

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, 井上伊知朗^C,
大坂泰斗^C, 矢橋牧名^{CD}, 石川哲也^C

東大理, KEK^A, 東大素セ^B, 理研/SPring-8^C, JASRI^D

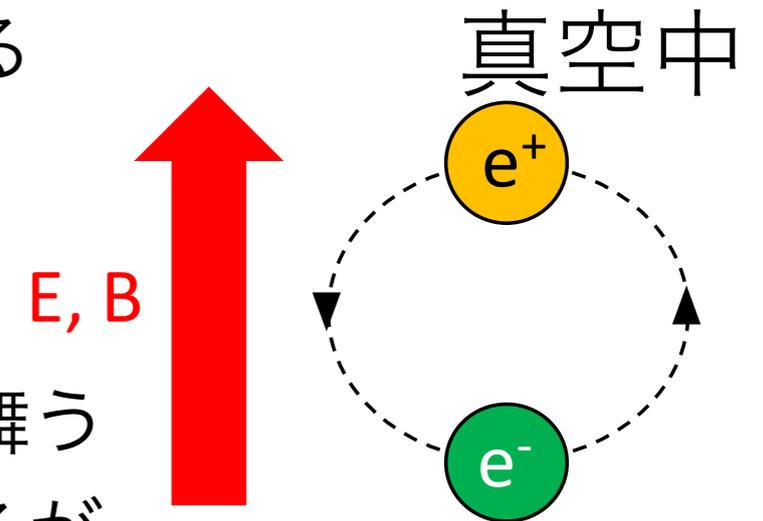


2017/09/15



真空の非線形効果

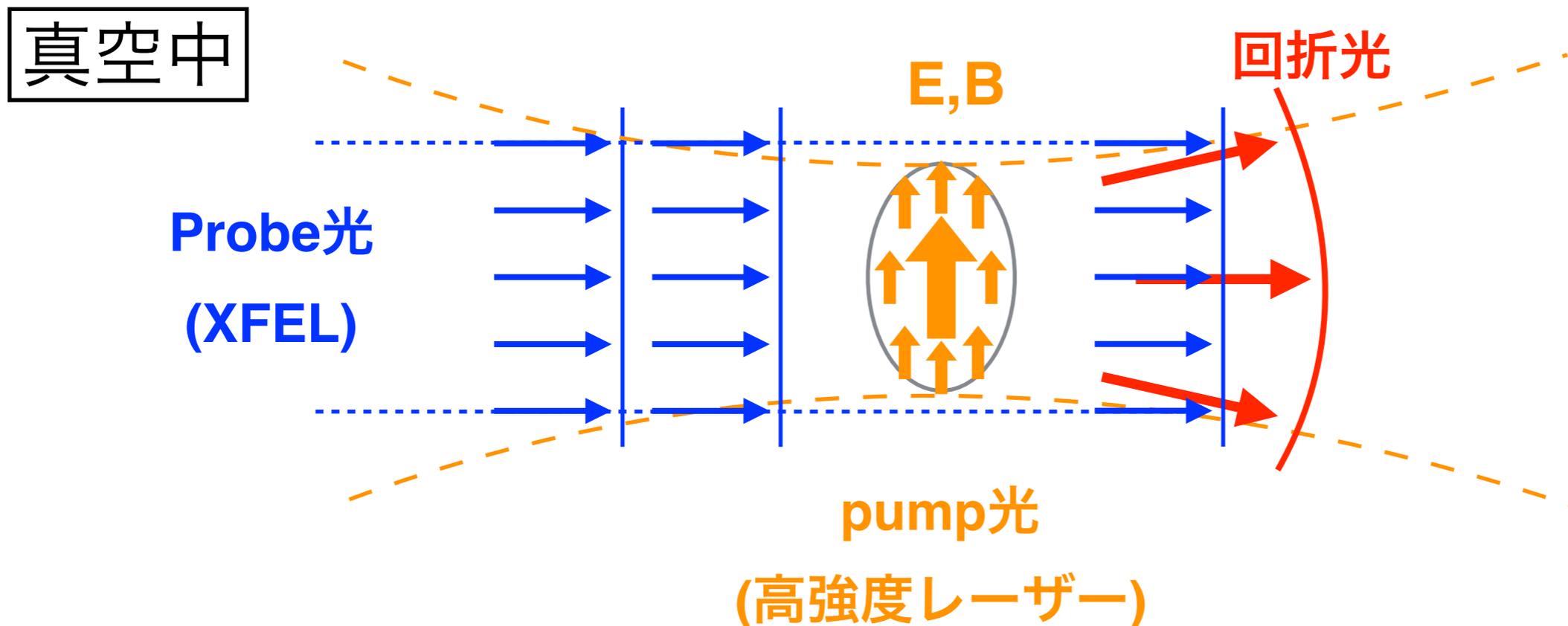
- 真空は仮想的な粒子の生成・消滅を繰り返している
この仮想的な粒子対に対して**電磁場を印加すると**
真空が分極・磁化する(真空偏極)
- 真空偏極により真空は非線形光学媒質として振る舞う
probe光を通した際に様々な現象が予言されているが
いずれも**未発見**
 - ✓真空複屈折(偏光変化)
 - ✓**真空回折(運動量変化)**
 - ✓photon splitting(周波数変化)



我々は**PWクラスの高強度レーザー**をpump光に用いて
真空を偏極させ、**XFEL**をprobeとして真空回折を探索する

真空回折

- 高強度電磁場を印加すると、真空の屈折率は1からわずかにずれる
ex) 磁場があるとき $n = 1 + 9 \times 10^{-24} B^2 \text{ [T}^2]$
- **非一様な**高強度電磁場(例えば高強度レーザー)によって真空をpumpすると、**屈折率勾配**が生じる
- この真空にprobe光を通すと一部が回折される → **真空回折**



真空回折の確率

回折光の角度分布

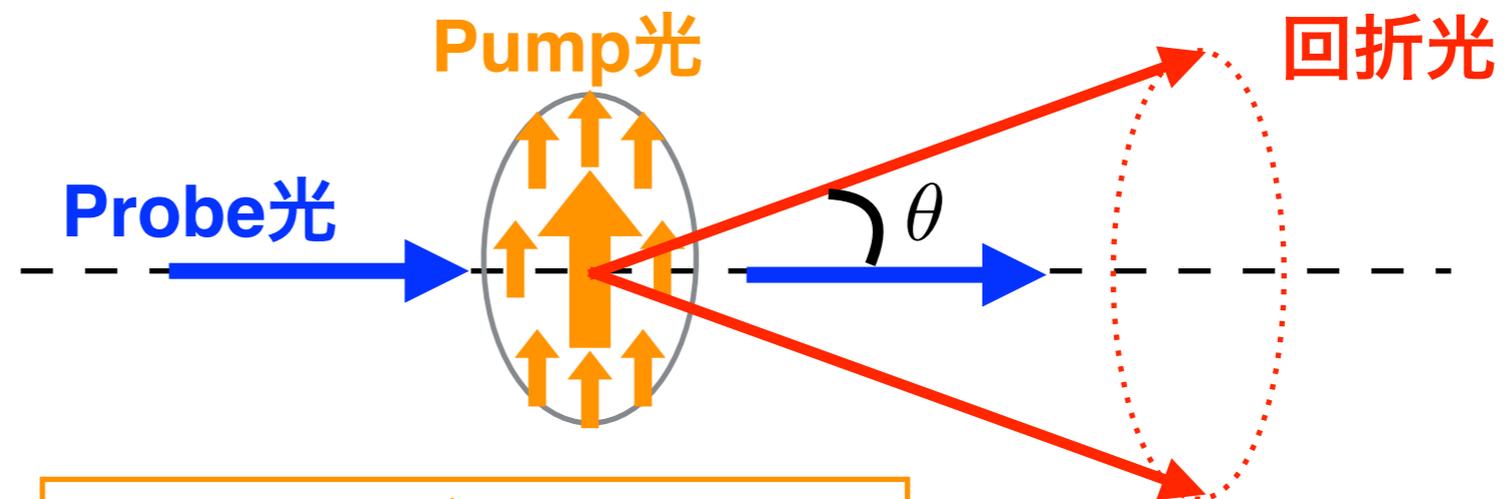
$$\frac{dN_{\text{diffracted}}}{d \cos \theta} \sim \frac{J E^2 W^2}{w_L^2 (w_L^2 + 2w_X^2)} \times (E w)^2 e^{-\frac{1}{2} (E w \theta)^2}$$

$$w^2 = \frac{w_L^2 w_X^2}{w_L^2 + 2w_X^2}$$

PRD 94, 013004 (2016)

Probe XFEL
(ガウシアンビーム)

光子数 : N
光子エネルギー : E
フラックス : J
ビームウエスト : w_X



Pumpレーザー

パルスエネルギー : W
ビームウエスト : w_L

真空回折の確率

回折光の角度分布

$$\frac{dN_{\text{diffracted}}}{d \cos \theta} \sim \frac{J E^2 W^2}{w_L^2 (w_L^2 + 2w_X^2)} \times (E w)^2 e^{-\frac{1}{2} (E w \theta)^2}$$

$$w^2 = \frac{w_L^2 w_X^2}{w_L^2 + 2w_X^2}$$

PRD 94, 013004 (2016)

Pump光は高強度&集光

→PWクラスレーザーの μm 集光

Probe光は高光子エネルギー

& パルスレーザーが良い → XFEL

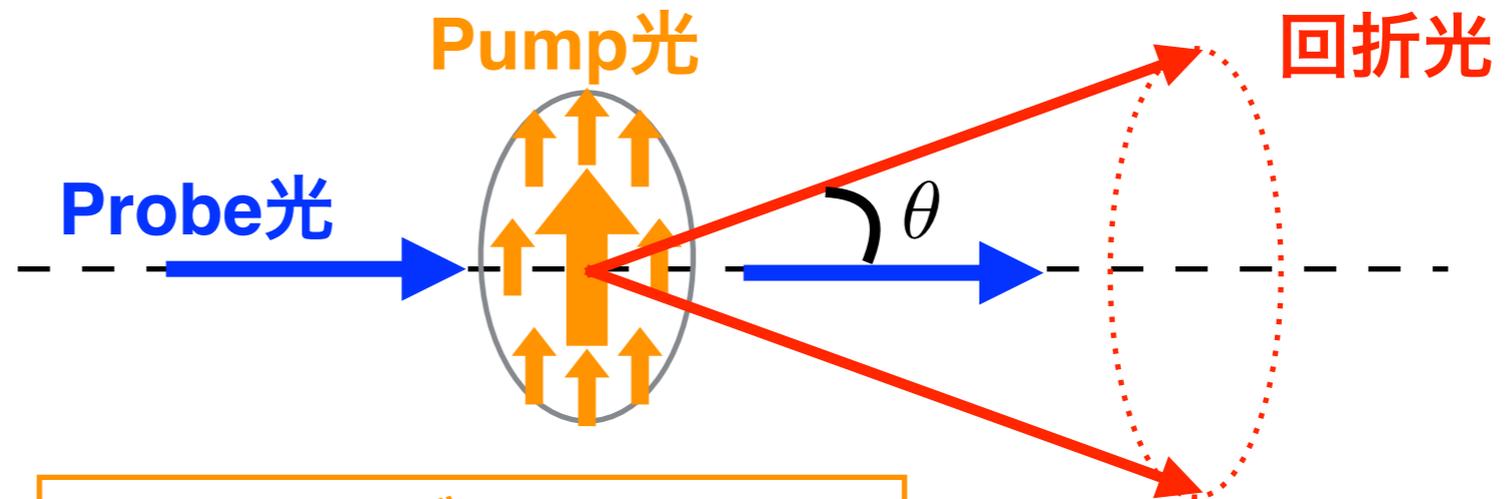
Probe XFEL
(ガウシアンビーム)

光子数 : N

光子エネルギー : E

フラックス : J

ビームウエスト : w_X



Pumpレーザー

パルスエネルギー : W

ビームウエスト : w_L

真空回折による角度発散

回折光の角度分布

$$\frac{dN_{\text{diffracted}}}{d \cos \theta} \sim \frac{J E^2 W^2}{w_L^2 (w_L^2 + 2w_X^2)} \times (E w)^2 e^{-\frac{1}{2} (E w \theta)^2}$$

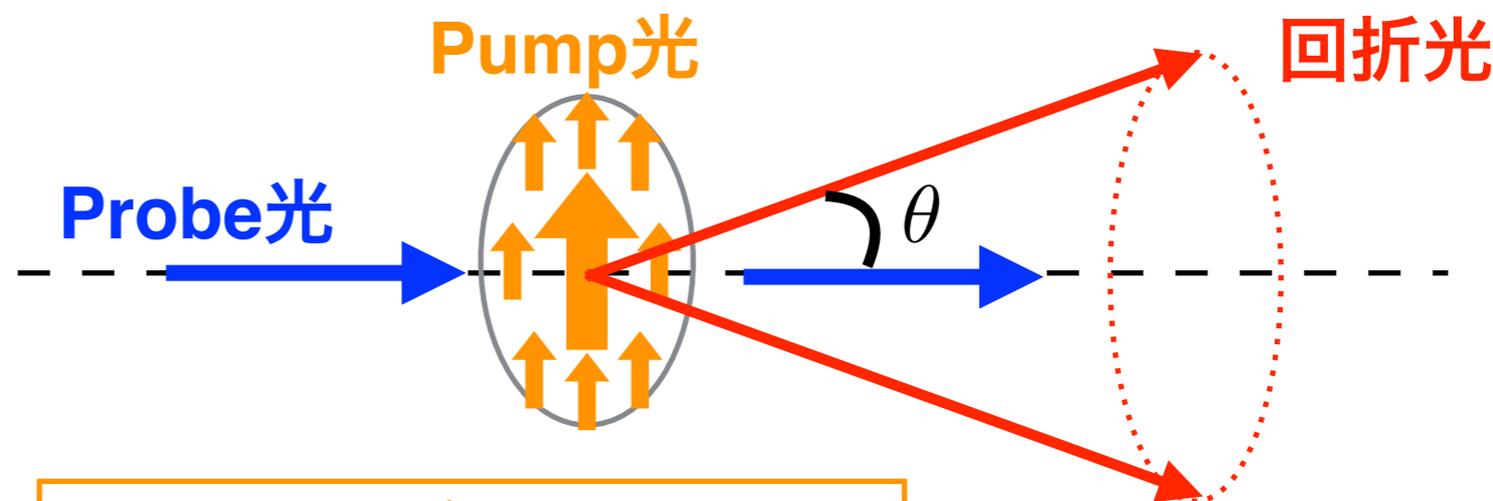
Pumpレーザー、probe XFELを小さく集光すると角度発散が増加

$$w^2 = \frac{w_L^2 w_X^2}{w_L^2 + 2w_X^2}$$

PRD 94, 013004 (2016)

Probe XFEL
(ガウシアンビーム)

光子数 : N
光子エネルギー : E
フラックス : J
ビームウエスト : w_X



Pumpレーザー

パルスエネルギー : W
ビームウエスト : w_L

実験場所：SACLA

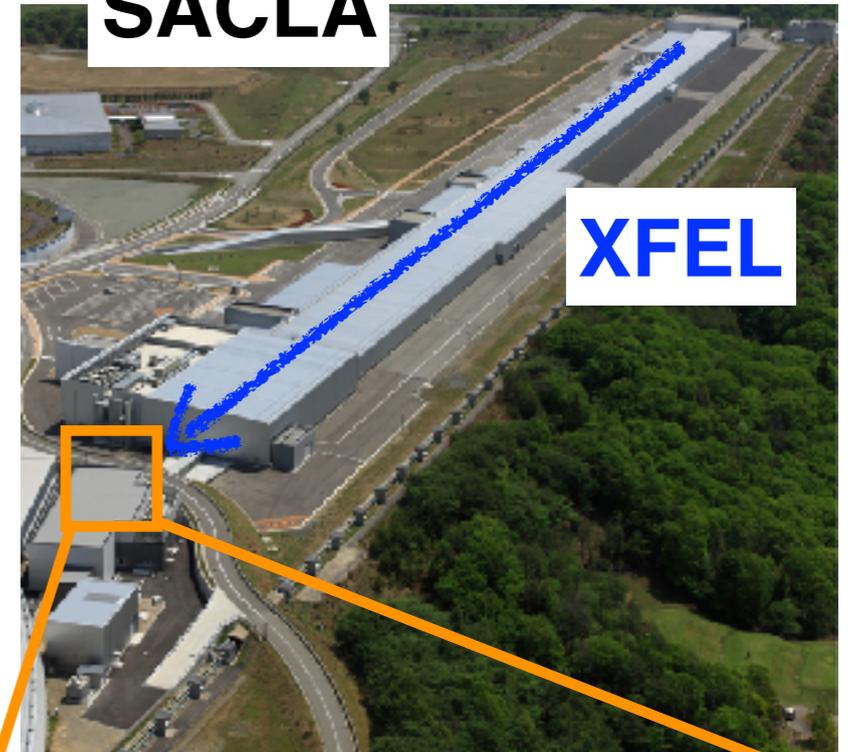
- ・ X線自由電子レーザー(XFEL)と高強度レーザーの両方が使える！

Probe：X線自由電子レーザー(XFEL)

XFELのパラメータ

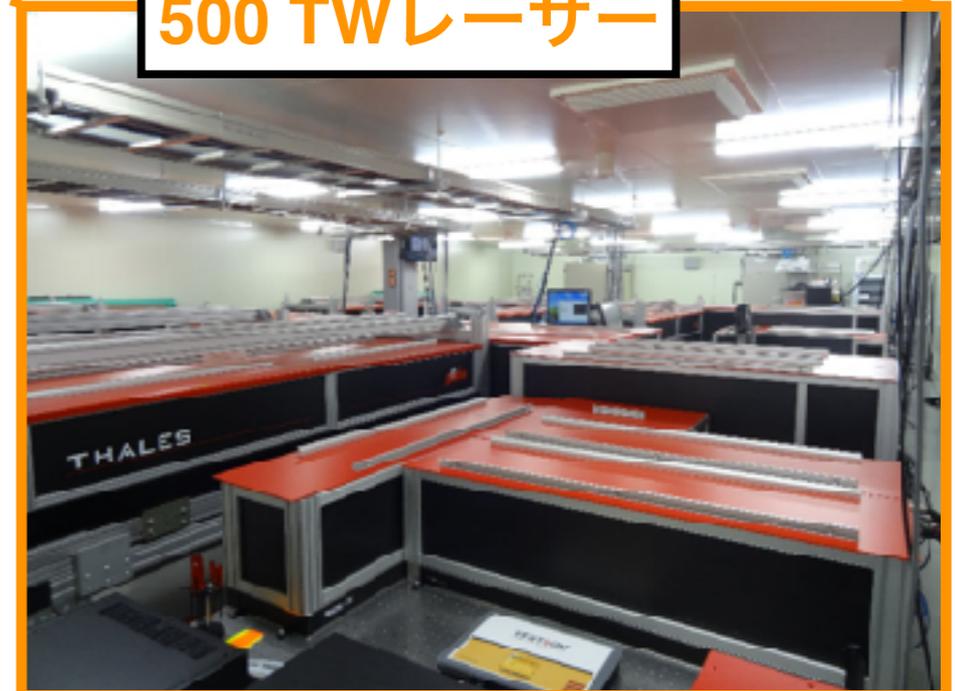
- ・ 光子エネルギー : 4 - 20 keV
- ・ パルスエネルギー : ~ 0.5 mJ/pulse
- ・ パルス幅 : < 10 fs
- ・ 繰り返しレート : 30 Hz
- ・ ビーム径 : 300 μm (集光時 1 μm)

