



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

2020/03/16

• 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

真空の屈折率変化と真空回折

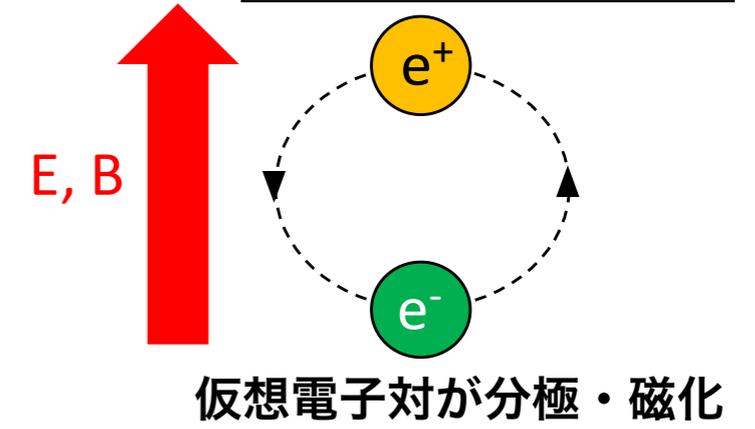
- 標準理論やそれを越えた物理の多くは真空の非線形効果により
高強度電磁場が真空の屈折率を変化させることを予言

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

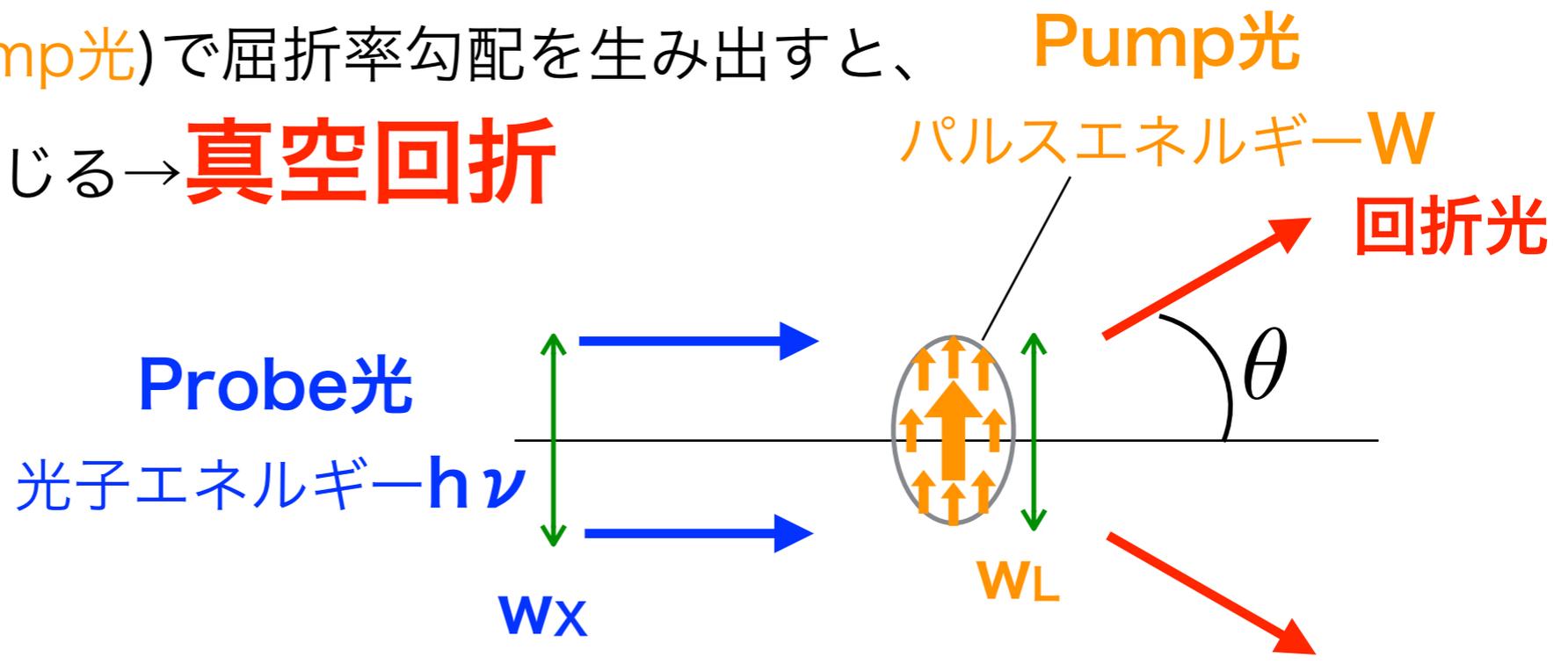
これを測りたい！

- 屈折率変化に寄与する未知粒子を探索することも可能

真空中(QED)



