

X線自由電子レーザーを用いた真空構造の探索

難波俊雄

東京大学素粒子物理国際研究センター

今日の話に関係する人たち



東大理、
ICEPP

理研、JASRI
(SPRING-8、
SACLA)

大阪大工

浅井祥仁、山崎高幸、稲田
聡明、山道智博、清野結大

玉作賢治、田中義人(兵庫県
立大)、澤田桂、犬伏雄一、
矢橋牧名、藪内俊毅、富樫
格、井上伊知郎、大坂泰斗、
石川哲也

川合健太郎

今日のテーマ: 「真空」



真空に何かいる？



場の量子論によると、
「真空」 ≠ 「空っぽ」

真空中に潜んでいるモノ

- Higgs場（スカラー場が実際に満ちていることを証明！）
- インフラトン？
- 暗黒物質？（SUSY以外にもいろんな候補）
- 暗黒エネルギー??

真空中に潜んでいるモノ

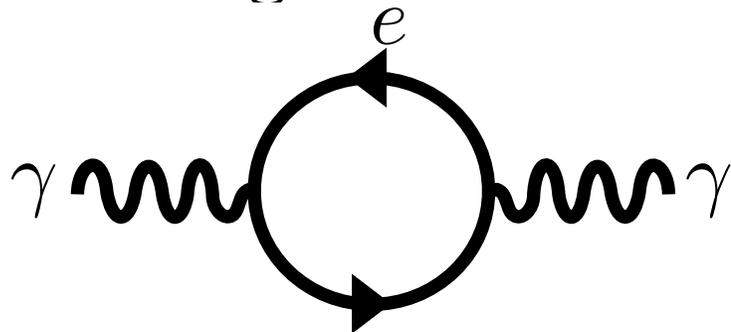
- Higgs場（スカラー場が実際に満ちていることを証明！）
- インフラトン？
- 暗黒物質？（SUSY以外にもいろんな候補）
- 暗黒エネルギー??

XFELで照らすと何かみえるかな？

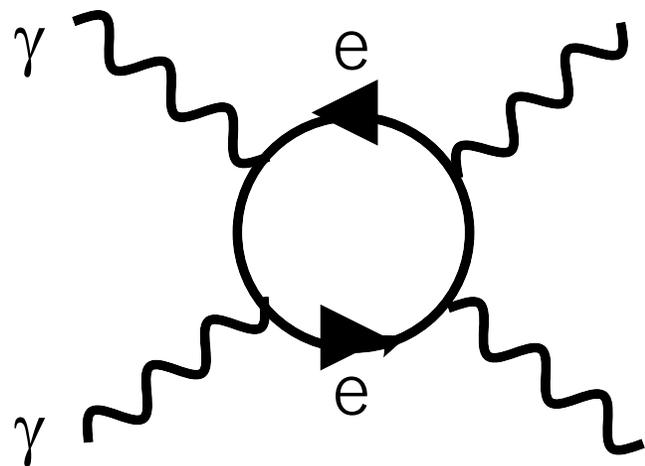


当面の目標(=確実に見えるもの): 量子電磁気学(QED)の真空

- 真空中では、常に仮想電子・陽電子ペアが生成と消滅
→ 極限ではSchwinger limit



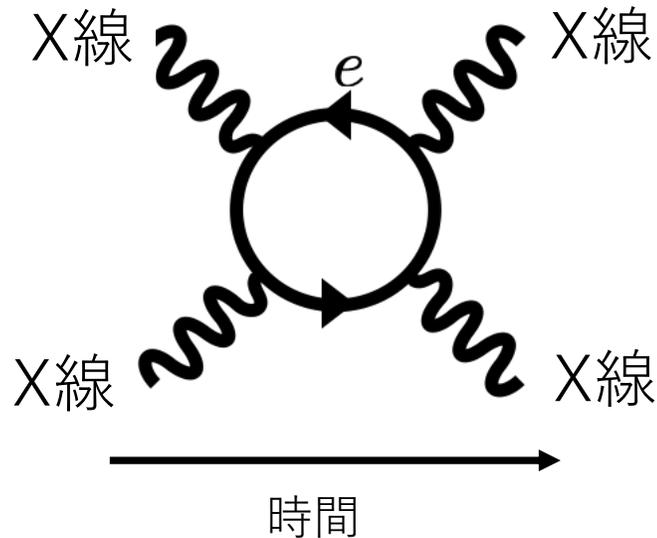
- 確率は非常に小さいが、電荷を持たない光子同士が仮想電子のループを介して散乱



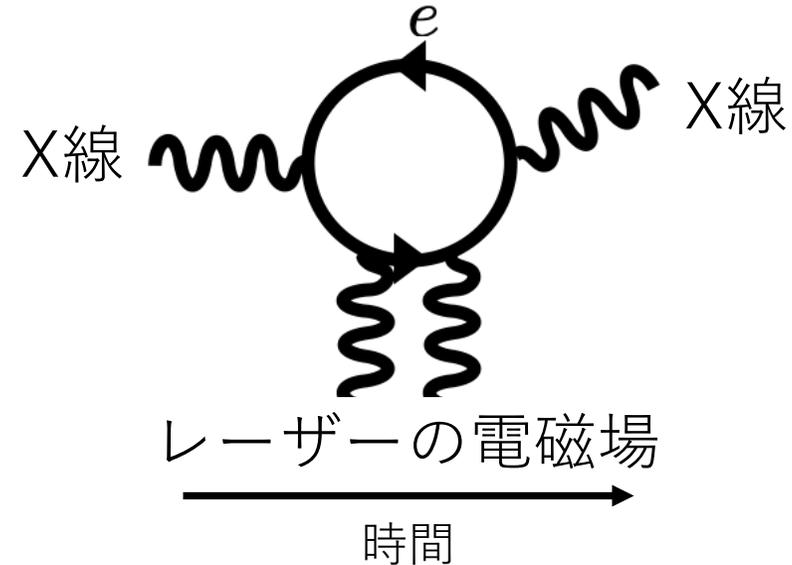
真空中で光が相互作用！

2つの手法でアプローチ

- X線とX線を衝突させて、真空の構造を見る
- 大強度レーザーで真空をポンプしてX線でプローブする



X線同士が、真空の非線形効果を介して弾性散乱

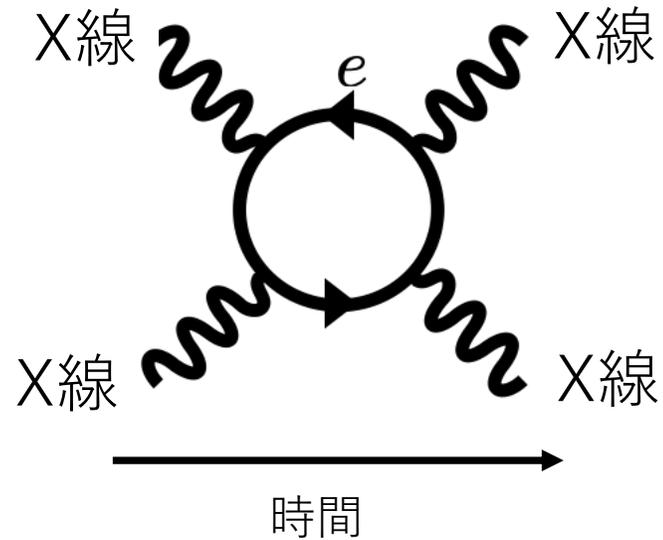


レーザーの電磁場が真空の非線形効果を生じてX線が回折

どちらも使用するX線の質が非常に重要

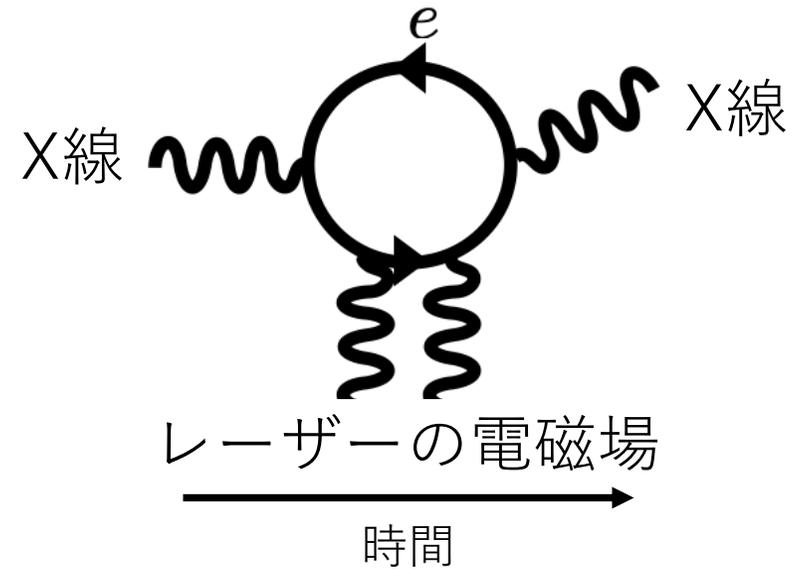
2つの手法でアプローチ

- X線とX線を衝突させて、真空の構造を見る



X線同士が、真空の非線形効果を介して弾性散乱

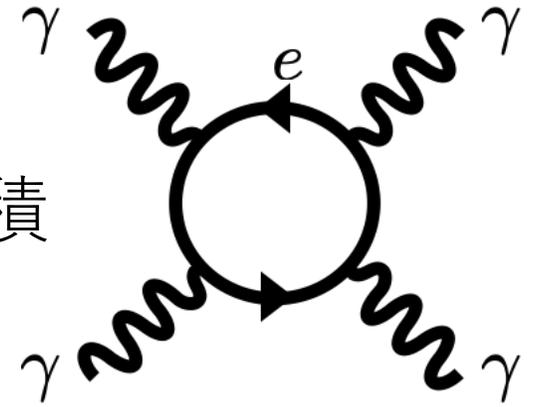
- 大強度レーザーで真空をポンプしてX線でプローブする



レーザーの電磁場が真空の非線形効果を生じてX線が回折

どちらも使用するX線の質が非常に重要

アプローチ1: X線同士を衝突させる



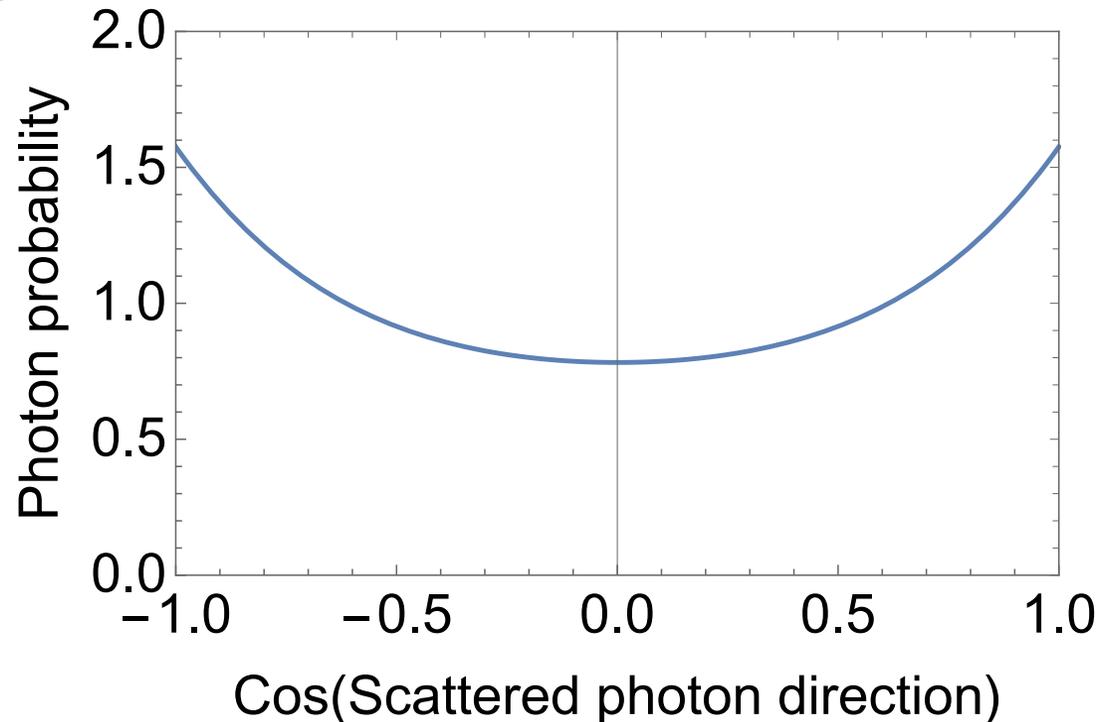
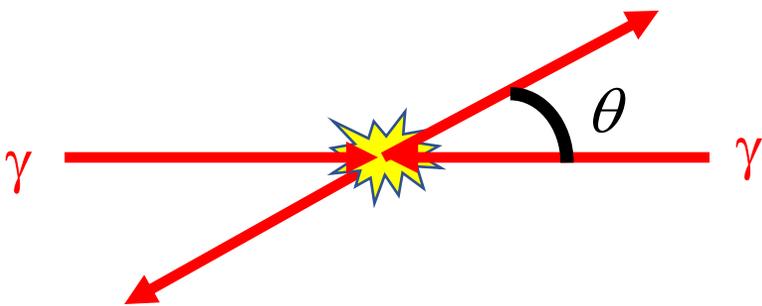
- 2本の光子(同一偏極)を衝突させた場合の全断面積

$$\sigma = 3.5 \times 10^{-70} (\omega/1[\text{eV}])^6 [\text{m}^2]$$

- 重心系での角度分布

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{linear, same}} = \frac{\alpha^4 \omega_{cm}^6}{(180\pi)^2 m_e^8} (260 \cos^4 \theta + 328 \cos^2 \theta + 580)$$

