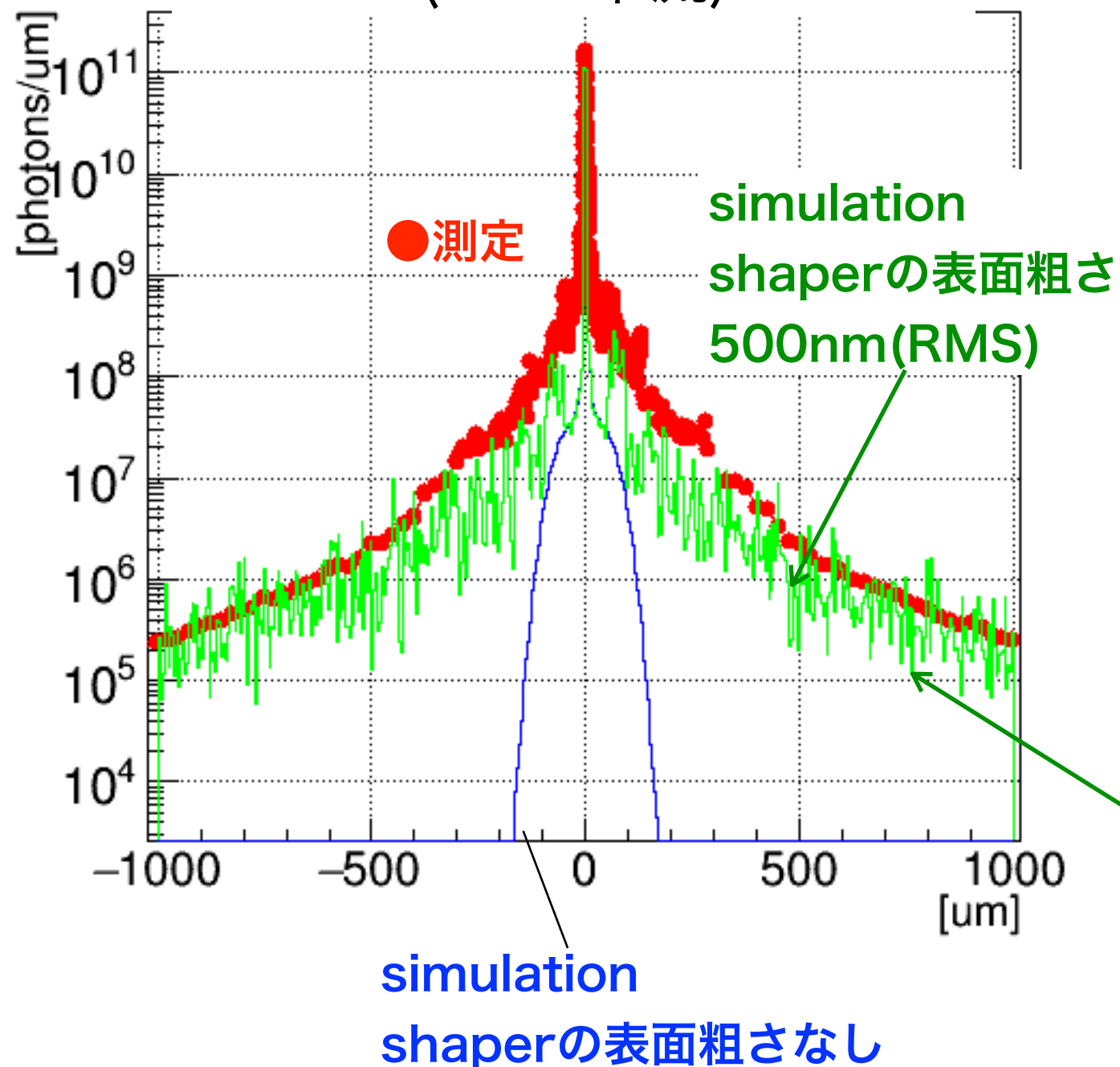


レンズ効果を確認、期待通りの集光距離
 $f=3.21\text{m}$ (設計値とのズレ < 6%)