- 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

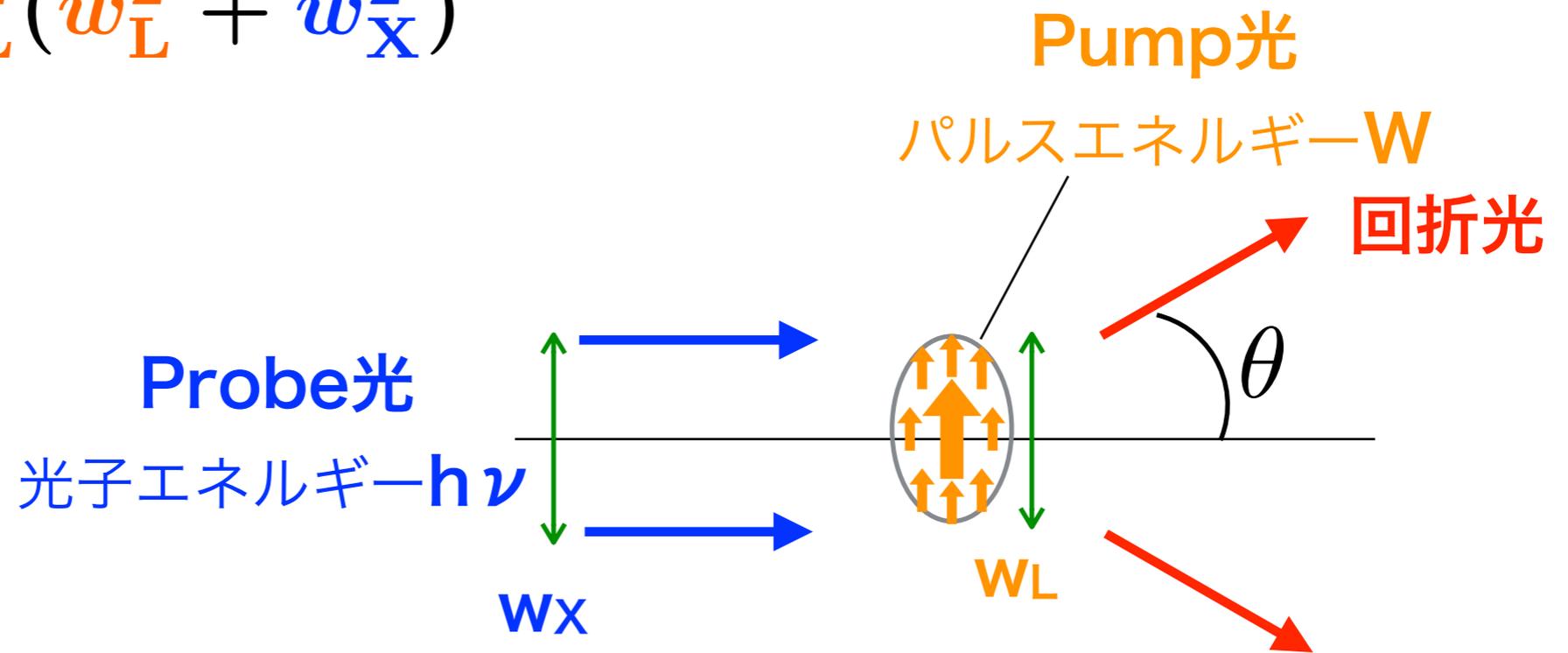


真空の屈折率変化と真空回折

- 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pump光**が必要

$$\theta \sim 70 \mu\text{rad} \times \left(\frac{1 \mu\text{m}}{w_L} \right) \left(\frac{8 \text{ keV}}{h\nu} \right)$$

実験感度 $\propto \frac{(h\nu)^2 W^2}{w_L^2 (w_L^2 + w_X^2)} \times (\text{probe光の分離率})$



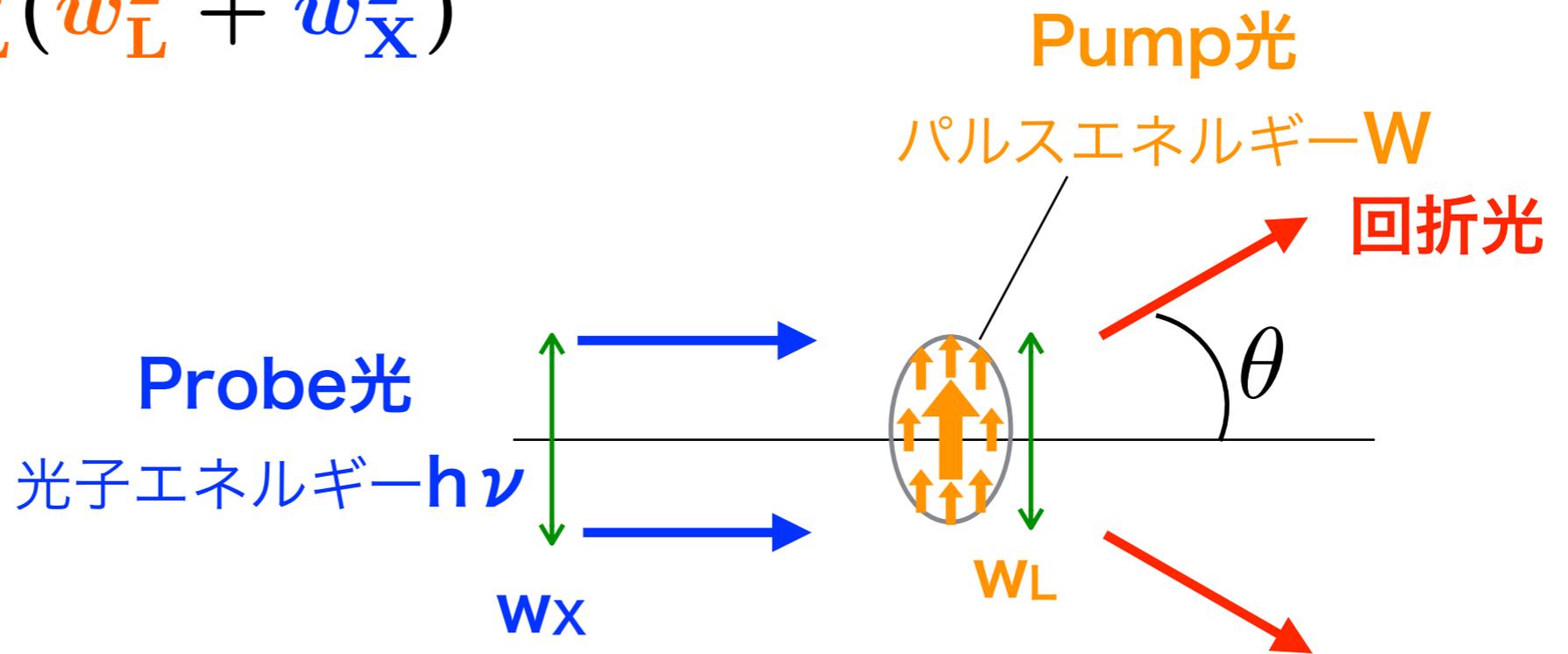
真空の屈折率変化と真空回折

- 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pump光**が必要

$$\theta \sim 70 \mu\text{rad} \times \left(\frac{1 \mu\text{m}}{w_L} \right) \left(\frac{8 \text{ keV}}{h\nu} \right)$$

高エネルギーprobe光 & 高強度pumpレーザーが最適

実験感度 $\propto \frac{(h\nu)^2 W^2}{w_L^2 (w_L^2 + w_X^2)} \times (\text{probe光の分離率})$