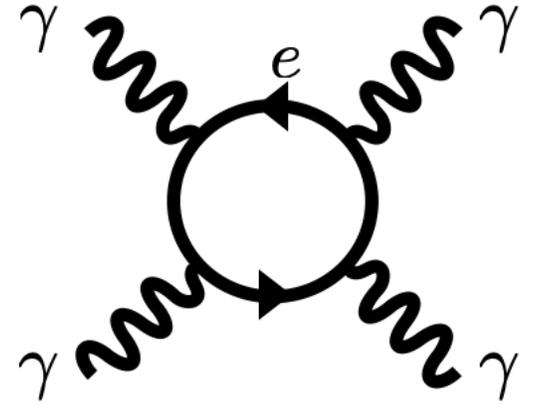
ほぼ一様に散乱



アプローチ1: X線同士を衝突させる

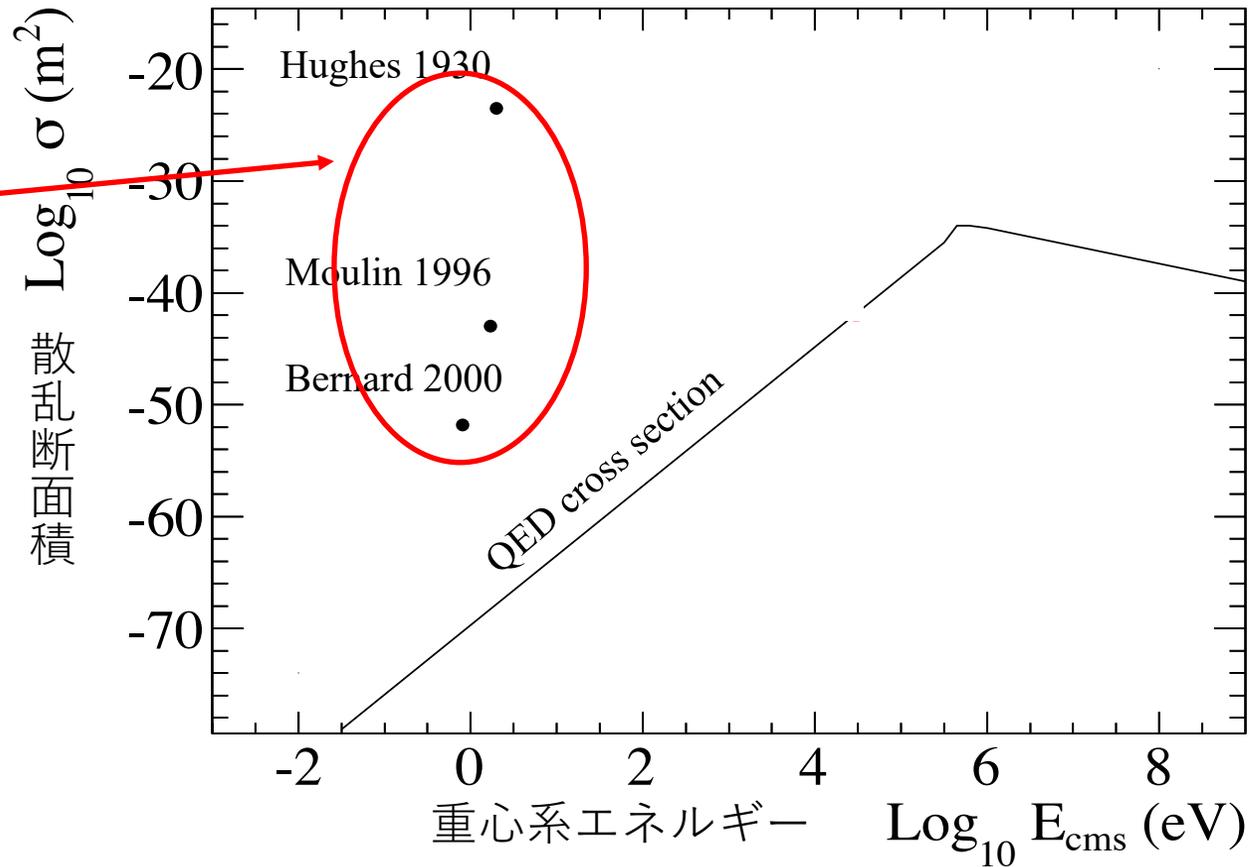
- 2本の光子(無偏極)を衝突させた場合の全断面積

$$\sigma = 7.3 \times 10^{-70} (\omega/1[\text{eV}])^6 [\text{m}^2]$$



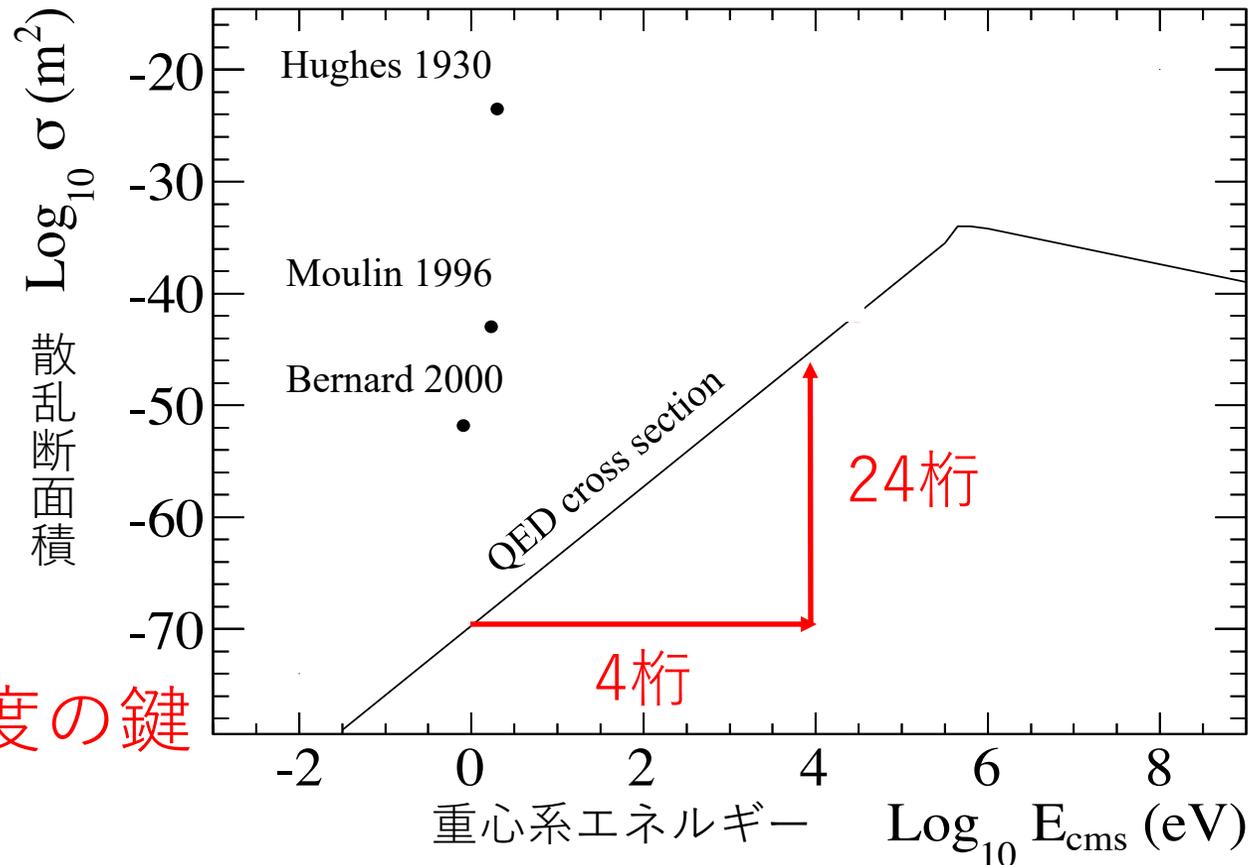
可視/赤外領域で実験

未発見現象



X線を利用する利点

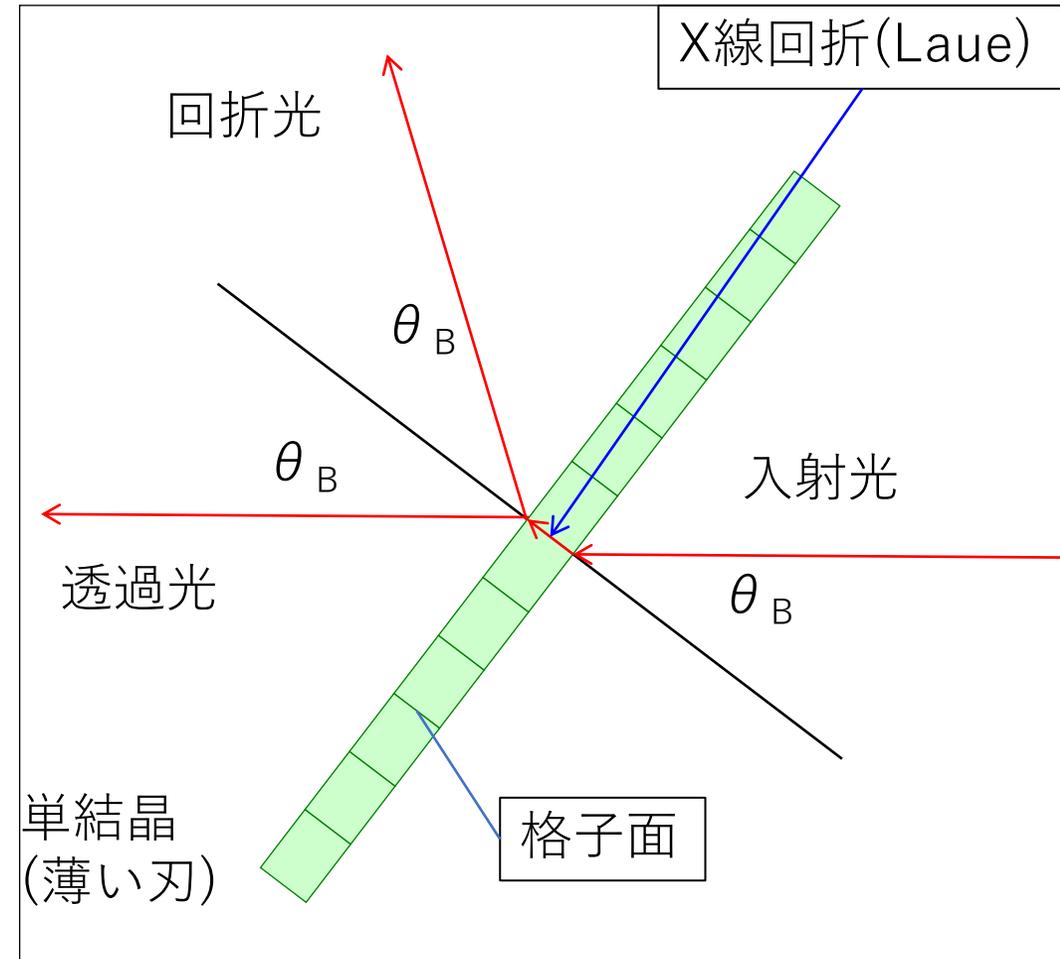
- 重心系エネルギーの6乗に比例
→10keVだと可視光(~eV)より24桁もお得！
- (原理的には)ナノメートルサイズまで集光可
- 未検証領域



エネルギーと瞬間強度が感度の鍵
→SACLA BL3 の利用

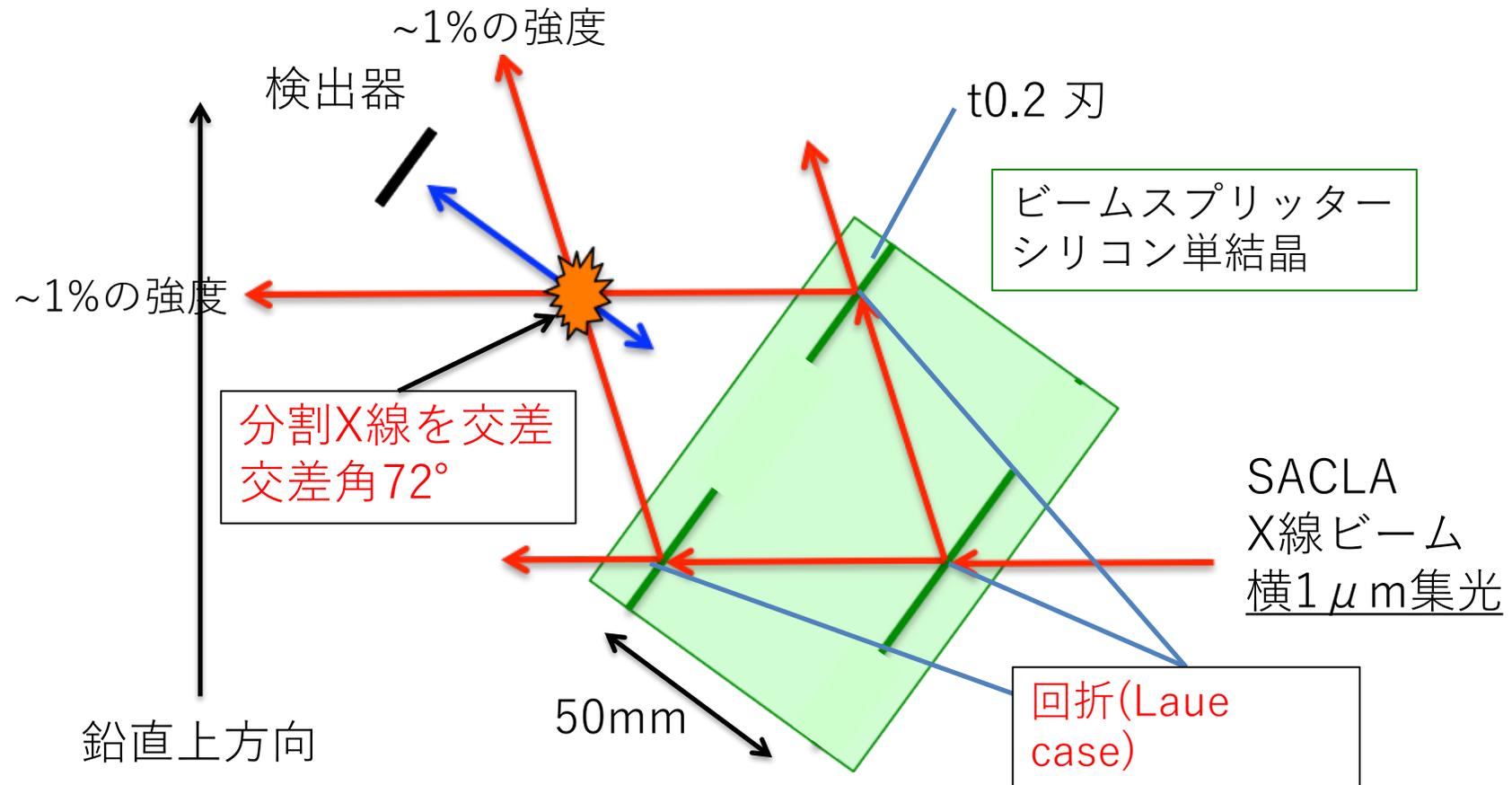
1本のX線を分岐してぶつける方法

- X線の回折を利用して分岐
 - そのまま透過→透過光
 - 結晶でラウエ回折→回折光
- 今回の実験では、
 - 0.2mm厚のシリコンの刃を使用
 - シリコン(4,4,0)格子面
 - 10.985keVのX線に対して、 $\theta_B = 36^\circ$
 - 透過、回折の効率 $\sim 1/10$