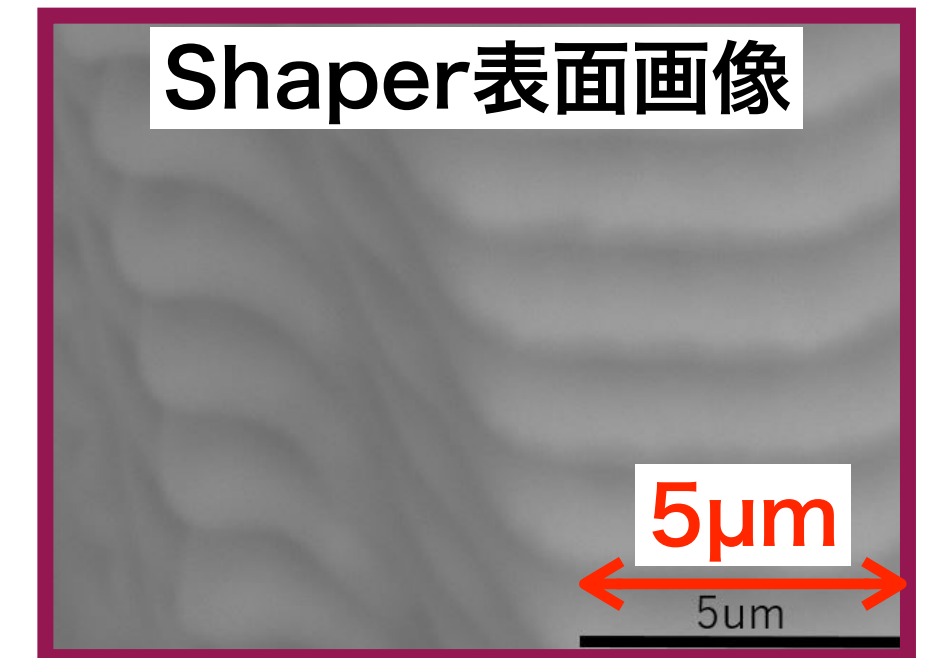
ビームのすその光子数の評価

- shaperより3.2m下流のslit2でビーム形状(すその光子数)を計測

shaper下流での光子数分布 (3.2m下流)



- X線ビーム分布がすそを持つ
→テールの光のパスから、
shaperからの散乱光であることを確認
- shaper試作品は表面粗さをもつ
これはビームを散乱させる