実験場所：XFEL施設SACLA

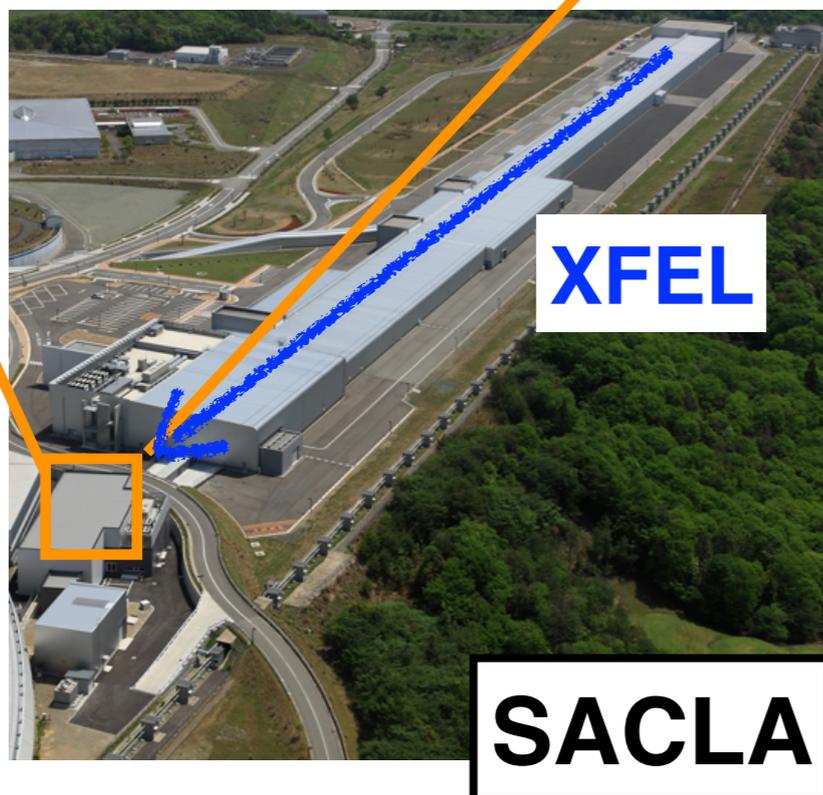
500 TWレーザー



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

- ・昨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



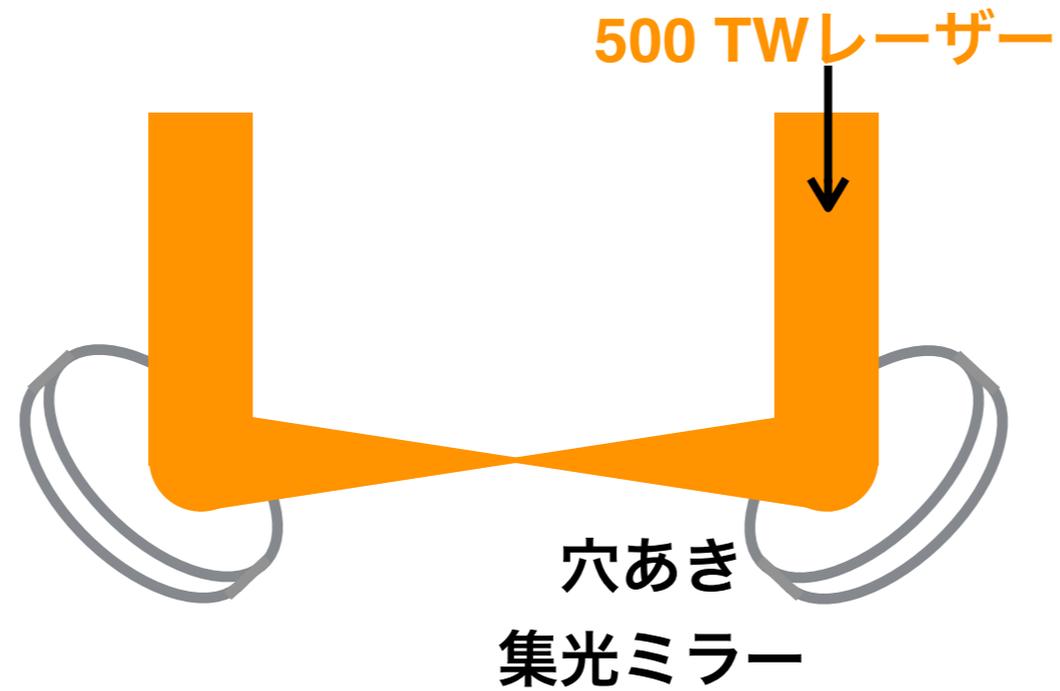
Probe光：SACLAのXFEL

(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

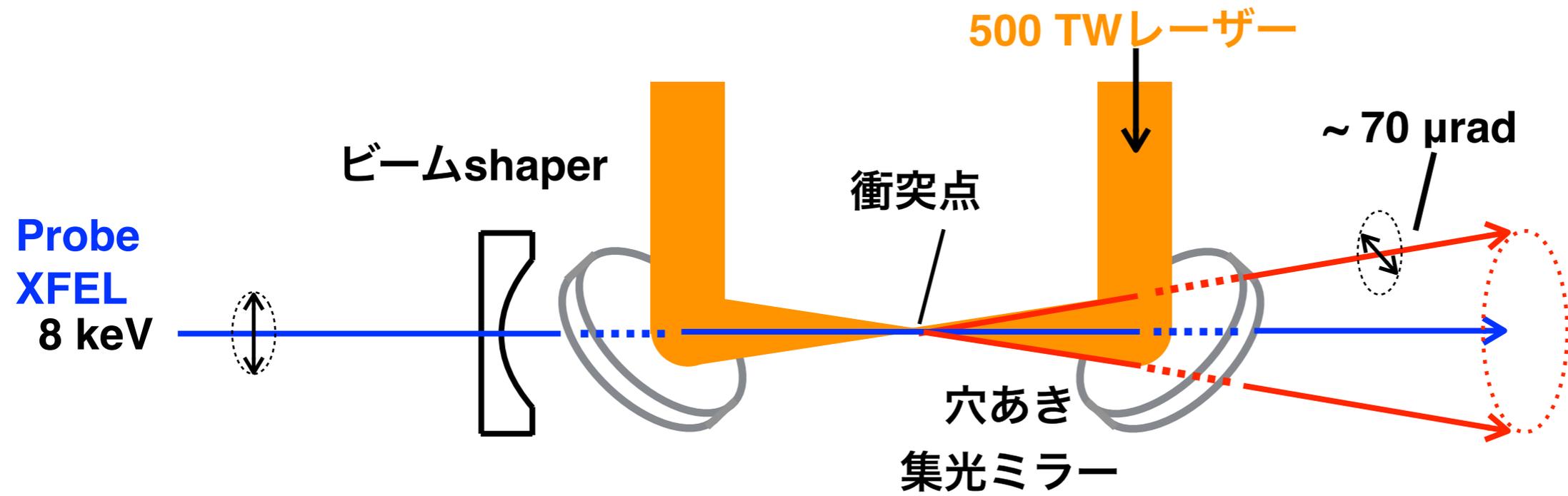
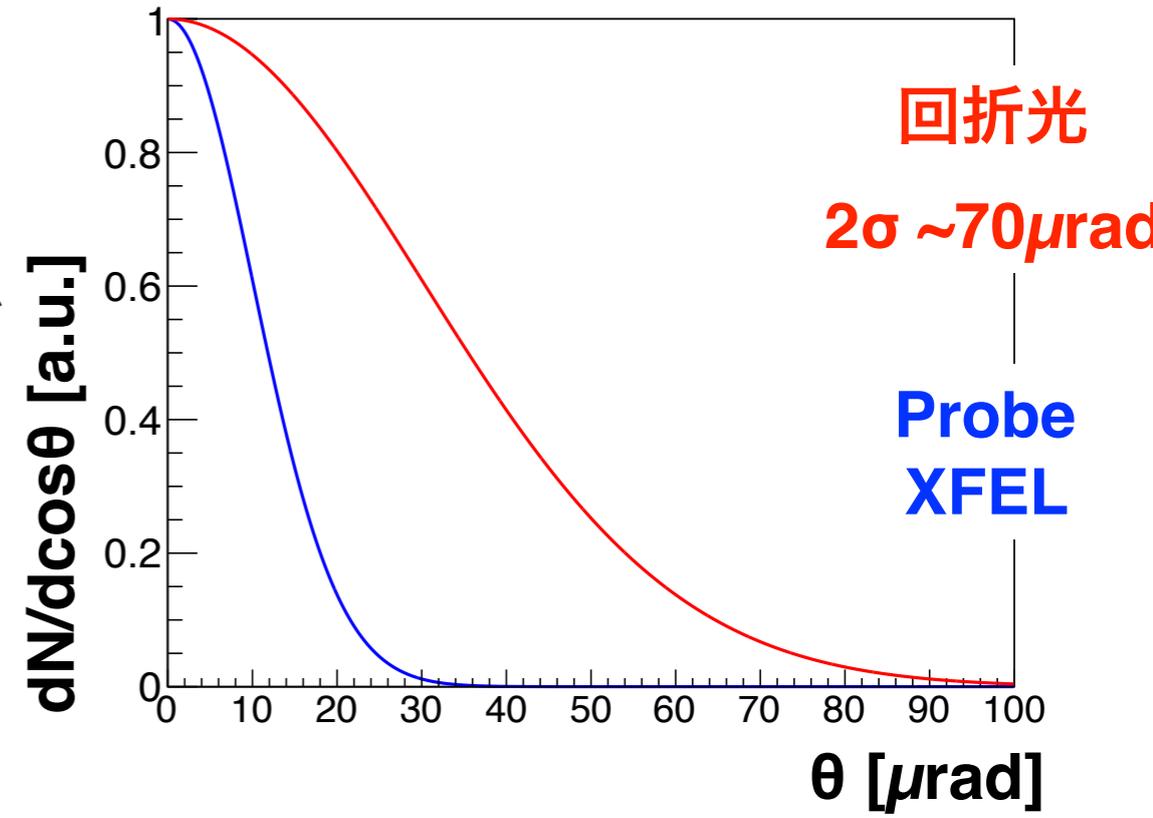
- 500 TWレーザーを1 μm に集光する