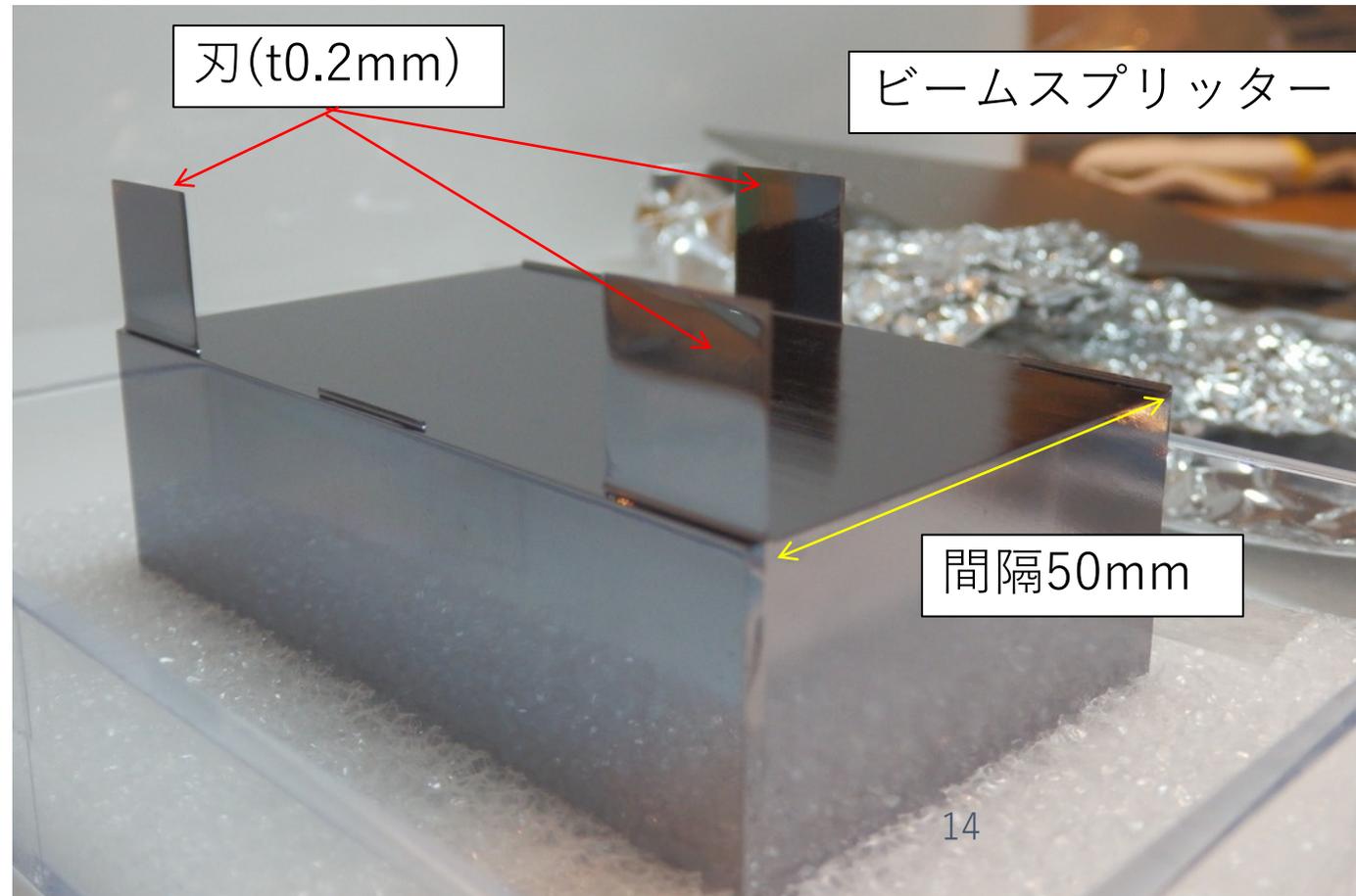
2回繰り返すと、

- 透過・回折ビームと、回折・回折ビームが、中心で交差し、衝突する



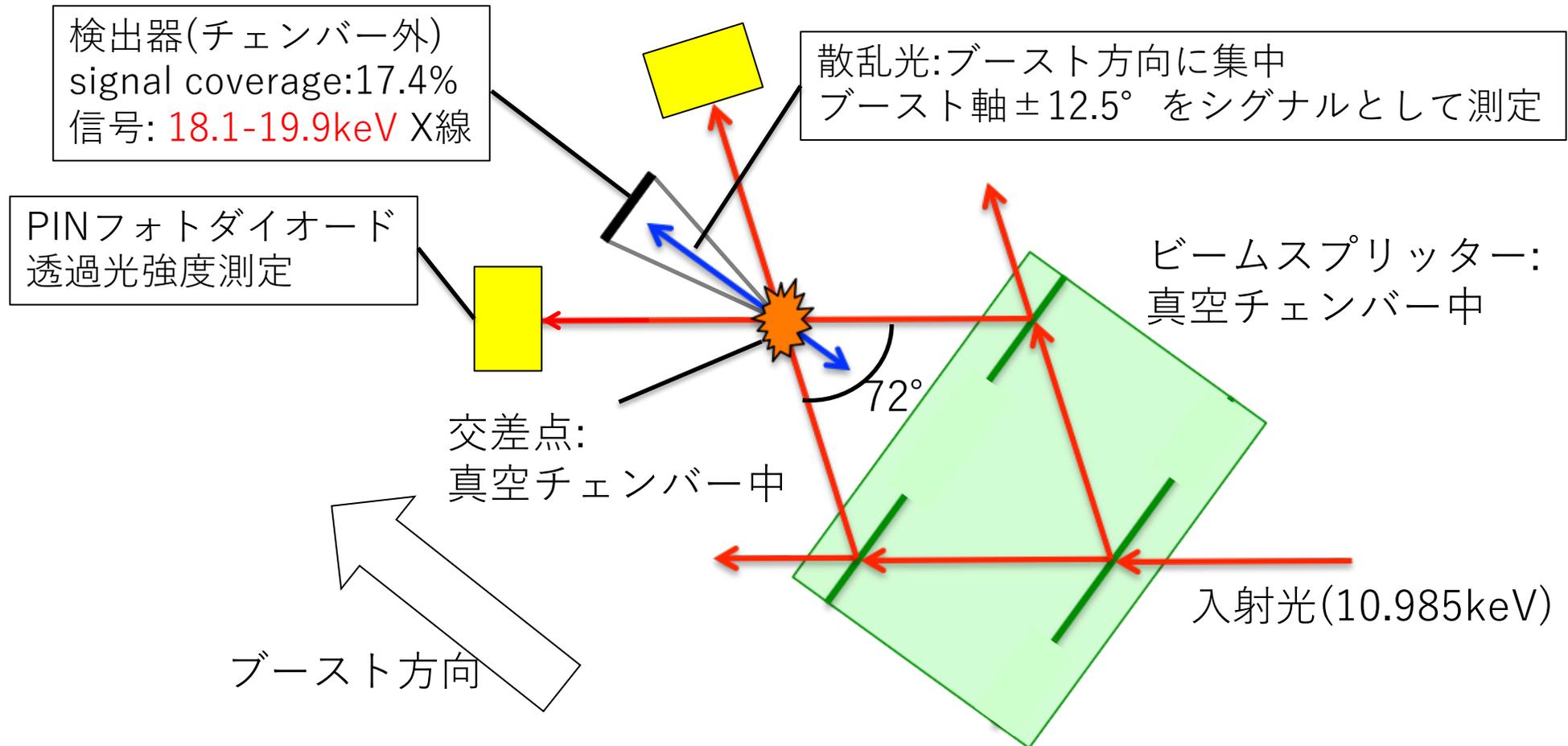
キモは、単結晶から刃を切り出すこと

- ラウエ回折用の刃をシリコン単結晶から切り出す
→ビームの衝突を時間的・空間的に保証



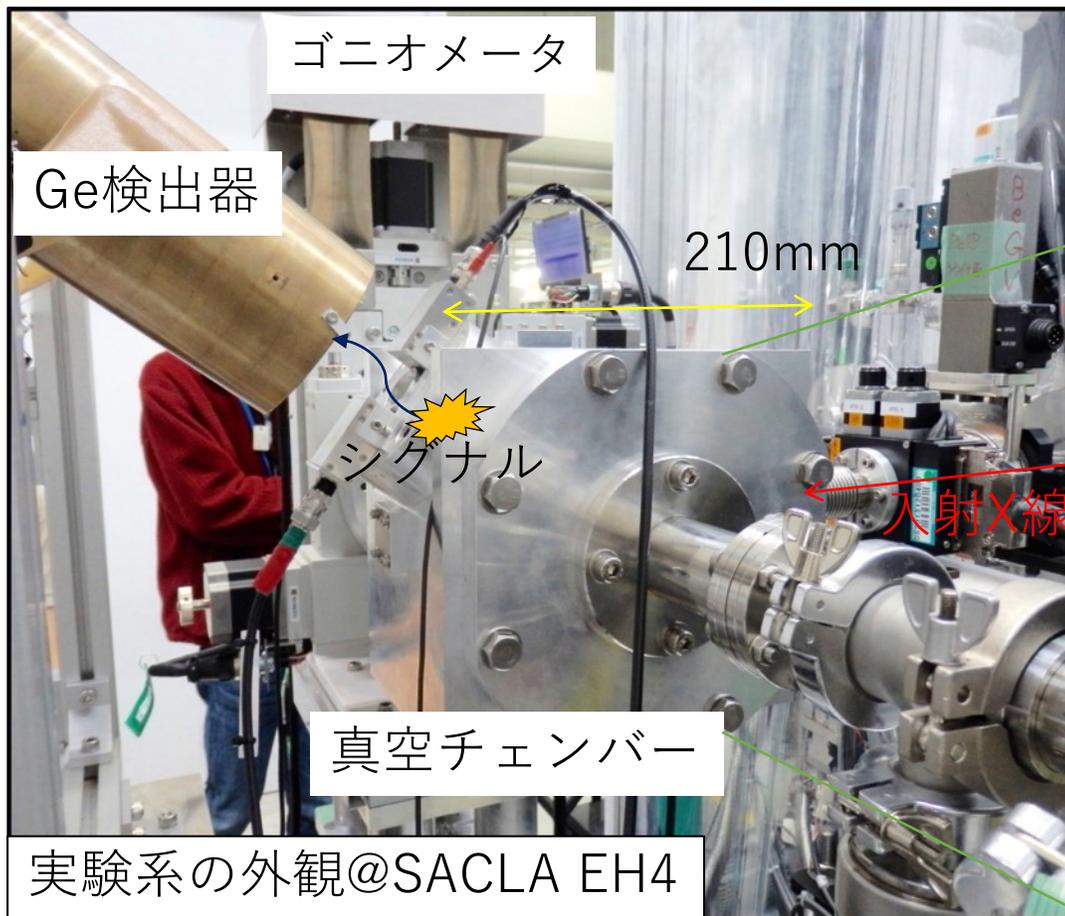
期待される散乱シグナル ～前方にブースト～

- $\omega_{CM}=6.46\text{keV}$ の系ではほぼ等方散乱
- 72° の交差系では、前方に19keV程度のブーストシグナル

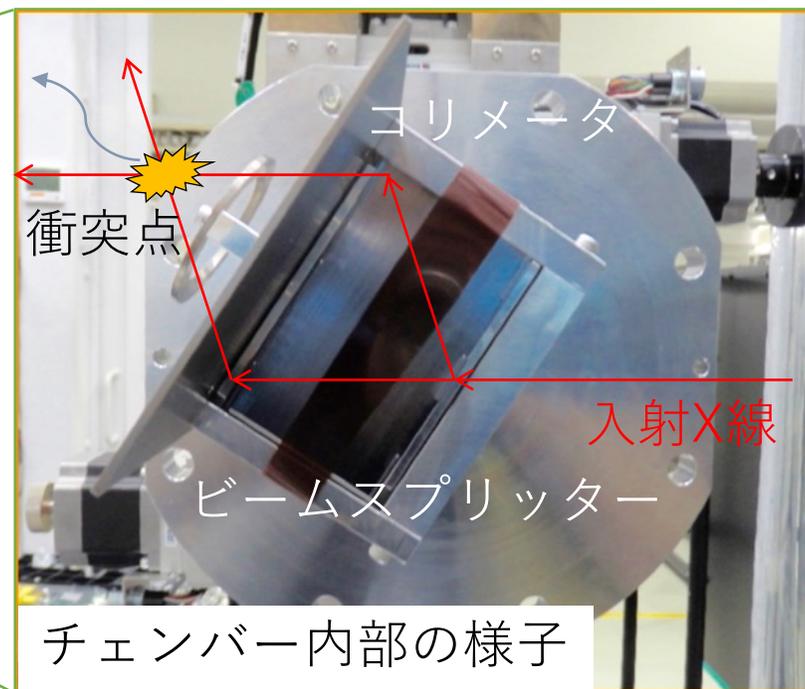


実験装置

- 大気分子によるX線散乱を防ぐために真空中でX線回折・交差
- 刃でのX線散乱由来の迷光を遮蔽する為に複数のコリメータを使用



- 光子光子散乱のシグナル光はチェンバー外のGe検出器で測定



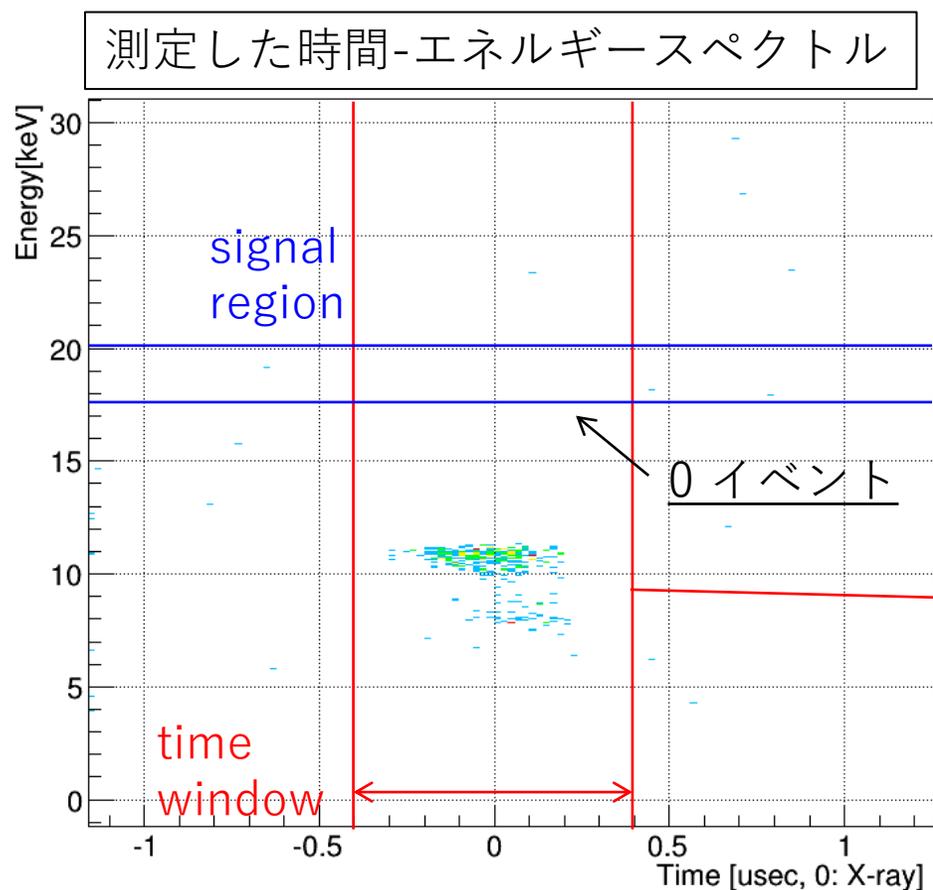
実験結果: 測定スペクトル

-SACLA(BL3)のビームタイムを, 2015/11/11 22:00 - 11/14 10:00(60 h)に取得,
実験

-シグナル測定: 30Hz, ~34h DAQ, 3.7×10^6 pls

-X線パルスに同期したトリガーでDAQ, 時間窓: X線タイミング $\pm 0.4 \mu\text{sec}$

-時間窓, 信号領域内のイベント: 0

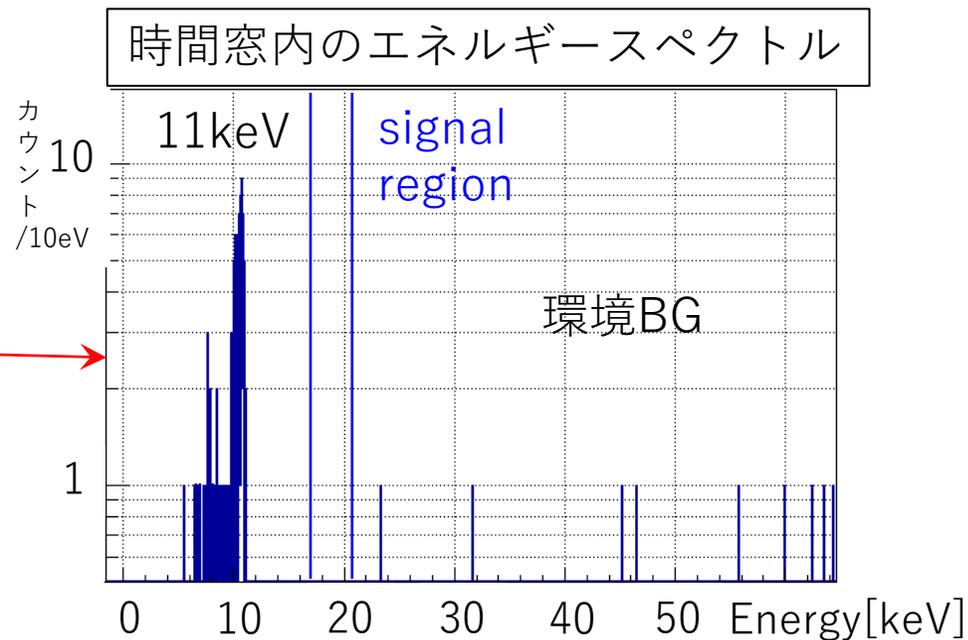


◆時間窓内のイベント

1) ~11keV: XFEL由来の迷光X線

2) 11keV: 環境BGの偶然同時計数

偽信号期待値: 0.43 ± 0.03 BGs



ルミノシティ&検出効率

$$L = \frac{I_{TR} I_{RR}}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

- 2本の衝突するX線の強度
PDでパルス毎に観測 (総計 3.7×10^6 pls)
共に平均で $\sim 2.4 \times 10^6$ γ /pulse程度