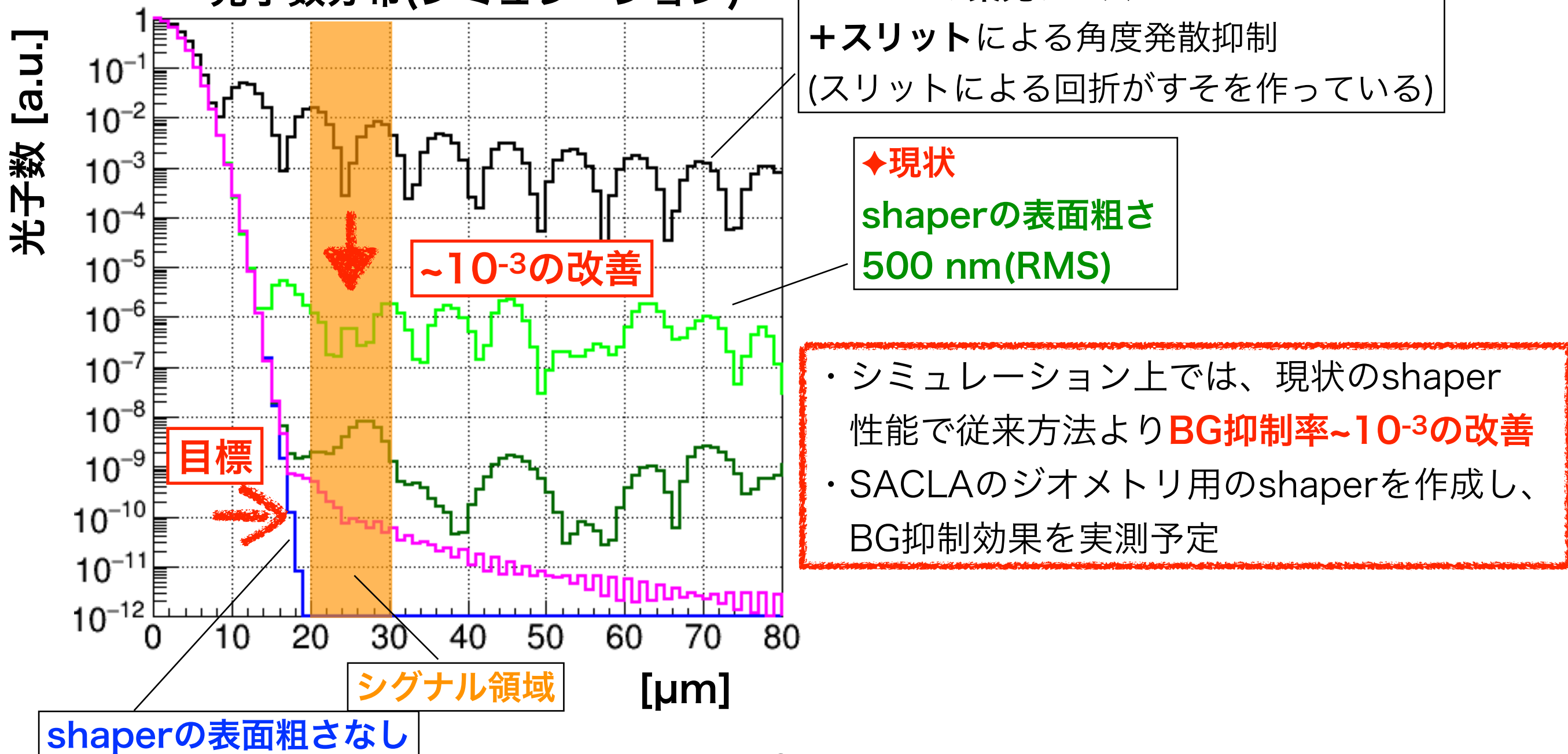


- shaperの表面粗さと同程度の粗さ
(500 nm,RMS)を仮定したsimulation
では、実測データをおおむね再現する
→おそらく表面粗さがすその原因

ShaperによるBG抑制効果の確認

- SACLA(本実験)でのセットアップを仮定し、各状況でのBG量(散乱量)をシミュレーションで比較

シグナル切り分けスリット位置での
光子数分布(シミュレーション)



ShaperによるBG抑制効果の確認

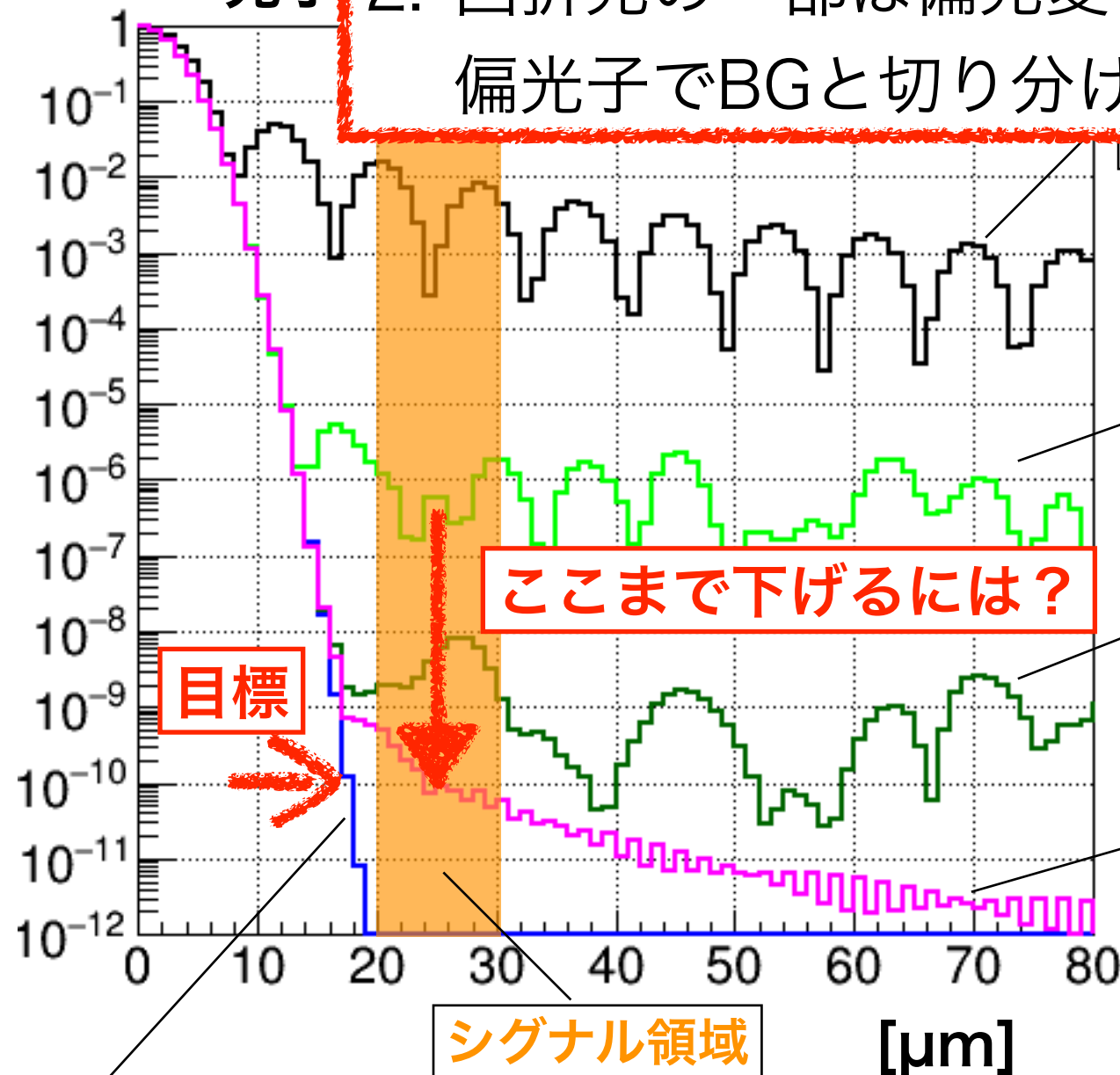
- SACLAシミュレーション
シグナル光子
- **BG抑制率を更に下げるための対策**
 1. 表面粗さを500 nm→20 nmに低減
& 散乱光除去スリットを追加
 2. 回折光の一部は偏光変化しているので、
偏光子でBGと切り分け(消光比 $\sim 10^{-10}$)