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： $\sim 10^{-12}$ 角度発散： $\sim 70 \mu\text{rad}$

角度発散分布



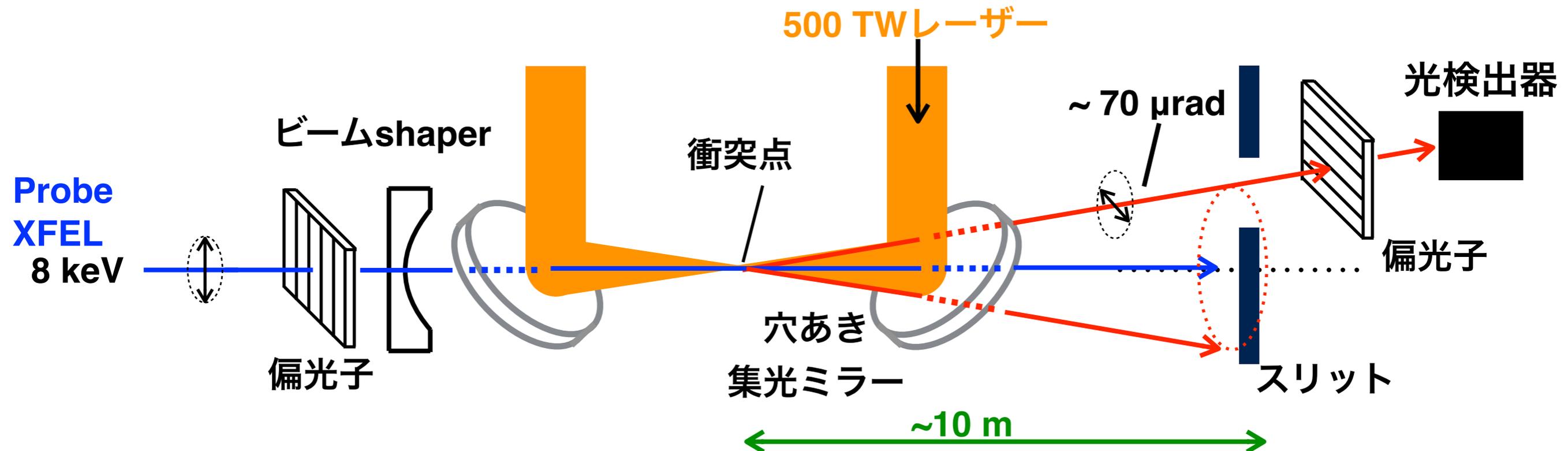
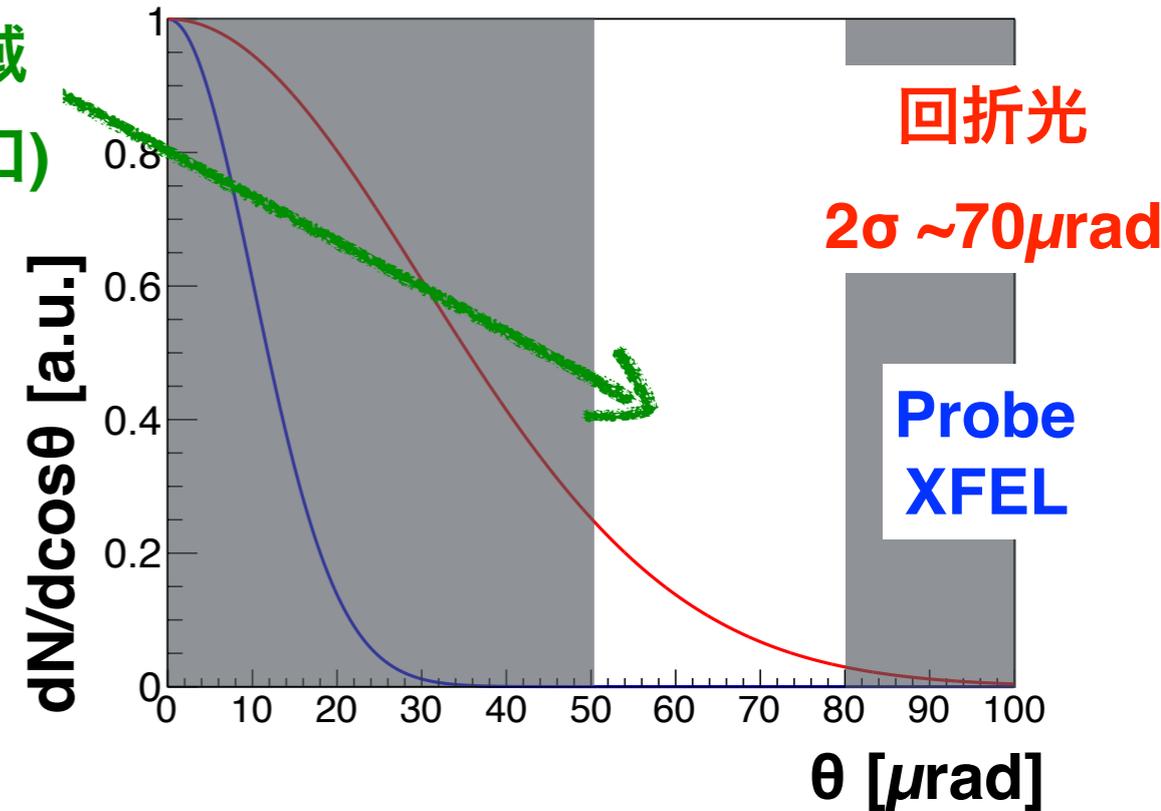
実験セットアップ

- 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)