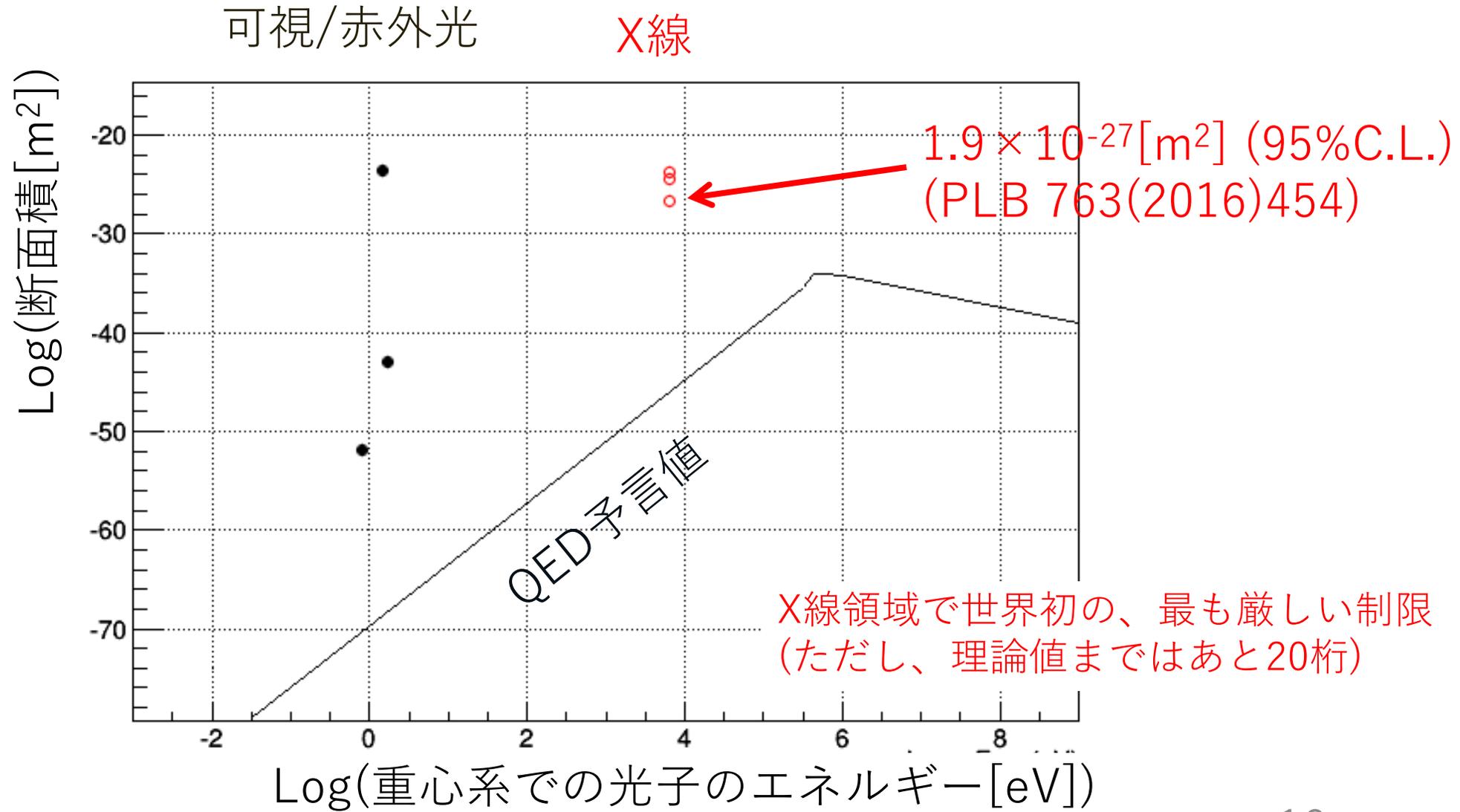
- ビームの大きさ
ワイヤースキャンで別途測定
 $\sigma_x \sim 1\mu\text{m}$ (集光)
 $\sigma_y \sim 130\mu\text{m}$



積分ルミノシティ $L = 1.24 \times 10^{28} \text{m}^{-2}$

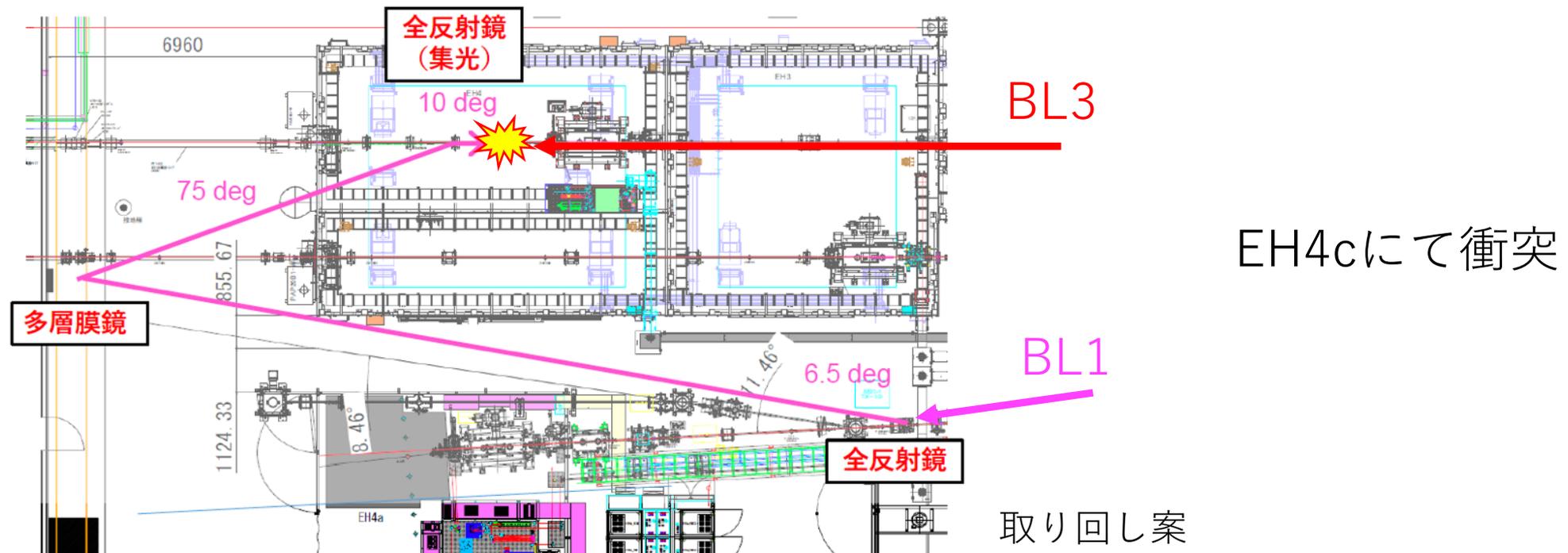
- シグナル検出効率: 13%

散乱断面積に対する制限

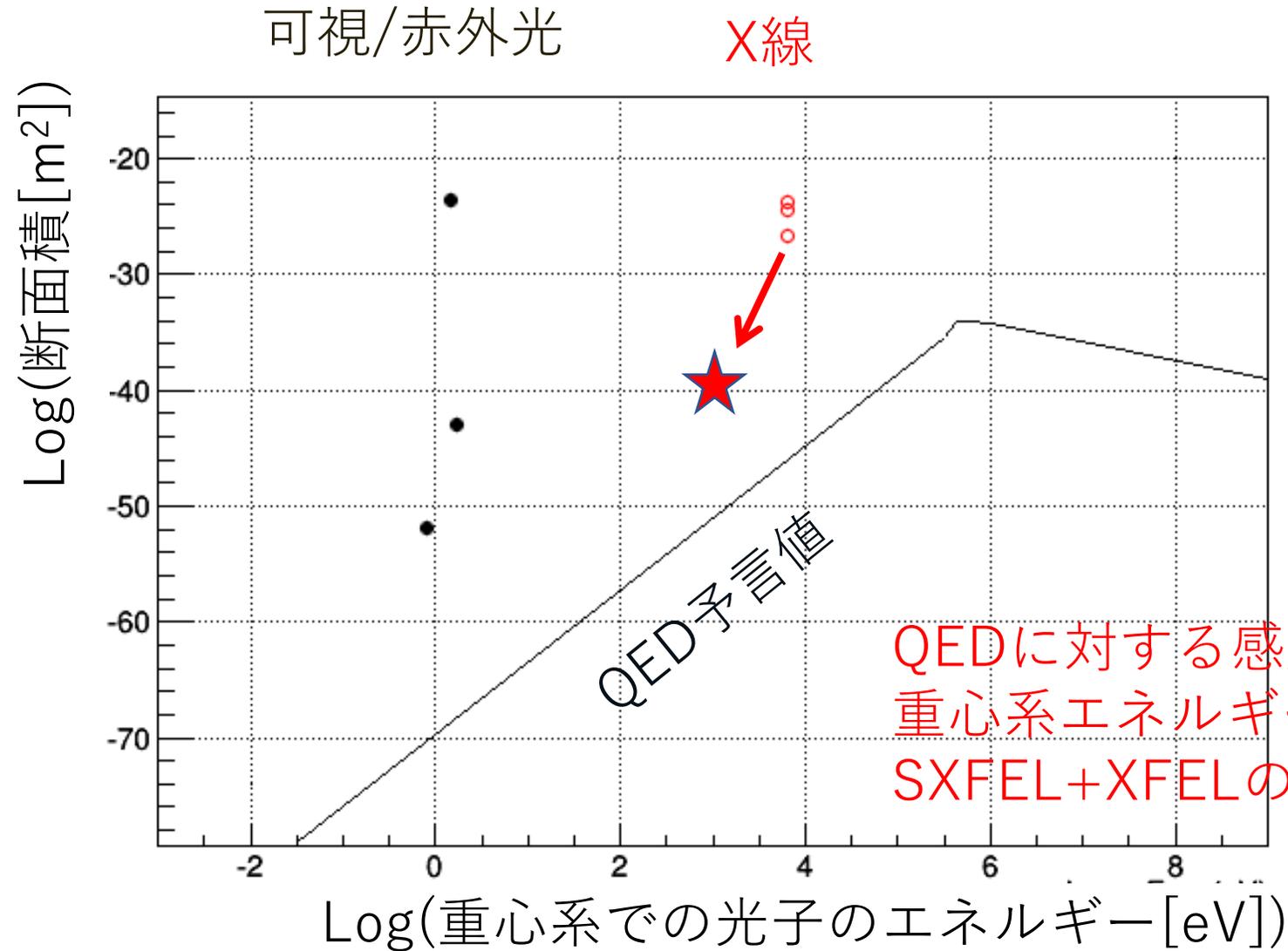


今後

- 結晶光学を利用して1本のビームを分けるのは効率が悪いので、もう1本のビームを使用
- BL1 軟X線ビームライン (BL3 とは独立) をミラーで取り回して BL3 と正面衝突させる
- 重心系エネルギーは、 $10\text{keV} + 0.1\text{keV}$ で 2keV になるが、結晶光学系のロスが無くなり、集光が可能になる



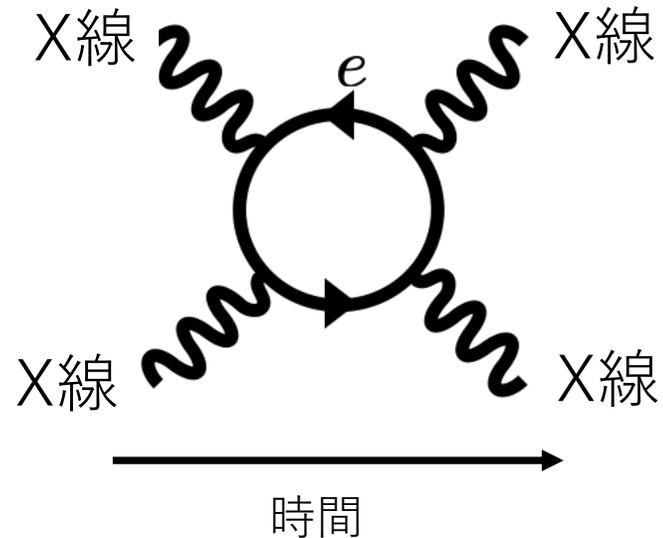
BL3+BL1コライダーでの予想探索感度



QEDに対する感度を~10桁改善
重心系エネルギー可変
SXFEL+XFELの他用途への応用?

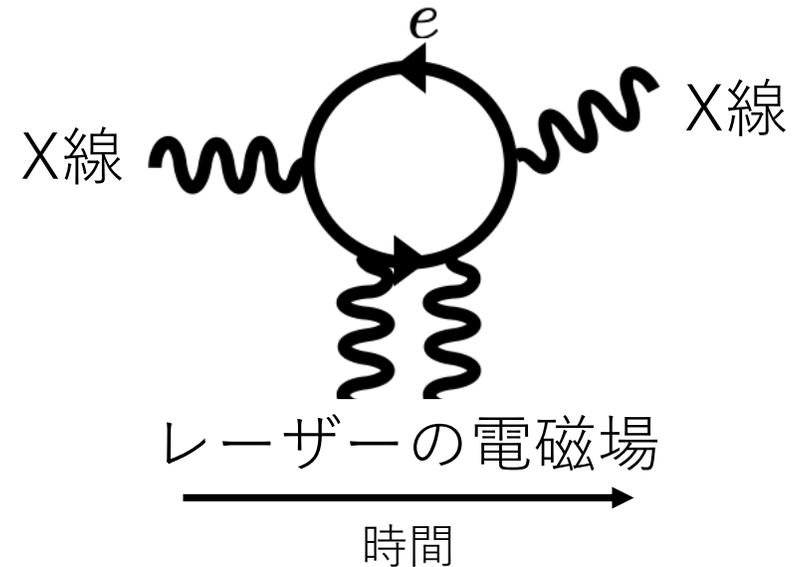
2つの手法でアプローチ

- X線とX線を衝突させて、真空の構造を見る



X線同士が、真空の非線形効果を介して弾性散乱

- 大強度レーザーで真空をポンプしてX線でプローブする



レーザーの電磁場が真空の非線形効果を生じてX線が回折

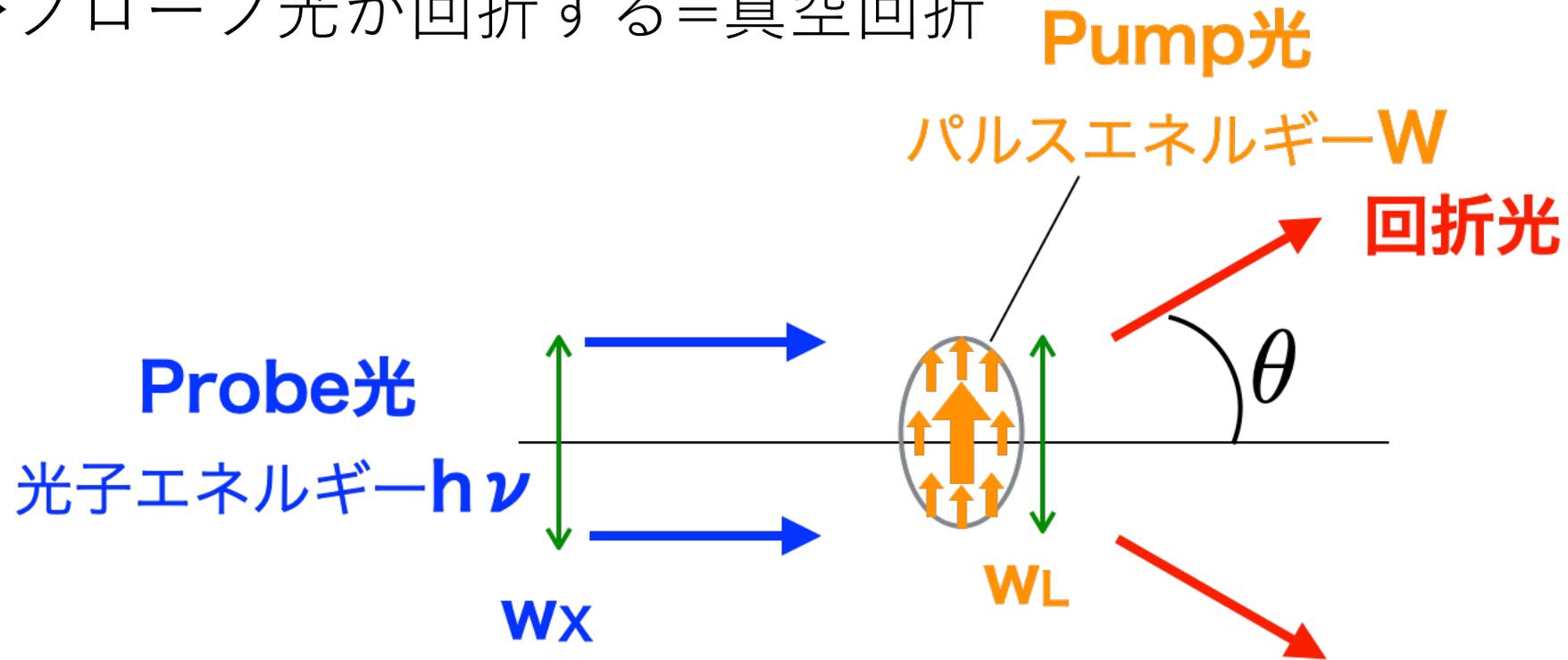
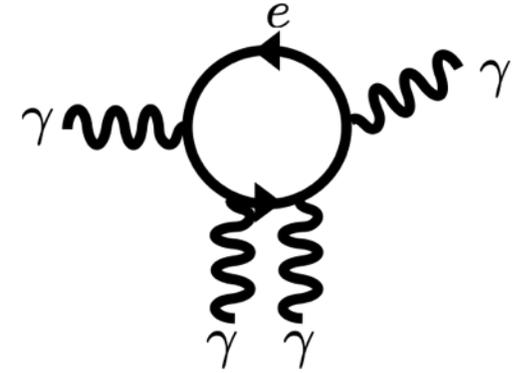
どちらも使用するX線の質が非常に重要