SACLA



XFEL

500 TWレーザー



Pump：500 TWレーザー

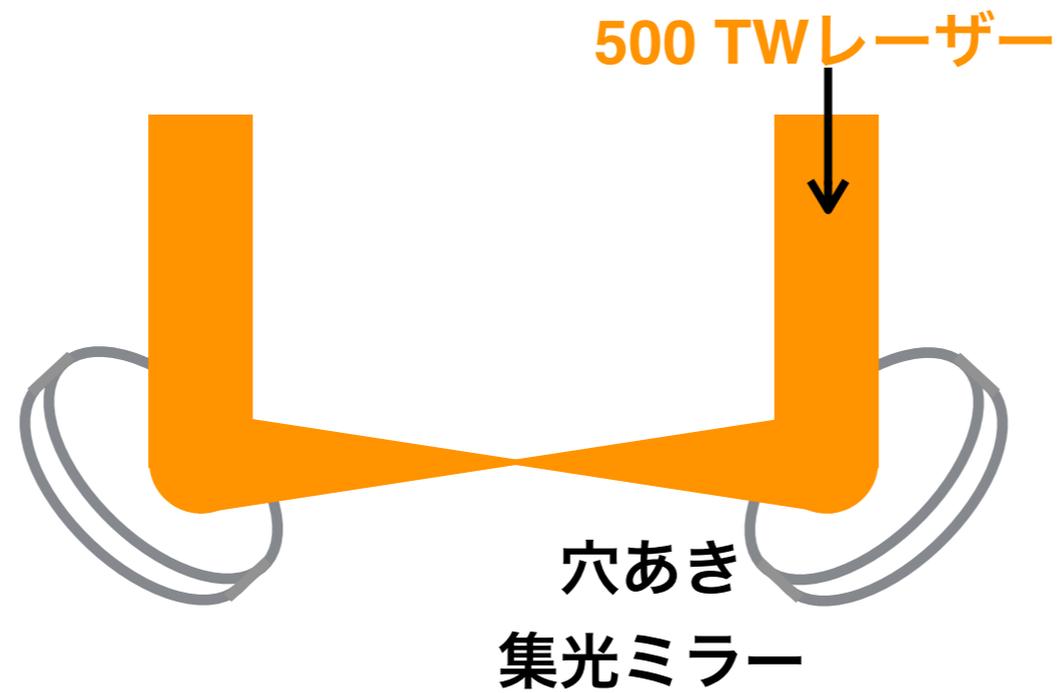
来年度以降に共用運転開始予定

500 TWレーザーのパラメータ

- ・ 波長 : 800 nm
- ・ パルスエネルギー : 12.5 J/pulse
- ・ パルス幅 : 25 fs
- ・ 繰り返しレート : 1 Hz

実験セットアップ

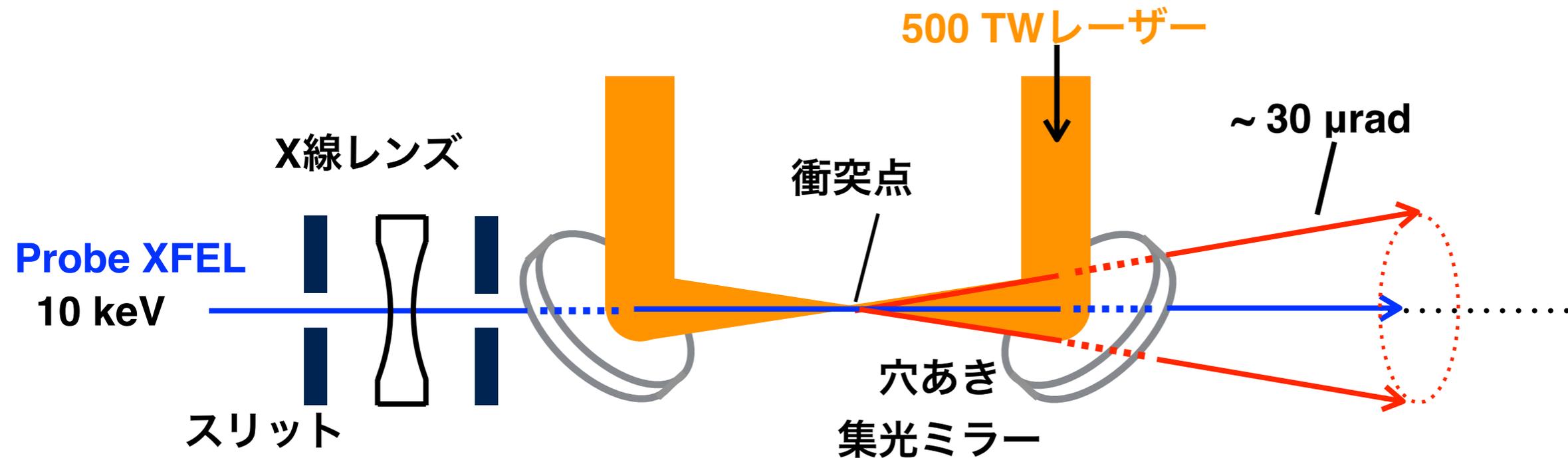
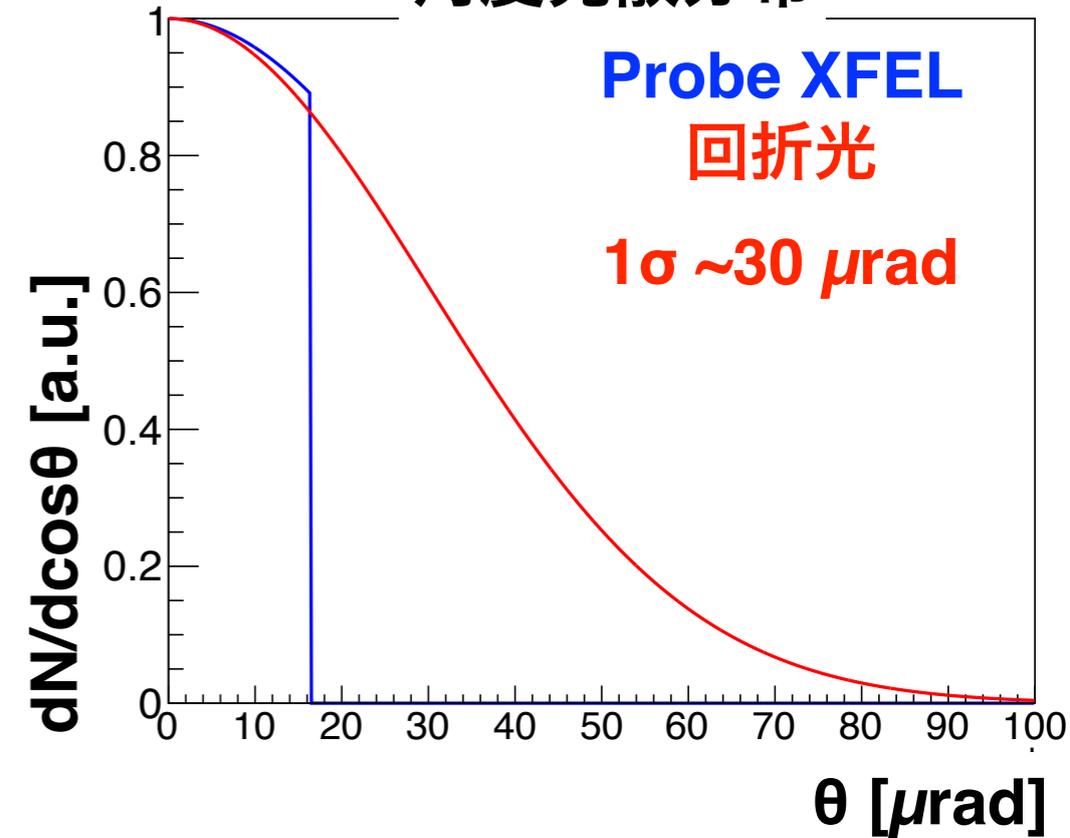
- 500 TWレーザーを1 μm に集光する



実験セットアップ

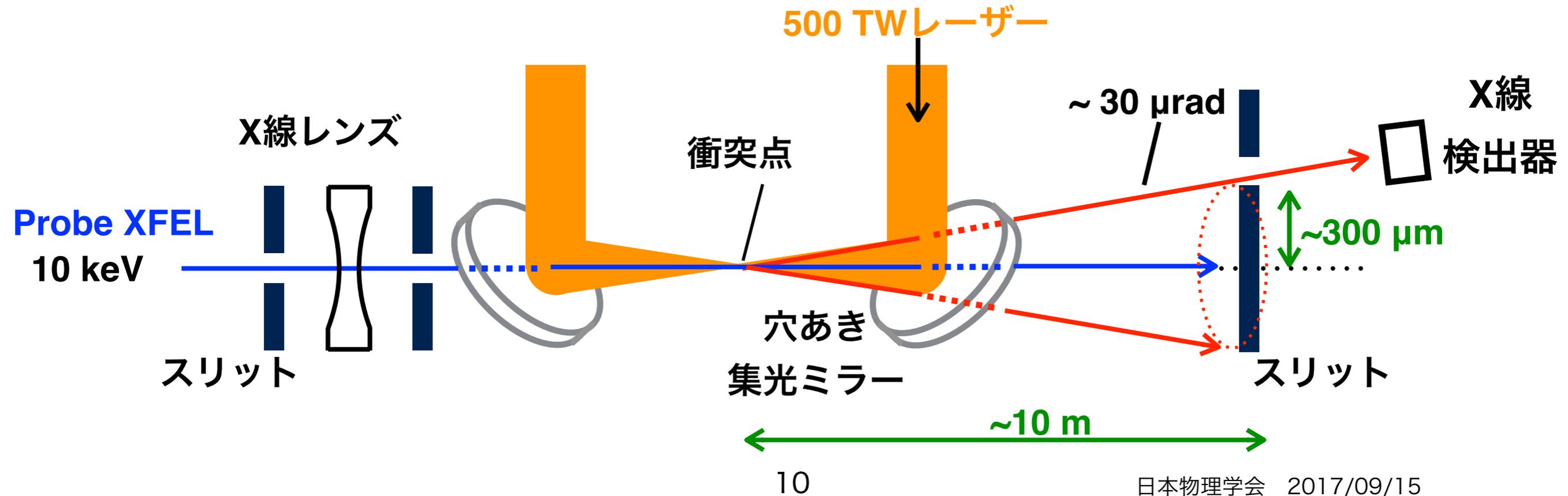
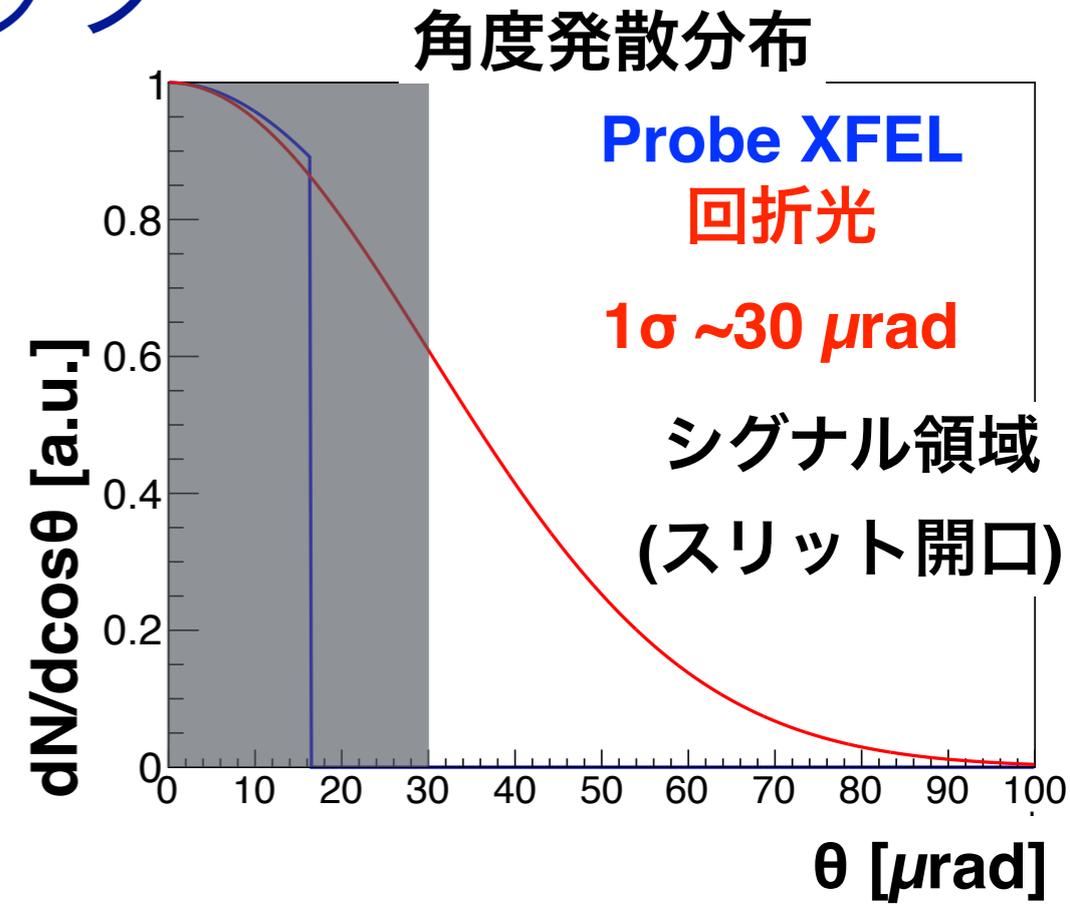
- ProbeのXFELを、スリットで角度発散を抑えつつ、 $2\ \mu\text{m}$ に集光する
- Probe XFELと500 TWレーザーを集光点で正面衝突させる
- Probe XFELの一部が回折される
確率： $\sim 10^{-13}$ 角度発散： $\sim 30\ \mu\text{rad}$

角度発散分布



実験セットアップ

- スリットを用いて回折光だけを切り出す
- 2日間のDAQでシグナル数は
~100 photonsに達する



真空回折実験のポイント

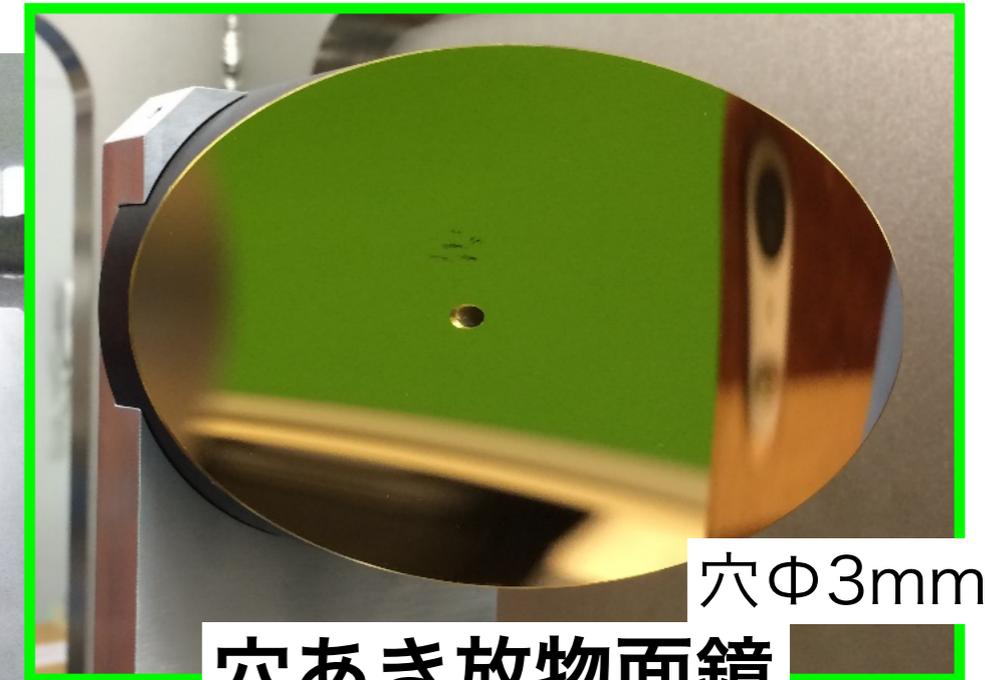
- シグナルを十分に得るために必要な要素
 - 高強度レーザーの集光 **1 μm**
 - 空間的な位置合わせ(ゼロ点、ふらつき) **1 μm**
 - 時間的な位置合わせ(ゼロ点、ふらつき) **0.3 ps**
- バックグラウンドの抑制 **10^{-16}**
probe XFELに由来

SACLAには既に利用可能な2.5 TWのレーザーがあり
このレーザーを用いて上記項目の予備測定を行っている

衝突点チャンバ内の写真

集光点撮像系へ

レンズ



穴Φ3mm

穴あき放物面鏡

Probe XFEL

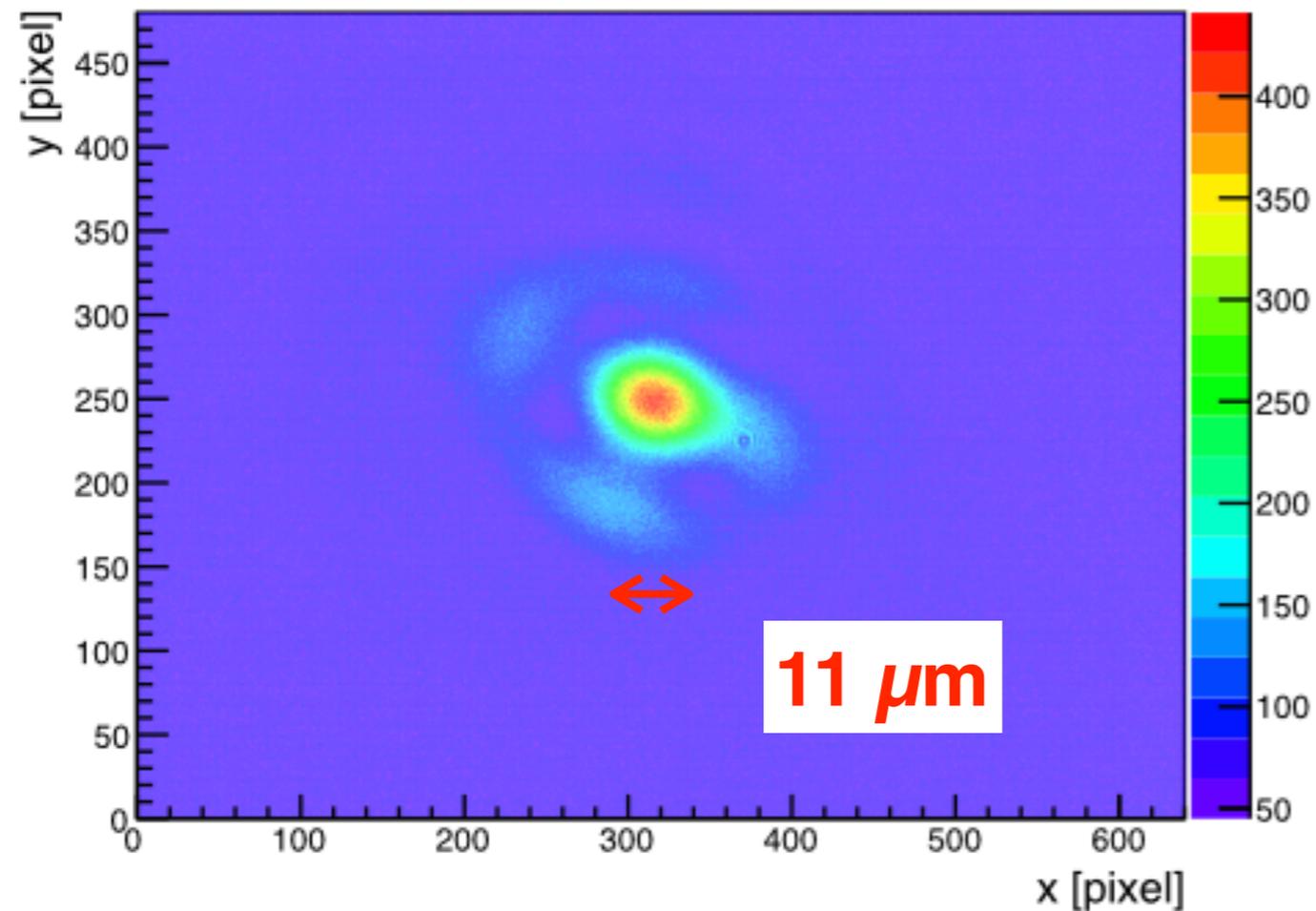
Probe XFEL

+ 回折光

Pumpレーザー

Pump レーザーの集光

Pump レーザーの集光像 (2.5 TWレーザー)