2nd 真空回折実験

- **これまで(前回までのJPSでの報告内容)**

- 2017/12にSACLAでプロトタイプ実験(1st 実験)を行い、
世界初の真空回折実験を実現 & QED理論値の 4×10^{34} 倍に制限
- 感度向上には、以下の2つが必要だった

- ①シグナル増強

- 補償光学システムを導入し、レーザーを集光

- ②BGのさらなる抑制

- 低角度発散のProbe XFELが必要

- X線ビームshaperを開発

- **2nd 実験**

2019/06に、①,②を実現して感度を向上させた、第二弾の実験を行った
このトークでは、その概要を紹介します

2nd 実験セットアップ(2019/06)

2nd実験

- 期間 : 2019/06 96時間
- レーザー : 0.6 TW fs laser
- XFEL : BL3 8.4 keV

39~59 μ radの
回折角のシグナルを
切り出して測定

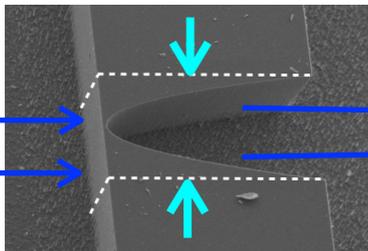
EH1

EH2

衝突点
(XFEL 13 μ m)

EH4

shaper



XFEL 700 μ m

コンプレッサー

スリット

レーザー