アプローチ2:

大強度レーザーで真空をポンプしてX線でプローブする

- ポンプ光の局所的な電磁場により、真空の屈折率が変化

→ プローブ光が回折する = 真空回折

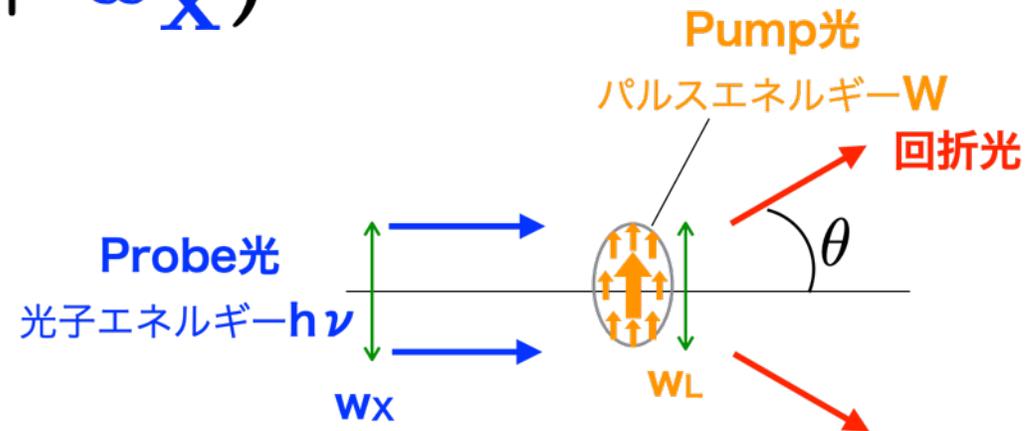


真空回折の性質

- ポンプ光はギュッと絞って細かい構造=大きく回折
- プローブ光は短波長で小さな構造を見る=X線の利用

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

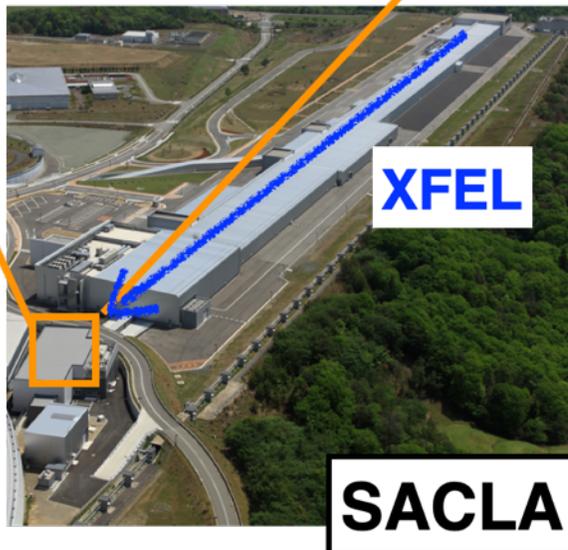
$$\text{実験感度} \propto \frac{(h\nu)^2 W^2}{w_L^2 (w_L^2 + w_X^2)} \times (\text{probe光の分離率})$$



われわれのグループが定式化
PTEP 2020, 073C02

SACLAには、X線も大強度レーザーもある

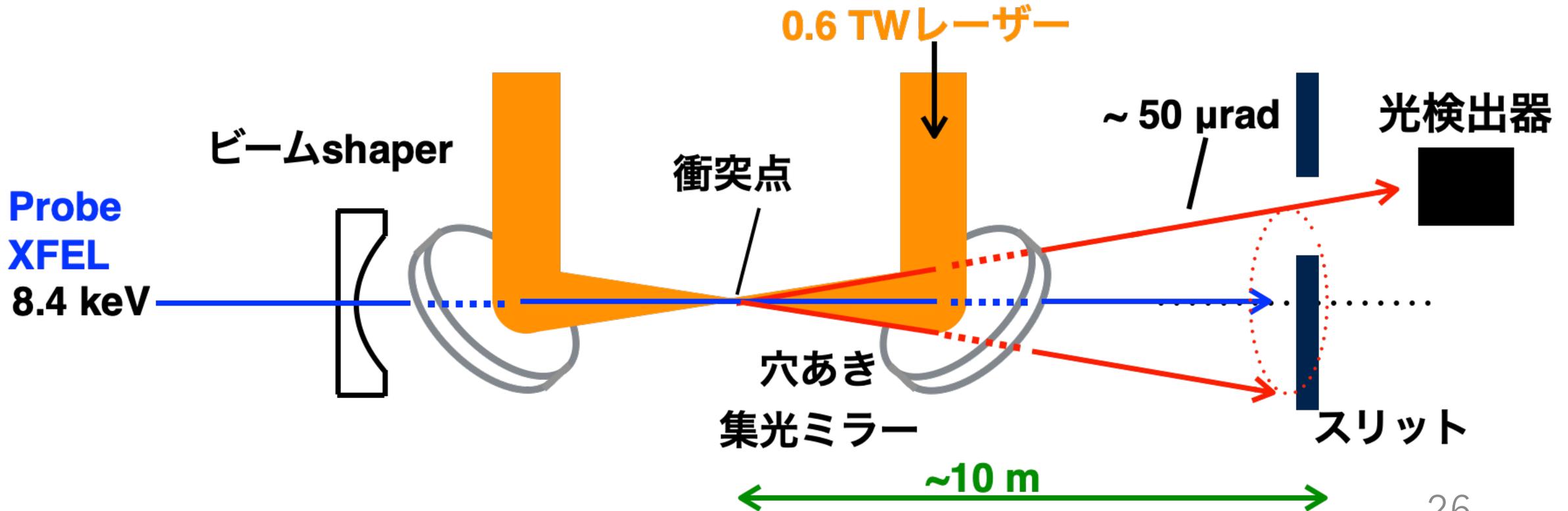
500 TWレーザー



- プローブ光: SACLA XFEL 8.4keV
- ポンプ光: 500TW レーザー
 - 2018年から共用運転開始
 - 高強度フェムト秒レーザー
幅30fs、パルスエネルギー12.5J、波長800nm
- ただし、今日のお話は、主に基礎スタディのため、実験ハッチ2に常設の0.6TWレーザーを使ったものです。

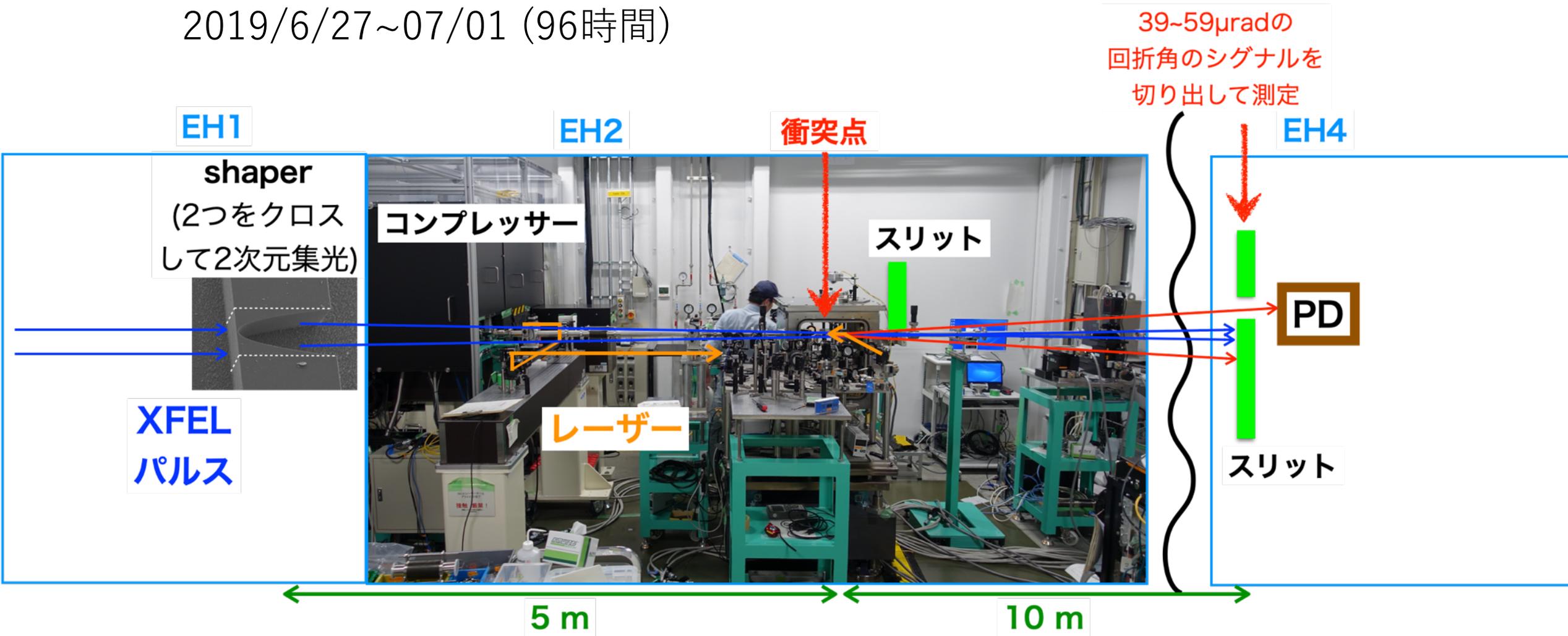
スタディ－実験セットアップ

- プロブ光: XFEL 8.4keVをシェーパー(後述)で集光
- ポンプ光: 0.6TWレーザーを集光ミラーで集光
- 両者の集光点で衝突、 10m下流のスリットで回折光を選択

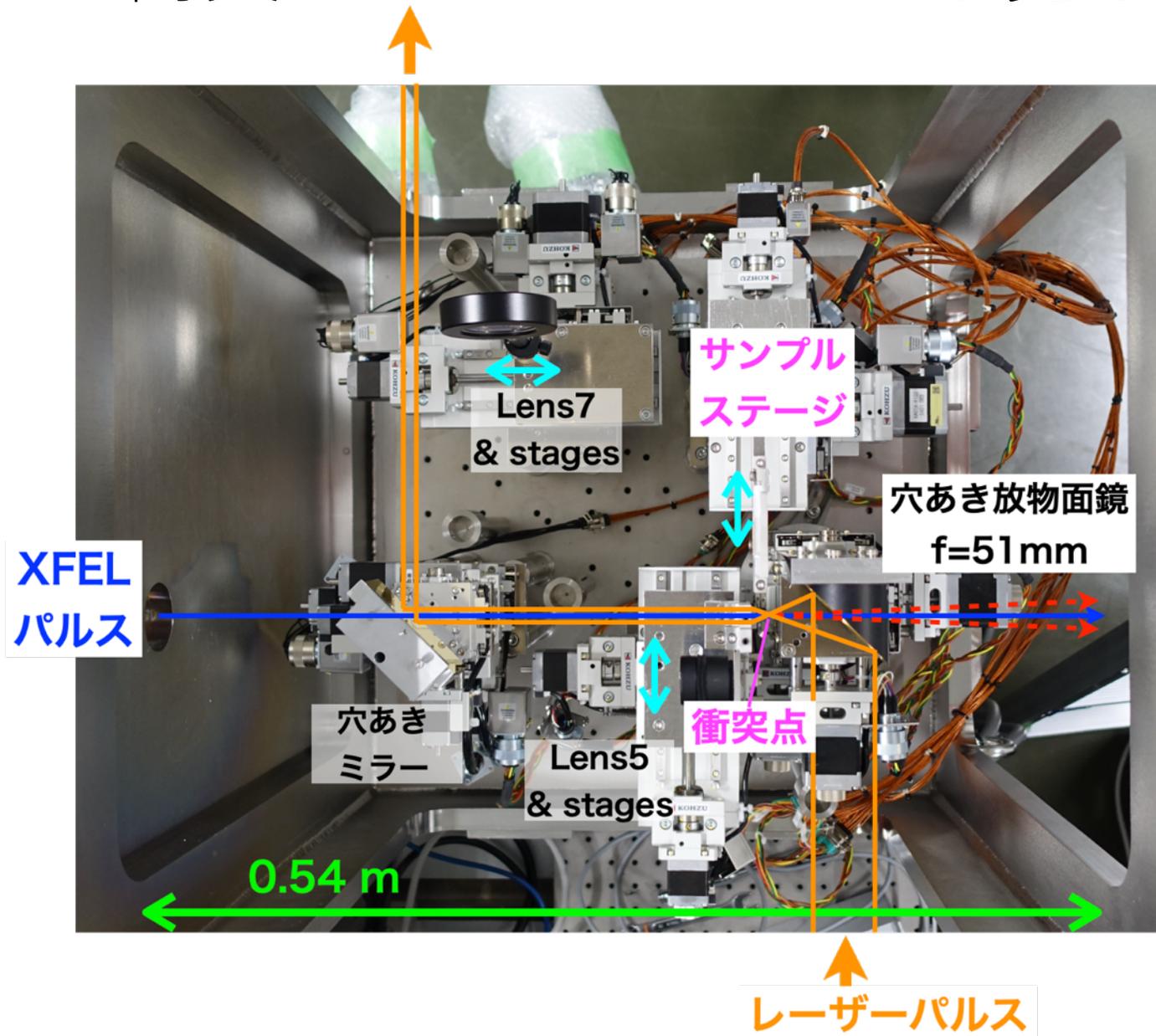


実験セットアップ (@実験ハッチ2)

2019/6/27~07/01 (96時間)