Pumpレーザーの集光サイズ

: 11 μm

目標サイズ1 μmに向けての改善

- 放物面鏡のF値：2.6→1
- 回折限界まで集光するため
集光前のレーザー波面を整える
形状可変ミラーを導入

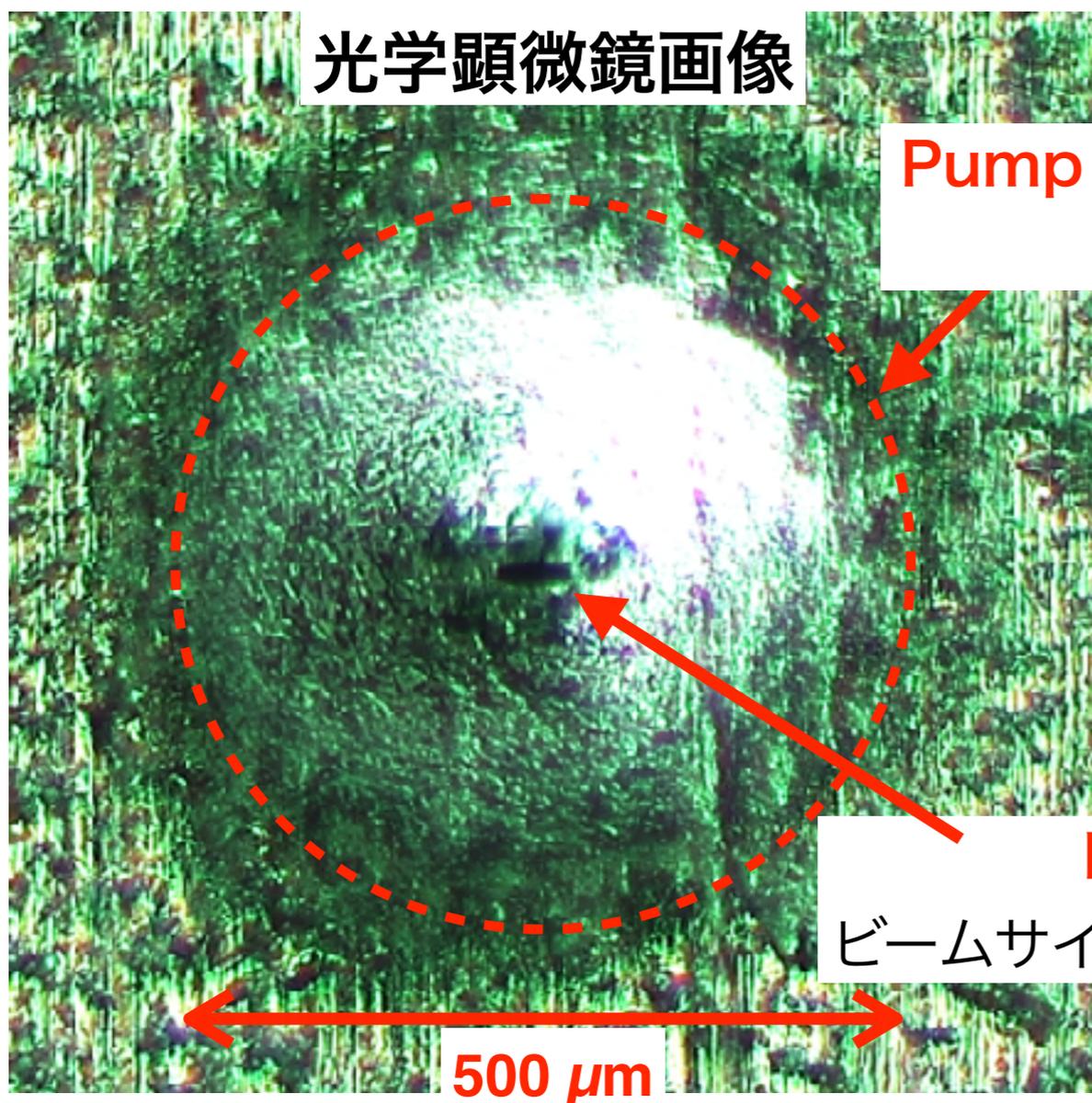
Pumpレーザーとprobe XFELの位置合わせ

Pumpレーザーとprobe XFELの位置合わせ

衝突点に置いた亜鉛薄膜(20 μm 厚)に対する照射痕の位置を
レーザー顕微鏡で比較

亜鉛薄膜の

光学顕微鏡画像



Pumpレーザーによるくぼみ

約 500 μm

Probe XFELの穴

ビームサイズ20 μm と同程度の大きさ

500 μm

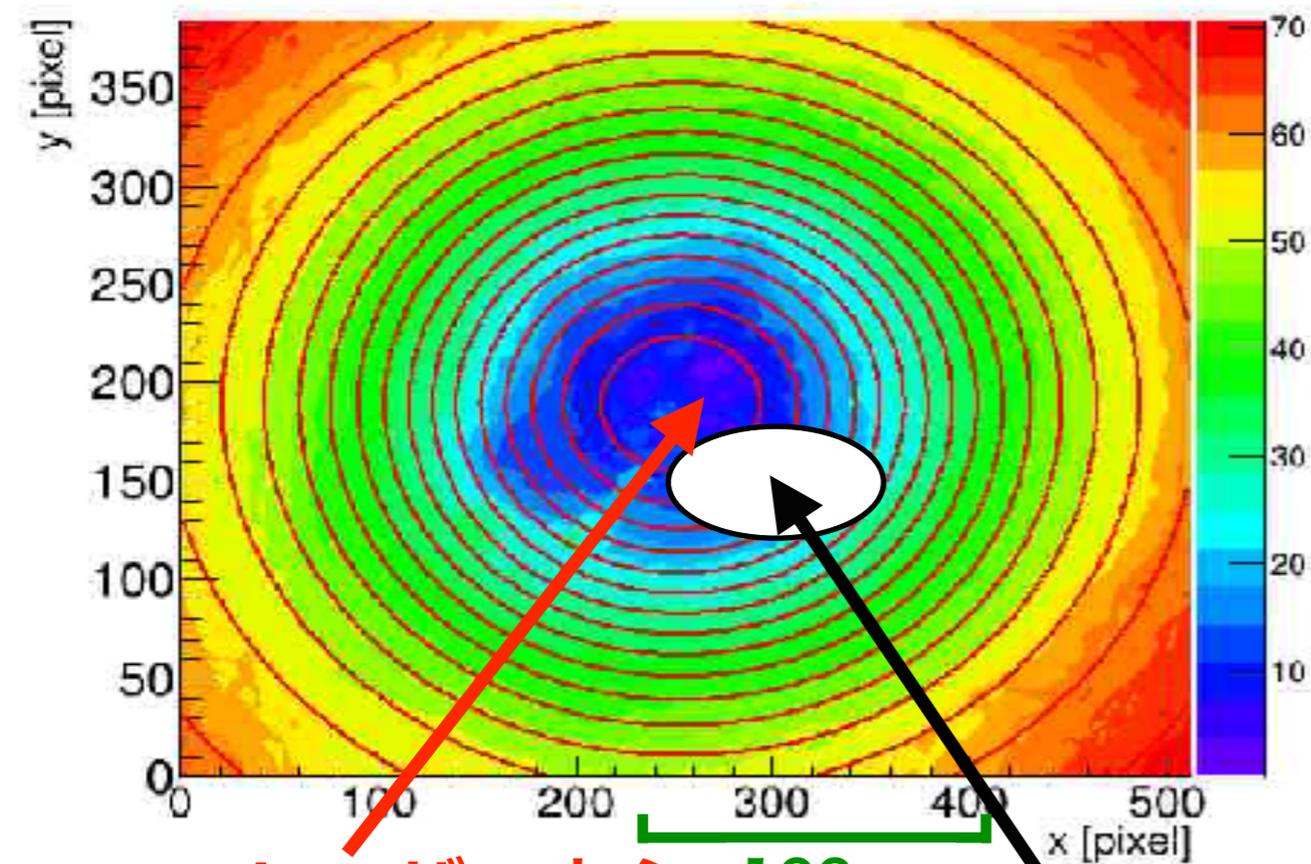
Pumpレーザーとprobe XFELの位置合わせ

Pumpレーザーとprobe XFELの位置合わせ

衝突点に置いた亜鉛薄膜(20 μm 厚)に対する照射痕の位置を
レーザー顕微鏡で比較

レーザー顕微鏡画像

Z軸：薄膜面垂直方向の高さ



相対位置決定精度： $\pm 4 \mu\text{m}$

目標精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ に向けての改善

- ・ 平らな金属薄膜へ変更
(亜鉛薄膜には数 μm の凹凸あり)

Pumpレーザー中心

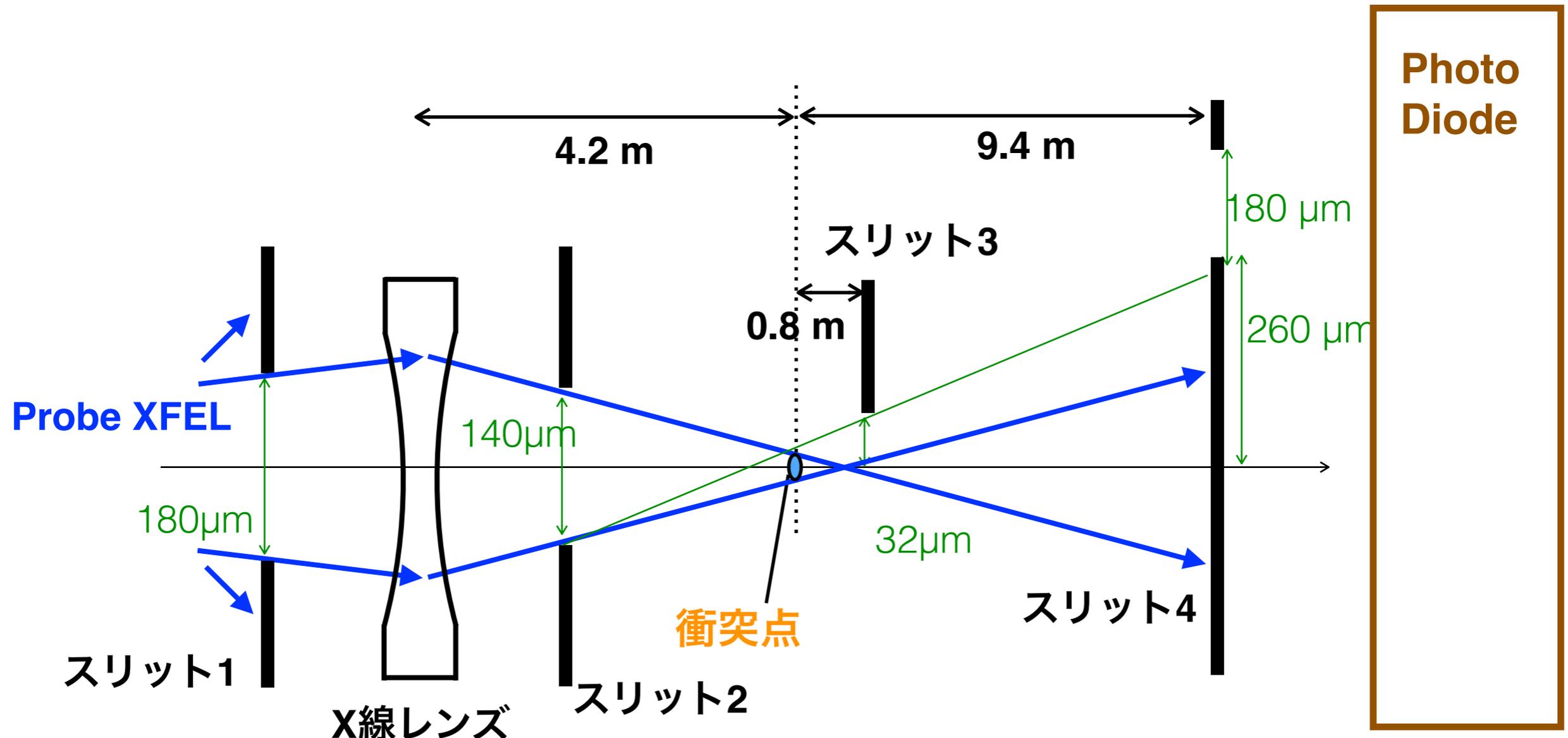
100 μm

Probe XFEL中心

バックグラウンドの原因は？

昨年度のSACLAでの実験時のセットアップ

BG抑制率： 10^{-4} (目標 10^{-16})

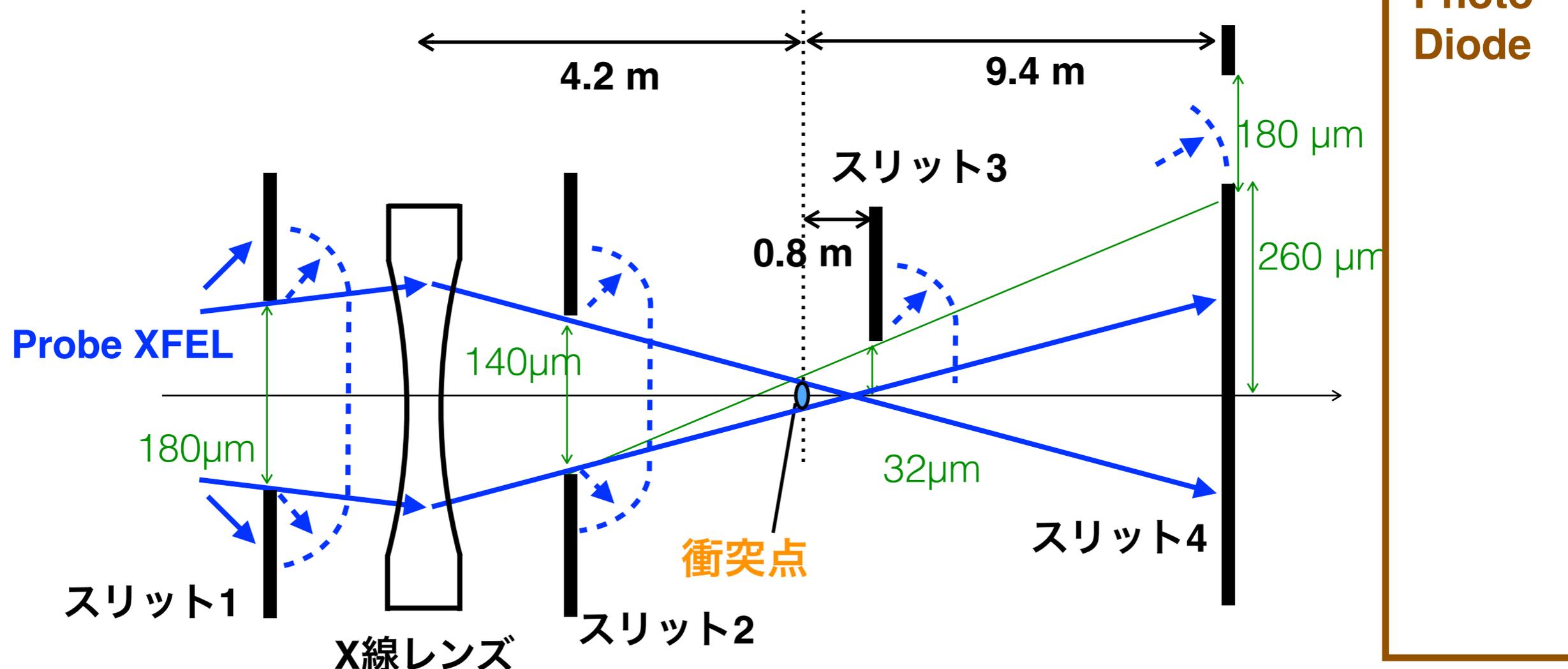


バックグラウンドの原因は？

昨年度のSACLAでの実験時のセットアップ

BG抑制率： 10^{-4} (目標 10^{-16})

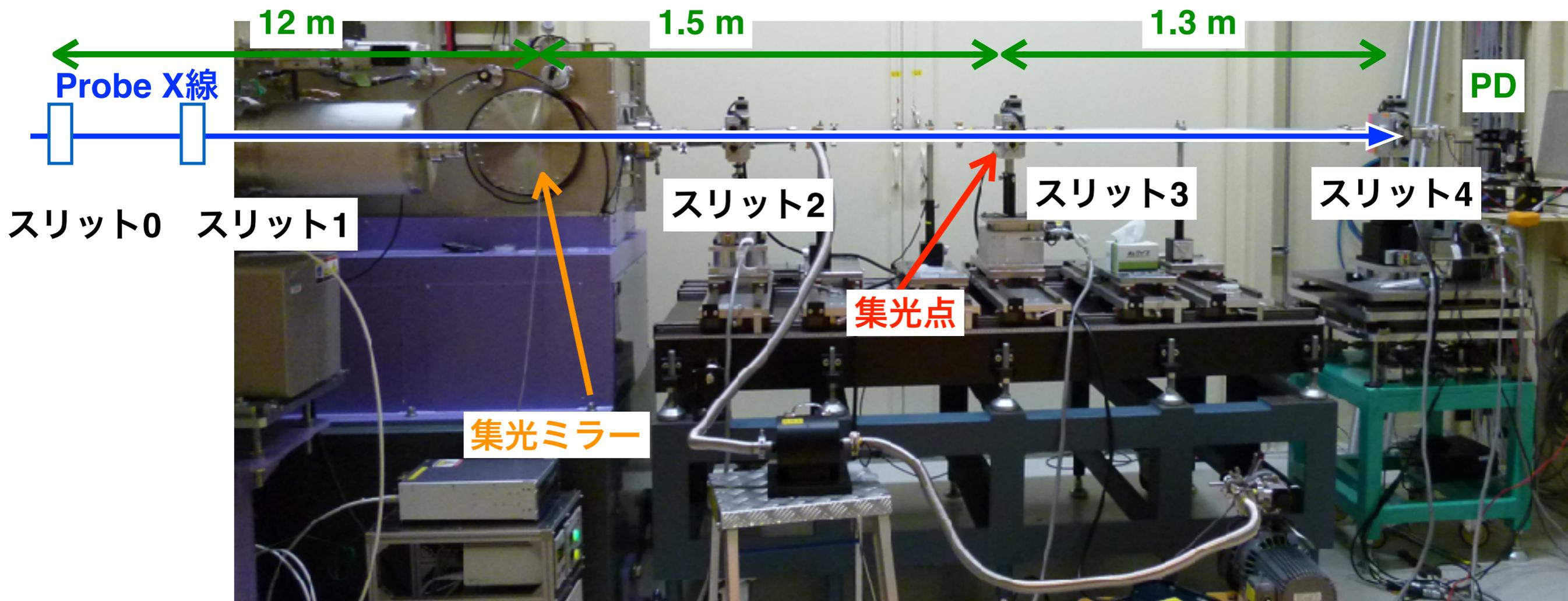
→スリットでprobe XFELを切った際に回折して
回り込んできたprobe XFELがBG源？