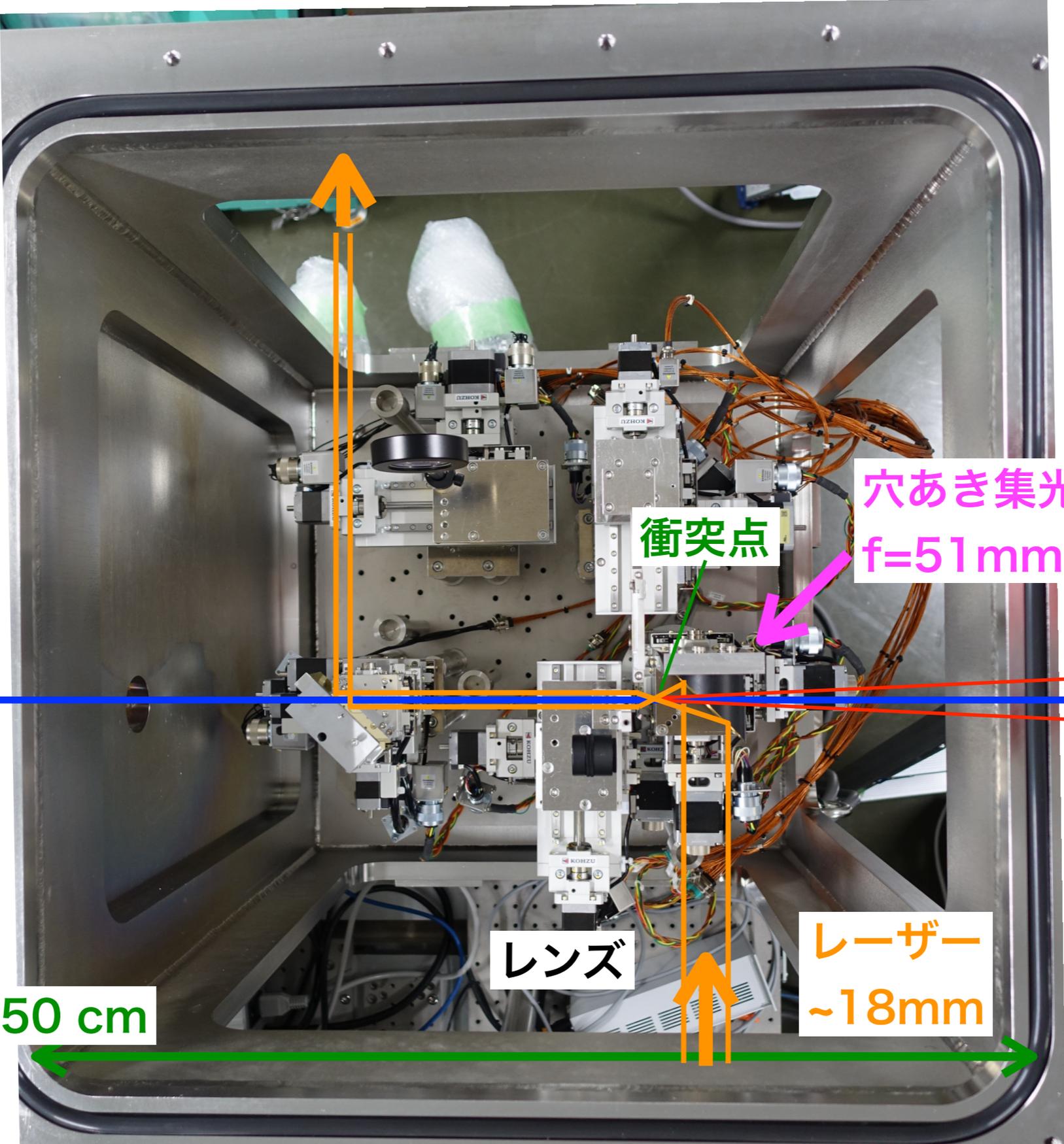
PD

スリット

5 m

10 m

衝突チャンバ写真



XFEL

※本測定時は
レンズを退避

50 cm

衝突点

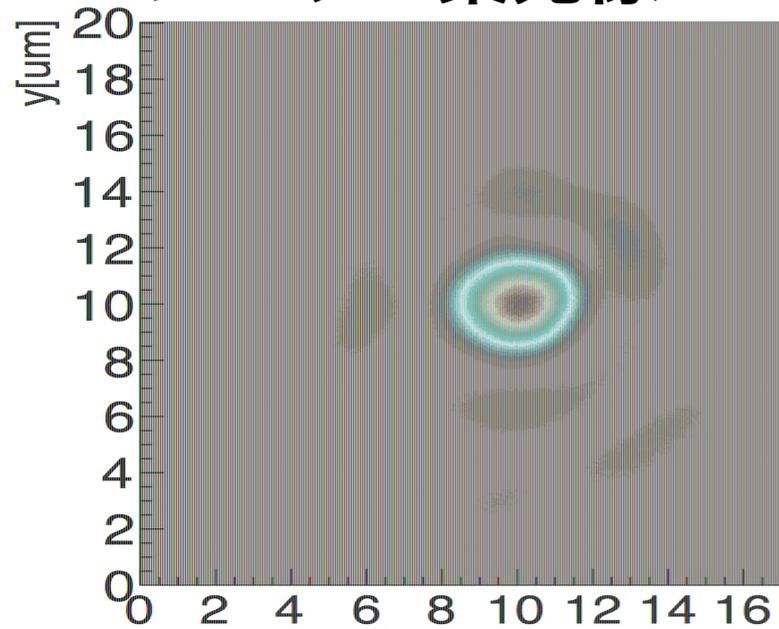
穴あき集光鏡
f=51mm

レンズ

レーザー
~18mm

レーザー & XFEL サイズ

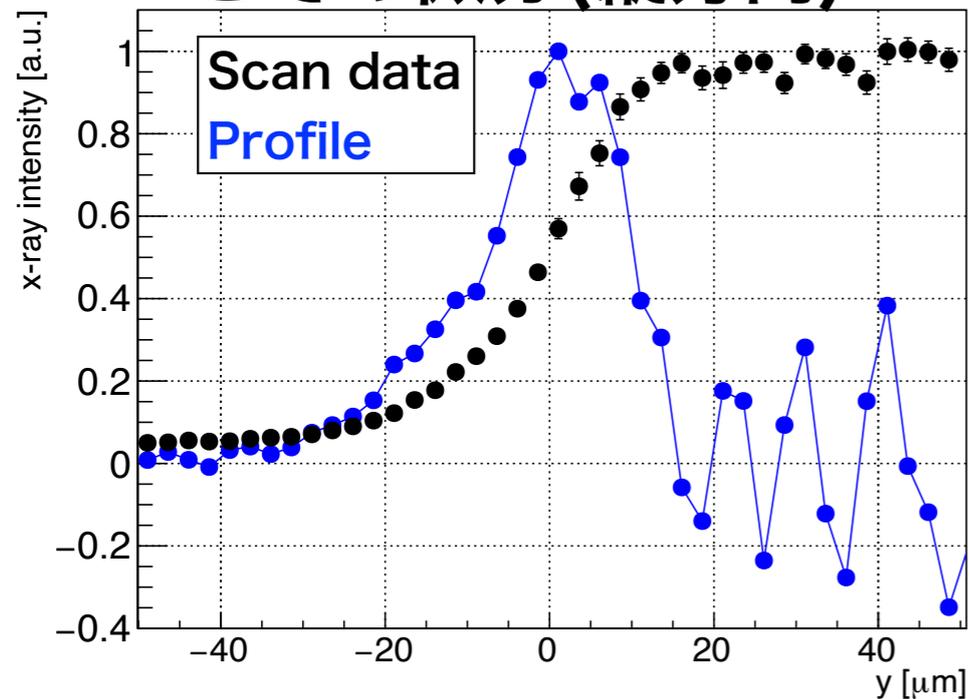
レーザー集光像



- レーザー集光サイズ (2Dgaus fit)
2σ 縦 : **2.0±0.2 μm**
横 : **1.9±0.2 μm**

XFELのワイヤースキャン結果

とその微分(縦方向)



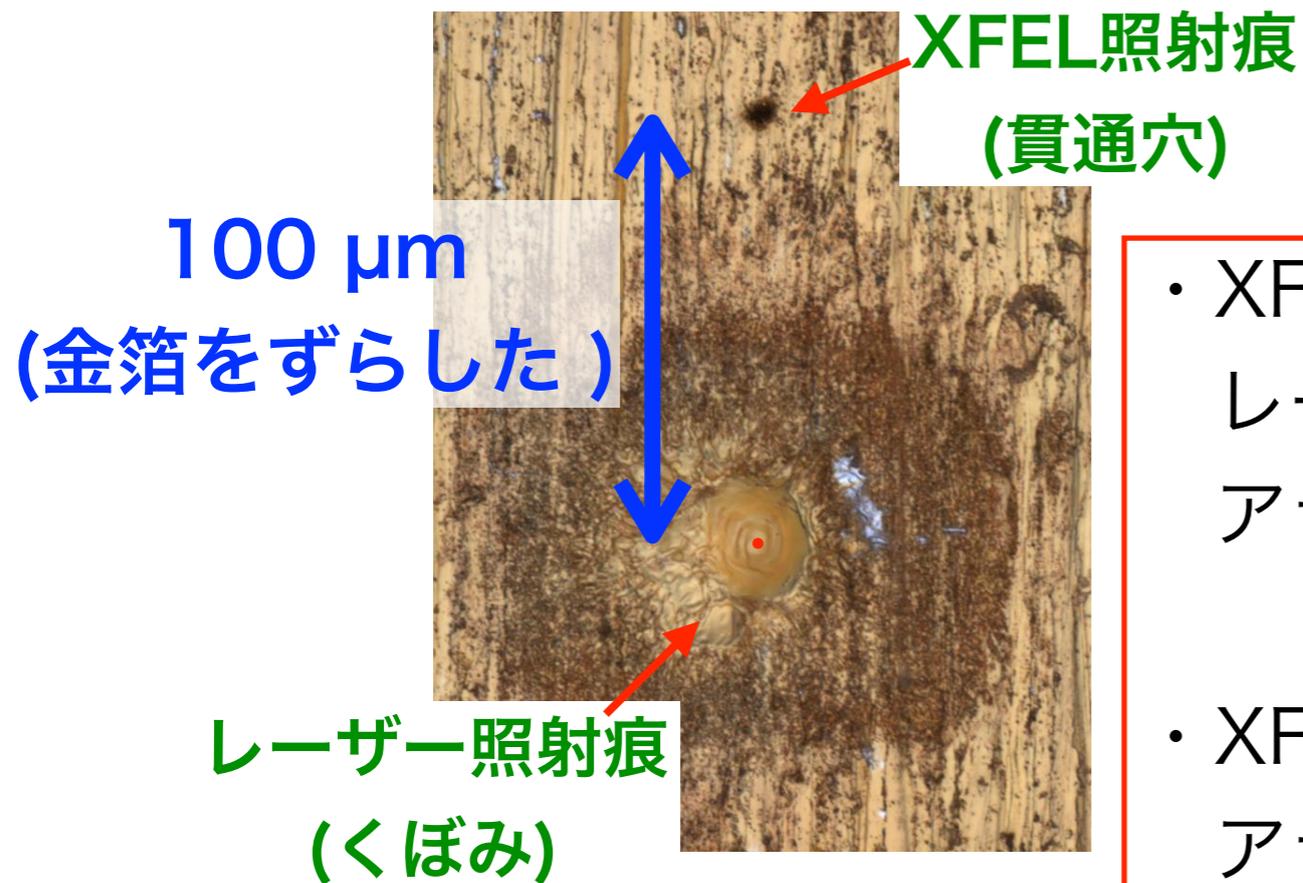
- 衝突点でのXFELサイズ (FWHMを評価)
2σ 縦 : **13±3 μm**
横 : **19±3 μm**

重要なのは、両パルスがちゃんとぶつかっているか(次ページ以降)

空間アライメント

- 衝突点位置に金箔(20 μm)をセットし、XFELとレーザーで照射痕を作る。両者の相対位置を測定・比較し、レーザー位置を調整することで空間アライメントを行った。