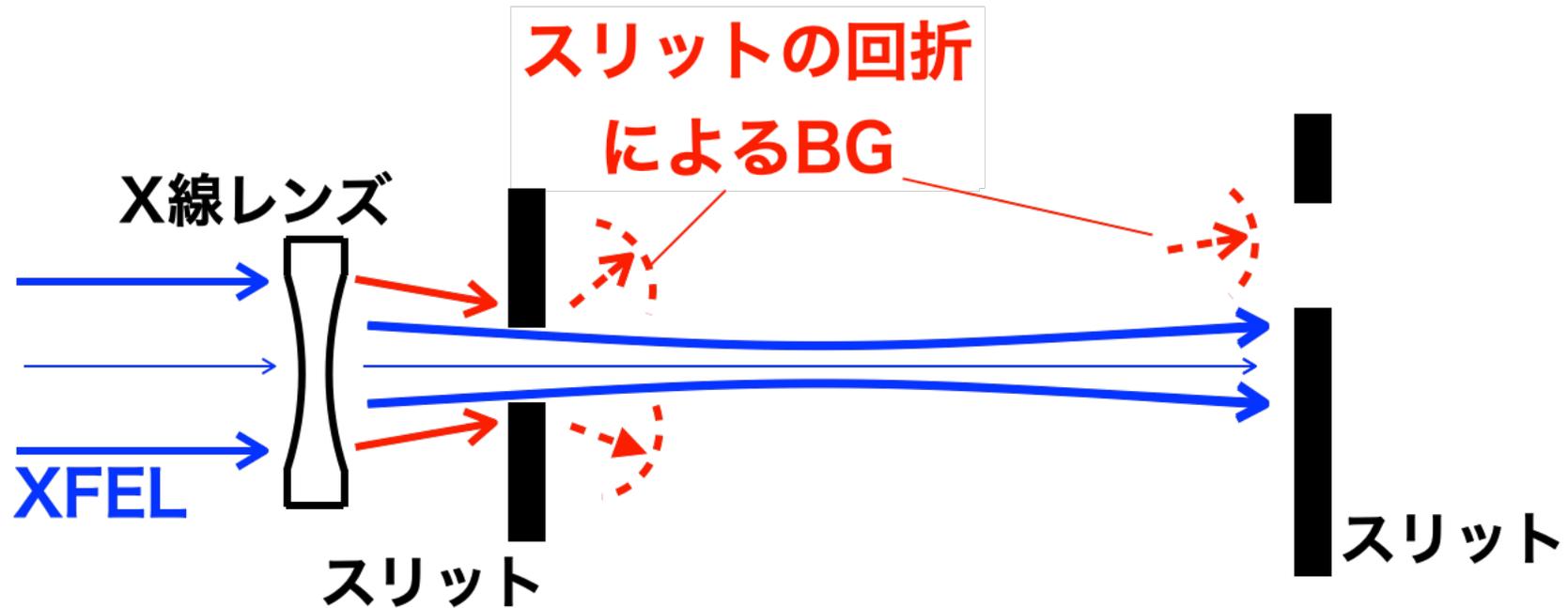
衝突チャンバーを上から見ると



- 穴あき放物面鏡を操作してレーザーの集光位置を操作
- 衝突点上にサンプルステージ (アライメントに使用)
- 真空度: 3×10^{-3} Pa

XFELの裾が問題

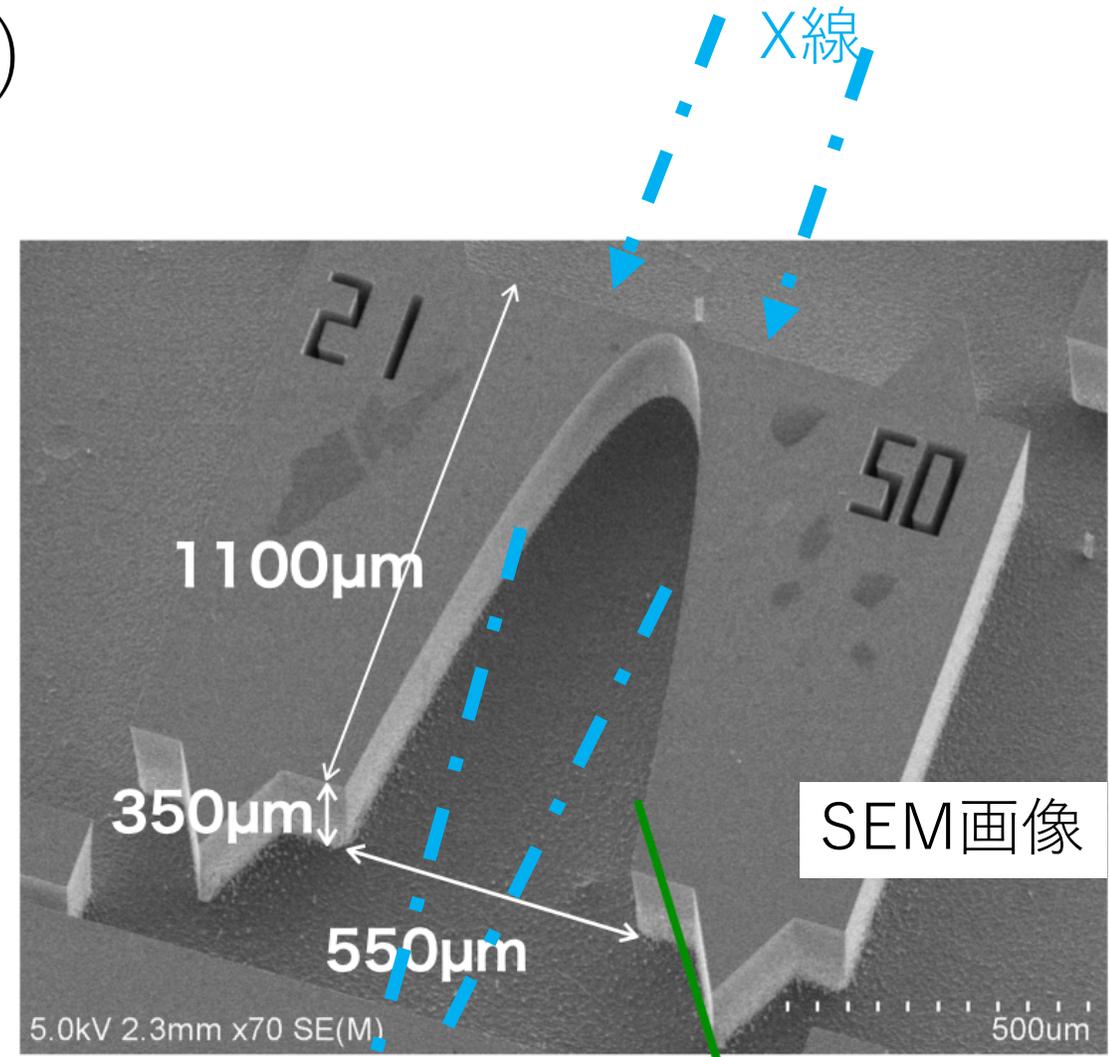
- X線の裾や、角度発散の大きな成分はBG源
- スリットは回折を生じる



- 小角度発散で集光し、裾を切るX線シェーパーを開発

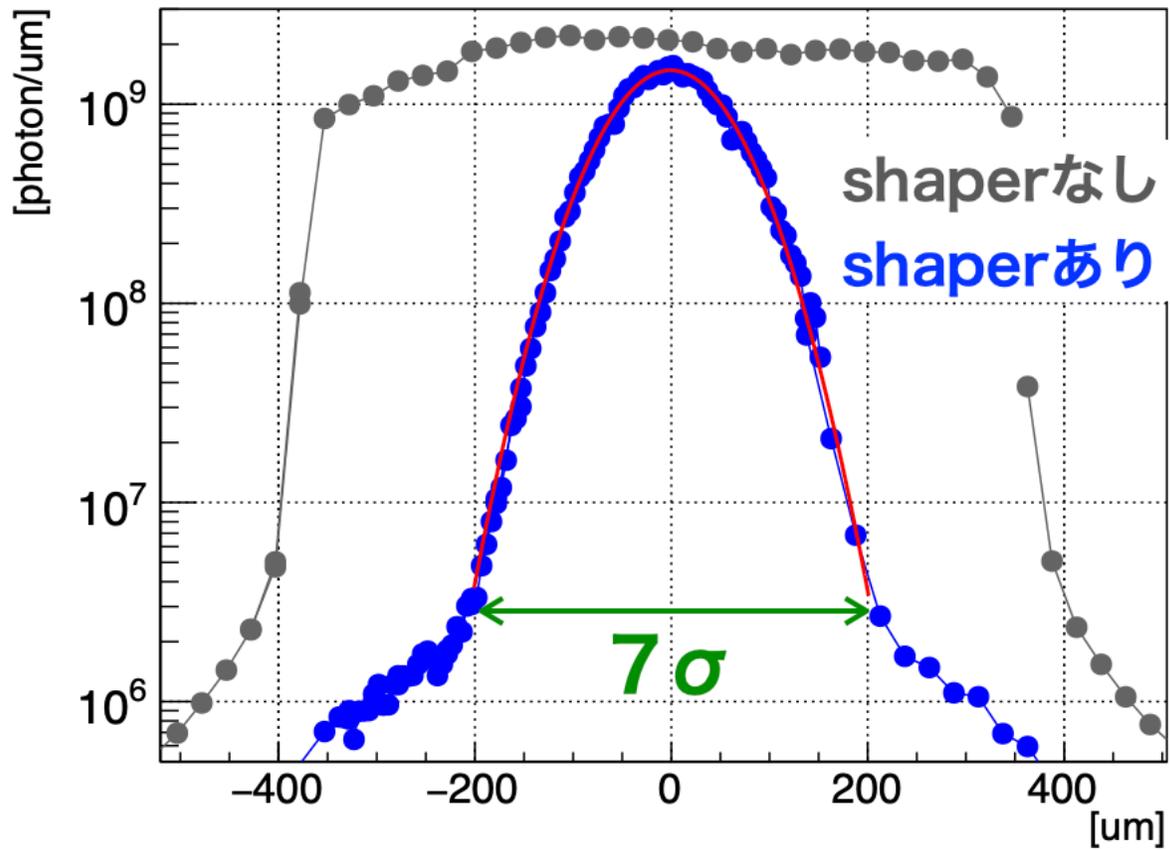
X線集光素子(X線シェーパー)

- Si基板をイオンエッチングでパラボラ状に加工
- 負の屈折率による1次元集光効果
($f=5.4\text{m}$)
- 吸収により、透過光をガウスプロファイルに ($1\sigma=50\mu\text{m}$)
- 2個を組み合わせて2次元集光



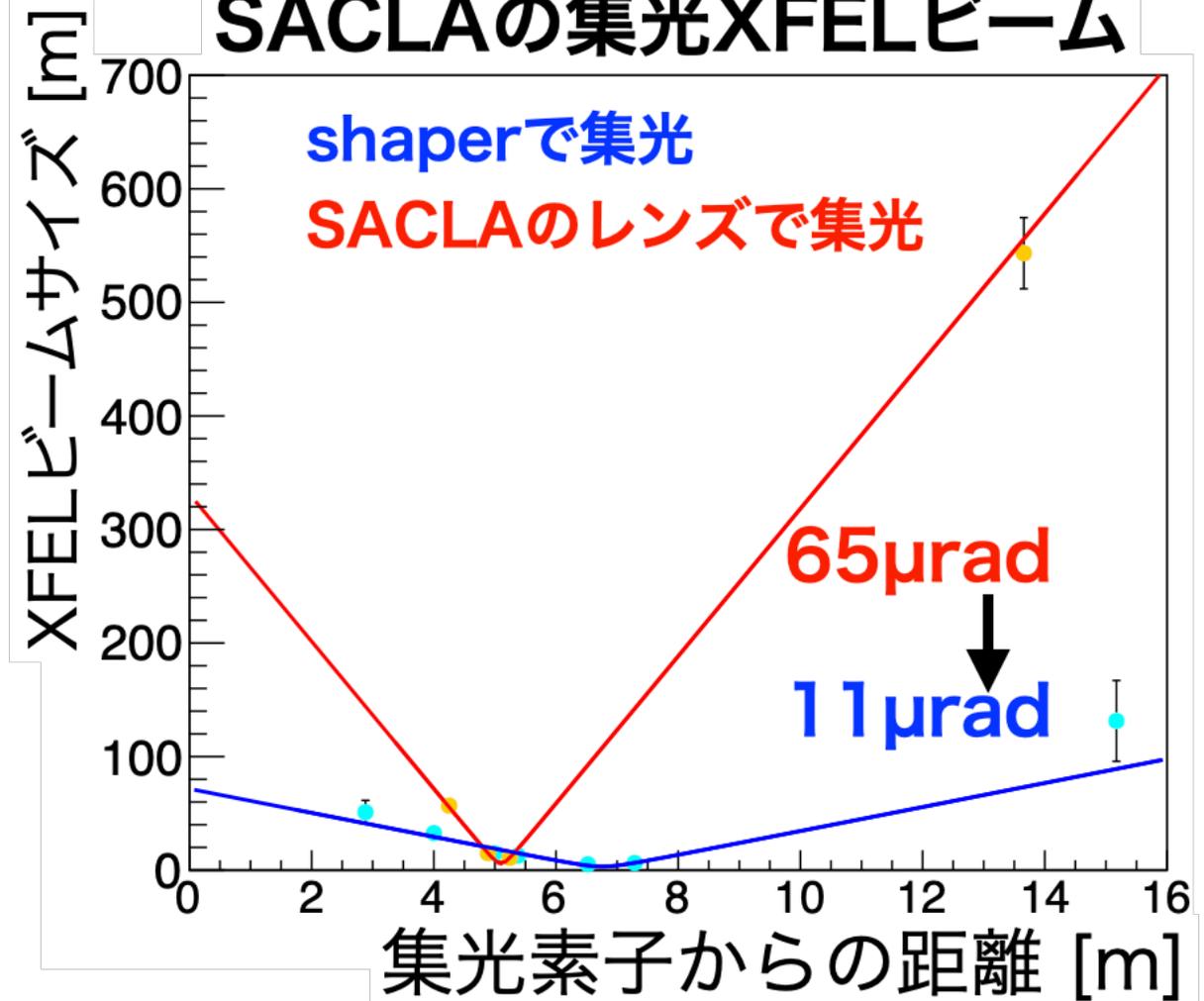
2次関数の形状

シェーパー評価



ガウス形状になっていることを確認 (@SPring-8 BL19LXU)

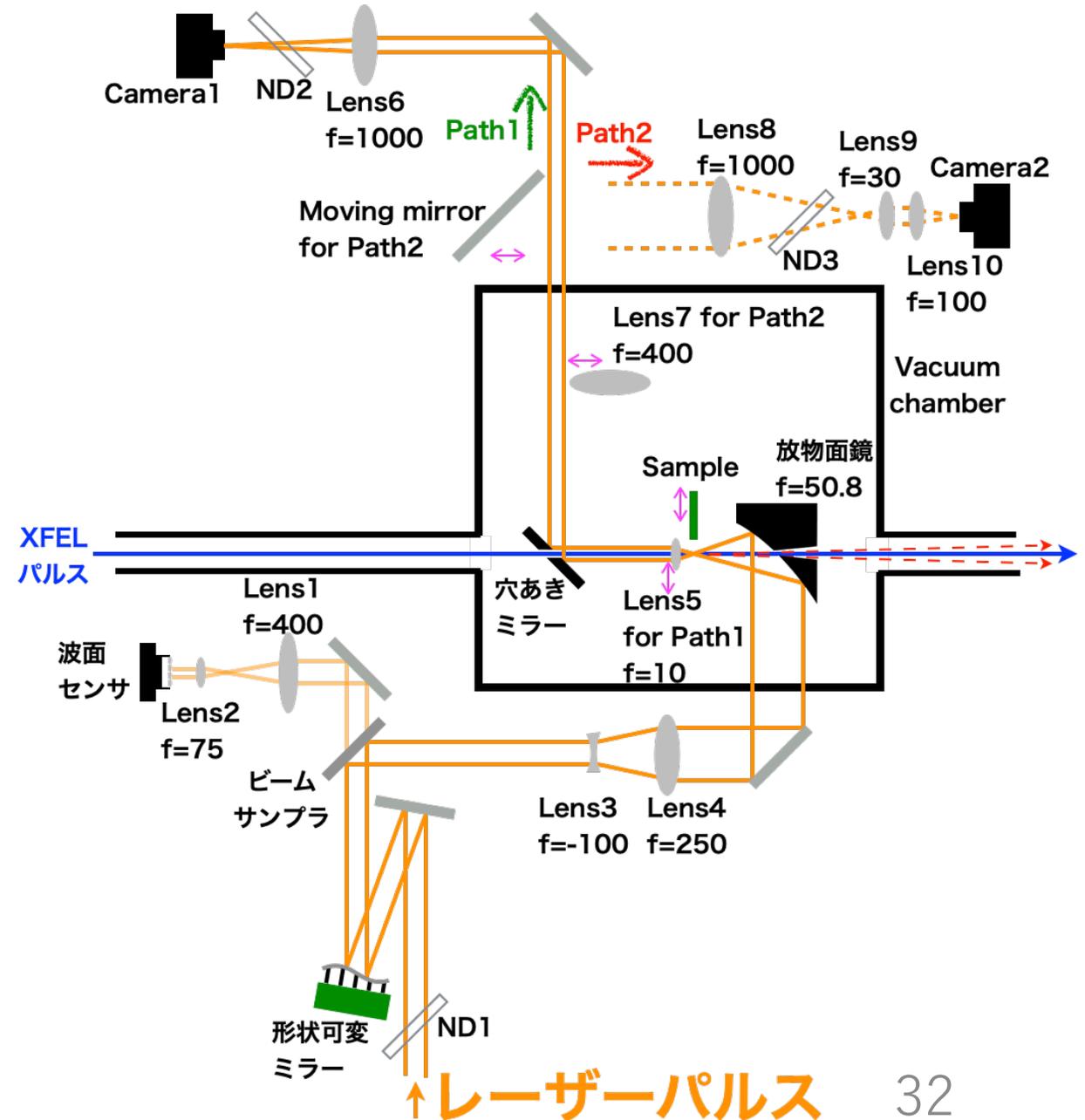
SACLAの集光XFELビーム



ビームの発散角が $11\mu\text{rad}$ に抑えられていることを確認

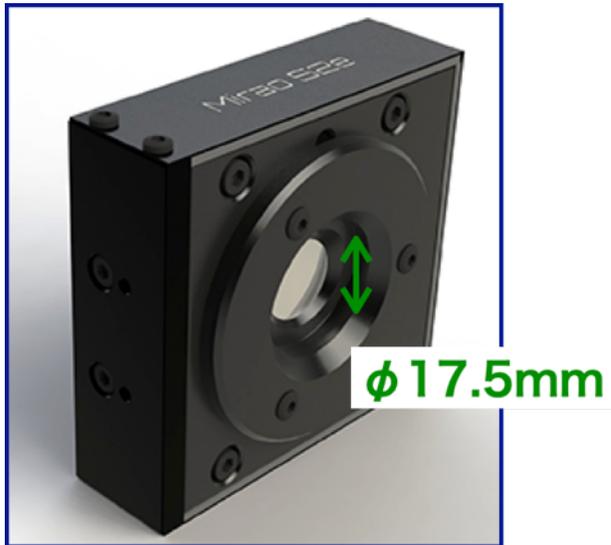
レーザー光学系

- 0.6TWレーザー (800nm)
 - Ti:Sapphire
 - 最上流で3mJパルス
 - パルス幅48fs
- $f=50.8\text{mm}$ の穴あき放物面鏡で集光 (でかいため、歪みあり)
- 形状可変ミラーを利用して歪みの補正
- 下流で、パルス毎に集光像をモニター