SPring-8 でのBG study

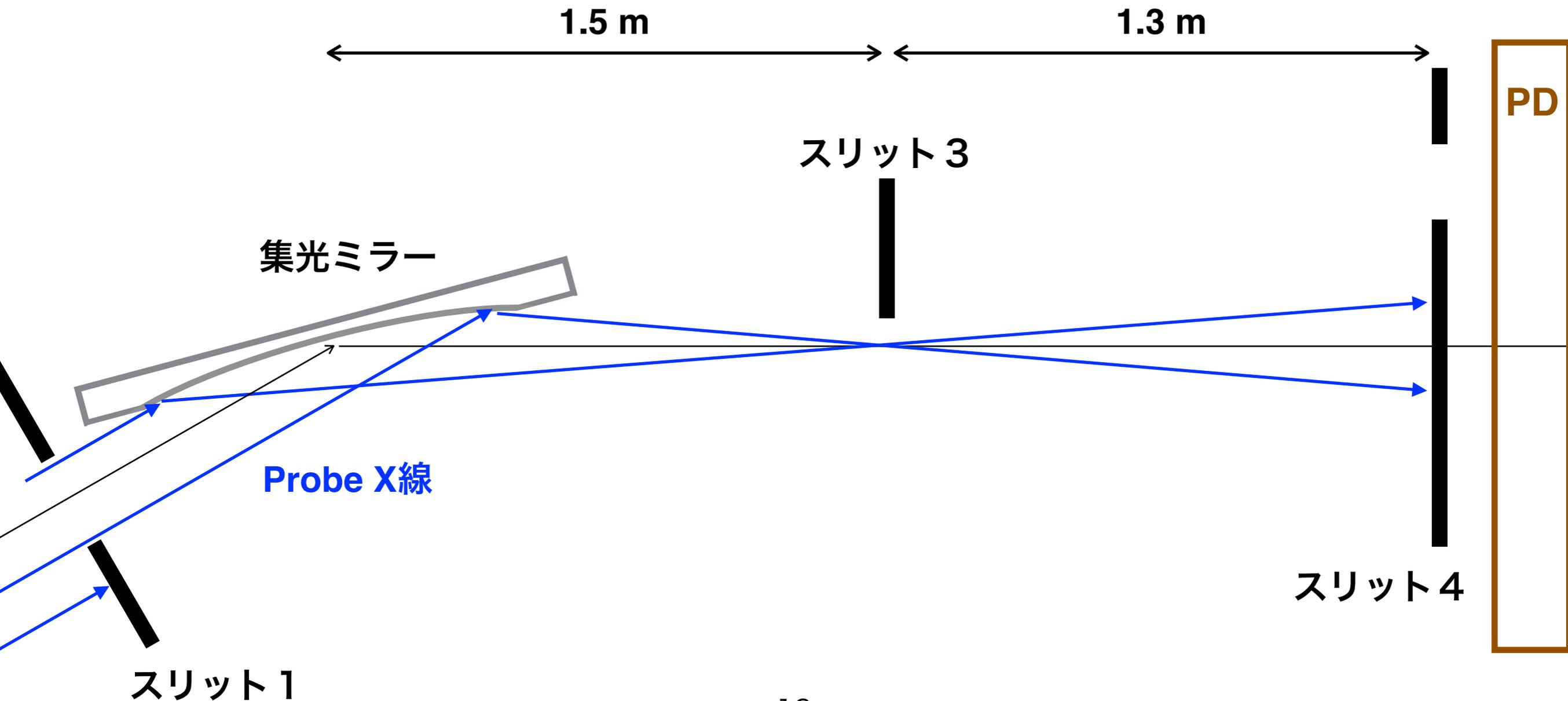
SPring-8 BL19LXUでのBG study

- ビームタイム：2017/05 5日間
- SACLAと同様な実験セットアップ組む
- Probe X線をスリットで切った際の振る舞いを、
回折の効果を検討したシミュレーションと比較