衝突点にセットした 金箔写真

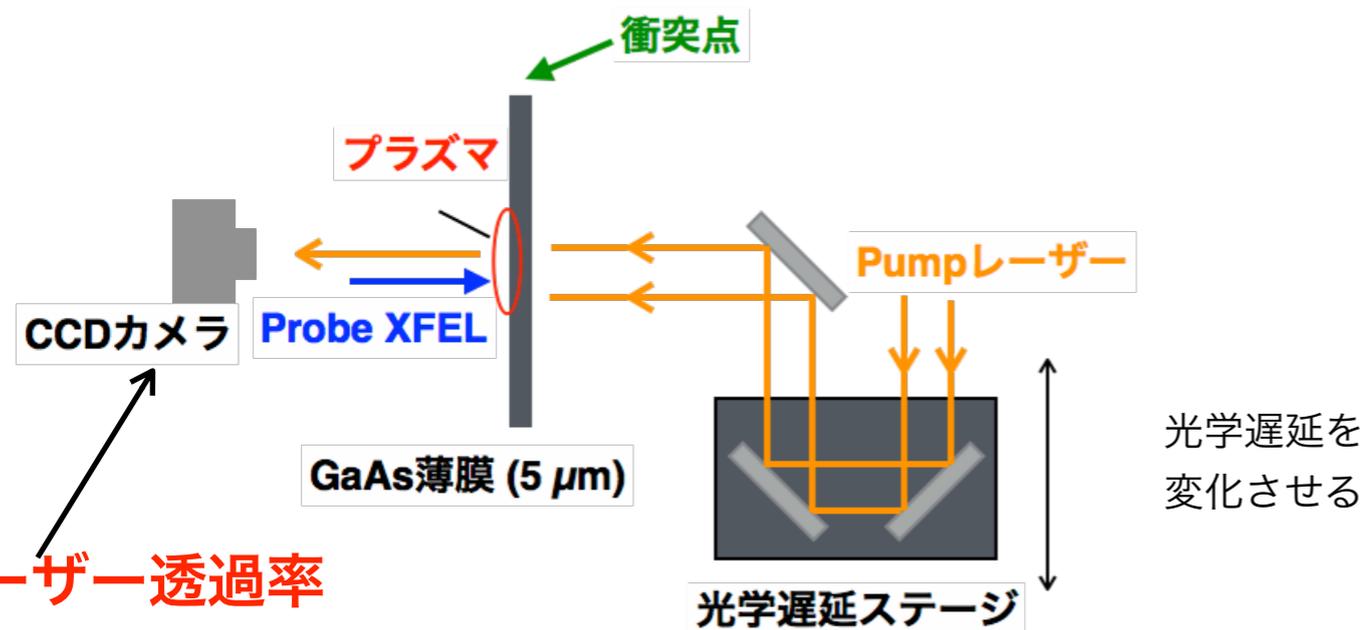


- XFEL照射痕とレーザー照射痕の位置をレーザー顕微鏡で測定し比較したところ、アライメント精度は $\sim 3\mu\text{m}$ (詳細解析中)
- XFELサイズ(13 μm)に対しアライメントの不定性3 μm は十分小さく、レーザーとXFELは空間的にぶつかっている

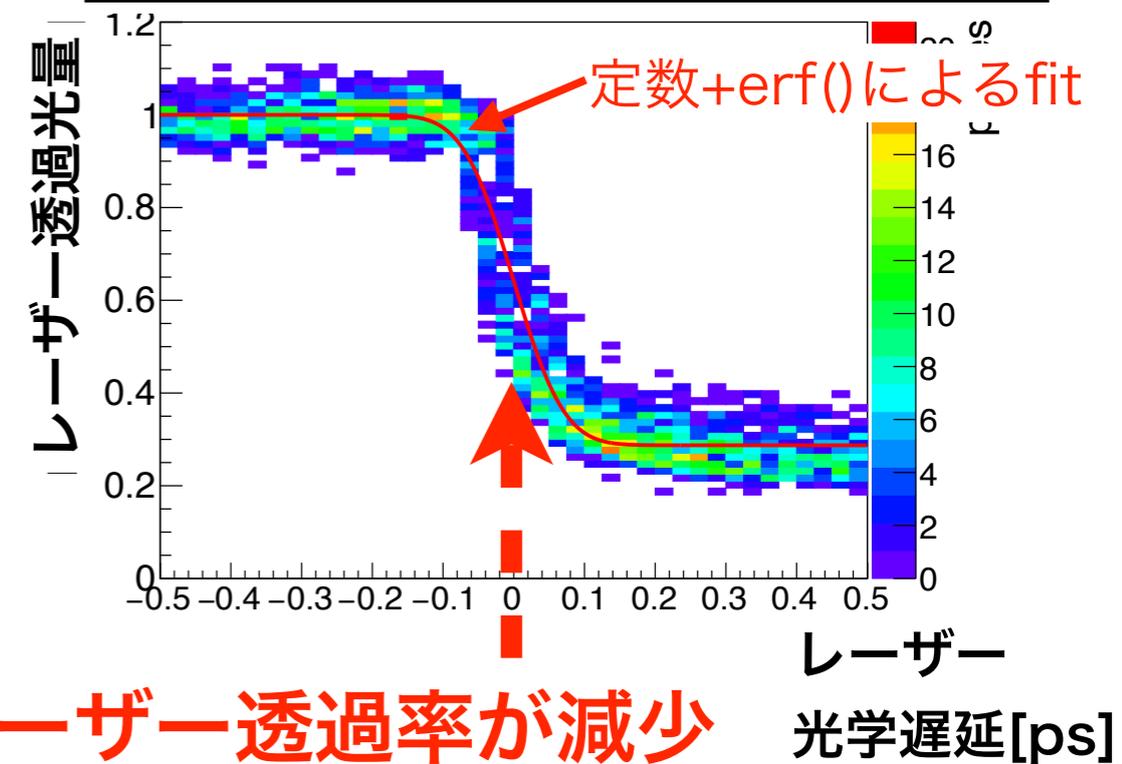
タイミングアライメント

- GaAs基板(5 μm)を用いたタイミングアライメントを行った。
- レーザータイミングを調整しながら、レーザーとXFELをGaAs基板に照射すると、同タイミングで照射されたときレーザー透過率が下がる