形状可変ミラーの効果

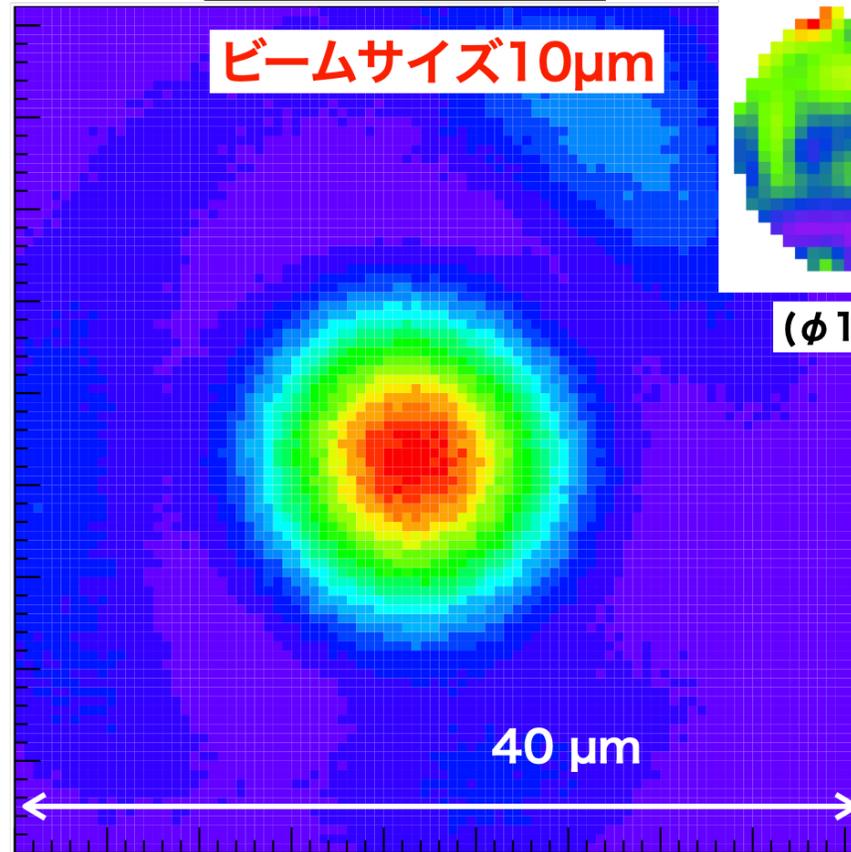
Imagine社
Mirao52e



52本のアクチュエーターで
ミラー制御 ($\pm 1.6\mu\text{m}$)

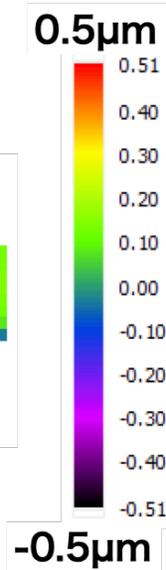
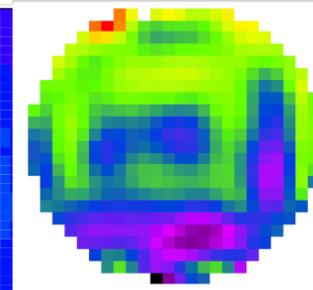
位相制御なし

ビームサイズ $10\mu\text{m}$



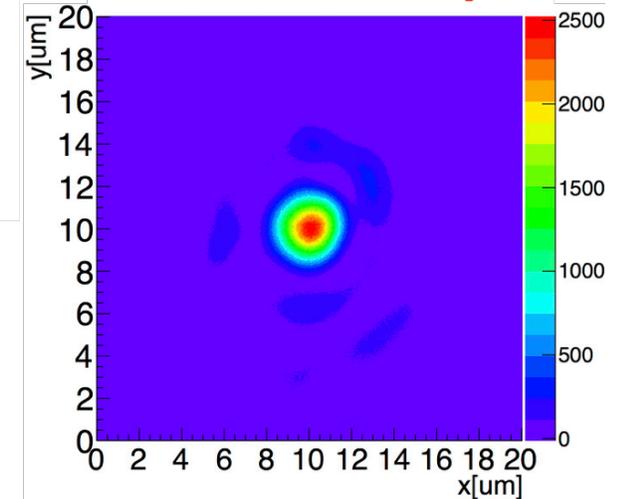
(集光距離102mm)

形状可変
ミラー形状



位相制御あり

ビームサイズ $1.9\mu\text{m}$



(集光距離51mm)

衝突の保証が重要

- XFELとレーザーを、それぞれ集光して、
空間的に $\sim\mu\text{m}$ の精度で
時間的に(レーザーが集光している)300fsの精度で
衝突させないといけない。

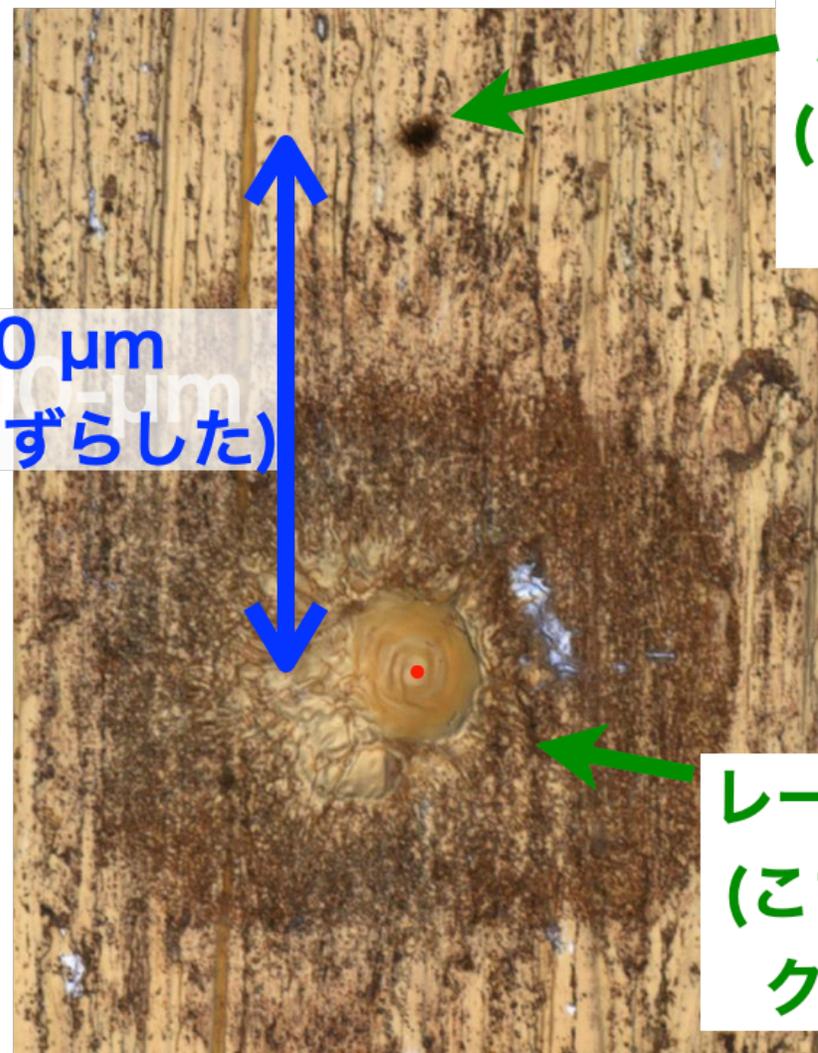


- 集光位置に金箔、GaAs基板を置いて空間、時間的な位置を測定

空間位置測定

- 金箔(20 μm 厚)を衝突点に置いて、XFELとレーザーを照射
 - XFEL: 貫通穴
 - レーザー: クレーター
- 位置をレーザー顕微鏡で読み取って測定
 - 水平位置の精度: $\pm 4.2\mu\text{m}$
 - 垂直位置の精度: $\pm 3.7\mu\text{m}$
- XFELサイズ(15 μm)より十分良い精度で位置合わせできた

金箔の顕微鏡写真



XFEL照射痕
(向こう側から、
貫通穴)

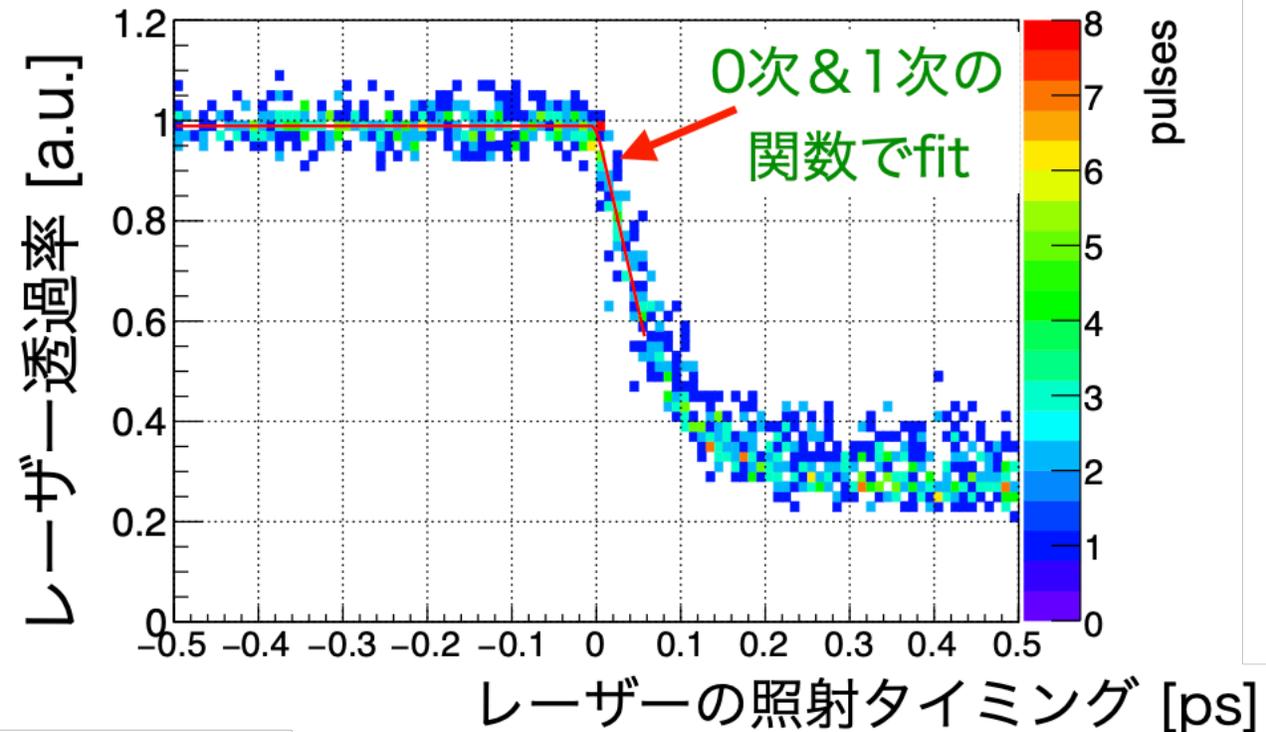
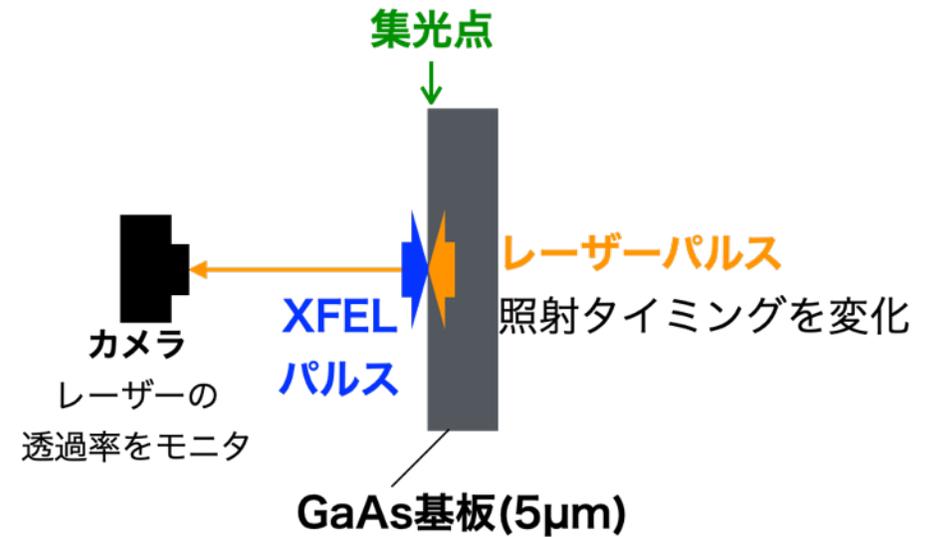
100 μm

(金箔をずらした)

レーザー照射痕
(こちら側から、
クレーター)

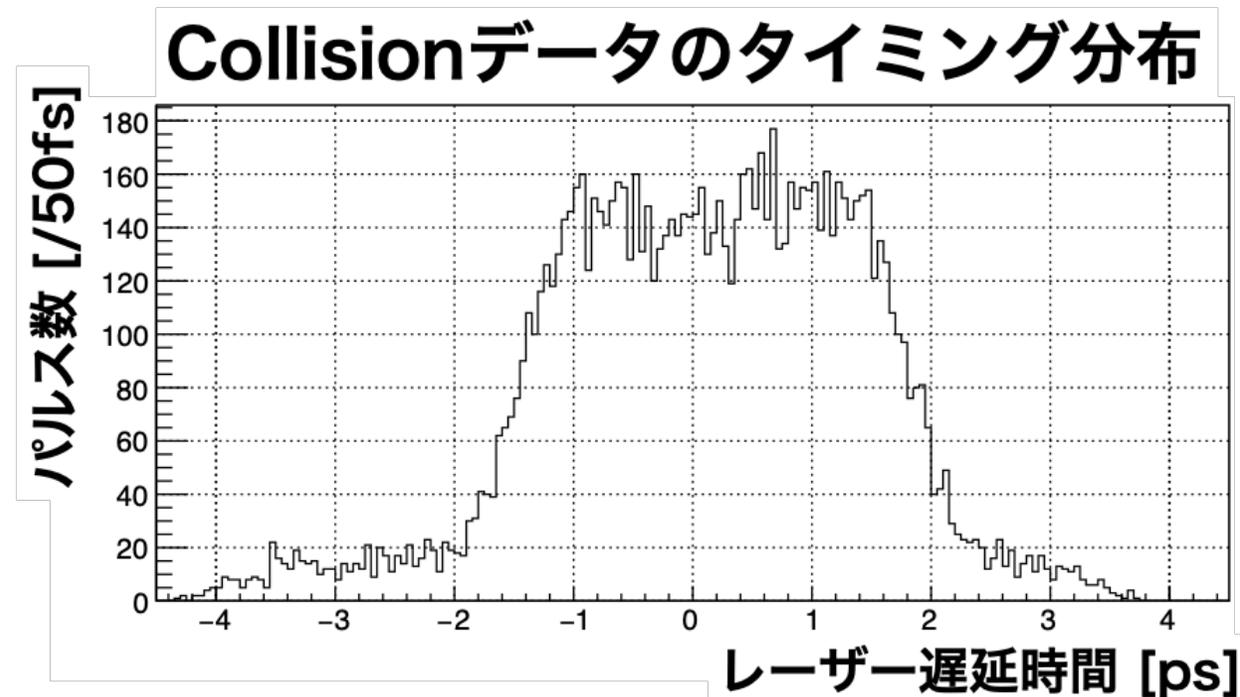
時間位置測定

- GaAs基板(5 μm 厚)を衝突点に置き、XFEL照射によるレーザー透過率変化を測定 (X線によるGaAsの不透明化を見る)
- 得られた透過率の立ち下がりの位置から、 $\pm 160\text{fs}$ で時間的に衝突させることに成功