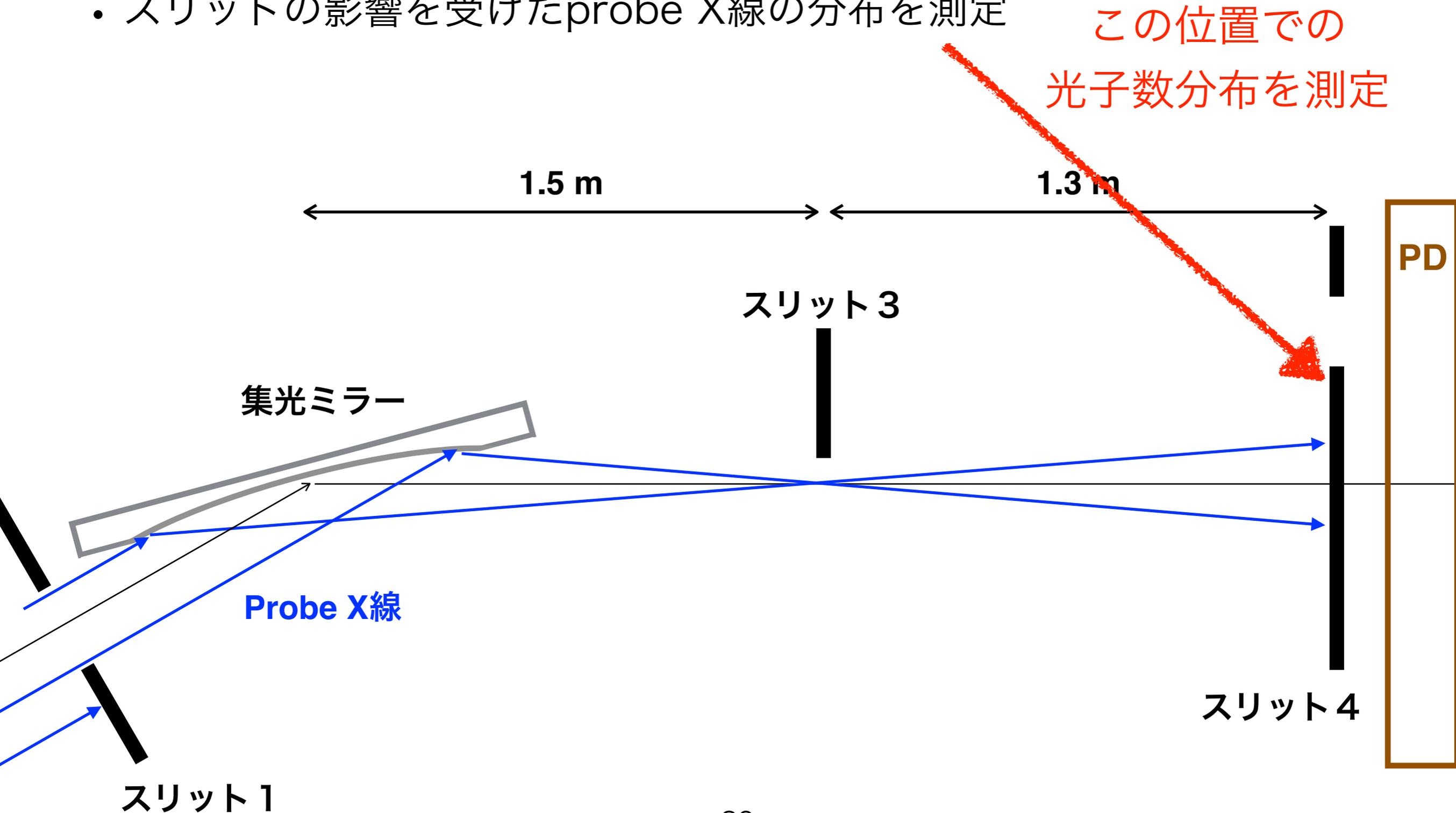
セットアップ図

- SACLAと同様なセットアップを組んだ
- スリットの影響を受けたprobe X線の分布を測定

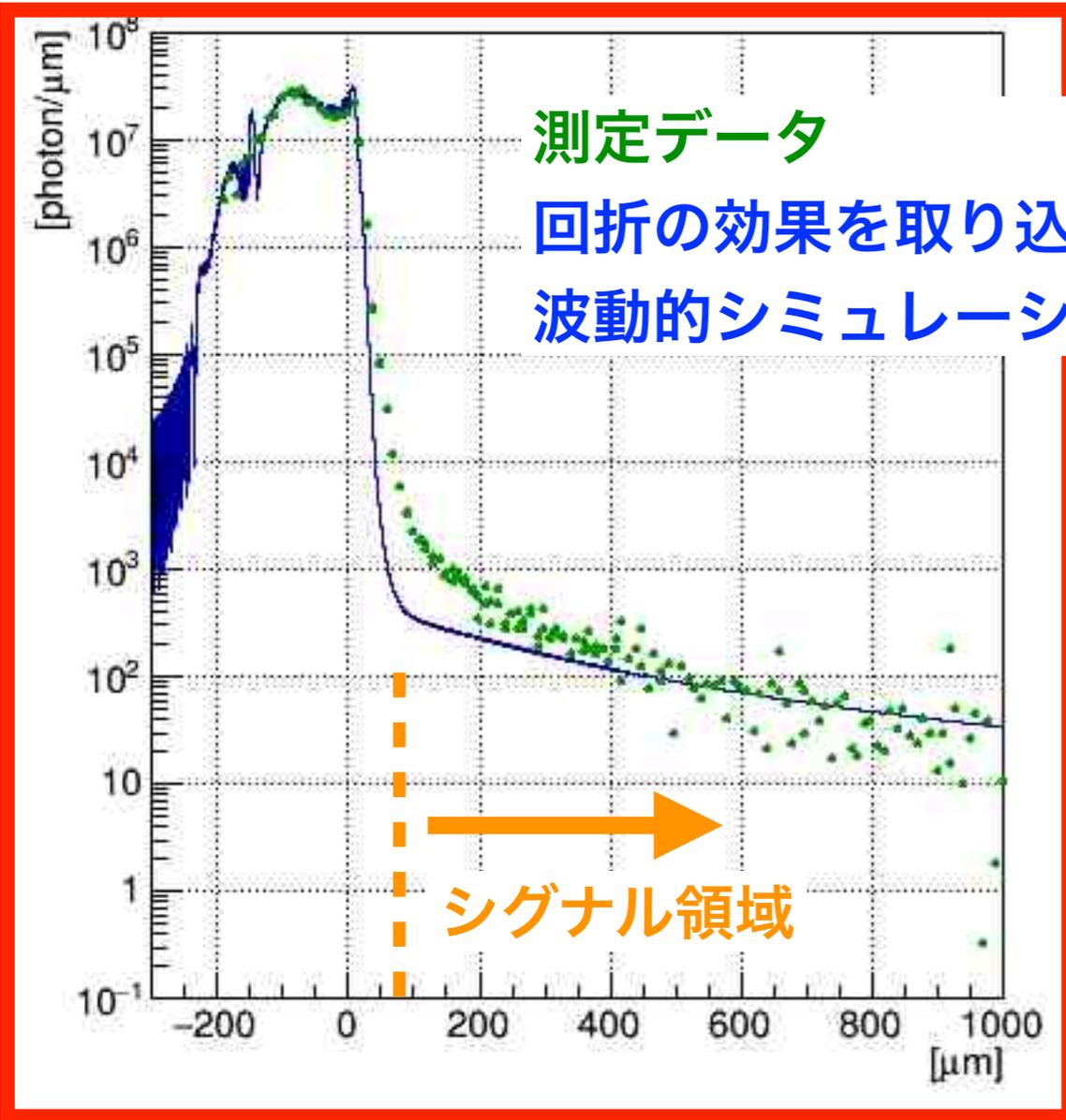


光子数分布測定結果

- SACLAと同様なセットアップを組んだ
- スリットの影響を受けたprobe X線の分布を測定



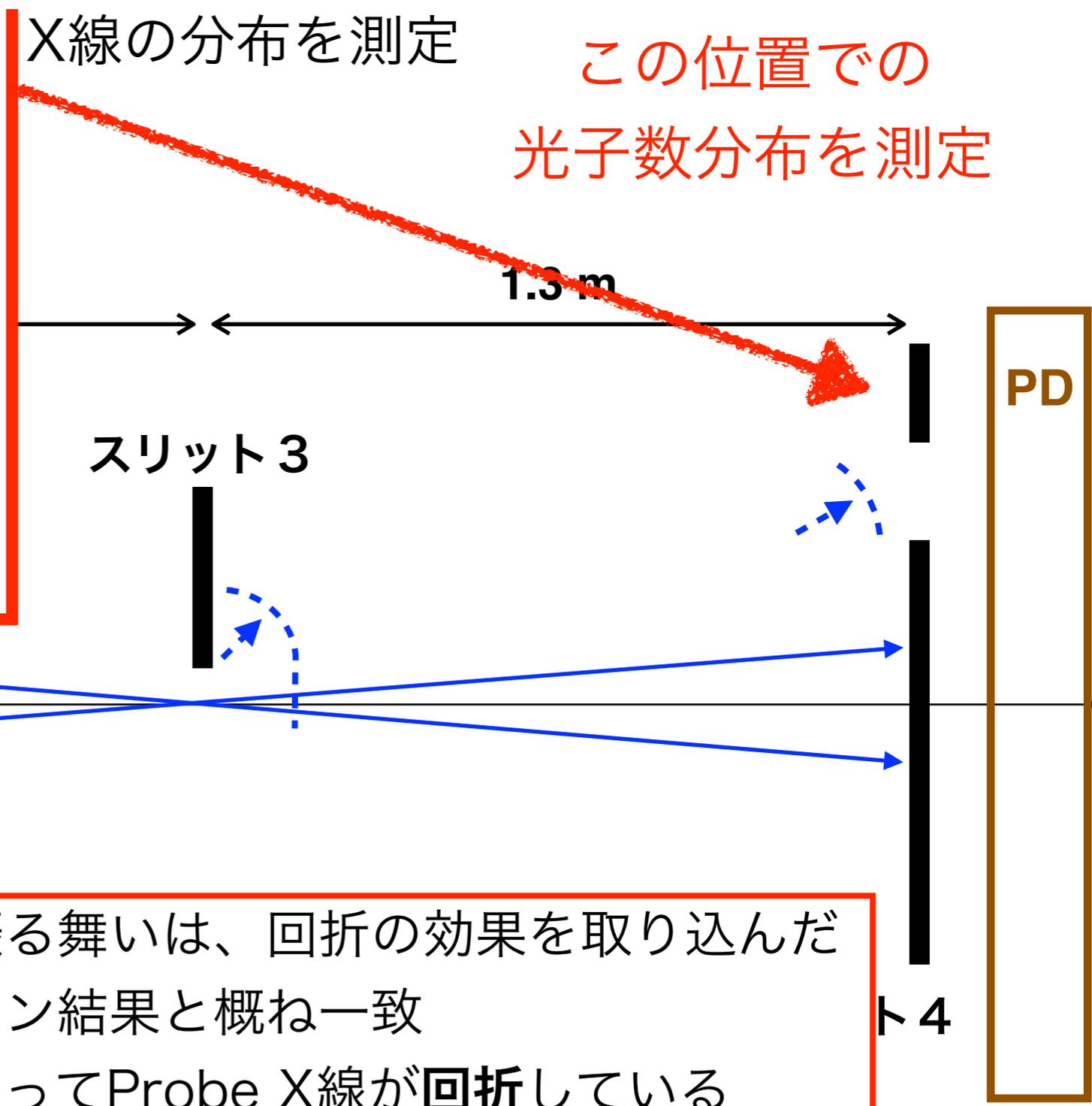
測定結果



測定データ
 回折の効果を取り込んだ
 波動的シミュレーションだ

X線の分布を測定

この位置での
 光子数分布を測定



測定データの振る舞いは、回折の効果を取り込んだ
 シミュレーション結果と概ね一致
 →スリットによってProbe X線が回折している

スリット 1

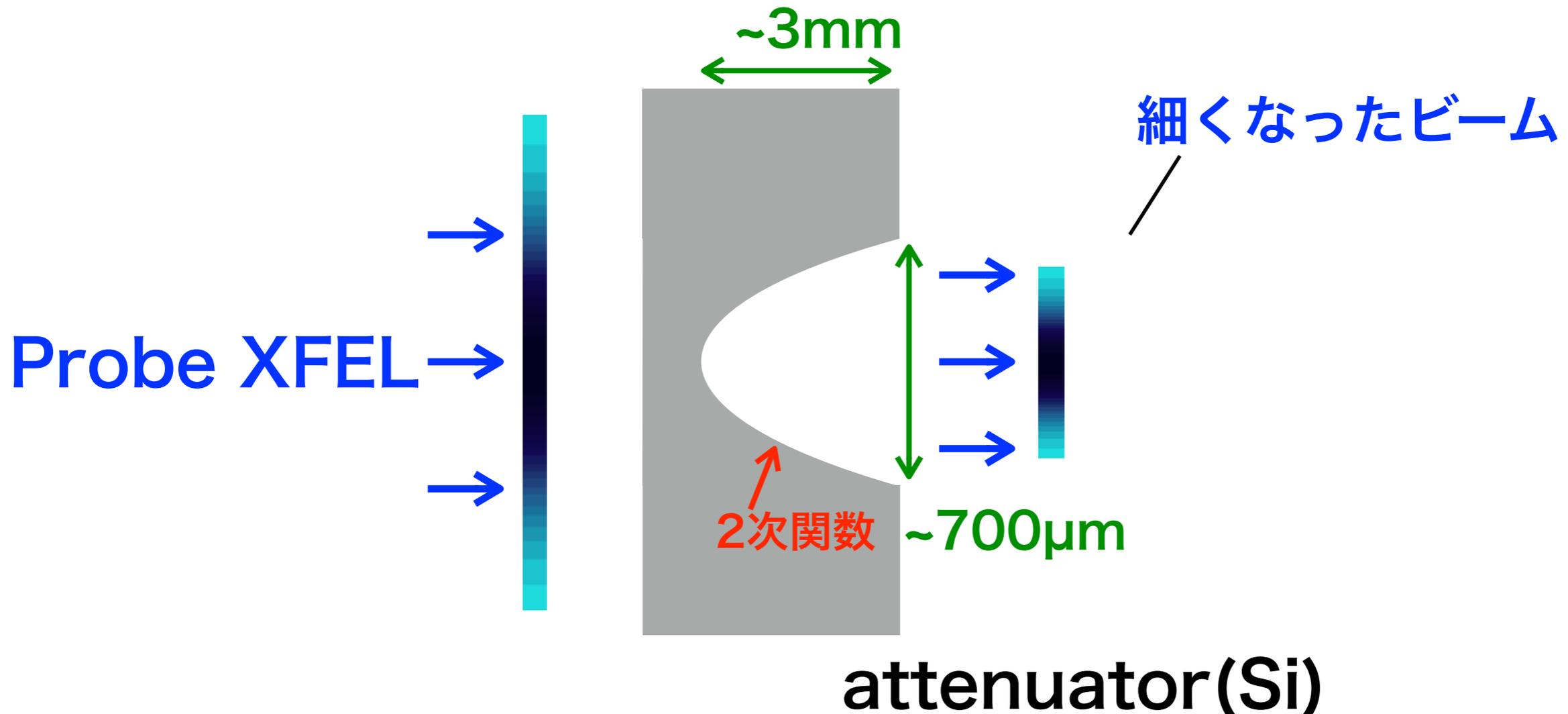
BG対策：特殊形状attenuator

BGの原因

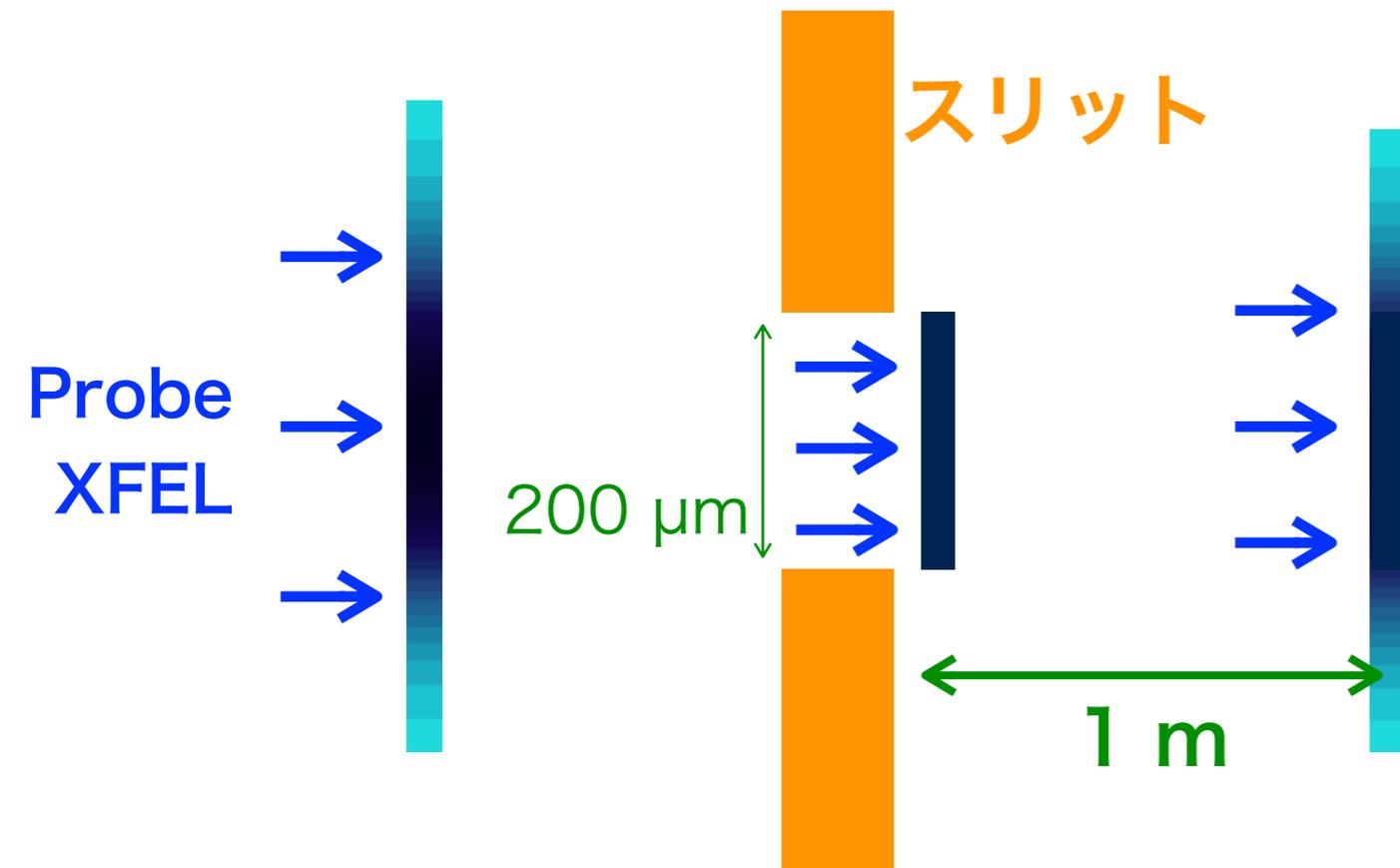
Probe XFELをスリットで切った際の光の回り込み

対策：attenuatorによるビームのshaping

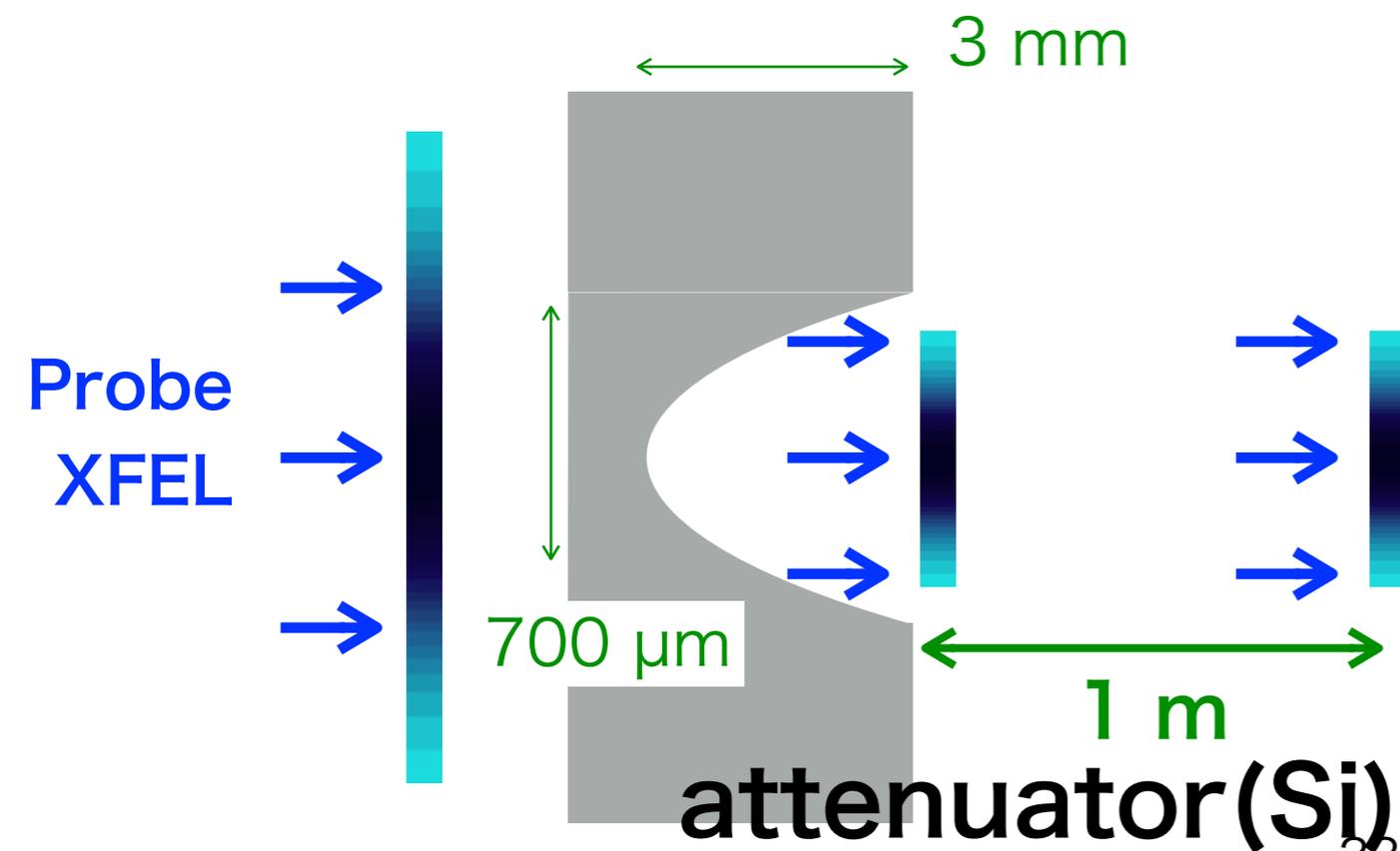
- 光軸外側が厚いattenuatorでprobe XFELをshaping
- スリットの代わりに用い、回り込みなく probe XFELを細くする



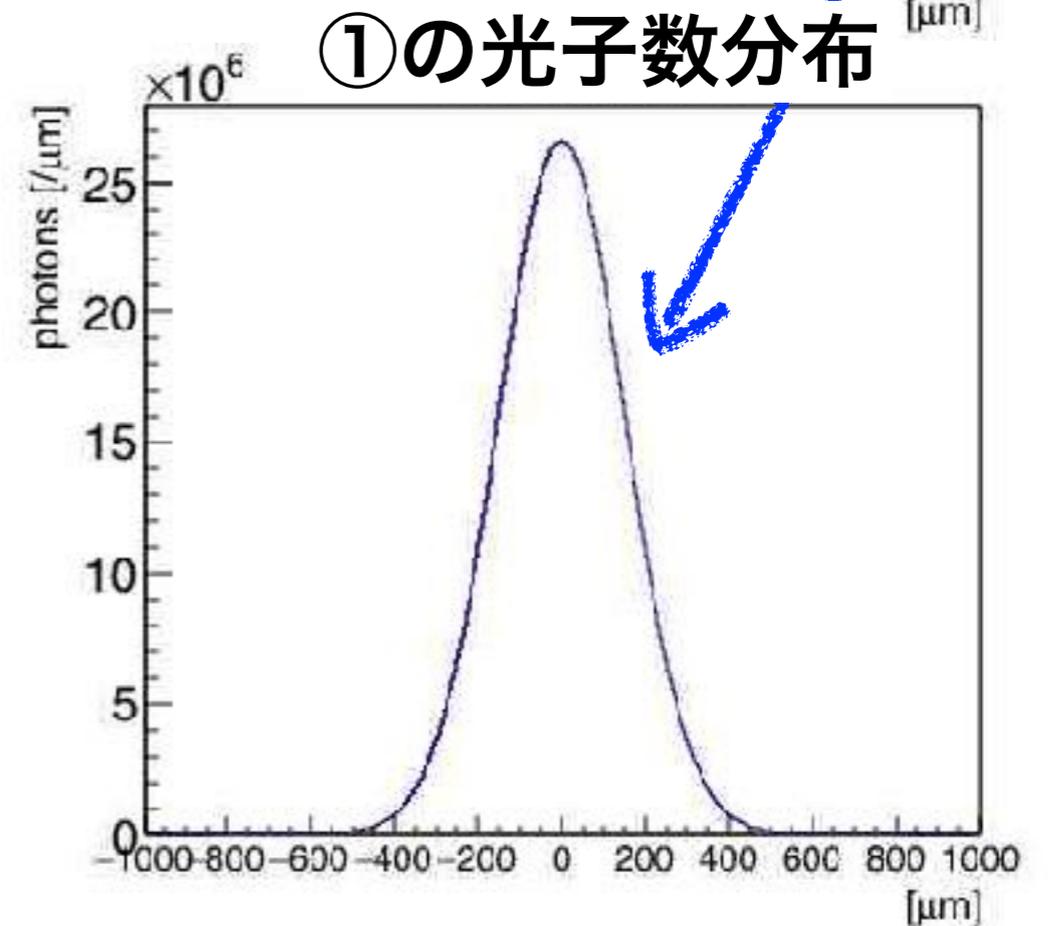
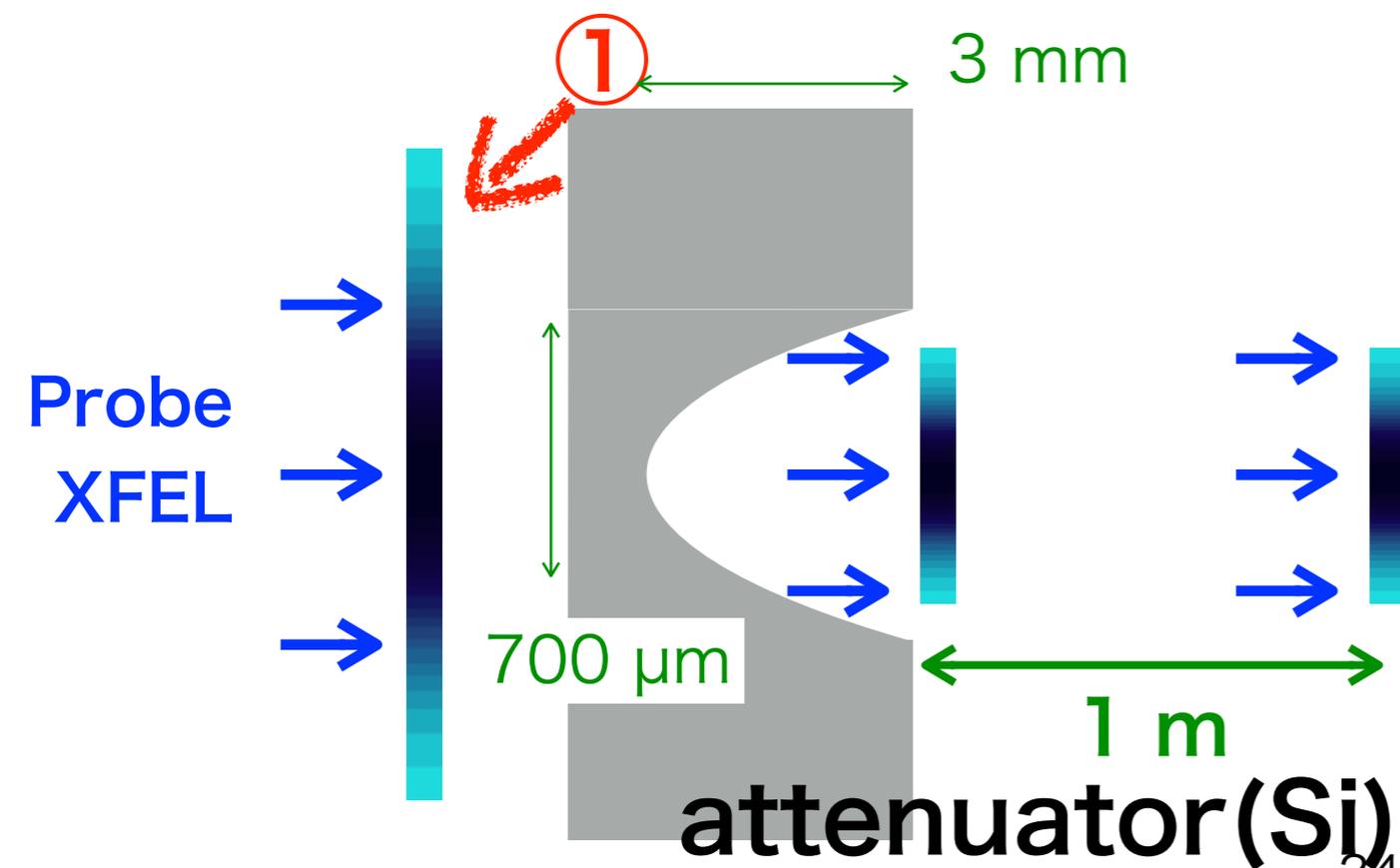
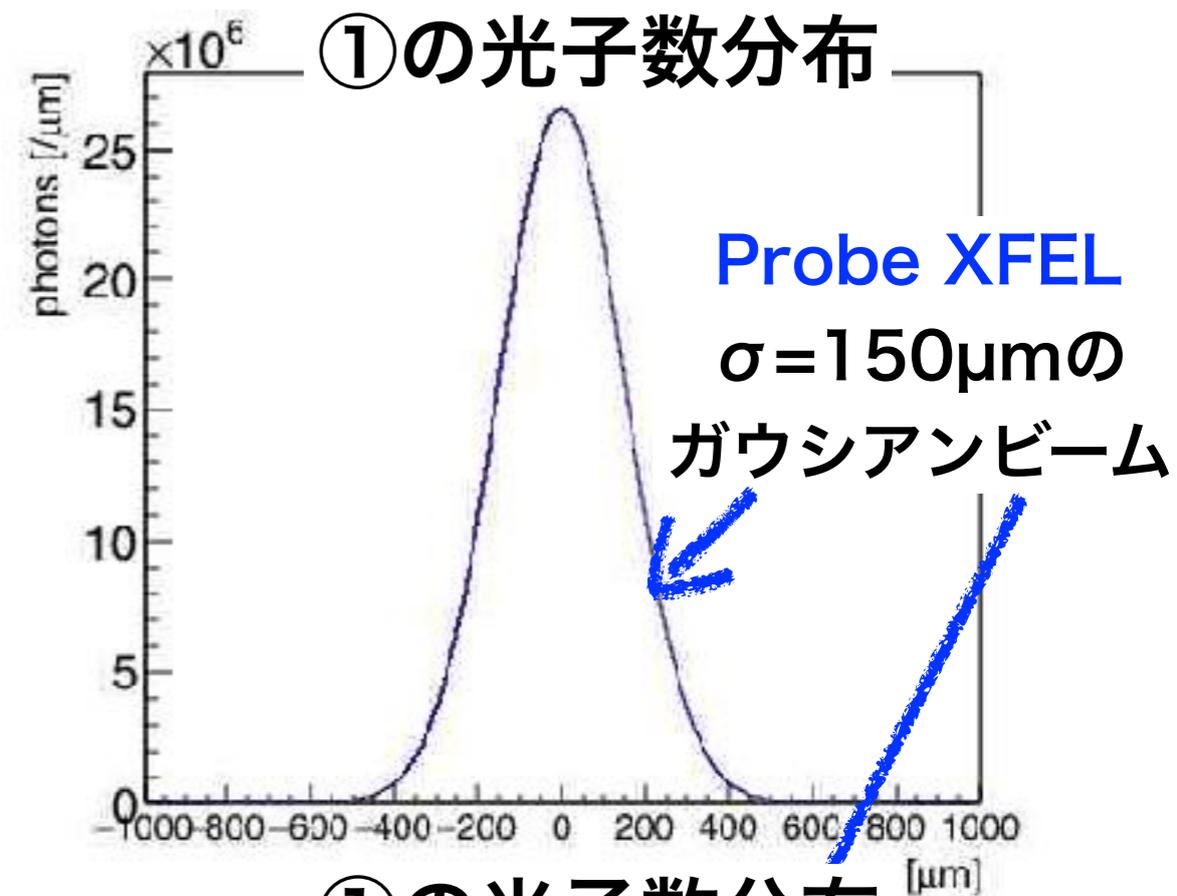
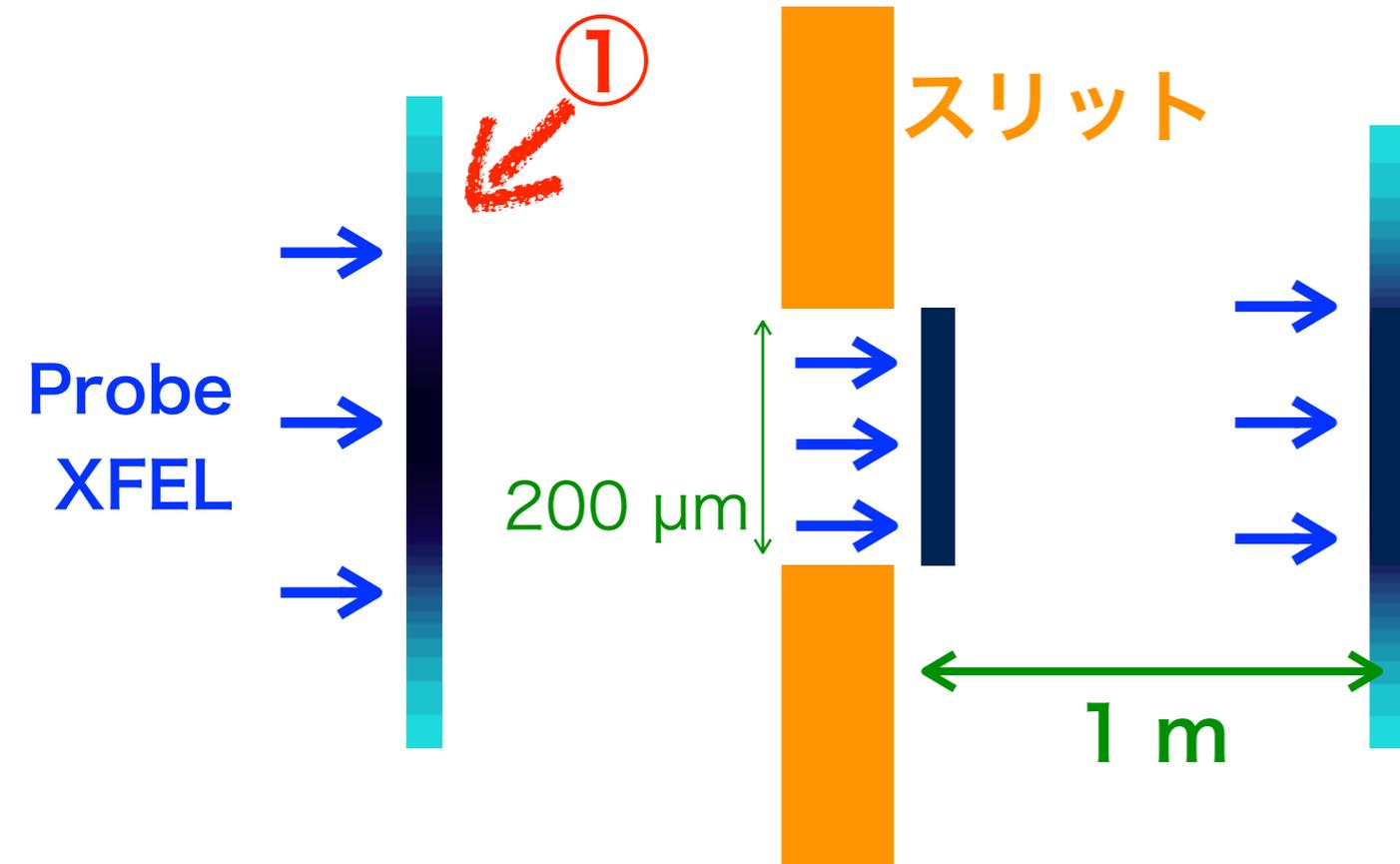
Probe XFELのシミュレーション