タイミングアライメントのセットアップ



レーザー透過光量測定結果



レーザー透過率が減少

⇒XFELとレーザーが同時に照射

- XFELとレーザーが同時に照射されたタイミングを測定できた
- 右図の同時照射のタイミングにきちんとアライメント出来たので、真空回折測定を行った

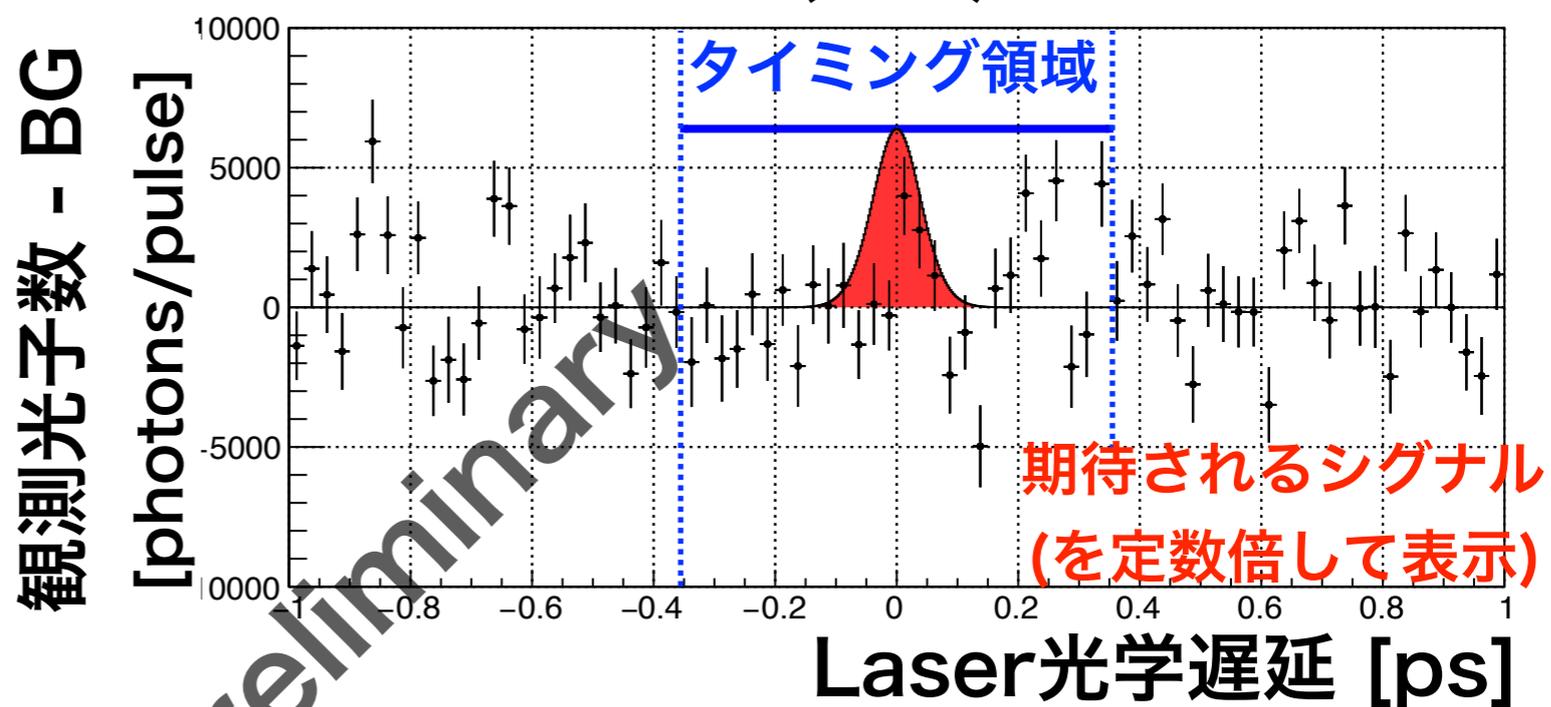
シグナル測定

- ・シグナル測定を行った
 - レーザーOn/Off(BG)を15 Hz
 - レーザー照射タイミングでスキャン

- ・観測光子数 - BG が下図
有意なシグナルはなさそう

詳細な解析結果は次回の学会でご報告します！

観測光子数(-BG)の時間分布



真空回折観測へ向けた今後

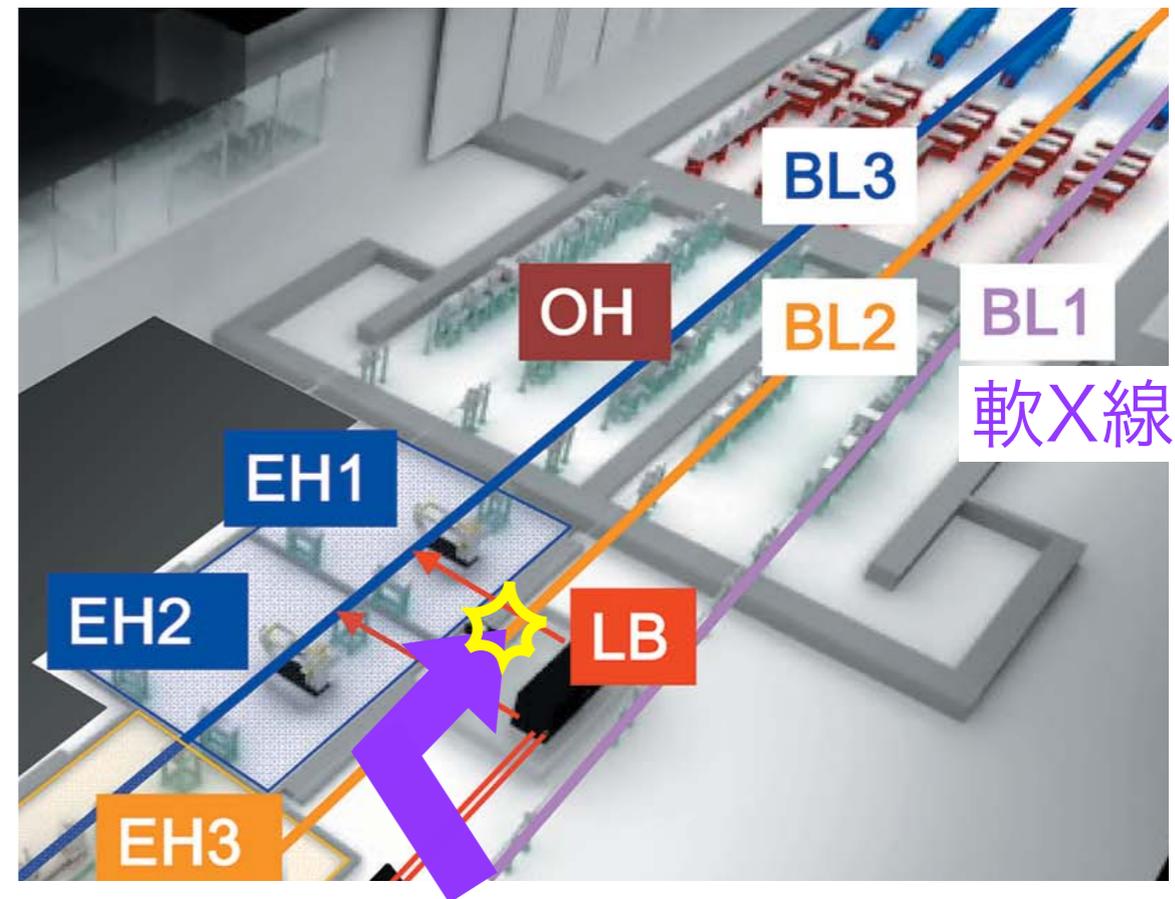
現在、2つの方法を検討中

方法1 (従来の作戦)

- BG抑制用の偏光子開発
偏光子(精度 $1e-9$)でS/Nを向上
- 500 TWレーザーでの実験
5日間の測定で真空回折の世界初観測

方法2

- SACLAにはX線ビームライン(BL2,3)の他に軟X線ビームライン(BL1)がある
これをポンプ光に用いて実験する
- 軟X線は波長が短く、100nmまで集光できる
→シグナルの角度発散が $O(1)$ mradに
(SACLAのシード化などのアップグレードが達成されれば)
3日で1 photon程度のシグナルが期待



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
- 1st実験をアップグレードした2nd実験を行った
詳細な結果は解析中
- 今後の課題は、偏光子開発と500TWレーザーを用いた実験
- 軟X線ビームラインをpump光に用いた真空回折実験も検討中