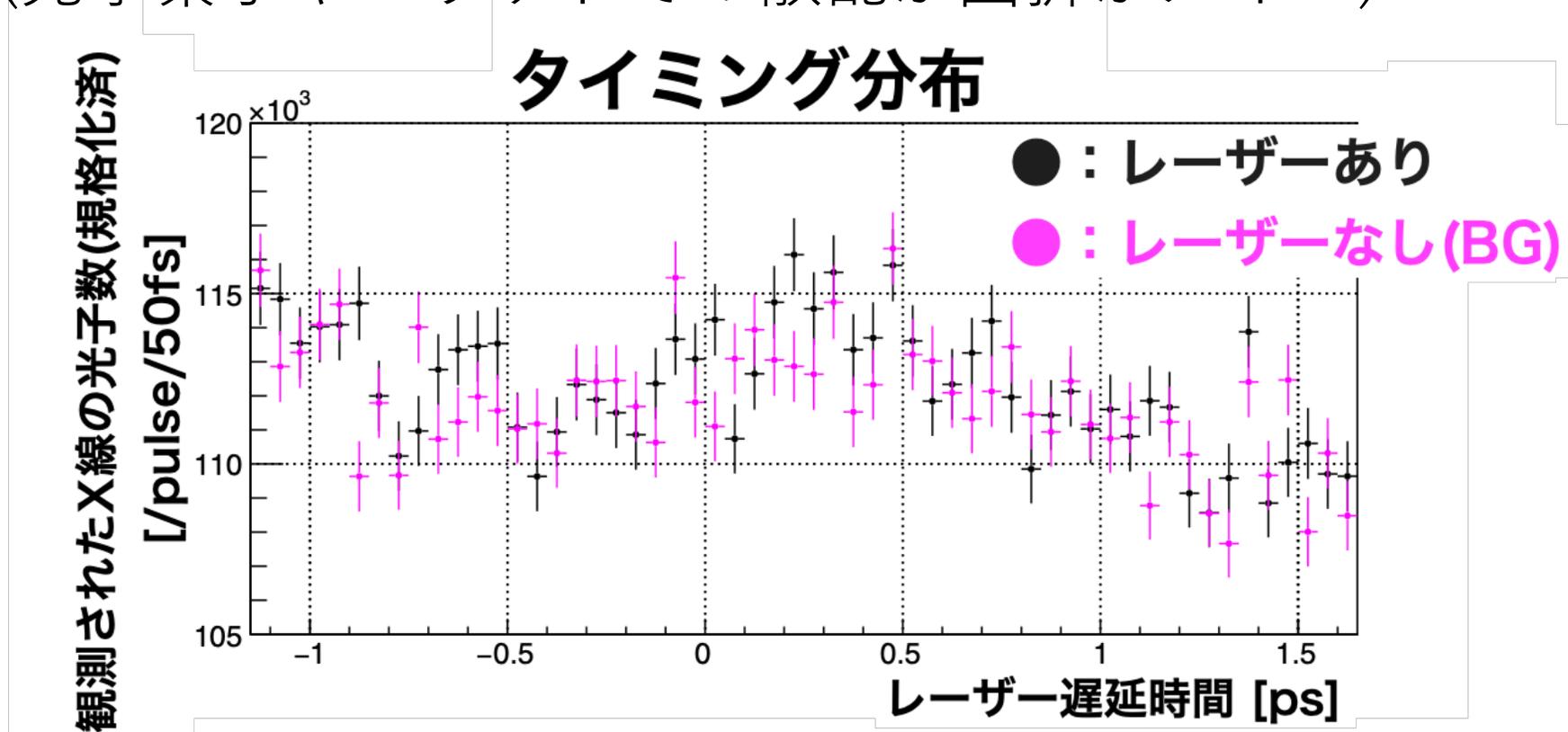
真空回折のお試し測定

- 位置・タイミング合わせ完了後、XFEL: 30Hz、レーザー: 15Hzで照射 (シグナルとBGを交互に測定)
- XFELに対するレーザーの遅延時間を変更しながら、シグナル・BG各11025パルスにわたってデータを取得
- XFELパルスあたりの平均光子数: 3.46×10^9 photons/pulse

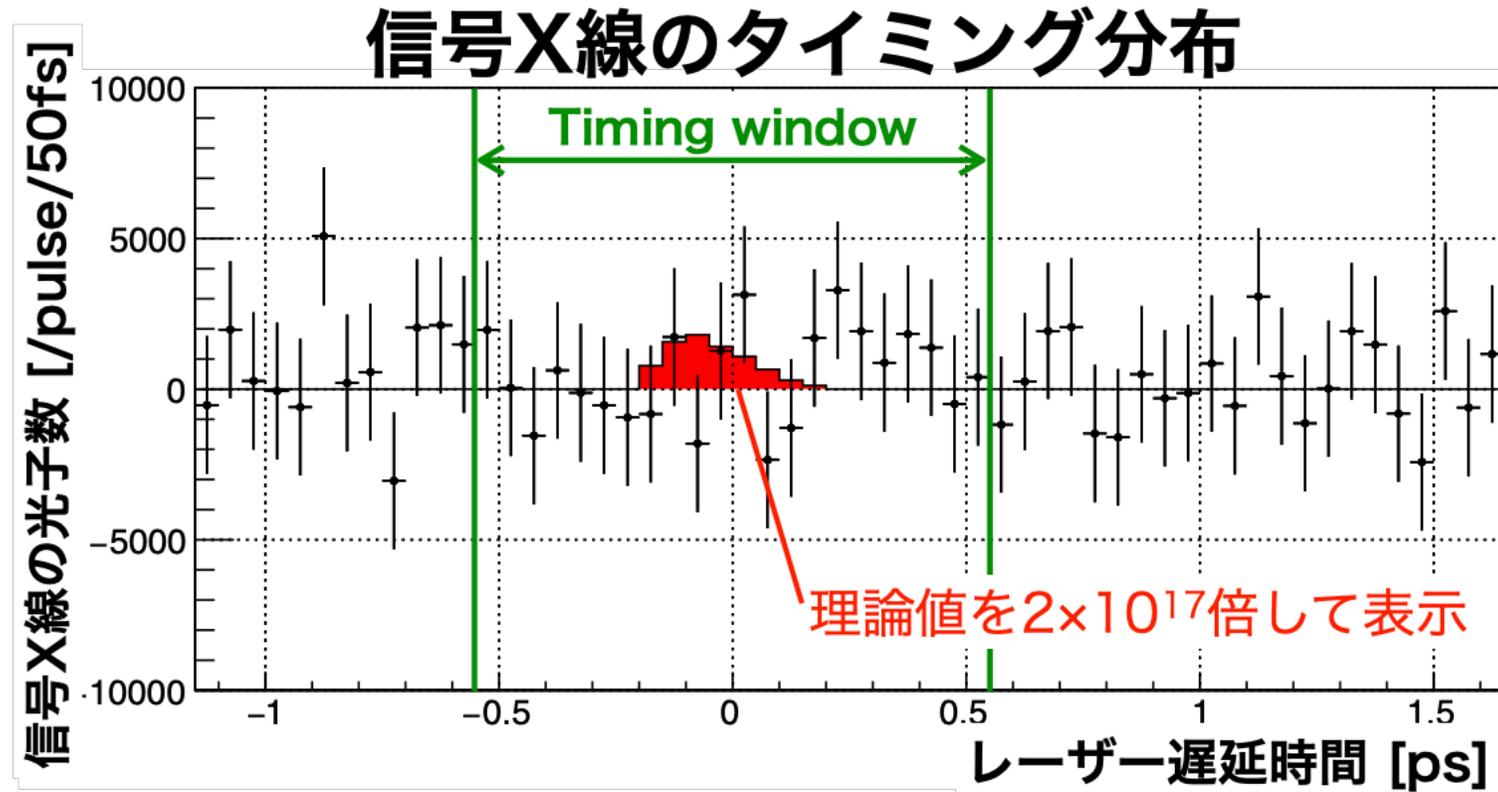


得られた回折光の分布

- 10m後方で、上方向に $39\mu\text{rad}\sim 59\mu\text{rad}$ 回折されたX線を測定
- レーザーの有無、タイミングにかかわらず、スリットを抜けてくるX線が $\sim 10^5$ photons/pulse 程度存在 (主ビームの4~5桁下)
(光学素子やスリットでの散乱が回折がメイン)



差からシグナルを抽出

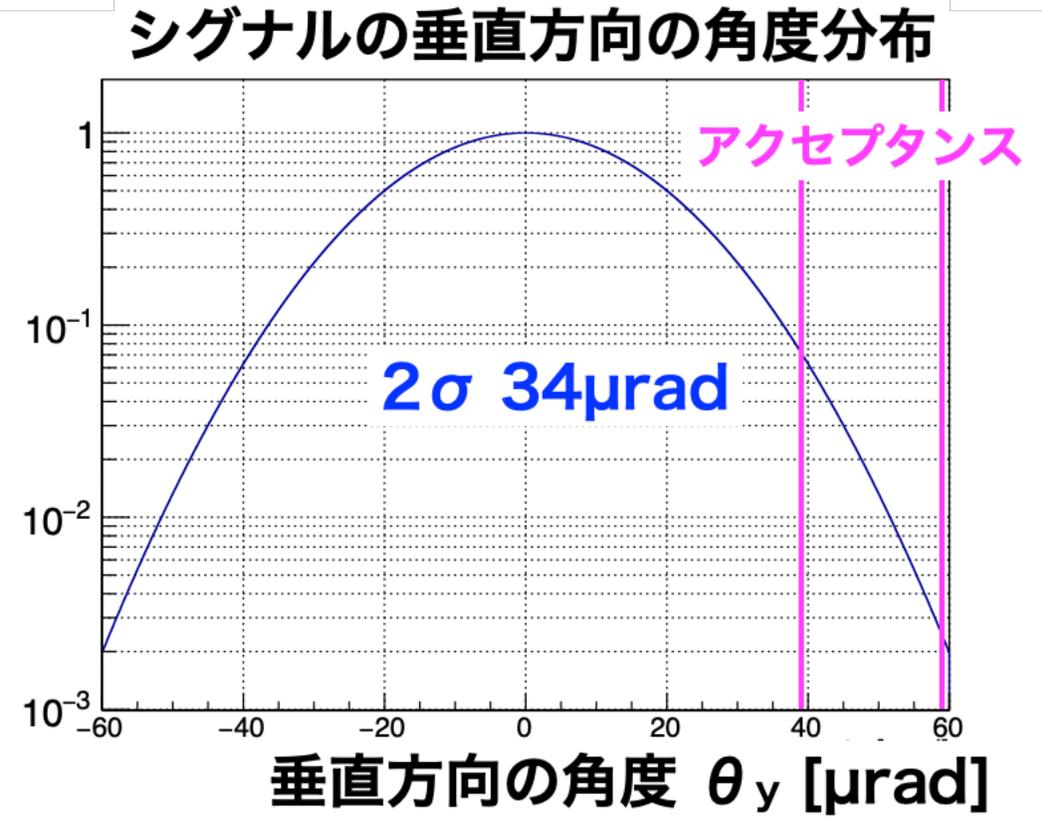


- 予想されるシグナルの範囲 (± 0.55 ps) に有意なシグナルは観測されなかった

$$(1.02 \pm 1.07) \times 10^4 \text{ photons}$$

予想されるシグナルとの比較

- 予想されるシグナル
 - 角度発散: $34\mu\text{rad}$
 - 回折確率: $P=2.1 \times 10^{-22}$
 - アクセプタンス: $A=9.5 \times 10^{-3}$
 - 期待されるシグナル数:
 $\text{NPA}=7.0 \times 10^{-15}$ photons/pulse

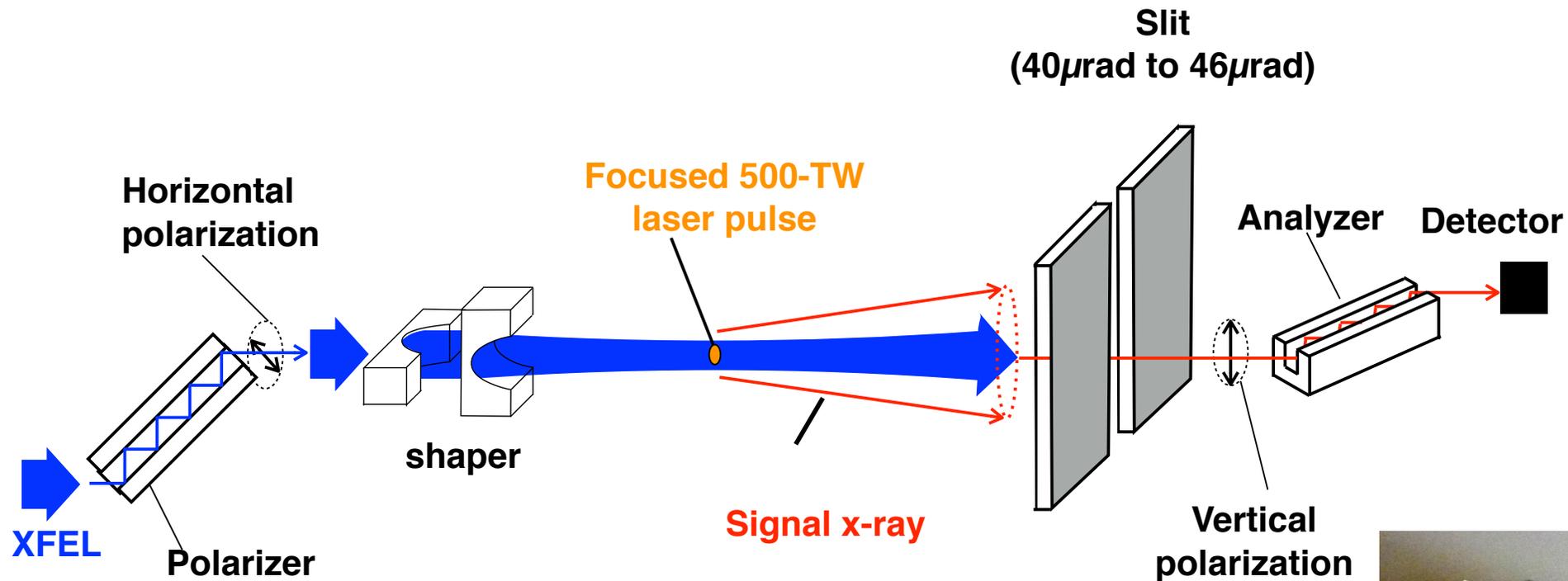


- さきほどの測定で得られた上限値と比をとると、

$$\frac{n_{\text{xrays,sum}}}{n_{\text{QED,sum}}} < 2.3 \times 10^{18} \quad (90\% \text{ C.L.})$$

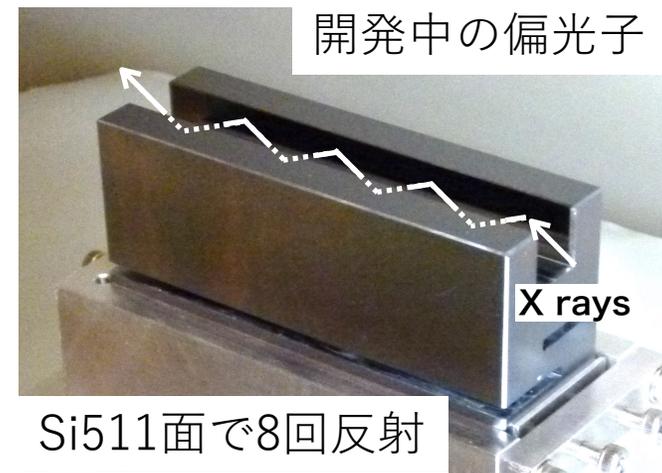
世界初の真空回折に対する制限

今後

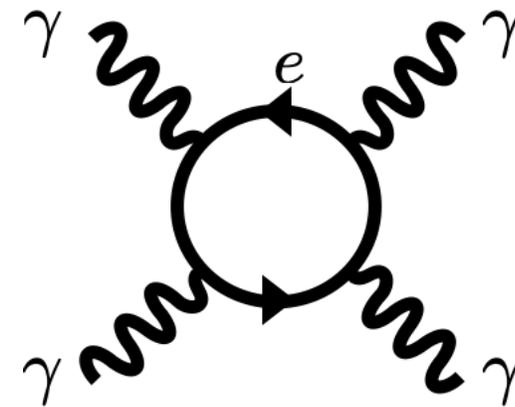


- レーザーを 500TW に (シグナルを~9桁向上)
- BGはX線偏光子によって抑制 (S/Nを~10桁向上)

→20日程度の測定で、真空回折シグナルを観測可能



まとめ



- 真空中に潜む未知を探したいが、
まずはQEDの真空を見たい
- 2つのアプローチで実験
 1. SACLAのX線を分岐して衝突
 2. レーザーを集光して真空をポンプし、X線でプローブ
- いずれの実験も最初のステップが終了し、世界初の制限
- 今後の改良によって感度向上、QEDの真空の初観測を目指す