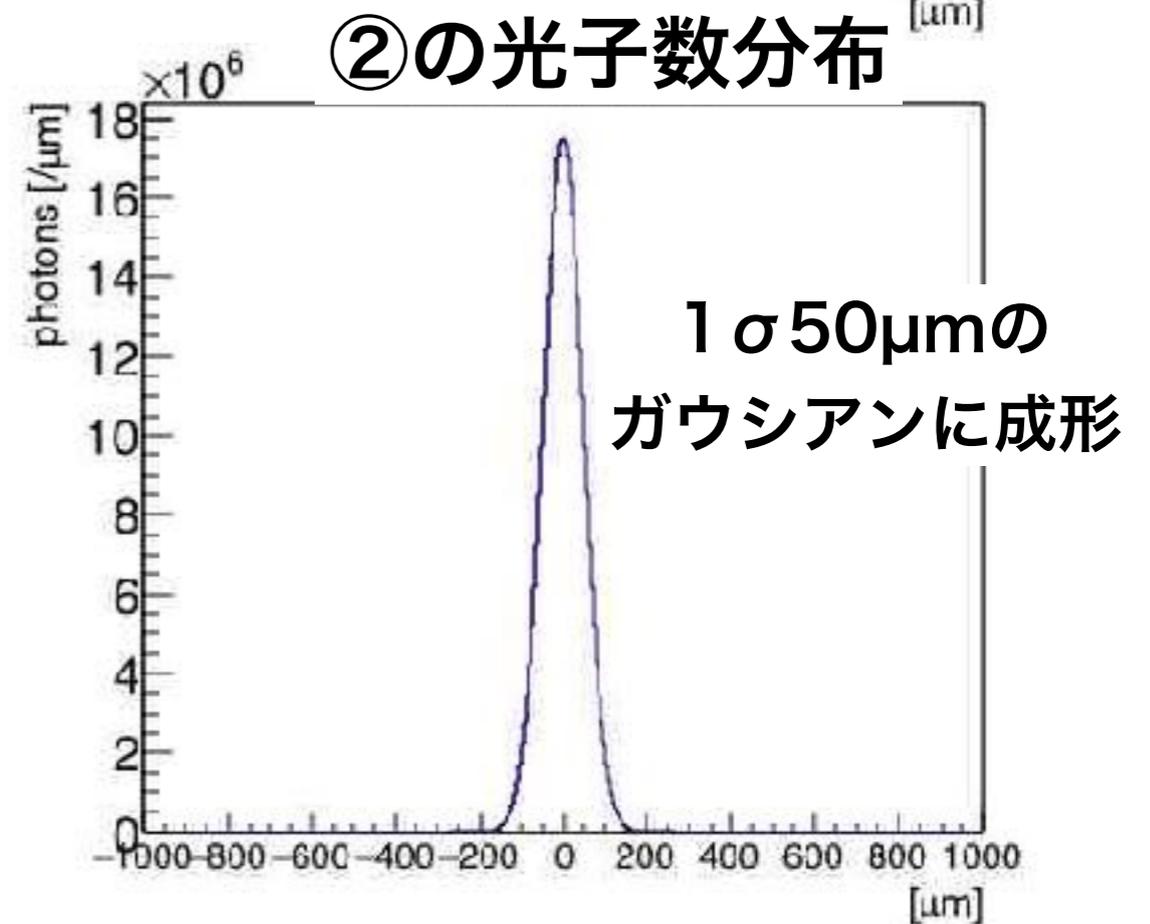
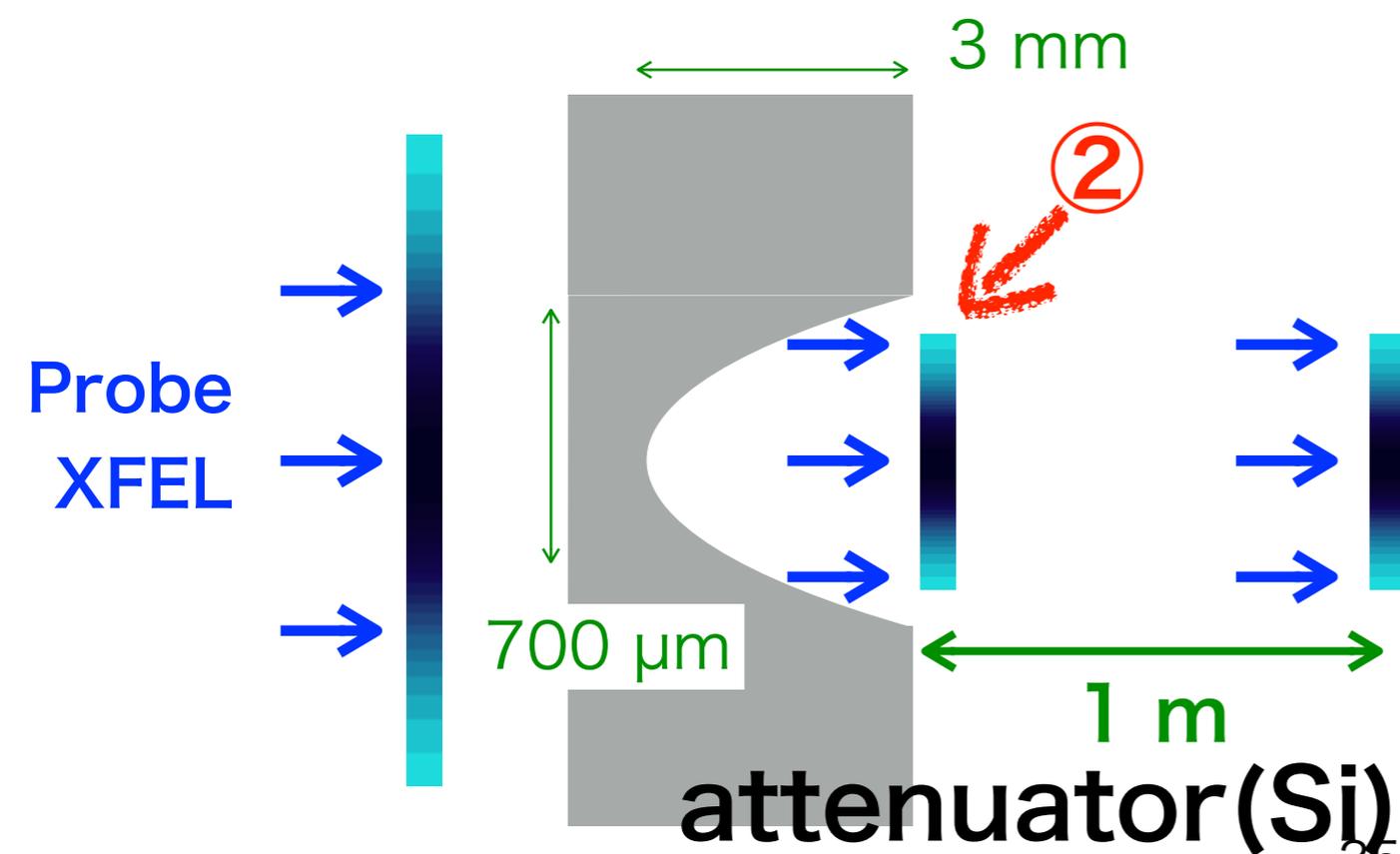
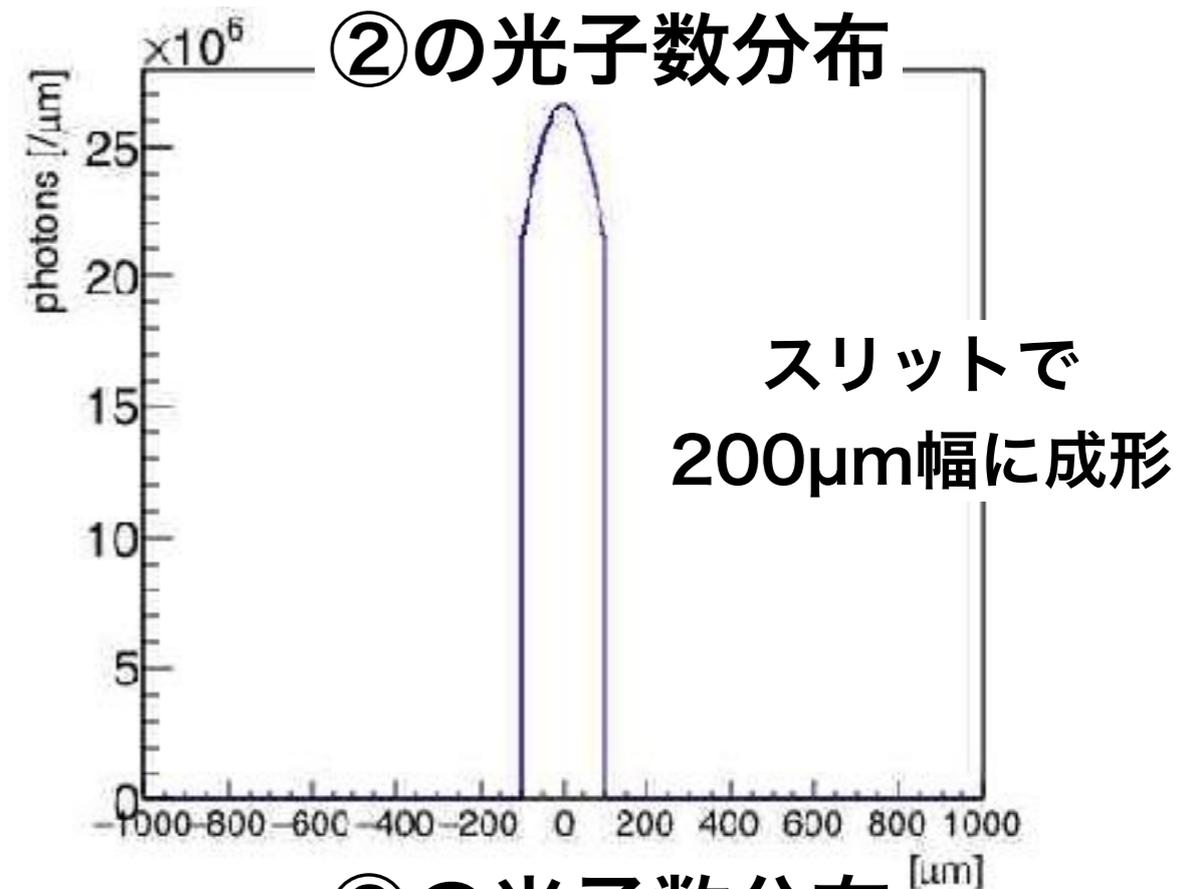
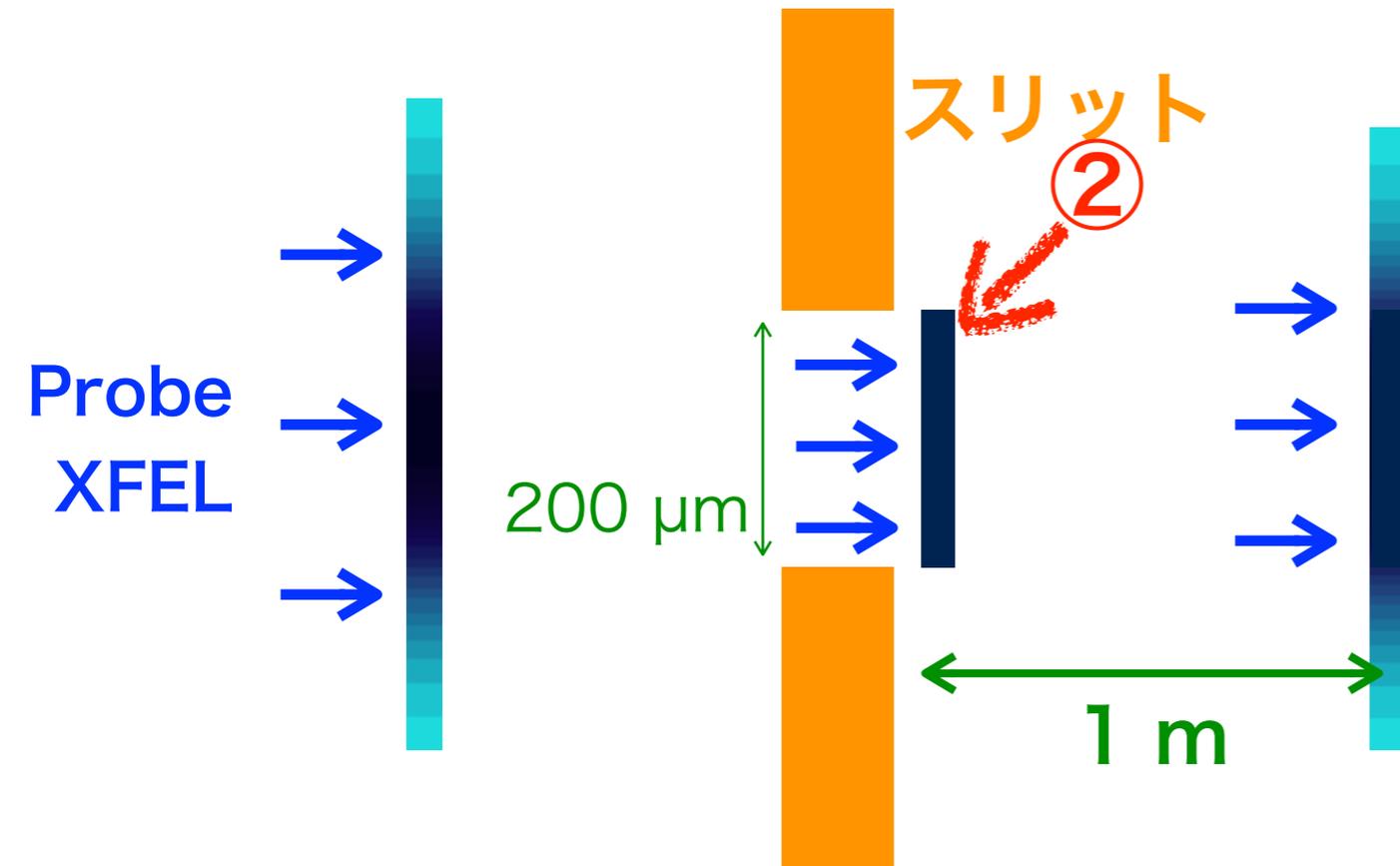
左の2種類のジオメトリで
probe XFELの
波動的シミュレーションを行った