散乱量(散乱量)を

発散抑制

すそを作っている)

光子数 [a.u.]



◆現状

shaperの表面粗さ
500 nm(RMS)

shaperの表面粗さ
20 nm(RMS)

◆将来

shaperの表面粗さ
20 nm(RMS)

+ 散乱光除去スリット → BG抑制率 $\sim 10^{-10}$

観測へ向けた今後の課題

- **BG抑制**(シミュレーション上では、現状で $\sim 10^{-3} \rightarrow \sim 10^{-6}$ 。目標 10^{-10})

- shaperの試作第2段を作成中

- SACLAの実験ハッチに合わせた仕様(集光距離など)

- 表面粗さの改善方法について検討中 ex)- ウエットエッチング

- さらにちょっとずつエッチング

- 来月、試作第2弾のshaperでBG抑制効果の実測予定

- 偏光変化をみる偏光子の開発

- **レーザー集光**

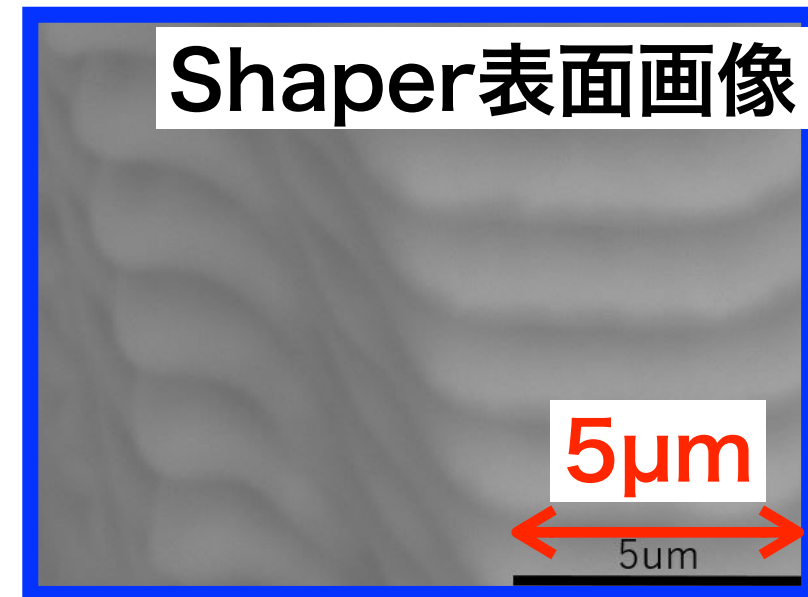
- プロトタイプ実験のフェムト秒レーザーでの集光study

- 500 TWレーザーでの集光study

- **500 TWレーザー光学系の設計及び実験**

- 来年度以降に5日間の測定を行い、

- 真空回折の世界初観測



まとめ

- ・ 高強度電磁場は、真空の屈折率を変化させ、伝播する光に回折を引き起こす。真空回折と呼ばれるstrong-field QEDの未観測現象
- ・ 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として真空回折を観測する
- ・ レーザー集光サイズの最小化のためにデフォーマブルミラーの導入を行った。フェムト秒レーザーでの集光studyを計画中
- ・ BG抑制のためのshaper開発を行った
シミュレーションによる評価ではBG抑制率 $\sim 10^{-3}$ の向上
表面粗さの改善などによる、さらなるBG抑制率改善が課題
- ・ 来年度以降に500 TWレーザーを用いて実験を行い、strong-field QEDで予言される真空回折の初観測を行う