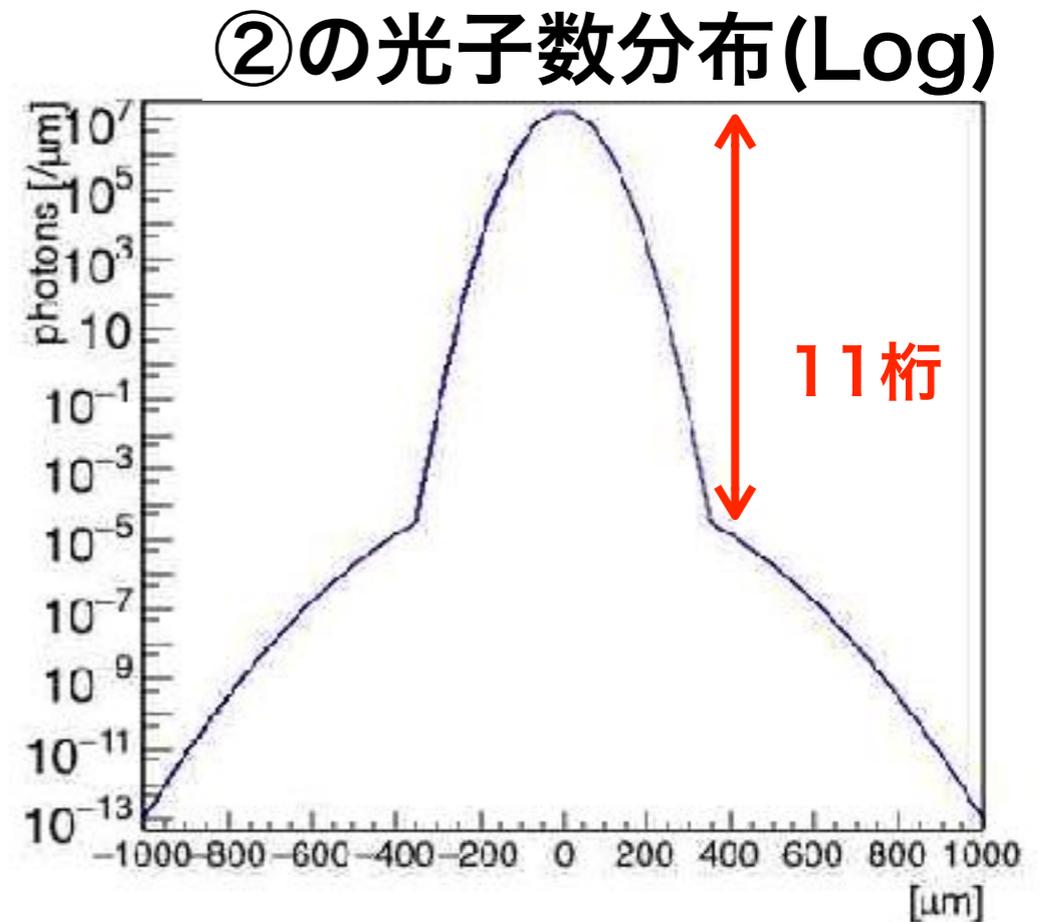
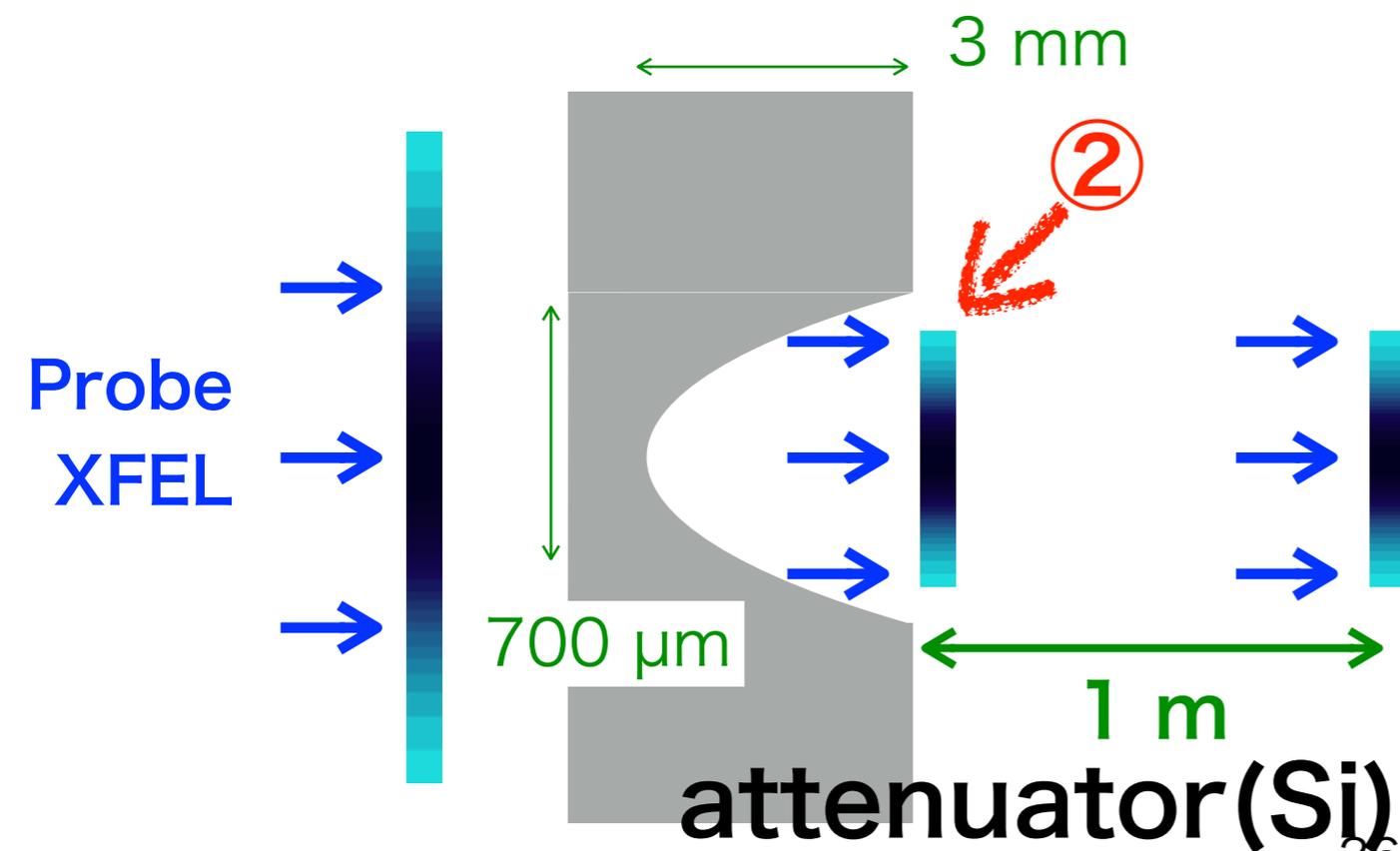
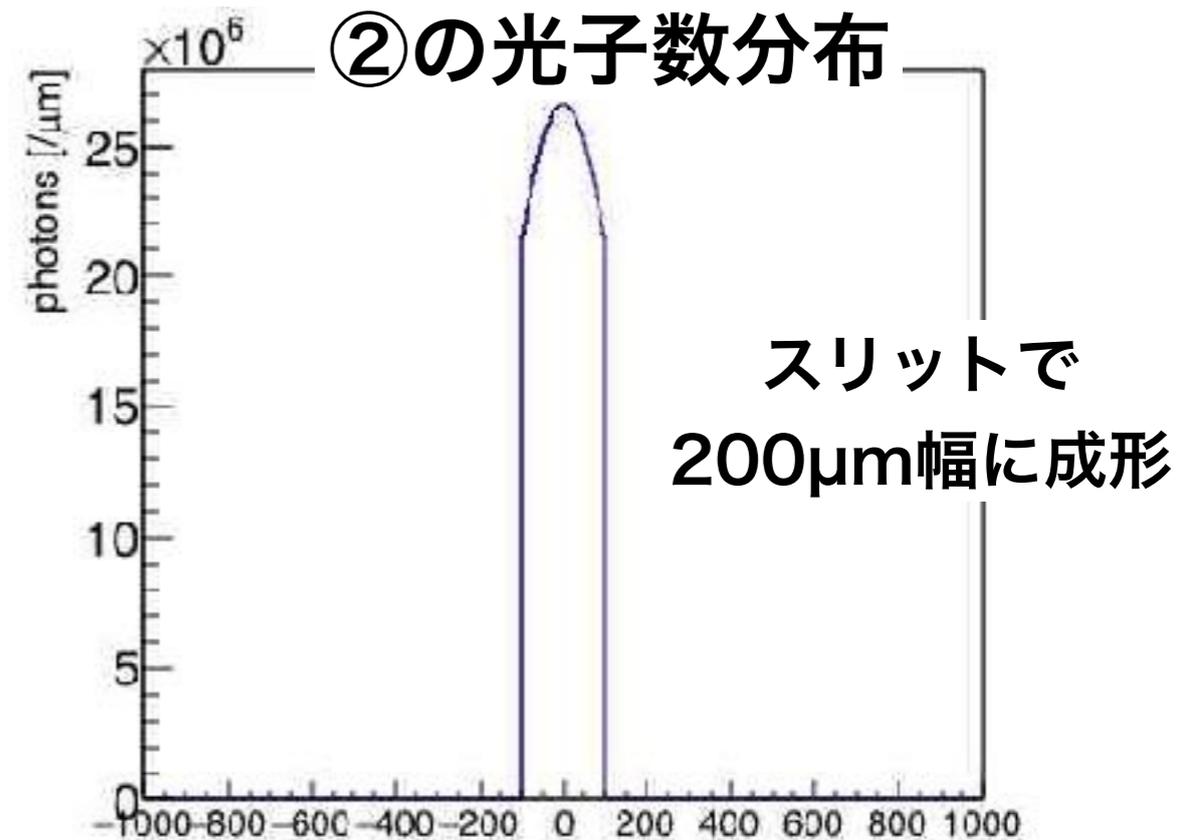
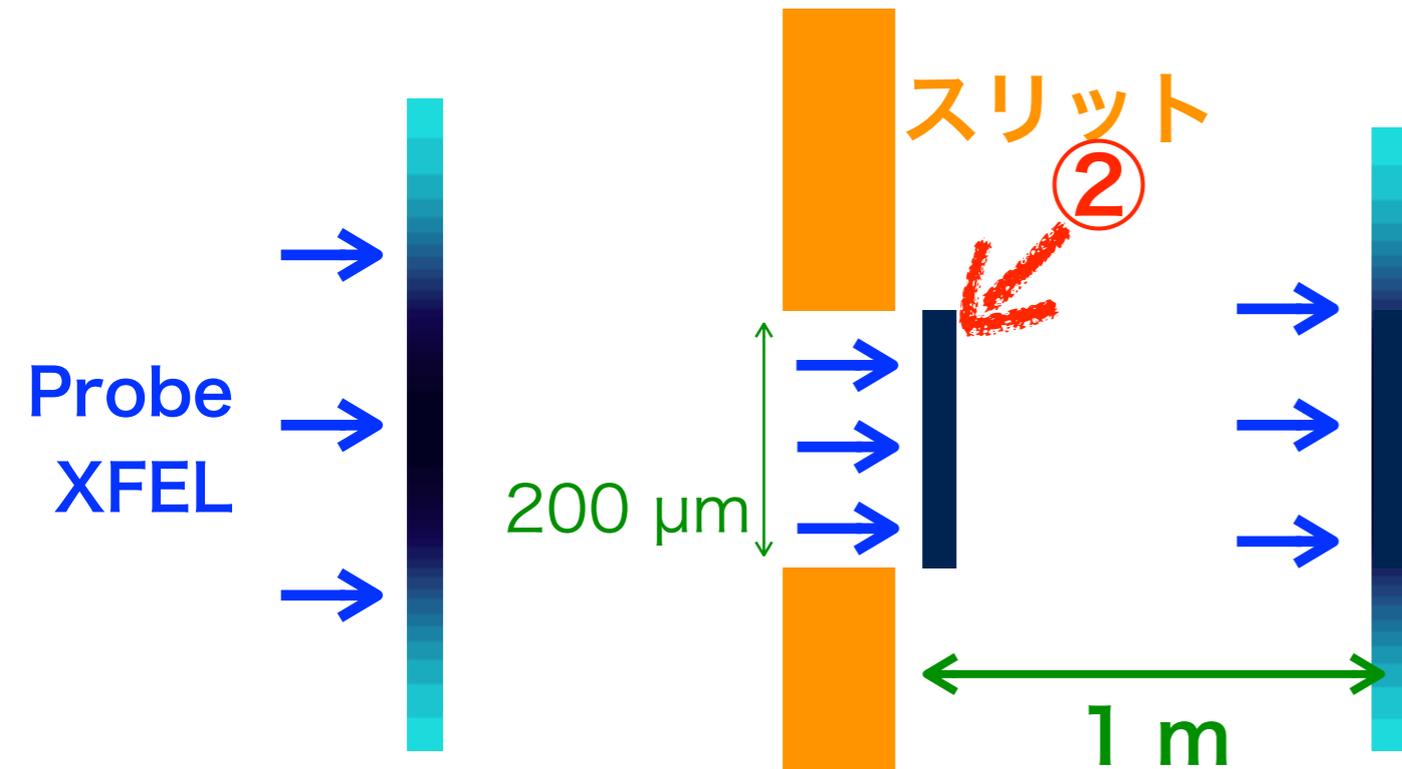
Probe XFELのシミュレーション



Probe XFELのシミュレーション

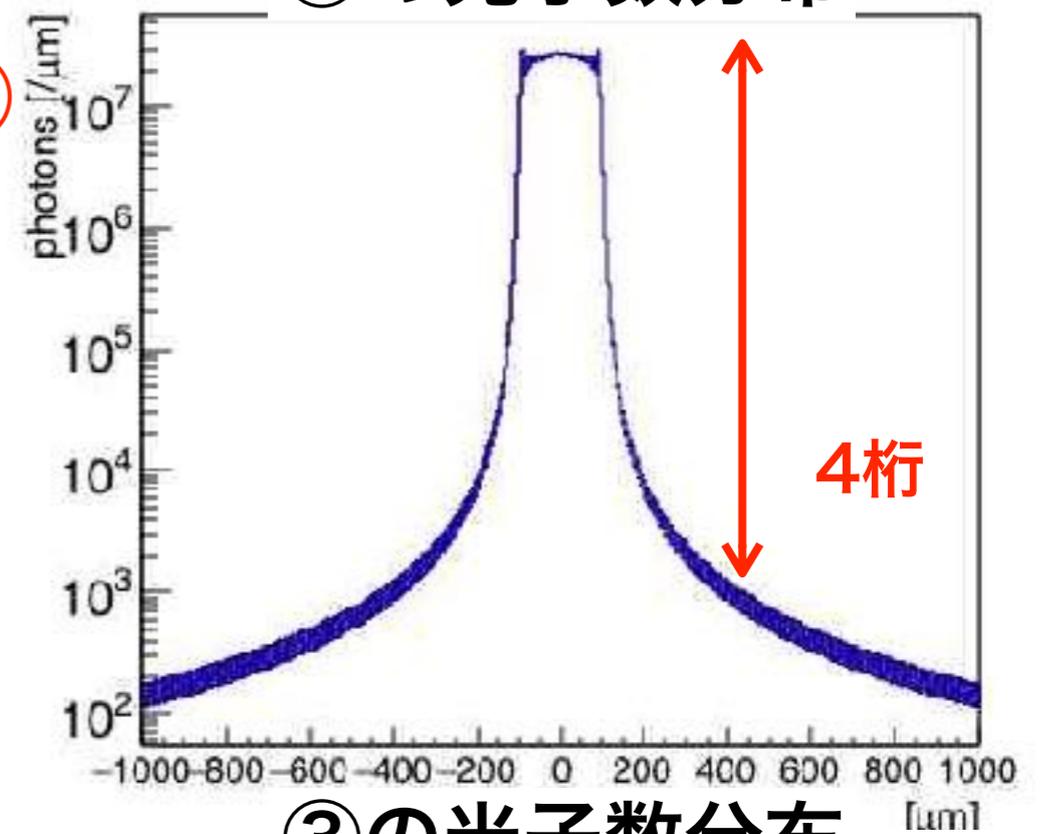


Probe XFELのシミュレーション

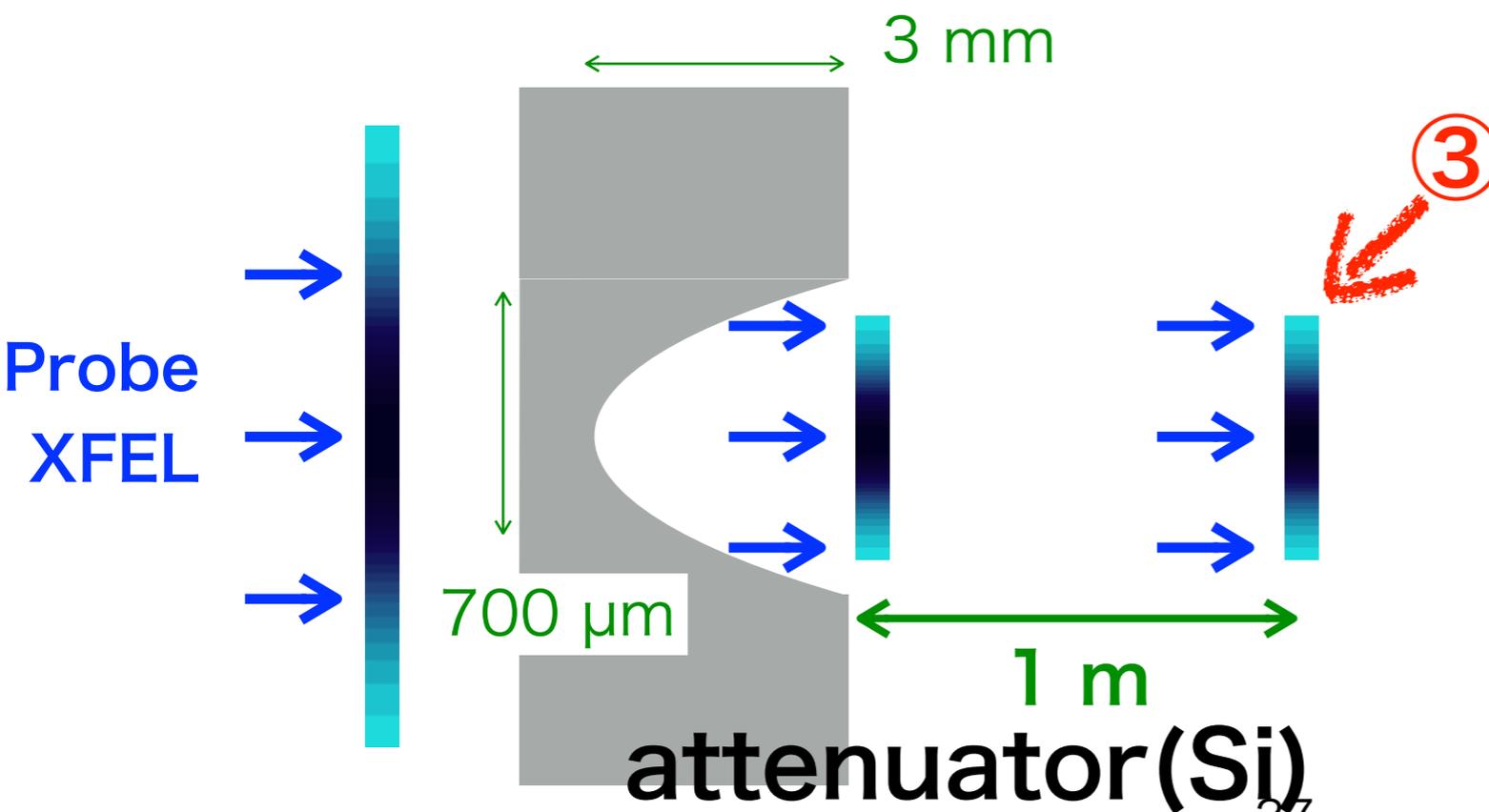
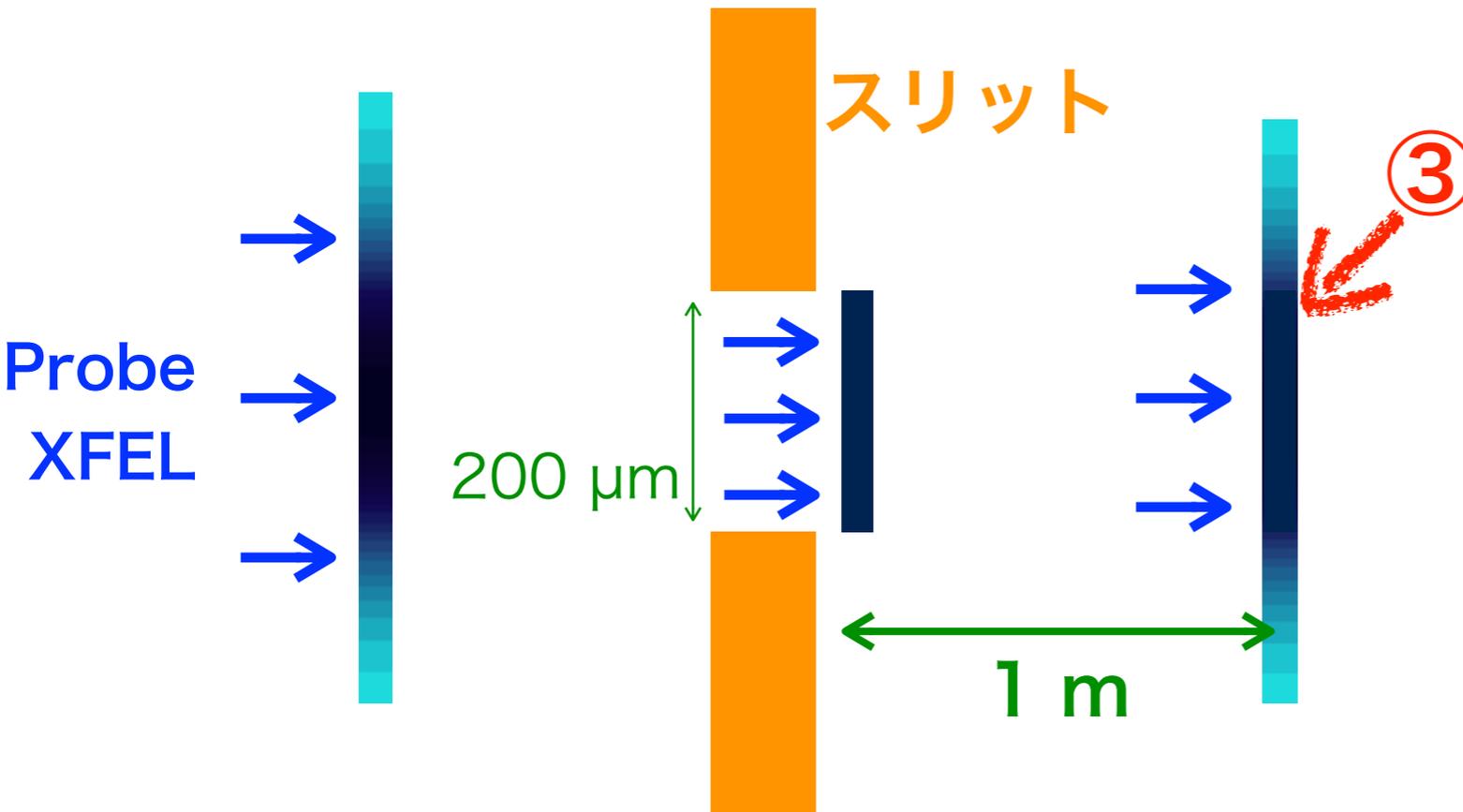
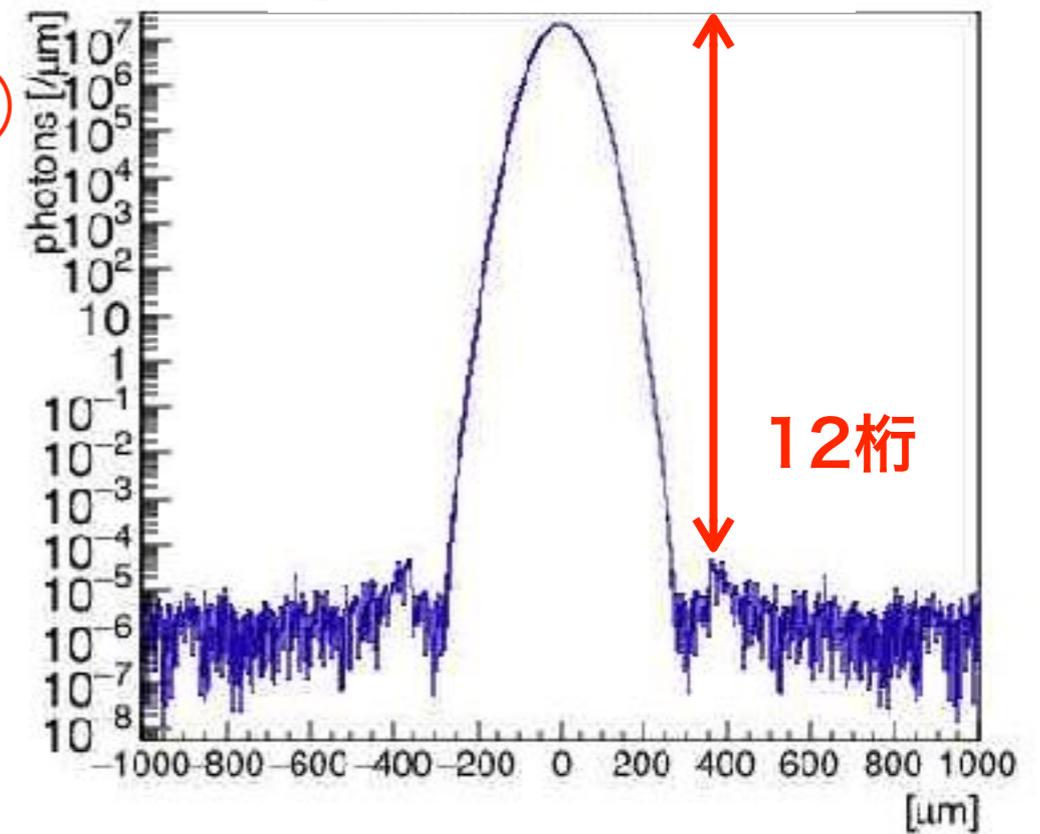


Probe XFELのシミュレーション

③の光子数分布

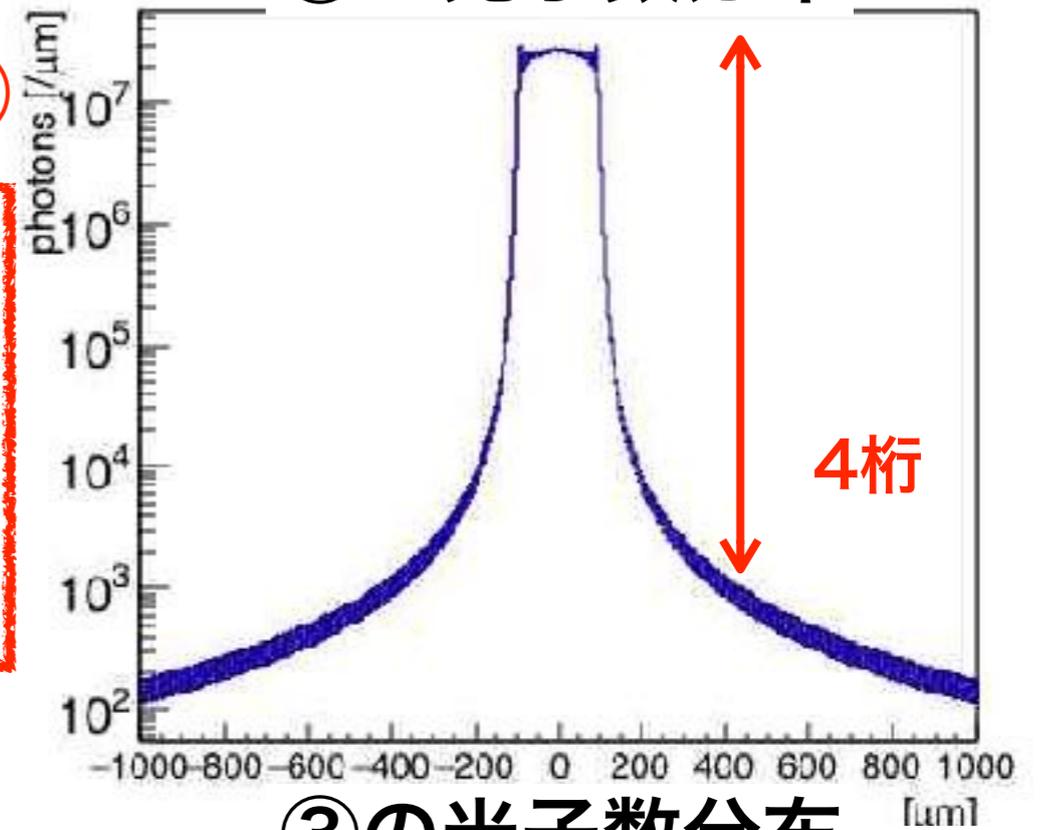


③の光子数分布

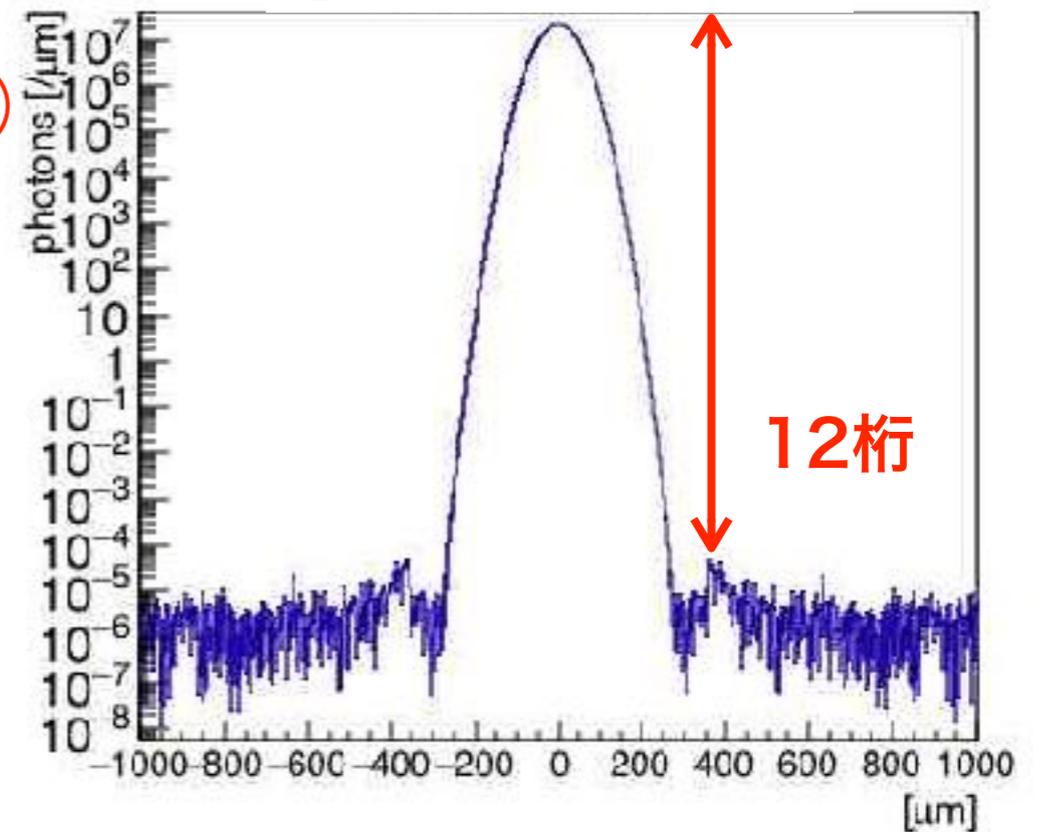


Probe XFELのシミュレーション

③の光子数分布



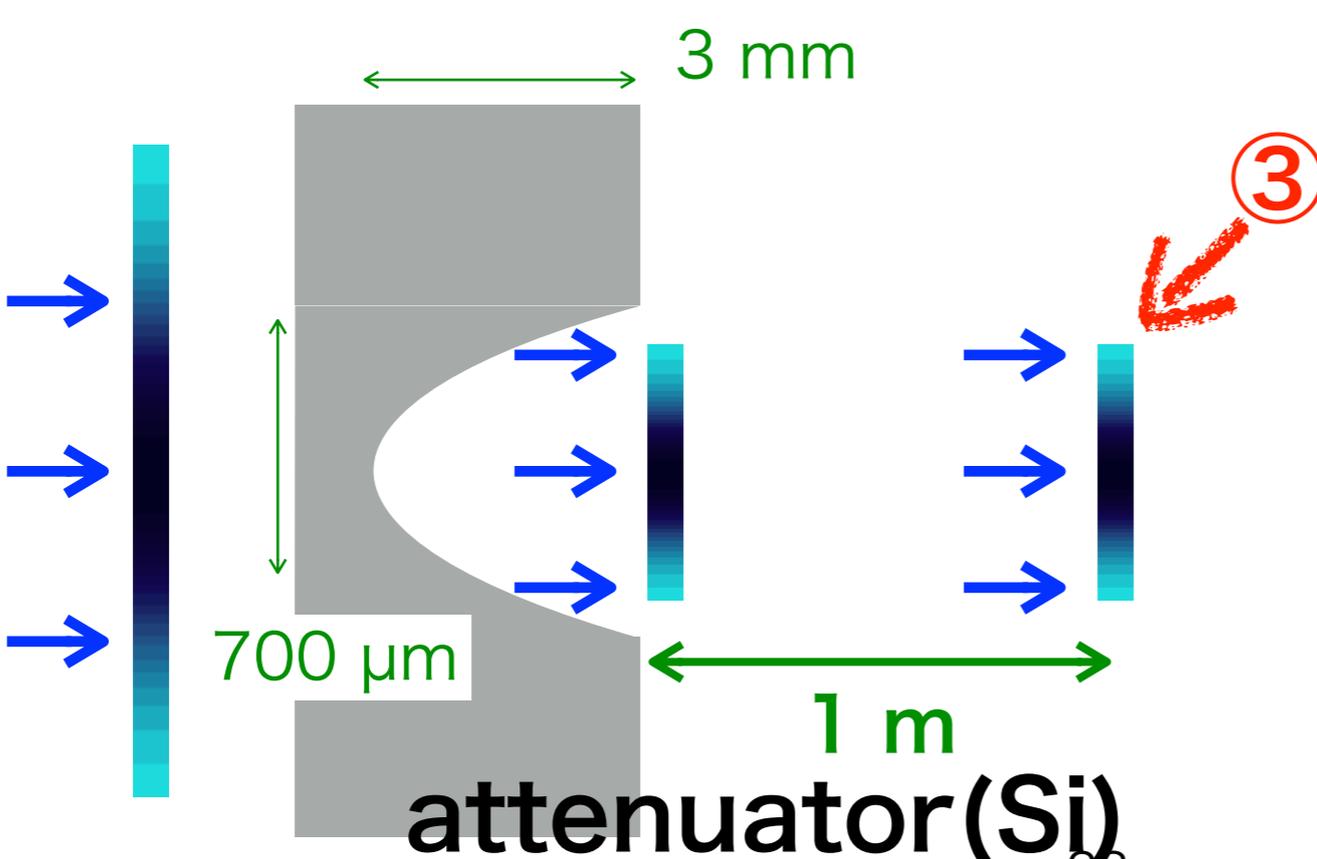
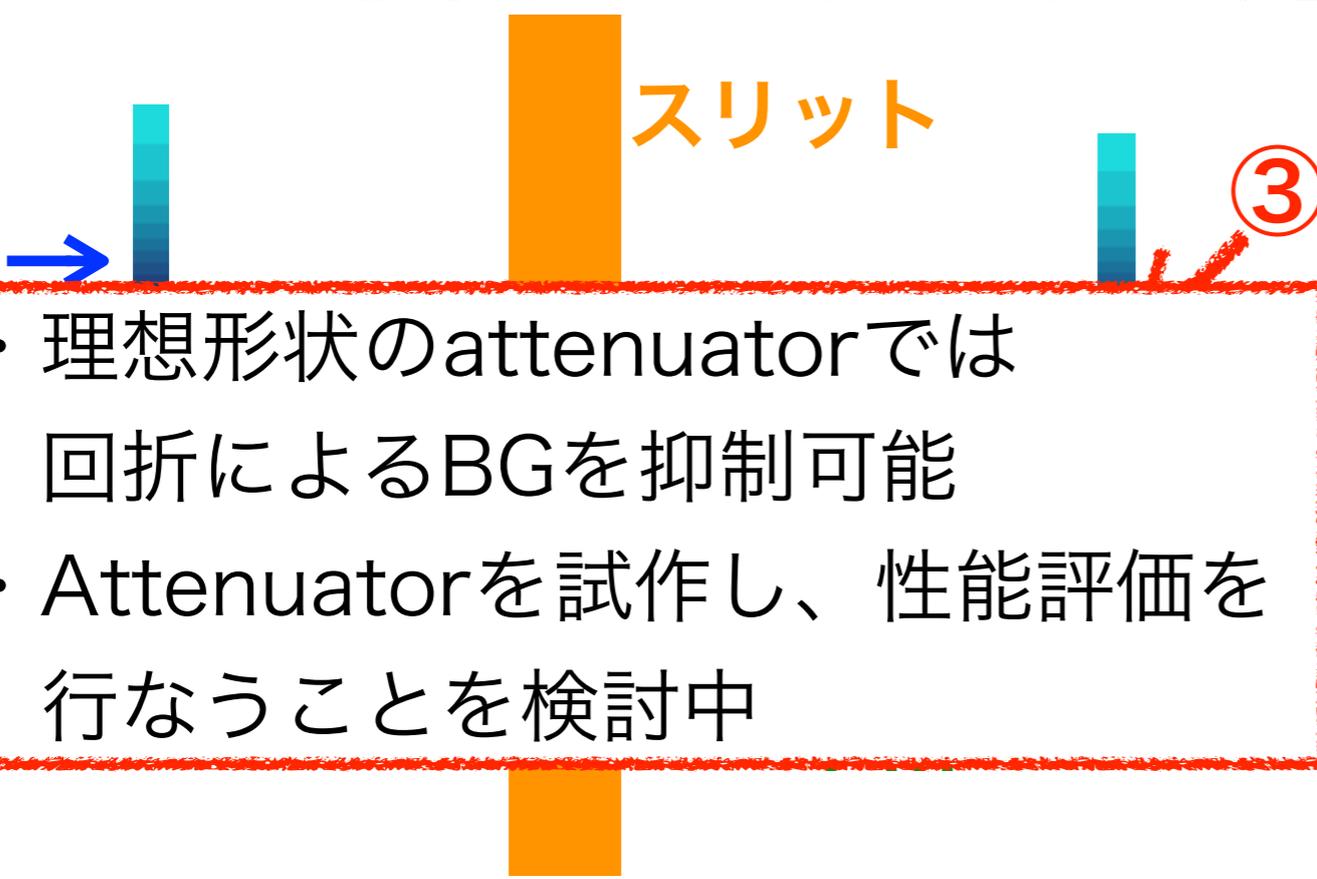
③の光子数分布



- 理想形状のattenuatorでは回折によるBGを抑制可能
- Attenuatorを試作し、性能評価を行なうことを検討中

Probe XFEL

Probe XFEL



今後の予定

今年度

- Attenuatorの試作、BG抑制率等の性能評価
- デフォーダブルミラーを用いたレーザーの集光
- 空間・時間のアライメント方法の向上

来年度以降

- 2.5 TWレーザー10 μm 集光での実験
 - 成功すると、真空回折を探索する初めての実験
- 500 TWレーザー1 μm 集光での実験
 - 感度はQED理論値に到達
 - 真空回折の初観測

まとめ

- 非一様な高強度電磁場中では、光が伝播する際に回折が起こる真空回折現象がQEDで予言されているが、未検証
- 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
- 現在、レーザーの集光サイズや空間アライメント精度、BG抑制率の確認のための予備測定を行っている
- 現在、probe XFELのスリットによる回折光がBGとなっており、これを抑えるための素子を作成中
- 来年度以降にSACLAの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